

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 10741



硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 双碳战略下铝企业碳审计评价指标体系研究——以中国铝业为例

研究生姓名: 李伯阳

指导教师姓名、职称: 杨荣美 教授 李世龙 正高级会计师

学科、专业名称: 审计硕士

研究方向: 政府审计

提交日期: 2023年6月19日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 李伯阳 签字日期： 2023.6.15

导师签名： 杨荣美 签字日期： 2023.6.15

导师(校外)签名： 李伯阳 签字日期： 2023.6.15

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分內容。

学位论文作者签名 李伯阳 签字日期： 2023.6.15

导师签名： 杨荣美 签字日期： 2023.6.15

导师(校外)签名： 李伯阳 签字日期： 2023.6.15

**Research on carbon audit evaluation
index System of aluminum enterprises
under the double-carbon strategy ——
Take Aluminum Corporation of China as an
example**

Candidate : Li Boyang

Supervisor: Yang Rongmei Li Shilong

摘 要

重污染高耗能的发展方式促进了我国工业领域的飞速发展,但随之而来的二氧化碳排放问题也不容小觑。我国碳中和碳达峰战略的部署充分体现了工业降碳的重要性和紧迫性,因此监督各行业内企业的碳减排实施效果显得尤为重要,碳审计应运而生。近年来,我国学者在碳审计的含义方面进行了一定程度的探索,但对碳审计评价体系的相关研究仍十分欠缺。铝行业作为有色金属工业中的碳排放大户,近年来减排工作越来越受到国家的重视,为了提高铝企业节能减排工作的效率,有必要建立一套符合其碳排放特点的碳审计评价体系,对企业节能减排情况、碳减排政策执行情况和降碳责任履行情况进行评价和监督。

本文首先梳理国内外研究现状,对碳审计研究情况进行评价和总结,在此基础上以相关理论基础为切入点,对案例企业基本情况、碳减排工作情况以及构建碳审计评价指标的必要性作出阐述。其次通过 DSR 模型构建框架,分析铝行业碳排放足迹及碳排放特点选取 28 个具体指标并按照模型逻辑填充框架得到指标体系。再次,通过结合德尔菲法、D-ANP 法以及熵权法的结果可以获得一个更加科学的权重。最后,根据评价标准运用三角模糊综合分析法得出评价结果 2021 年中国铝业碳审计评价为优。对照企业实际碳减排工作开展情况与评价结果相差无几,说明该碳审计评级指标体系具有一定合理性和科学性。

根据评价结果,本文提出 4 点案例启示:一是提高清洁能源使用比例,促进电力脱碳;二是加大节能减排技术研发和推广力度促进生产降碳;三是提升降碳管理水平实现降碳目标;四是提高铝资源回收效率。

关键词: 碳审计 D-ANP 法 评价指标体系 铝行业

Abstract

China's industrial sector has seen a swift advancement due to the intensification of heavy pollution and high energy expenditure, but the subsequent problem of carbon dioxide emissions can not be underestimated. The deployment of China's carbon neutral carbon peak strategy fully reflects the importance and urgency of industrial carbon reduction, so it is particularly important to supervise the implementation effect of carbon emission reduction of enterprises in various industries, and carbon audit arises at the historic moment. Scholars of Chinese origin have recently conducted a certain amount of research on carbon audit, yet it is still essential to refine the carbon audit organization system to direct the orderly growth of practice. To accelerate the improvement of the carbon audit system. Aluminum industry as a carbon emissions in nonferrous metal industry, The nation's attention has been increasingly focused on the efficiency of aluminum enterprise energy conservation and emissions reduction in recent years, necessitating the establishment of a set of carbon audit evaluation systems for carbon characteristic, enterprise energy conservation and emissions reduction, carbon emission reduction policy implementation, and carbon reduction responsibility performance evaluation and supervision.

Beginning with a theoretical foundation, this paper first examines the research status of carbon audit studies both domestically and

internationally, then evaluates and summarizes them, it expounds the basic situation of case enterprises, the work of carbon emission reduction and the necessity of constructing carbon audit evaluation index. Secondly, through the construction framework of DSR model, 28 specific indicators are selected to analyze the carbon emission footprint and carbon emission characteristics of the aluminum industry, and the index system is obtained according to the model logic to fill the framework. The comprehensive weight is attained by combining the subjective weight obtained from Delphi, D-ANP, and entropy weight methods, as well as the objective weight. In Chinalco's evaluation results were obtained using the triangular fuzzy comprehensive analysis method, as per the criteria. These results, when compared to the carbon emission reduction efforts of enterprises, were almost indistinguishable, thus demonstrating the validity and scientific nature of the carbon audit rating index system.

According to the evaluation results, this paper proposes four case lessons: the first is to improve the proportion of clean energy used to promote power decarbonization; Research and development of energy conservation and emission reduction technologies should be augmented, with the aim of encouraging production carbon reduction; management of carbon reduction should be improved to reach carbon reduction objectives. the fourth is to improve the recovery efficiency of aluminum resources.

Key words:Carbon audit; D-ANP method; Evaluation index system;
Aluminum industry.

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的及研究意义	2
1.2.1 研究目的	2
1.2.2 研究意义	3
1.3 研究内容、研究方法和技术路径	3
1.3.1 研究内容	3
1.3.2 研究方法	4
1.3.3 技术路径	5
1.4 国内外研究现状	6
1.4.1 国外研究现状	6
1.4.2 国内研究现状	7
1.4.3 文献评述	13
1.5 创新之处	14
2 概念界定及理论基础	15
2.1 概念界定	15
2.1.1 “双碳”战略	15
2.1.2 碳审计的内涵	15
2.1.3 碳审计评价指标体系	15
2.2 理论基础	16
2.2.1 委托代理理论	16
2.2.2 绿色发展理论	16
2.2.3 低碳经济理论	17
3 中国铝业案例企业分析	18
3.1 基本情况介绍	18
3.2 碳减排及碳披露情况介绍	18
3.3 构建碳审计评价指标体系的必要性	19

4 双碳背景下基于 DSR 模型的铝企业碳审计指标体系构建	20
4.1 铝企业碳审计评价指标体系构建原则	20
4.1.1 科学性与客观性原则	20
4.1.2 定性与定量相结合	20
4.1.3 动态性原则	20
4.1.4 可比性原则	21
4.2 双碳战略下铝企业碳审计评价指标体系构建依据	21
4.3 铝企业碳排放分析	21
4.3.1 铝企业投入产出分析	21
4.3.2 铝企业二氧化碳排放源的识别	24
4.3.3 铝企业碳排放特点及碳减排要点	24
4.4 铝企业碳审计指标框架及内容设计	25
4.4.1 碳审计指标框架设计	25
4.4.2 碳审计评价指标体系内容设计	28
4.5 指标体系权重设计	30
4.5.1 DEMATEL—ANP 计算权重	30
4.5.2 熵权法计算权重	32
4.5.3 计算组合权重	33
4.6 碳审计综合评价模型设计	33
4.6.1 三角模糊综合评价法概述	33
4.6.2 碳审计评价指标体系三角模糊综合分析法有效性	34
4.6.3 三角模糊综合评价的具体步骤	35
5 铝企业碳审计评价体系的应用——以中国铝业为例	39
5.1 数据来源	39
5.1.1 主观数据来源	39
5.1.2 客观数据来源	39
5.3 评价指标权重确定	41
5.3.1 基于 D-ANP 法的主观权重确定	41
5.3.2 基于熵权法的客观权重确定	45

5.3.3 组合权重确定	51
5.4 评价标准及综合打分	51
5.5 中国铝业碳审计综合评价	55
5.5.1 三角模糊综合评价计算	55
5.5.2 中国铝业碳审计结果评价	58
5.5.3 案例启示	61
6 研究结论与展望	64
6.1 研究结论	64
6.2 研究展望	65
参考文献	66
附 录 1 铝企业碳审计评价指标体系构建调查问卷	73
附 录 2 dematel-anp 计算过程表	76
附 录 3 三角模糊综合评价法运用	94
致 谢	99

1 引言

1.1 研究背景

应对气候变化一直以来是一个全球性的严峻挑战，1896年瑞典科学家 Arrhenius 提出：如果二氧化碳浓度增加一倍，全球温度将上升 5°C-极端时甚至更高^[6]。因此，我们需要采取一系列措施预防可能产生的严重后果，避免气候变化对人类可持续发展产生不可挽回的影响。面对严峻的气候变暖问题，世界各国积极寻求解决办法。在多方努力下，《联合国气候变化框架公约》^[64]《京都协议书》^[50]《巴黎协定》^[66]等一系列具有深远影响的国际减排公约得到认可，并被全球各国接受和执行。近年来，我国一直在气候变化会议中积极推动协定通过，展现“负责任大国”担当并在在谈判进程当中发挥积极、建设性作用，同时在国内积极开展碳减排工作^[32]。“十二五”至“十四五”期间，国家不断细化减排政策，扩大碳减排工作范围。2011年8月，国务院发布《“十二五”节能减排综合性工作方案》，旨在通过明确减排任务、促进技术创新、加强减排监督等措施，实现节能减排的有效实施^[51]。2016年10月下发《“十三五”工作方案》进一步要求工业领域重点行业企业开展碳排放管理体系建设，对企业碳排放环境风险进行评估，鼓励部分工业率先实现碳达峰。2020年9月第七十五届联合国大会一般性辩论上。2020年9月，中国国家主席习近平同志在第75届联合国大会上发表讲话，强调中国将努力实现碳排放峰值，并在2060年实现碳中和，以此来推动全球气候变化的可持续发展^[78]。对此，2021年12月的《“十四五”工作方案》要求钢铁、电解铝、水泥等重点行业提高节能减排达标率，完善企业能源利用状况报告披露，建立相关领域能源消费指标体系以加强监督。为了确保“碳达峰、碳中和”等目标的按期实现，督促企业完成碳减排，尤其是重点行业优先达到碳排放峰值的工作，这就需要以政府审计作为审计主体开展碳审计监督，通过建立碳审计评价指标体系对被审计单位碳减排义务的履行情况进行评价，由于不同行业的主要碳排放源存在较大的差异，为了更好地促进行业内企业碳审计工作的高质量高效率，应当选择重点企业有针对性的建立一套针对性的碳审计评价指标体系。

铝金属作为基础有色金属中的一种，广泛用于电力、机械制造、航空航天等国民经济发展的各个领域，在加工与制造的过程中的高耗能及高碳排放受到长期关注。“十二五”期间，国家发展改革委印发《首批 10 个行业企业温室气体核算方法与报告指南（试行）》的通知就包括电解铝行业^[33]，对国内电解铝生产企业温室气体排放测算方法、汇报格式提供规范性指导。碳达峰碳中和的行动将铝行业碳减排问题再次聚焦在“聚光灯下”，2020 年，全国电解铝生产用电量 5022 亿度，占全国电量的 6.7%。2021 年 10 月 24 日国务院印发的《2030 年碳达峰行动方案》进一步强调，铝行业的碳达峰要从绿色低碳技术的推广、清洁能源替代比重以及铝生产余热回收率的提高三个方面入手^[88]。2022 年 11 月，有关部门印发《有色金属行业碳达峰实施方案》，重点强调铝金属碳排放占全行业 75%以上，应作为重点减排对象，同时从清洁能源替代、技术创新、以及再生金属供应比例三个方面对企业用电环节、冶炼环节以及产出环节全方位作出降碳要求^[43]。铝行业作为碳减排的重点关注行业，要实现“碳达峰、碳中和”的目标，需要政府对重点排放单位，也就是重点铝生产企业开展碳审计，充分发挥国家审计在碳减排过程中的监督作用，通过构建碳审计评价指标体系，促进铝行业碳减排目标的按期实现。

1.2 研究目的及研究意义

1.2.1 研究目的

碳达峰、碳中和的政策落实离不开政府的有效监督。碳审计作为有力的“碳减排支持工具”，能够有效增强政府环境责任落实、发展低碳经济，促使企业落实低碳减排政策。本文的主要研究目的可归纳为以下三点：其一，通过梳理相关国内外文献，明晰碳审计相关概念以及碳审计评价体系构建及应用现状。其二，在现有研究基础上，以双碳战略相关政策为依据选取碳减排重点行业铝行业，通过分析铝行业碳排放足迹总结其碳排放特点，运用 DSR 模型探索性的构建出一套符合铝行业企业使用的碳审计评价指标体系。其三，选取该行业内的典型企业作为案例，运用已构建出的碳审计评价指标体系，结合专家打分以及企业披露的企业年度财务报告以及《ESG 报告》，经过数据整理、处理与分析，得出企业

碳审计评价分数，并根据评价分数对该企业低碳工作开展情况进行评价，并对案例企业降碳工作提供合理化建议，为企业走可持续发展道路提出保障措施。

1.2.2 研究意义

在理论意义方面，碳审计作为环境审计的一个精细化分支，对于发展和丰富环境审计理论有着重要的意义^[74]。目前，我国学者对碳审计基本概念做了详细深入的研究，一部分学者选取电力、水泥、石油等重点高碳行业探索性的构建了碳审计评价指标体系，但未能结合实际案例开展综合评价。因此，本文通过梳理碳审计已有研究成果，结合“双碳”战略，选取具有典型性的案例企业，针对铝企业特点探索性的构建碳审计评价指标体系并进行运用，丰富我国碳审计理论研究。现实意义方面，对铝行业案例企业开展碳审计评价，可以为审计机关实际开展碳审计评价工作提供参考的同时。企业通过评价结果可以发现碳排放工作中的不足之处。有助于企业深挖碳减排潜力，积极推进布局调整和能源结构优化，早日实现碳达峰碳中和战略目标，走可持续发展道路。

1.3 研究内容、研究方法和技术路径

1.3.1 研究内容

第一部分：引言。引言部分介绍了温室气体问题的出现，结合国内外政策变化趋势以及铝金属高碳排放问题引出开展铝企业碳审计紧迫性。通过梳理国内外研究现状，总结出我国目前碳审计的理论和实践研究现状，以此明晰本文的研究内容、研究方法和技术路线，并提出出本文的创新点。

第二部分：概念界定及理论分析。对碳审计涵义和碳审计评价指标体系的相关概念进行阐述，为本文奠定基础。同时确立了以委托代理理论、可持续发展理论和环境审计理论为理论依据，为铝企业碳审计评价指标体系的构建提供理论支撑。

第三部分：案例企业介绍。首先对中国铝业基本情况介绍，其次介绍该企业碳减排工作开展情况以及碳信息披露情况。最后对该企业构建碳审计评价指标体系的必要性展开论述。

第四部分：构建铝企业碳审计评价指标体系。根据系统性、可操作性、可比性等原则，基于 DSR 模型构建铝行业碳审计指标框架，归纳梳理国内外研究成果和碳减排政策筛选具体指标建立指标体系，结合铝行业碳排放特征选取合适的指标并进行解释，对拟采用的主观赋权法 D-ANP 法和客观赋权法基本概念和运算过程进行介绍，最后对选取的三角模糊综合分析方法相关概念、适用性及计算步骤进行说明。

第五部分：铝企业碳审计评价指标体系应用研究。结合主观权重法 D-ANP 法以及客观权重法熵权法根据调查问卷、企业年度财务报告和 ESG 报告的数据得出混合权重，制定评价标准并运用三角模糊综合评价法进行综合评价。最后根据评价结果总结企业碳减排工作开展情况并提出展望。

第六部分：研究结论与建议。对本文构建的评价体系，赋权过程以及研究结论进行评价，分析本文的局限性并提出改进思路。

1.3.2 研究方法

（1）文献研究法

通过搜集整理国内外碳审计相关理论与研究成果，归纳总结当前碳审计的发展状况与研究现状。结合委托代理理论、可持续发展理论和环境审计理论，设计出在政府审计视角下，为构建铝行业碳审计评价指标体系提供坚实的理论基础。

（2）定性与定量相结合

基于 DSR 模型的特性以及行业碳减排重点，结合定性与定量指标选取评价指标。选取科学合理的方法对定性指标进行量化处理。

（3）案例研究法

本文以中国铝业案例研究对象，基于对碳审计理论的深入研究，我们设计了一套完善的铝行业碳审计评价指标体系，并给予了相应的权重，将中国铝业的相关数据应用于指标体系中，客观评价该企业碳减排工作并得出审计结论。根据审计结论对该企业碳减排工作提出意见建议。中国铝业为行业的龙头企业，其审计结果对于该行业具有一定代表性，对于该行业碳审计工作思路提供参考。

1.3.3 技术路径

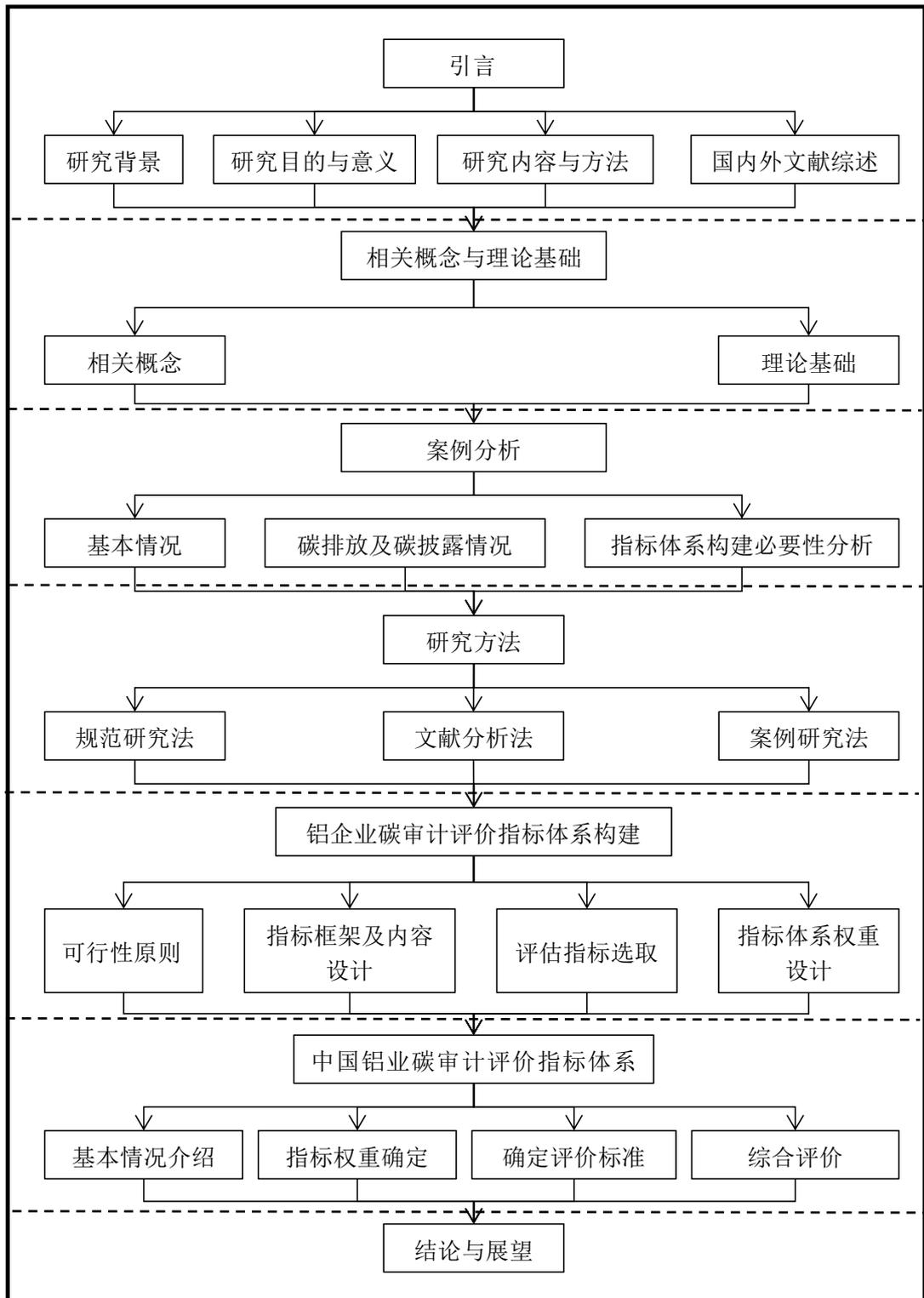


图1.1 技术路线图

1.4 国内外研究现状

1.4.1 国外研究现状

(1) 碳审计内涵

世界审计组织（INTOSAI）（2000）认为低碳审计应当是以绩效审计为主的综合性审计，内容包括传统财务审计、经济效益审计和风控审计。Jonathan Lash（2007）碳审计有利于企业实现品牌价值^[15]。但 Andrew Treason（2007）同年提出反对意见，认为碳审计会增加企业审计成本，不利于企业发展^[3]。Bruce Bellingham（2008）提出在低碳经济发展的背景下，应将碳审计作为企业的必要环节来开展^[9]。Joseph H.K.Lai 通过调查旅游管理行业管理者碳减排履行情况，管理者应当根据碳审计结果加强碳减排措施^[14]。

(2) 碳审计评价指标体系

①碳审计评价对象

Anonymous（2010）提出应通过建立碳税制度控制企业碳排放，即根据化石燃料的碳排放量征收调节税^[4]。Mckinnon（2010）研究了企业从原料、生产、运输、储存、使用和废弃物处理全供应链视角碳排放审计流程，并对整个生命周期内的排量予以确认^[1]。Shiming Deng（2012）通过香港酒店能源使用特征进行分析，建立了酒店行业清洁能源使用评估框架，评估酒店清洁能源使用情况^[20]。Joseph H.K.Lai（2013）对比中国香港、澳洲以及英国的碳审计规范，选取香港地区酒店作为碳审计对象，对香港的酒店碳排放进行了数据搜集，确定了该酒店的碳排放来源于电力消耗^[16]。Clement Mouchet（2014）提出应当结合信息技术建立一套碳足迹梳理工具，以便于开展碳审计过程中碳足迹数据的获取^[10]。JJ.de Greijter,McBratney,Minasny（2016）提出了一种开展碳审计的新思路，即测算土壤碳含量准确值，通过系统分层抽样确认不同地区碳储量的不同^[13]。Brendan P.Melone（2017）提出土壤碳储量审计，通过对土壤碳含量的变化进行长时间测算从而检测土地碳储量的增减变化^[9]。Babatunde A.Anifowose（2018）通过主成分分析法对尼日利亚下游石油设施开展碳审计，检验相关污染数据的变化^[8]。

②碳审计指标体系构建基础

世界资源研究所（2004）联合发布《温室气体协定书》中阐述了温室气体核

算包含识别核算边界；确定被核算对象的排放源；选定计算方法；搜集数据并选择排放系数；运用选定方法和排放系数计算排放量五个步骤，其中确定排放源可以大致划分为直接排放、电力消耗排放及间接排放 3 个方面^[24]。联合国气候变化专门委员会（IPCC）（2006）颁布了《IPCC 国家温室气体清单指南》，为了编制温室气体排放清单科学性完整性要求各行业增强关键碳排放信息及排放因子等相关缺失数据的披露^[13]。美国注册会计师（AICPA）（2003）制定了《关于温室气体排放信息的认证业务》指导碳审计工作^[2]。加拿大注册会计师协会（2008）在《温室气体排放信息的审计业务》对企业温室气体排放信息开展审计工作作出了规范^[7]。

③碳审计评价指标选择

Torvanger（1991）根据指数分解法，选取 9 个 OECF 成员国进行工业结构变化、排放系数变化、燃料组合变化的分析^[23]。Halsnaes（1994）从两个角度对温室气体减排进行了测算，一方面从宏观角度出发，通过应用宏观经济学方法，我们可以评估温室气体减排措施对经济的潜在影响。另一方面是从微观角度出发，对碳减排技术通过测算能源消费、生产方式的方法对未来发展潜力进行预测^[11]。Shrestha（1996）选取 11 个亚洲国家电力行业作为研究对象构建评价体系研究其碳排放强度的变化情况^[21]。Andrew C.Lovell（2008）认为构建碳审计框架应结合风险导向审计模式，碳审计的审计风险来源于相关碳排放报告的重大错报风险^[5]。Patlitzianas KD（2008）以国家和行业能源减排为切入点，设置了能耗指数、调整指数、扩散指数和目标指数^[18]。Salvador（2008）通过种间竞争模型研究 GDP、人口密度与碳排放量之间的关系，得到碳排放量变动与人口密度为正向增长^[19]。McKinno,AlanC（2010）认为由于碳捕捉技术可以回收利用生产中的二氧化碳，因此应当作为碳审计的评价因素之一^[1]。世界标准化组织（ISO）2013 年提出节能减排审计评价体系应包括管理效益、对环境的影响和单位经营绩效三个方面^[12]。Nava Subramaniam（2015）对澳洲高碳企业开展碳审计，发现企业碳风险整合程度与企业内部审计监督有效性和管理层降碳工作开展程度呈正相关^[17]。

1.4.2 国内研究现状

（1）碳审计内涵

关于碳审计的内涵这一基本概念,国内学者进行了大量研究。通过对现有文献的总结,大体可以概括为从碳排放责任观、碳排放行为观和碳排放环境影响观三个主要角度进行监督、鉴证和评价^[86]。其中,由于碳排放经管责任中存在代理人对委托人的委托代理责任,因此碳排放责任观重点强调被审计单位的碳排放责任履行情况^{[68][91]}。碳排放行为观更强调对碳排放行为的审计,在行为规则控制理论下,通过碳审计和鉴定,我们可以更好地控制企业的整体行为,通过使用碳足迹来评估各个部门或环节的二氧化碳排放情况,进一步加强对企业的监管,以确保其碳减排工作评估^{[80][92]}。碳排放环境影响观注重碳排放对环境的影响方面的审计。国家评价碳减排工作情况,对采取科学办法对减排温室气体进行测算^[31]。碳审计旨在评估能源消耗所产生的温室气体排放对环境的影响,以确保其符合可持续发展的要求^{[39][49]}。

上述的三个角度并不相互对立,也有学者通过对上述观点进行综合对碳审计的定义作出阐述。有学者认为低碳审计是一种特殊管理活动,对企业低碳生产经营情况、资源利用情况以及碳排放职责履行情况进行鉴证和评价^{[38][67]}。除上述观点,还存在碳信息披露观、碳交易审计观等观点,这类观点认为碳披露情况和碳交易情况也造成了一定的环境影响,应当作为碳审计内容的一部分^[40]。郑石桥(2022)通过相关文献的梳理,基于委托代理理论得到碳审计是碳排放信息、碳排放行为和碳排放制度的综合碳排放鉴证行为^[87]。

(2) 碳审计评价指标体系

① 碳审计指标体系评价的对象

碳审计指标体系构建的过程中离不开构建视角的选取,通过对已有文献的梳理,可以将碳审计评价指标体系的研究对象大致分为两类,分别是以重点行业的企业为研究对象和以地域为研究对象。

以重点行业企业为研究对象的碳审计指标体系构建的兴起源于两个方面。一方面,由于我国在开展节能减排的工作中,不断推动行业减碳行动,倡导以重点工业领域降碳率先达峰。另一方面,重点行业低碳减排目标的实现离不开行业内各个企业的落实。因此,我国学者在以电力、钢铁等几个高碳排放行业如何构建案例企业碳审计评价指标体系进行了大量的研究。如李海燕(2017)^[55]、杨娴雅(2020)^[82]通过查阅环保部数据发现电力企业碳排放长期占据各行业第一,提出

应有针对性的构建符合行业特点的低碳审计评价指标体系,加快相关行业节能减排工作。刘金玲^[59](2012)、陈瑶^[28](2016)通过对钢铁企业排放数据和特点分析,结合国家颁布的《钢铁行业清洁生产评价指标体系(试行)》,构建钢铁企业评价指标体系。除此之外有学者在化工企业^[52]石油企业^[56]水泥企业^[48]的指标体系构建进行了探索。

按照地域为研究对象的碳审计评价指标体系由于地域范围难以划定,数据难以收集等原因,设计难度较大,因而这一类研究相对较少,目前学者都以固定的行政区域划分作为研究对象。较大的地域范围以省作为审计对象,如余欢欢(2013)对浙江省低碳经济发展制定出科学评价的综合碳审计评价指标体系^[81]。张焕敬(2018)选择以重工业、高耗能集中的河南省为研究对象,从环境、经济、政策消费等方面构建了河南省低碳审计评价指标体系^[84]。小的地域范围以市或某一具体地区范围为主,如徐文杰以第二产业占比较高、取暖时间较长化石燃料利用较多的沈阳市为例构建低碳城市评价指标体系^[79]。李琼(2015)通过建立低碳引导、低碳意识等指标评价嵩山旅游景区低碳发展情况^[63]。

除此之外,还有学者从环境治理视角出发对碳审计评价指标体系进行一定的探索。如李孟哲(2016)提出将碳审计评价运用于环境价值链的各环节有助于提高碳审计能力^[60]。管亚梅(2016)基于雾霾天气日益严重的环境治理的迫切性,建立以雾霾治理为核心的碳审计评价指标体系^[41]。

②碳审计指标体系构建基础

在评价指标体系的构建模型的选择方面,我国学者充分借鉴了环境管理模型。例如:施然(2020)运用PSR模型构建了以“压力-状态-相应”三个逻辑要素构成的碳交易审计评价指标体系^[69]。PSR模型仅限于静态评估,缺乏可持续发展的考量。为了更好地反映碳排放对经济社会的影响,我们将“P”替换为“D”,构建了一个更加全面的DSR模型,并选取钢铁企业案例进行运用^[91]。由于DSR模型的设计理念更符合碳审计的可持续发展模式,更能突出温室效应等环境问题对经济社会的影响。因此该模型在碳审计指标体系构建中得到了广泛的运用。如、李海燕^[55](2017)、金密^[52](2018)、黄松琦^[34](2021)等分别在电力、化工、水泥等不同行业以DSR模型为基础,选取案例企业碳审计评价指标体系构建上进行了探索。王爱华(2016)基于DRS模型,设计了D-R-S低碳审计模型,区

别在于 DRS 模型中的 S 代表新发展状态^[47]。

除此之外，部分学者借鉴了运用其他模型作出了尝试，如高建慧（2016）以低碳企业为战略方向的总体目标设计低碳生产技术—低碳生产效益—低碳管理职能—相关政策支持四位一体的支撑体系^[35]。陈瑶^[28]（2016）在国内外学者研究成果的基础上，结合钢铁企业构建了环境、经济、技术、人员四个宏观维度指标方向。杨娴雅（2020）借鉴绩效审计的“3E”原则，通过分析减排资金的使用情况、减排资源的投入效率、碳减排的成果以及法律法规符合情况建立指标体系^[82]。李孟哲（2016）以企业产品的环境价值链为研究范围，从低碳技术、政策、配套建设三个方面对企业产品的设计、生产等全流程建立指标体系^[60]。陈洋洋（2016）结合低碳绩效审计、合法性审计和社会责任审计，依据低碳审计目标和内容，将指标分低碳技术、环境保护和低碳政策等五类^[30]。

③碳审计评价指标选择

通过对现有碳审计评价指标的整理与分类，本文发现不同研究对象的评价指标体系的指标大体可分为经济指标、环境指标、技术指标、管理指标和政策指标五个大类，如表 1.1 所示：

表 1.1 碳审计评价指标整理分类

一级指标	具体指标名称	作者
	资产总额、负债总额、营业收入、实现税费、股东权益合计	金密（2018）
	单位 GDP 能耗降低率、企业低碳产业产值的增长	高建慧（2016）
	GDP、第三产业占比、环境治理占比、工业增加值	陈洋洋（2016）
	碳排放税额	王爱华（2016）
经济指标	电力收入、发电量	李海燕（2017）
	钢铁总产值	张亚连（2017）
	原油加工量、天然气产量、成品油经营量	金密（2018）
	企业累计碳交易总额、低碳项目收益、低碳专项项目投资总额、 原油加工量、天然气产量、化工产品经营量	金密（2018）

续表 1.1 碳审计评价指标整理分类

一级指标	具体指标名称	作者
环境指标	废水排放量、氨氮排放量、CO ₂ 排放量、SO ₂ 排放量、烟尘排放量、COD排放量、油排放量、次生资源综合利用率、余能回收总量	陈瑶(2016)
	碳排放强度、人均碳排放量、非碳能源占比	陈洋洋(2016)
	购入电力隐含排放量、含碳化石能源消耗量	王爱华(2016)
	综合能源消费量、万元产值综合能耗	李海燕(2017)
	传统产业的低碳改造率、温室气体排放量的增长、新增节能建筑比率	高建慧(2016)
	专利授权数	陈瑶(2016)
技术指标	CO ₂ 减排量、SO ₂ 减排量、烟尘减排量	李海燕(2017)
	碳排放弹性系数、单位GDP能耗降低率、能源效率	陈洋洋(2016)
	煤炭节约量、节能率、氮氧化物减排率	金密(2018)
管理指标	成品油增加量、乙烯产量	李鸿儒(2019)
	低碳内控制度的健全有效性、社会责任报告质量、碳排放计量与检测体系建设程度	王爱华(2016)
	低碳技术人员的培养	傅双双(2014)
	员工低碳认识程度	陈瑶(2016)
	环保培训覆盖率、低碳宣传活动、环保项目总投资、环保设施运行情况	杨娴雅(2020)
政策指标	第三方低碳审计监管、低碳财税支持	高建慧(2016)
	碳税收优惠政策、低碳政策执行力度、碳信息披露制度健全性	陈洋洋(2016)
	碳审计教育投入、法律法规遵守情况	张亚连(2017)

经济因素是企业可持续发展的根本，碳审计与企业走低碳经济道路密不可分。通过对碳审计评价指标的梳理，发现已有研究中经济指标包括两部分：一部分为企业财务指标，具体包括：资产总额、负债总额、营业收入、实现税费、股东权益、碳排放税额合计等；另一部分为特定行业主营业务产品产量，如电力企业选

取了电力收入和发电量、化工企业设置了原油加工量、化工产品经营量、钢铁企业设置了钢铁总产值这一指标。

环境因素在碳审计指标中属于最重要的地位，企业在生产经营过程中会产生大量的污染物。因此需要识别出产生的各种污染物并筛选出会对大气污染造成影响的重要指标。通过对已有文献和碳达峰相关研究的梳理，大多选取的指标包括氨氮排放量、CO₂排放量、SO₂排放量、烟尘排放量、COD排放量。除此之外，部分学者将关注点聚集在能源消耗所带来的碳排放。王爱华（2016）提出了购入电力隐含排放量和含碳化石能源消耗量^[75]。陈洋洋（2016）从地区的角度出发，提出了碳排放强度、人均碳排放量、非碳能源占比三个环境指标^[30]。

碳减排的核心在于核心技术的研发。因此，在构建碳审计评价指标体系的过程中，需要了解企业在碳减排过程中实际减排量，包括CO₂、SO₂减排量、烟尘减排量^[55]。氮氧化物减排量^[52]。此外，对于新技术的研发、高碳排放旧设备的更新也是技术指标的重点关注对象，如传统产业的低碳改造率、新增节能建筑比率^[35]专利授权数^[28]。

管理指标注重企业对碳排放的管理程度，主要包括两个方面，一个方面是企业层面的管理，具体指标包括碳排放计量与报告、低碳内控制度建设、碳排放检测体系建设^[75]、低碳宣传活动、环保项目总投资、环保设施运行情况^[82]。另一方面，员工的低碳认识程度和员工低碳培养情况也是对企业进行碳审计的评价指标之一。具体包括低碳技术人员的培养^[34]、环保培训覆盖率^[82]、员工低碳认识程度^[14]等。

国内学者对政策指标的研究主要表现在两个方面，一是企业外部对对企业碳排放的支持和监管，包括低碳财税支持、第三方低碳审计监管^[22]、碳税收优惠政策^[30]另一个是企业内部碳减排政策的建立。包括低碳政策执行力度、碳信息披露制度健全性^[28]、规章制度低碳体现程度^[56]。

④评价指标体系评价方法

通过整理分析可以得知。层次分析法（AHP）在碳审计指标体系构建研究中得到广泛应用。AHP法一方面可以清晰反映指标，二来可以结合对指标量化评分，使审计评价更为清晰明了^[30]。也有学者运用环境优值法，即树立一个环境优值，当被评价数据与环境优值越接近，该项指标的表现越优秀。环境优值法广泛

应用于环境绩效管理评价中^{[48][82]}。此外，通过模糊数学建立隶属度进行评价的方法也在碳审计评价方面得到了一定的应用^[52]。在对于如何确定权重的问题上，一部分学者对碳审计评价指标运用专家打分法和层次分析法相结合进行了赋值。例如王爱华（2016）聘请专家对笔者所选取 54 个指标进行两轮打分，根据分值均值和变异系数对评价指标进行二次筛选^[75]；傅双双运用人工神经网络的方法，按照对评价体系进行人工神经网络模型训练得到各指标权重^[34]。

1.4.3 文献评述

通过对国外碳审计文献的梳理可以得知，由于发达国家在上个世纪 90 年代就意识到了气候危机，因此立法推动温室气体的减排措施并开展碳审计工作对减排效果进行监督。随着研究不断深入，碳审计的研究领域不仅包括了不同行业，还利用土壤碳含量测算碳储量变化。研究方法包括了生命周期法、多元统计技术等多种方法。碳审计指标体系构建的相关研究也较为丰富，包括对国家能源效率等宏观指标体系设计以及管理层参与度等微观指标体系构建。我国早期的碳审计研究中，也大量参考了国外文献的研究成果。

国内碳审计评述从碳审计内涵，碳审计指标构建对象、构建基础、指标选择、构建的方法与权重确定几个方面进行了梳理。通过上述分析可以看出，尽管我国在碳审计评价指标体系的构建上，已有许多相关的研究成果可供参考，但仍需要更深入的研究。从研究对象的角度来讲，首先，碳排放不仅仅在于企业层面，要达到国家制定的“碳达峰碳中和”的目标，对于个人、城市、国家的碳排放也要进行细致化研究。其次，不同行业的碳审计评级指标存在部分相同，如经济指标、政策指标中部分指标可以相互借鉴，但行业不同，所属的企业生产流程不同，碳排放源也就不同，碳排放的形式也存在一定差异，因此对行业的碳审计研究的内容不应局限于碳排放占比最高的几个行业。最后，部分学者以案例企业为切入点，对行业碳审计评价指标体系构建开展相关研究，但单一的案例企业无法代表所属行业的整体碳排放现状。因此，在对行业开展碳审计评价体系研究之前还应对该行业多个企业进行相关研究。在采用的方法方面，在碳审计评价体系构建的方法可以参照环境审计评价指标体系的相关研究，目前碳审计评价指标体系的构建，无论是指标体系构建的模型、还是指标赋值还是评价的方法都较为单一，尤其在

各层次指标赋值上, 现有文献选用层次分析法的研究较多, 层次分析法作为较为赋权形式较为主观的一种方法, 指标重要性严重依赖研究者的主观判断与实践经验, 单独使用层次分析法不利于数据的科学性。部分相关硕士毕业论文选用了熵权法、人工神经网络模型等客观赋权法构建评价指标体系, 目前对于主客观赋权相结合的评价体系研究较少。

基于此, 参照《中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》《碳达峰行动方案》和铝行业以及《有色金属行业碳达峰实施方案》等相关政策要求, 结合铝行业生产和能耗碳排放特点, 有针对性的一套铝企业构建碳审计评价指标体系, 按照国家相关标准、行业标杆、目标标杆建立评价标准, 运用三角模糊综合分析法对案例企业开展碳审计评价和总结, 分析企业碳减排工作的不足并提出改进意见。

1.5 创新之处

1、本研究的选题紧扣当前国家发展的重点规划, 结合了碳达峰碳中和的国家战略背景。作为一种新兴审计方式, 碳审计能够有效的促进碳达峰碳中和的相关政策落实, 国内虽然对此已有一段时间的研究, 但研究尚未成熟, 因此本文存在一定研究意义。

2、现有碳审计研究主要集中在钢铁企业、煤炭企业、化工企业以及电力企业, 未发现对铝金属及有色金属企业的碳审计研究, 也尚未形成一套针对铝企业的碳审计评价指标体系。本文基于 DSR 模型, 对铝企业这一受到碳减排关注的“碳排放大户”进行研究, 选取铝行业标杆企业针对中国铝业探索性地构建出一套全面系统的碳审计评价指标体系, 不仅提升了铝企业的碳审计评价水平, 而且还具有重要的创新意义。

3、在指标体系的构建上, 本文拟采用 D-ANP 与熵权法相结合的方法。D-ANP 受主观因素影响较强, 设计出的评价指标体系有失客观性。而熵权法由于其过于依靠客观数据, 导致随着数据的变化以及极值变化容易对评价结果造成影响。主观加权客观使得到的权重更加科学合理。

2 概念界定及理论基础

2.1 概念界定

2.1.1 “双碳”战略

“双碳”，即碳达峰与碳中和的简称。碳达峰是指一定时间空间内，温室气体的排放达到最高峰值不再增长。而碳中和指一定时间空间范围内，直接间接碳排放总和通过碳汇、碳捕捉、碳封存等技术等量抵消，实现相对意义上的零碳排放。我国“双碳”战略目标最早在2020年9月提出，2020年9月，中国国家主席习近平在第75届UN大会上发表讲话，强调要在2030年前实现全球二氧化碳排放的最低点，并努力推动碳中和的发展，以期在2060年前实现这一目标。我国“双碳”战略目标的提出，有利于引导我国绿色技术不断创新，我国产业和经济的全球竞争力不断提高。对此，如《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》等政策陆续出台，围绕重点领域及行业的配套方案以及相关技术研发储备也有条不紊地开展，为我国“双碳”战略目标的实现保驾护航。

2.1.2 碳审计的内涵

基于温室气体减排和低碳经济发展的背景下，在传统财务审计的基础上拓展延伸，并与能源环境科学、环境科学技术等学科领域相融合而产生。因此，碳审计的内涵需要以审计的内涵为基础进行拓展。审计是一种系统性的方法，它从信息、行为和制度三个方面独立地评估经营管理责任的执行情况，并将结果及时反馈给利益相关者。因此，通过碳审计，我们可以从碳排放信息、行为和制度三个层面，准确地评估管理责任的履行情况，并将评估结果及时反馈给有关利益攸关方，以实现有效的碳排放管控措施。

2.1.3 碳审计评价指标体系

综合评价是从整体性角度出发对多具有多属性特征的体系结构作出评价。评

价指标体系作为综合评价研究的重要组成部分，主要用于解决某个个性问题^[29]。在构建过程中，对相关构建原则、构建方法、测验方法、指标数量化技术需要重点考评^[71]。在碳审计工作开展的过程中，不同地区、不同行业不同企业生产方式及流程不同，碳排放特点各不相同，需要审计的重点也有所差别。因此，可以通过构建评价指标体系，通过审计人员的专业实践经验，客观地描述某一时期、某一地区或行业的低碳化发展水平，以及其变化的大致趋势，可以有效地反映出该时期的低碳化发展水平。

2.2 理论基础

2.2.1 委托代理理论

由于所有权和经营权的分离，传统的财务审计主要是对被审计单位的经济责任履行情况进行审计。碳审计是被审计单位碳排放经管责任的审计。公众是自然环境的所有者，碳排放资源会影响自然环境，但是公众作为一个集体缺乏行为能力，通常委托政府代表公众行使碳排放的经管责任。由于碳排放外部性的问题，各类碳排放单位、部门为追求利益毫无限制的生产带来的碳排放问题导致环境日益恶化、大气污染愈演愈烈。社会公众意识到碳排放带来的环境问题时，为了维护自身利益，委托政府进行碳排放管理。委托人通过建立一套监督机制进行检验，为了更好地管理碳排放，需要对代理人进行审计和监督。由于不同行业 and 企业的碳排放特征各不相同，需要根据这些特点制定适当的碳审计评价指标体系，并提出整改意见，以达到有效控制碳排放的目的。

2.2.2 绿色发展理论

绿色发展理论是基于可持续发展理论优化的基础上提出的，反映了中国发展理念的创新，甚至对世界发展理念的贡献。对此应该采取更多的行动来推动可持续发展，强调绿色理念的重要性，推动绿色产业的发展，并且积极推广绿色生活。自十八大以来，中国共产党坚持不懈地践行绿色发展理念，大力推动绿色发展，取得了令国际社会赞叹不已的辉煌成绩。十九届五中全会将“生产生活方式绿色转型成效显著”“广泛形成绿色生产生活方式”和“十四五”纳入国家战略。通

过有针对性的构建碳排放评价指标体系，对特定行业、企业开展碳审计，有助于帮助企业明确节能减排的方向，促进企业走绿色发展道路。

2.2.3 低碳经济理论

传统的经济增长模式通过毫无节制的消耗能源从而达到赶超式发展的目的。在这种模式下，随着全球变暖的加速，温室效应变得越来越严重，导致环境污染也在不断恶化。因此，转变经济增长模式成为必然。英国首先提出低碳经济模式：通过政策导向，制定低碳环保政策减少碳排放；通过先进的科学技术控制化石能源消耗和温室气体排放。由此可见，通过实施低碳经济可以从高碳的状态中解脱，并且有效地控制对能源的消耗。低碳经济的核心在于通过促进碳减排促进发展模式由高碳向低碳转型。减排途径包括清洁能源替代、低碳技术研发等等。因此，在设计碳审计评价体系的过程中，企业的经济状况、主要碳排放量、降碳技术研发、低碳管理水平都应纳入考核范围。

3 中国铝业案例企业分析

3.1 基本情况介绍

中国铝业股份有限公司，于2001年9月10日注册成立，是国务院国有资产监督管理委员会监督管理的中国铝业集团有限公司控股的中央企业子公司。该企业不仅是国内行业龙头企业，还是全球最大的铝产业的生产供应商。公司分别在香港联合交易所、纽约证券交易所和上海证券交易所三地挂牌上市。公司的主营业务包含了铝行业相关的开采、生产、销售、技术研发、生产发电等所有业务。作为国家级铝企业技术中心，中国铝业自主研发了铝行业相关多项代表性成果，主导制（修）订多项相关国家和行业标准，引领了行业标准和科技进步。

3.2 碳减排及碳披露情况介绍

碳减排工作方面，近年来，公司在坚持建设全球竞争力的世界一流铝行业公司的同时，大力发展绿色低碳路线，紧紧抓住国家“双碳”战略机遇，建立一体化产业集群，通过推进可持续发展，中铝努力实现节能、低碳、循环经济的综合性发展。以旗下子公司为例，云铝股份以科技创新和智能制造为动力，打造了“3+3”绿色铝，在云铝的低碳品牌。此外，广西华昇“赤泥综合利用”、郑州研究院“绿色低碳炭阳极生产技术”都反映了中国铝业在公司碳排放控制、节能降耗增效、绿色低碳技术创新等方面的杰出实践。2022年12月，中国铝业及分公司云铝股份分别获评首届“ESG金牛奖·先锋企业”和“ESG金牛奖·双碳先锋”。2023年6月，中国铝业申报的3项低碳案例入选“2022企业绿色低碳发展优秀实践案例”。

碳信息披露方面，受香港联交所《环境、社会及管治报告指引2019》环境范畴一般披露规范，中国铝业积极披露碳排放相关信息，不断细化碳披露信息范围，以生产流程划分，对氧化铝板块二氧化碳排放当量和电解铝板块二氧化碳排放当量进行分别计量。以碳排放类型划分，对二氧化硫、氮氧化物、烟尘分别计量等等。2017-2021年间，碳披露指标由22项增加到57项。对于各项减排指标，中国铝业坚持连续披露，为碳减排工作效果审查提供了数据基础。同时，中国铝业严格完成上年制定的减排目标，并根据自身情况制定更加详细、范围更加广泛

的下年目标。此外，中国铝业积极开展减排技术研发，降碳管理工作以及降碳理念宣传工作，充分体现了国有企业在“双碳战略”积极响应模范带头作用。

3.3 构建碳审计评价指标体系的必要性

上述描述中，可以看到中国铝业积极开展碳减排工作，但由于缺乏完整的碳审计评价指标体系，无法对企业碳减排工作效果作出准确的综合审计评价。通过选取具有代表性的指标构建具有针对性的铝企业碳审计评价指标体系，可以为审计人员提供有效的衡量。同时，通过专家打分以及客观数据标准化处理，可以提高碳审计评价指标体系的科学性。目前阶段，对于企业开展碳审计还处于探索阶段，鉴于此，本文以中国铝业作为案例公司，通过构建铝企业碳审计评价指标体系，对该公司进行碳减排情况进行评价梳理，总结案例启示，希望对政府有关部门开展碳审计评价提供借鉴，同时对该企业进一步开展碳减排工作提供思路。

4 双碳背景下基于 DSR 模型的铝企业碳审计指标体系构建

4.1 铝企业碳审计评价指标体系构建原则

4.1.1 科学性与客观性原则

科学性是一个评价体系的前提保障。就铝企业碳审计评价体系构建而言，指标体系的构建应当科学、客观的描述企业在一定时期内低碳化发展的水平。这就要求在碳审计评价体系构建的过程中，以发展低碳经济为导向，实现铝企业碳达峰碳中和总目标为目的。结合国家相关政策标准，科学合理构建碳审计评价指标体系框架，同时确保各层级评价指标逻辑关系清晰、明确。确保评价结果准确、可靠。有利于给企业开展减排工作提供一定方向上的指导、建议。也有利于为各级政府和有关部门科学、客观评价企业低碳化工作的开展情况。

4.1.2 定性与定量相结合

定量与定性指标相结合原则。定量指标旨在收集和分析企业经济发展和碳排放水平的相关信息，结合在企业财务报表和 ESG 报告等资料中能够获取的数据进行制定。实际工作过程中，尽管一些指标难以被完全数字化，但审计人员仍可依靠其丰富的专业知识和实践经验，结合客观事实，构建出更加准确的定性指标。只有定量指标，部分极端数据会导致整体结果的偏离，只有定性指标则会导致评价结果人为主观因素过重，影响数据结果的客观性。因此，只有二者相互补充，有机结合，才能使综合评价更为科学客观准确。

4.1.3 动态性原则

一方面，为了实现碳达峰碳中和的目标，国家对于碳减排相关政策在不断的更新细化、碳减排技术也在逐步迭代的更新，设置指标时应当根据国家最新的政策以及最新的碳减排技术进行调整。另一方面，铝企业碳减排水平也在不断变化。因此，碳审计评价指标应当是动态的、发展性的指标。根据评价对象的未来发展变化趋势，指标体系的要素、指标的权重系数也可作出相应的调整。

4.1.4 可比性原则

铝企业碳审计评价指标体系主要针对该行业内企业碳减排情况进行设计,这就要求该行业内不同企业之间评价结果具有可比性,在指标的选取上也应当对典型指标进行关注,以此来保证评价指标体系的实用型。除此之外,对于其他行业企业在构建和应用碳审计评价指标体系方面,也应当具有一定参考价值。

4.2 双碳战略下铝企业碳审计评价指标体系构建依据

随着双碳战略的推动,我国迅速建立了一个碳达峰碳中和工作小组,以便全面筹备、实施双碳战略,实现可持续发展。2021年10月,《2030年前碳达峰行动方案》正式出台,方案中重点提出要尽快实现以钢铁行业、有色金属行业、建材行业等工业领域率先碳达峰。在有色金属行业中,铝行业的综合碳排放占全行业的75%以上。因此,作为工业领域碳达峰的重点关注对象,2022年11月,工信部正式发布《有色金属行业碳达峰实施方案》,该方案提出要严格监管电解铝产能置换并将其纳入中央生态环境保护督察工作中,同时要推动电解铝改造升级,引导电解铝企业节能减排,加强原铝低碳冶炼等关键技术的技术攻关,重点推广高效稳定的电铝电解节能减排技术,进一步提高技能降碳水平。此外,由于电解铝环节生产用电量,鼓励相关企业积极提高再生能源比例,重点发展再生铝产量。为了保障上述政策的实施性,该方案提出应当探索开展低碳绩效评价。对此,根据铝行业相关降碳政策,结合铝行业实际碳排放特点,有针对性的构建铝企业碳审计评价指标体系,有利于铝行业尽早实现碳达峰,为碳中和工作奠定基础。

4.3 铝企业碳排放分析

4.3.1 铝企业投入产出分析

根据生命周期法,铝的发展历程可以大致划分为四个阶段:生产、加工与制造、使用以及再利用^[57]。其中,生产阶段的重点是从地下挖掘出的铝土矿,经过冶炼处理转变为氧化铝,再经过电解最终转变为原生铝。加工与制造阶段是将上述形成的原生铝根据需求通过铸造、轧制、挤压等工序,结合其他原材料生产出

最终产品。使用阶段是将最终产品售出，目前铝材料主要用于电气、机械制造、建筑等行业^[25]。最后是回收利用阶段，这一阶段包括产品回收、铝废料处理、再生铝熔铸等流程。铝行业各环节的物质投入产出关系具体见图 4.1。

图4.1 铝企业投入产出分析

4.3.2 铝企业二氧化碳排放源的识别

铝工业是一种资源和能源消耗型行业，在生产过程中会造成大量碳排放。结合上述投入产出分析，将铝企业温室气体排放分为三类。一类是生产铝过程造成的直接能源排，其中还包括阳极炭块，阳极炭块是电解铝生产的必需材料，在生产和耗用中产生碳排放。二类是在生产过程中辅助材料带来的碳排放。第三类电力为主的能源生产排放。根据排放的不同类型，可以将其划分为直接和间接两大类：前者主要指铝制品的生产过程中释放出的温室气体；而后者则指由于电力、燃料等能源消耗而产生的温室气体排放。铝企业温室气体排放分布情况如图 4.2 所示：

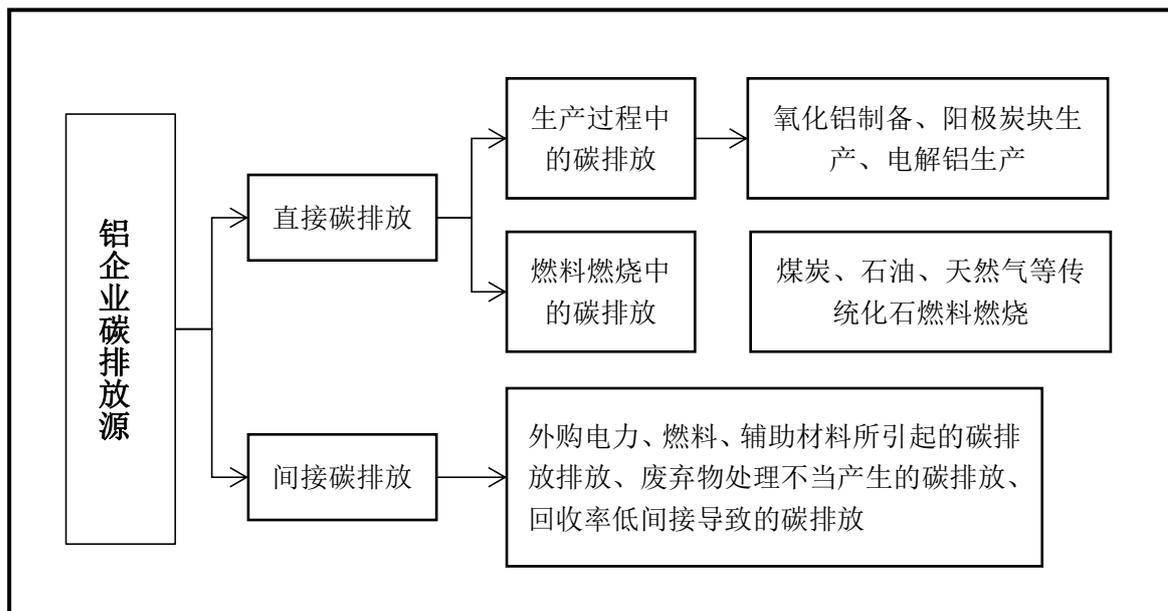


图4.2 铝企业投入产出分析

4.3.3 铝企业碳排放特点及碳减排要点

我国铝企业碳排放存在以下三个特点。首先，相比欧美电解铝企业，我国铝企业在电解过程中对火电的依赖性更加明显。根据最新的数据，到 2020 年底，

我国电解铝的产能消耗中，火电的比重高达 65.2%，整体能耗非化石能源占比仅为 11.9%。其次，由于目前铝企业生产工艺未出现颠覆性改变，电解铝、氧化铝能耗优化工艺已被压缩至极限，指标大幅下降的空间有限。再次，关键降碳技术未出现突破。在铝生产过程中，高效超低能耗铝电解、二氧化碳捕集利用等零碳等核心技术的储备不足。最后，我国再生铝的占比较低，再生铝是降低铝企业碳排放量的重要手段之一，因其碳排放量只有原铝的 4%。但我国 2020 年再生铝产量占国内铝产量的 16.6%，与全球再生铝产量占铝总产量的 34.1%还有很大差距。

根据上述问题，结合 2021 年 11 月国际铝业协会发布的《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》^[61]，本文认为应当从电力脱碳、直接减排以及回收利用和资源效率三个路径着手实施降碳。第一，作为一个电能密集产业。2018 年铝行业二氧化碳排放量中来自电力生产的超过 60%，其中多数为依赖化石能源的火电模式。杨毅（2019）通过不同能源结构进行铝生产进行模拟，结果表明火电模式的温室气体排放明显高于水电模式，应当促进向脱碳发电的模式转变^[26]。此外，碳捕集、利用与储存技术（CCUS）的部署和实施，为自备发电厂和从电网购电的冶炼厂提供了最重要的减排机会。第二，燃烧燃料产生的排放量，占整体排放量的 15%，电气化、绿色氢气、集中太阳能热能和碳捕获利用与储存技术（CCUS）为其提供了潜在的脱碳路径。最后，铝金属具有无限的可回收且不损失性能的独特优势。通过再生铝的回收，可使原铝需求量大大减少，同时减少铝生产的温室气体排放。

4.4 铝企业碳审计指标框架及内容设计

4.4.1 碳审计指标框架设计

指标体系框架是指标体系组织的概念模式，指标体系框架决定了衡量问题的方法和途径^[42]。按碳审计促进低碳经济发展的宏观目标，在构建碳审计评价指标体系时应充分考虑可持续发展性。联合国经济合作与发展组织在 1993 年设计出了压力—状态—响应（PSR）模型，该模型通过诠释人类在生产生活中的活动对环境造成了压力，压力对自然环境造成了积极或消极的作用（状态），社会对这种状态通过环境政策、治理措施等方式进行响应^[93]。我国学者运用 PSR 模型在

碳审计领域的开展也进行了探索。但 PSR 模型存在环境目标与社会和经济指标。但 PSR 模型在设计上对于可持续发展的环境目标密切相关，对于社会和经济类的指标无法形成紧密上的逻辑关系。1996 年联合国可持续发展委员会制定了“驱动力-状态-响应”（DSR）模型。该模型将压力替换为了驱动力是为了适应社会、经济、制度等新的指标的加入。从设计理念来看，DSR 模型能够更好的指导碳审计工作。

根据 DSR 模型，结合铝企业碳排放相关分析，依照驱动力、状态、响应三个因素层设置碳审计评价指标。驱动力因素为铝企业经济收入驱动力、企业行为驱动力以及生产方式驱动力。状态因素是在上述驱动力的影响下，企业生产、获利行为对环境的影响。包括企业生产带来的碳排放的环境状况和经济状况。面对状态的变化，企业为降低碳排放采取的一系列措施为响应因素，包括低碳生产方式响应（生产方式、碳排放处理）、国家降碳政策的响应、企业低碳管理响应等。基于 DRS 模型构建的碳审计评价指标体系如图 4.3 所示：



图4.3 基于DSR模型构建的碳审计评价指标体系

4.4.2 碳审计评价指标体系内容设计

在碳审计以及指标体系构建的理论基础上,根据网络层次分析法将企业铝行企业碳审计模型分为目标层、因素层、指标层三层^[30]。第一层是评价指标体系的核心,全面反映行业内企业碳审计工作的总体情况,以实现本文提出的总体目标。第二层是影响因素层,基于 DSR 模型,将每个因素细分为驱动力、状态和响应因素,以实现更加全面的评价目标。第三层是各个因素的细分指标。

在“驱动力”因素中,由于铝工业是有色金属生产行业,在生产盈利过程中会造成大量的碳排放,因此将企业生产经营活动以及主营业务生产情况作为产生碳排放的驱动力。其中设定的指标包括企业资产总额、主营业务收入、纳税情况、盈利情况等。在“状态层”中,因为企业的生产经营活动产生了碳排放。通过分析铝企业碳排放源,识别不同阶段、不同类型的铝企业的碳排放“状态”并设定指标,包括企业的主要温室气体排放(二氧化碳排放总量、二氧化硫排放量、氮氧化物排放量)、不同生产流程二氧化碳排放量(氧化铝、电解铝二氧化碳排放当量、排放强度)以及部分会导致温室气体排放的危废物(铝灰、大修渣、炭渣)。最后是“响应层”。在“状态层”产生的碳排放的前提下,根据国际铝协会提出的铝企业降碳重点,企业在电力脱碳(风力发电装机容量、太阳能发电装机容量)降碳手段(铝灰、大修渣、炭渣处置量)以及碳排放管理(科技降碳技术研发、员工低碳教育、企业低碳制度)等方面作出的响应。碳审计评价初始设置指标如表 4.1 所示:

表 4.1 铝企业碳审计评价体系构建

目标层	因素层	指标层
铝企业碳审计评价体系	驱动因素 (D)	资产总额
		主营业务收入
		企业纳税总额
		净资产收益率
		氧化铝生产量
		电解铝生产量

	二氧化硫排放量
	氮氧化物排放量
	烟尘排放量
	氧化铝板块二氧化碳排放当量
	氧化铝板块二氧化碳排放强度
	电解铝板块二氧化碳排放当量
状态因素 (S)	电解铝板块二氧化碳排放强度
	总体二氧化碳排放当量
	总二氧化碳排放当量每万元营业收入
	铝灰产生量
	大修渣产生量
	炭渣产生量
	总耗煤量
	风力发电装机容量
响应因素 (R)	太阳能发电装机容量
	铝灰处置量
	大修渣处置量

续表 4.1 铝企业碳审计评价体系构建

目标层	因素层	指标层
铝企业碳审计评价体系	响应因素 (R)	炭渣处置量
		科技降碳技术研发
		碳排放自愿披露
		员工低碳教育
		企业低碳制度

4.5 指标体系权重设计

4.5.1 DEMATEL—ANP 计算权重

在铝企业碳审计评级指标体系中，各指标之间相互存在相互影响，且各指标共同影响评价体系总目标的结果。第一步，在通过邀请专家学者填写调查问卷并对结果进行整理得到原始矩阵。第二步，运用决策与实验室法（DEMATEL）获取碳审计评价指标的综合影响矩阵后，计算出各指标的影响度与被影响度、中心度和原因度，分析出指标体系中各要素之间的因果关系。第三步，通过网络分析法（ANP），运用“超矩阵”对各个指标的相互影响程度进行分析得到混合权重。基于上述步骤得出的混合权重既考虑了因素影响关系的大小，又考虑到因素权重。DEMATEL—ANP 具体步骤如下：^{[53][70][83]}

(1) 采用德尔菲法对铝企业碳审计评级指标体系各项指标进行打分^[62]。遴选对象为铝生产及审计方向的专家学者，通过向相关专家学者发放调查问卷，由学者判断两两指标之间的重要程度，重要程度分数设为 0~4 共 5 个等级，重要等级如表 4.2 所示：

表 4.2 影响关系标度表

标度	重要性关系
0	i 因素与 j 因素同等重要
1	i 因素与 j 因素略微重要

续表 4.2 影响关系标度表

标度	重要性关系
2	i 因素与 j 因素明显重要
3	i 因素与 j 因素非常重要
4	i 因素与 j 因素绝对重要

(2) 根据专家打分结果汇总得到直接影响矩阵 Ori。

$$O_{ri} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & \dots & O_{1j} \\ O_{21} & O_{22} & \dots & O_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ O_{i1} & O_{i2} & \dots & O_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

公式中 A_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n;$) 其中由于各指标对自身的重要程度相等, 所以矩阵中对角线数值均为 0

(3) 建立规范化矩阵, 对式 (4.1) 进行归一化得到规范化矩阵 N 见式 (4.2)。

$$N = \left(\frac{O_{ij}}{\max(\sum_{j=1}^n O_{ij})} \right)_{i \times j} \quad (4.2)$$

(4) 建立综合影响矩阵, 在矩阵 N (4.2) 的基础上, 利用式 (4.3) 得到综合影响矩阵 T。

$$T = (N + N^2 + N^3 + \dots N^k) = \sum_{k=1}^{\infty} N^k \rightarrow T = N(1 - N)^{-1} \quad (4.3)$$

(5) 将 T 列归一化计算出加权超矩阵 \overline{W} 见式 (4.4)

$$\overline{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1j} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \dots & W_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

(6) 计算极限超矩阵, 设极限超矩阵 \overline{W} 的 t 此幂为 \overline{W}^t , 运用极限超矩阵存在定理, 若 \overline{W} 的极限存在, 极限超矩阵式 \overline{W}^{∞} 见式 (4.5), 即可得出各指标权重。各指标。其原理及步骤如图 4.4 所示

$$\overline{W}^{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \overline{W}^t \quad (4.5)$$

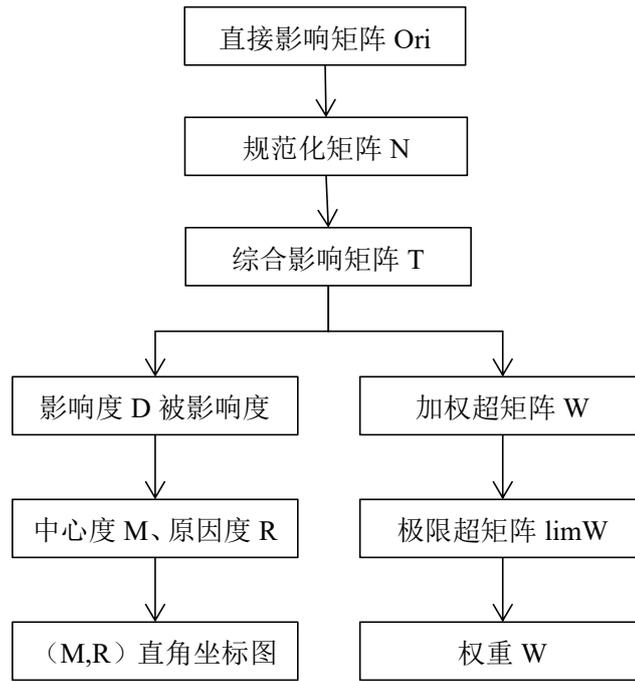


图4.4 DEMATEL—ANP原理及步骤图

4.5.2 熵权法计算权重

在构建评价指标体系的前提下，熵权法具体步骤如下：^{[54][73]}

(1) 构造矩阵

选取 n 个年份， m 个指标，则 x_{ij} 为第 i 个年份的第 j 个指标的数值。（ $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ）得到余矩阵 X 见式（4.6）

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

(2) 指标的标准化处理

在多指标评价体系中，各指标性质及计量单位不同，为了保证评价结果的可靠性，应该首先将数据处理成标准化数据。在此采用 min-max 标准化法，首先根据区分指标正负向，根据式（4.7）（4.8）计算正负向标准化数值，形成标准化矩阵见式（4.9）

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \left[\frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})} \right] + 0.01 \quad (4.7)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \left[\frac{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})} \right] + 0.01 \quad (4.8)$$

根据标准化公式, 得到标准化的矩阵

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} & \dots & X'_{1n} \\ X'_{21} & X'_{22} & \dots & X'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X'_{m1} & X'_{m2} & \dots & X'_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

(3) 通过上面的得到的标准化矩阵, 计算概率矩阵 P , 计算公式为 (4.10):

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (4.10)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$

(4) 分别计算每个指标的信息熵, 同时计算信息效用值并进行归一化处理, 最终得到每个指标的熵权。

其中第 j 项的信息熵计算公式为 (4.11)

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad \left(\frac{1}{\ln n} > 0 \text{ 且 } e_j \geq 0 \right) \quad (4.11)$$

信息效用值计算: $d_j = 1 - e_j$ (信息效用值越大, 对应的信息就越多)

最后将信息效用值进行归一化处理即可得到每个指标的熵权, 计算公式为 (4.12)

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (4.12)$$

4.5.3 计算组合权重

组合赋权法将主观与客观赋权法得到的权重相结合, 综合二者的优点同时规避二者的缺点。本文将 DEMATEL—ANP 及熵权法相结合。具体计算公式如下:

[27][65][90]

$$w_j \text{综合} = a w_j \text{主观} + (1 - a) a w_j \text{客观} \quad (4.13)$$

4.6 碳审计综合评价模型设计

4.6.1 三角模糊综合评价法概述

模糊综合分析法理论属于模糊数学综合评价方法。对于受到多种制约因素限

制的事务或评价对象，根据设定模糊数学的隶属度，对其作出总体评价。三角模糊函数是在传统模糊数学隶属度的基础上，建立一个三角模糊隶属函数进行评价。采用准确的数字表达方式，可以有效地替代模糊的语言变量，从而更加准确地进行综合评估^[45]。

4.6.2 碳审计评价指标体系三角模糊综合分析法有效性

(1) 通过 DSR 模型构建碳审计评价指标体。基于驱动力因素、状态因素、响应因素构建的 DSR 碳审计评价指标体系，涵盖了企业的经营情况，直接碳排放量、间接碳排放情况以及企业节能减排的技术、政策、教育等多方面因素。能够对碳审计工作的开展情况作出客观全面的整体评价。

(2) 各项指标的权重设计科学合理。权重设计由客观和主观两个综合得出，既反映了企业碳排放的真实情况，也包括政府审计学者、铝企业生产、环境相关专家以及审计实务人员的主观意见。

(3) 评价体系需要对企业碳审计工作进行综合评价，具有一定不确定性，因此可以采用模糊综合评价模型，运用三角模糊原理建立各项指标的隶属度进行模糊综合评价。碳审计综合评价模型图见图 3.5。

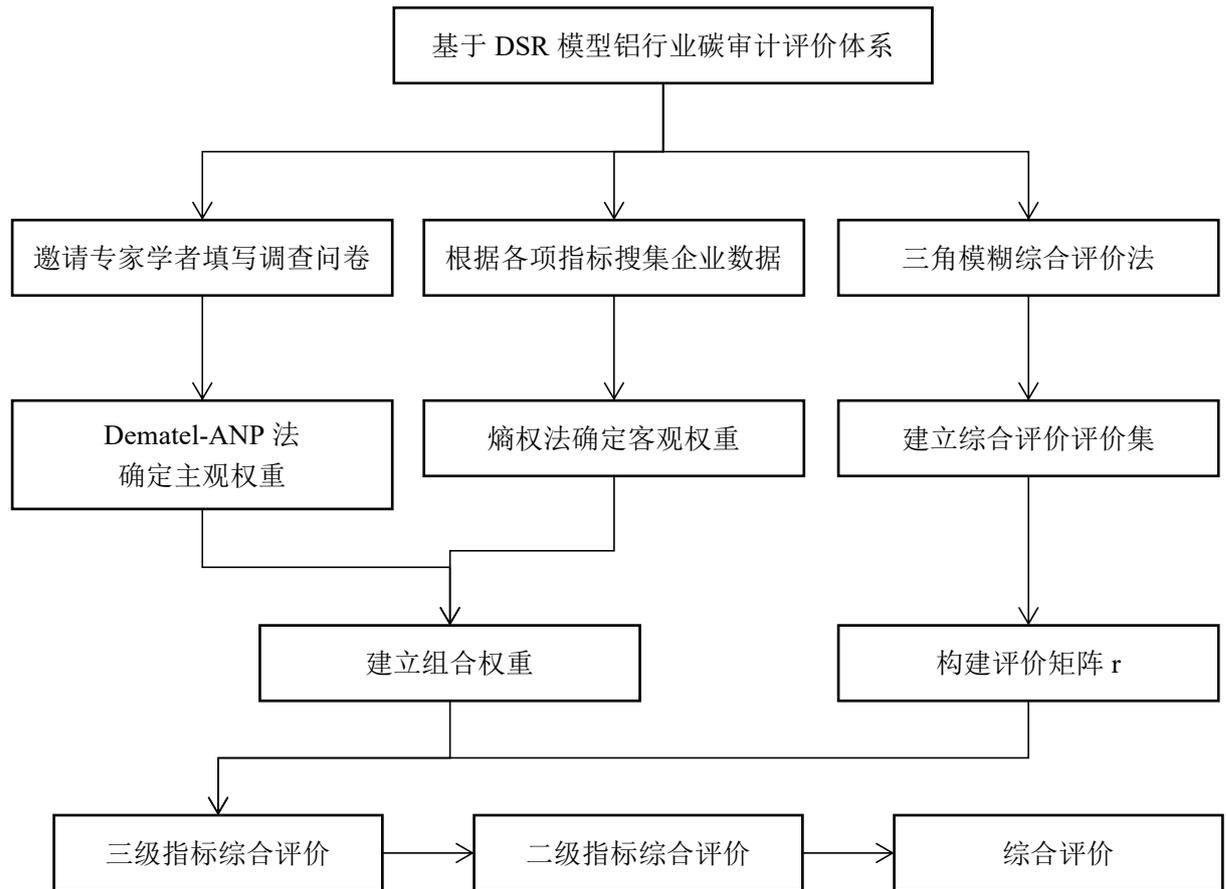


图4.4 碳审计综合评价模型图

4.6.3 三角模糊综合评价的具体步骤

三角模糊综合评价的具体步骤如下^[77]:

(1) 确定评价对象

因素集是影响评价对象的各个因素所组成的一个集合，用 U 来表示：设 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ ，即表 4.1。

(2) 建立综合评价的评价集

评价集是评价者对评价对象可能做出的各种结果所组成的集合，通常用 V 表示， $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ （其中 V_n 表示第 n 种评价结果。）

(3) 构建评价矩阵

隶属度也可以理解为评价者对评价对象作出的评价结果可以理解为一个“属于程度”。若因素集 U 中第 i 个元素对评价集 V 中第 1 个元素的隶属度为 r_{i1} ，则第 i 个元素的单因素评价结果用模糊 R_i 表示， $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ ，以 m 个

单因素评价集 r_1, r_2, \dots, r_m 组成的矩阵 $r_{m \times n}$ 即为模糊综合评价矩阵。见公式(4.14)

$$r_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

(4) 计算三级指标因素模糊矩阵。

根据三角模糊函数计算三级指标模糊值。其中正向指标单因素模糊值计算公式见式(4.15-18)

$$\mu_{v_1}(r) = \begin{cases} 1 & r < v_1 \\ \frac{r-v_1}{v_2-v_1} & v_1 < r \leq v_2 \\ 0 & r \geq v_2 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\mu_{v_2}(r) = \begin{cases} 0 & r < v_1 \\ \frac{r-v_1}{v_2-v_1} & v_1 < r \leq v_2 \\ \frac{v_3-r}{v_3-v_2} & v_2 < r \leq v_3 \\ 0 & r \geq v_3 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\mu_{v_3}(r) = \begin{cases} 0 & r < v_2 \\ \frac{r-v_2}{v_3-v_2} & v_2 < r \leq v_3 \\ \frac{v_4-r}{v_4-v_3} & v_3 < r \leq v_4 \\ 0 & r \geq v_4 \end{cases} \quad (4.17)$$

.....

$$\mu_{v_n}(r) = \begin{cases} 0 & r < v_{n-1} \\ \frac{r-v_{n-1}}{v_n-v_{n-1}} & v_{n-1} < r \leq v_n \\ 1 & r \geq v_n \end{cases} \quad (4.18)$$

负向指标三级指标模糊值计算公式见式(4.19-22)

$$\mu_{v_1}(r) = \begin{cases} 1 & r > v_1 \\ \frac{r-v_2}{v_1-v_2} & v_2 < r \leq v_1 \\ 0 & r \leq v_2 \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\mu_{v_2}(r) = \begin{cases} 0 & r > v_1 \\ \frac{v_1-r}{v_1-v_2} & v_2 < r \leq v_1 \\ \frac{r-v_3}{v_2-v_3} & v_3 < r \leq v_2 \\ 0 & r \leq v_3 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\mu_{v_3}(r) = \begin{cases} 0 & r > v_2 \\ \frac{v_2-r}{v_2-v_3} & v_3 < r \leq v_2 \\ \frac{r-v_4}{v_3-v_4} & v_4 < r \leq v_3 \\ 0 & r \leq v_4 \end{cases} \quad (4.21)$$

...

$$\mu_{v_n}(r) = \begin{cases} 0 & r > v_{n-1} \\ \frac{v_{n-1}-r}{v_{n-1}-v_n} & v_n < r \leq v_{n-1} \\ 1 & r \leq v_n \end{cases} \quad (4.22)$$

根据计算结果建立三级指标因素模糊矩阵 R 见式 (4.23)，并计算出二级指标因素得分，计算公式为： $\mu_{v_n}(r) * V$

$$R = \begin{pmatrix} \mu_{v_1}(r) \\ \mu_{v_2}(r) \\ \mu_{v_3}(r) \\ \dots \\ \mu_{v_n}(r) \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

(5) 根据权重向量建立二级指标综合模糊矩阵。基于 DSR 模型，根据计算出的各二级指标权重 \acute{W} 见式 (4.24)，分别计算三个二级指标的综合模糊矩阵 B，以驱动力因素 D 为例计算公式见式(4.25)。最后计算总模糊矩阵 $B_{\text{总}}$ 见式(4.26)

$$\acute{W}_D = \left[\frac{w_{D1}}{w_D}, \frac{w_{D2}}{w_D}, \dots, \frac{w_{D6}}{w_D} \right] \quad (4.24)$$

$$B_D = \acute{W}_D * R_D \quad (4.25)$$

其中 w_{D1} 为D1指标组合权重， w_D 为驱动力组合权重， R_D 为驱动力因素D模糊矩阵。

$$B_{总} = w_{总} * R_{总} = [w_D, w_S, w_R] \begin{bmatrix} B_D \\ B_S \\ B_R \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

(6) 根据二级模糊矩阵、总模糊矩阵及评价集进行综合评价，公式见(4.27)

$$M=B*V \quad (4.27)$$

5 铝企业碳审计评价体系的应用——以中国铝业为例

5.1 数据来源

5.1.1 主观数据来源

为保证调查对象具有全面性和代表性，分别邀请了铝企业专家、审计厅专家及高校教授等，分别从生产单位、政府审计部门以及科研单位三个角度对评价体系进行评价，具体评价人员组成见表 5.1，具体问卷调查见附录 1。

表 5.1 问卷调查评价人员

所属单位类型	职务	人员详情
铝企业	生产主管	长期从事铝企业生产工作
铝企业	部长	主管安全环保健康工作
审计部门	主任	从事企业审计工作
审计部门	主任	高级审计师，从事审计科研培训工作
高校	教授	审计学会理事、省科技成果评审专家
高校	教授	审计学教授，主持碳审计相关课题

5.2.2 客观数据来源

通过查阅对外公布的 2017-2021 年度《中铝年度财务报告》和《中铝社会责任报告》，通过对该公司碳审计评价指标数据搜集，我们整理出下表 5.2。

表 5.2 2017-2021 中国铝业碳审计评价指标数据

指标	2017	2018	2019	2020	2021
驱 资产总额（亿元）	2001.4	2008.76	2030.71	1949.02	1923.77
动 主营业务收入（亿元）	1800.81	1802.40	1900.74	1859.94	2697.48
力 企业纳税总额（亿元）	13.42	14.09	14.31	16.01	22.48
因 净资产收益率	3.90%	2.41%	2.15%	2.22%	10.81%
素 氧化铝生产量（万吨）	1281	1351	1,380	1453	1623

	电解铝生产量（万吨）	361	417	379	369	386
	二氧化硫排放量（万吨）	4.27	4.44	4.73	3.60	3.46
	氮氧化物排放量（万吨）	1.46	1.62	1.33	1.05	0.96
	烟尘排放量（万吨）	0.24	0.22	0.57	0.42	0.32
	氧化铝板块二氧化碳排放当量（万吨）	2700.86	3,005.92	2,663.76	2,610.79	2,522.97
	氧化铝板块二氧化碳排放强度（吨/吨）	1.88	2.22	1.93	1.80	1.55
状态因素	电解铝板块二氧化碳排放当量（万吨）	5021.88	5,465.52	5,040.71	4,690.23	4,891.05
	电解铝板块二氧化碳排放强度（吨/吨）	12.95	13.11	13.30	12.71	12.67
	总体二氧化碳排放当量（万吨）	6,862.3	10,126.78	9,395.20	8,904.00	8,680.11
	总二氧化碳排放当量每万元营业收入（吨/万元）	7.47	5.62	4.94	4.79	3.22
	铝灰产生量（万吨）	3.57	3.57	1.9	2.24	3.3
	大修渣产生量（万吨）	3.57	3.57	2.08	4.00	4.62
	炭渣产生量（万吨）	5.14	5.14	4.54	4.94	5.94
	总耗煤量（万吨）	1292.20	1495.95	1368.33	1551.96	1543.15
	风力发电装机容量（MW）	1118.3	1,405.8	1,605.8	1,605.8	1,606
	太阳能发电装机容量（MW）	130	203.33	203.33	203.33	213
响应因素	铝灰处置量（万吨）	2.19	1.97	1.16	2.92	2.7
	大修渣处置量（万吨）	4.29	2.36	1.01	3.79	9.99
	炭渣处置量（万吨）	4.73	4.65	2.68	4.75	6.83
	科技降碳技术研发（项）	5	3	4	7	8
	碳排放自愿披露（项）	22	35	37	55	57
	员工低碳教育（次）	2	4	3	7	9
	企业低碳制度（项）	4	9	7	9	12

资料来源：2017-2021年中国铝业股份有限公司年报、环境责任报告

5.3 评价指标权重确定

5.3.1 基于 D-ANP 法的主观权重确定

(1) 向有关专家学者发放调查问卷共 8 份, 收回有效问卷 6 份。根据调查问卷汇总汇聚得到直接影响矩阵 Ori 缩略表表 5.3, 完整表见附录 2 表 1。

表 5.3 直接影响矩阵

	D1	D2	D3	...	R7	R8	R9
D1	0	14	11	...	11	13	13
D2	16	0	13	...	12	14	13
D3	14	16	0	...	13	13	13
...
R7	16	17	16	...	0	15	16
R8	15	16	15	...	15	0	15
R9	16	17	15	...	16	16	0

(2) 通过对直接影响矩阵进行归一化处理, 根据式 (4.2) 在 matlab 软件输入指令, 得到规范化矩阵 N 缩略表 5.4, 完整表见附录 2 表 2 (保留小数点后 5 位)。

表 5.4 规范化矩阵表

	D1	D2	D3	...	R7	R8	R9
D1	0	0.03562	0.02799	...	0.02799	0.03308	0.03308
D2	0.04071	0	0.03308	...	0.03053	0.03562	0.03308
D3	0.03562	0.04071	0	...	0.03308	0.03308	0.03308
...	...	...	...	0	...	...	...
R7	0.04071	0.04326	0.04071	...	0	0.03817	0.04071
R8	0.03817	0.04071	0.03817	...	0.03817	0	0.03817
R9	0.04071	0.04326	0.03817	...	0.04071	0.04071	0

(3) 根据式 (4.3) 借助 matlab 进行计算, 得到综合影响矩阵 T 见表 5.5, 完整表见附录 2 表 3 (保留小数点后 5 位)。

表 5.5 规范化矩阵表

	D1	D2	D3	...	R7	R8	R9
D1	0.55600	0.59884	0.54507	...	0.53990	0.56420	0.54349
D2	0.60857	0.57818	0.56232	...	0.55461	0.57949	0.55589
D3	0.61174	0.62534	0.53771	...	0.56430	0.58466	0.56317
...	...	...	...	0	...	...	...
R7	0.66680	0.67890	0.62386	...	0.57876	0.63757	0.61664
R8	0.65531	0.66729	0.61294	...	0.60708	0.59209	0.60585
R9	0.66349	0.67561	0.61844	...	0.61480	0.63681	0.57447

(4) 运用 matlab 软件根据式计算出综合影响矩阵 T 的影响度 D, 被影响度 C、中心度 M 和原因度 R 见表 5.6, 并绘制 (M, R) 直角坐标散点图 5.1。

表 5.6 规范化矩阵表

	影响度	被影响度	中心度	原因度	
D1	17.80870	15.48302713	33.29173571	2.32568	原因因素
D2	18.08502	15.85868074	33.94370735	2.22634	原因因素
D3	16.59130	16.07832496	32.66962508	0.51297	原因因素
D4	17.36632	15.83041076	33.19673958	1.53591	原因因素
D5	15.88861	16.12923247	32.01785184	-0.24061	结果因素
D6	17.3765	16.010864	33.3874347	1.36570	原因因素
S1	16.83734	16.78354898	33.62089725	0.05379	原因因素
S2	16.64663	16.41216	33.05880	0.23446	原因因素
S3	16.50431	16.18055	32.68486	0.32376	原因因素
S4	18.3062	17.30785	35.61410	0.99839	原因因素

续表 5.6 规范化矩阵表

	影响度	被影响度	中心度	原因度	
S5	15.56521	17.6577	33.22296	-2.09253	结果因素
S6	16.54010	17.65097	34.19108	-1.11086	结果因素
S7	17.45209	17.54352	34.99562	-0.09142	结果因素
S8	16.5485	17.52678	34.07533	-0.97823	结果因素
S9	15.39629	17.57515	32.97144	-2.17886	结果因素
S10	16.13565	16.62322	32.75888	-0.48757	结果因素
S11	16.37510	16.29957	32.67467	0.07552	原因因素
S12	17.43793	16.31482	33.75275	1.12311	原因因素
S13	18.07938	17.52717	35.60655	0.55221	原因因素
R1	19.04181	16.39856	35.4403	2.64324	原因因素
R2	14.98740	16.78589	31.77329	-1.79849	原因因素
R3	16.82334	16.16704	32.99038	0.65629	原因因素
R4	16.81890	16.18942	33.00832	0.62948	原因因素
R5	14.85053	16.84353	31.69406	-1.99300	结果因素
R6	15.65434	17.70475	33.35910	-2.05040	结果因素
R7	16.42292	17.47963	33.90255	-1.05671	结果因素
R8	17.04846	17.2251	34.27358	-0.17665	结果因素
R9	16.38718	17.38873	33.77592	-1.00154	结果因素

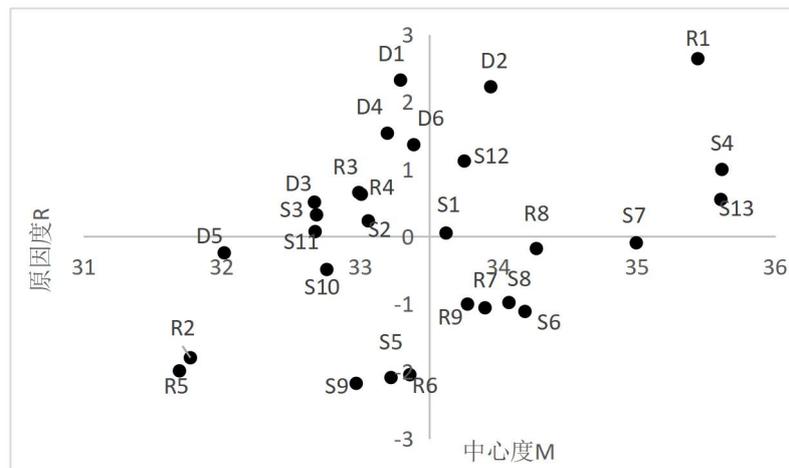


图5.1 (M, R) 直角坐标散点图

以中心度 M 为横坐标，原因度 R 为纵坐标，绘制 (M, R) 因果关系图对各指标进行分类，第一象限（如 $D1$ 、 $S3$ 、 $R4$ 等）代表具有高中心度和高影响力的关键因素；第二象限（如 $D2$ 、 $S12$ 、 $R1$ 等）代表具有中等影响力的高中心度和高影响力的原因；第三象限（如 $D5$ 、 $S9$ 、 $R2$ 等）代表具有中等影响力的低影响力的结果；第四象限（如 $S8$ 、 $R7$ 、 $R8$ 等）则代表具有中等影响力的高影响力的高重要性的结果^[42]。

（5）将综合影响矩阵 T 作为未加权超矩阵，借助 The R Project 软件，将矩阵 T 列归一化计算出加权超矩阵 \bar{W} 见表 5.7，完整表见附录 2 表 4（保留小数点后 5 位）。

表 5.7 加权超矩阵表

	D1	D2	D3	...	R7	R8	R9
D1	0.03122	0.03311	0.03285	...	0.03287	0.03309	0.03317
D2	0.03417	0.03197	0.03389	...	0.03377	0.03399	0.03392
D3	0.03435	0.03458	0.03241	...	0.03436	0.03429	0.03437
...	...	...	...	0	...	...	...
R7	0.03744	0.03754	0.03760	...	0.03524	0.03740	0.03763
R8	0.03680	0.03690	0.03694	...	0.03697	0.03473	0.03697
R9	0.03726	0.03736	0.03727	...	0.03744	0.03735	0.03506

（6）设极限超矩阵 \bar{W} 的 t 此幂为 \bar{W}^t ，根据式，借助 The R Project 软件计算极限超矩阵式 \bar{W}^∞ 见表 5.8，完整表见附录 2 表 5（保留小数点后 5 位）。

表 5.8 极限超矩阵表

	D1	D2	D3	...	R7	R8	R9
D1	0.03303	0.03302	0.03302	...	0.03302	0.03302	0.03302
D2	0.03382	0.03382	0.03382	...	0.03382	0.03382	0.03382
D3	0.03428	0.03428	0.03429	...	0.03428	0.03428	0.03428
...	...	...	...	0	...	...	...
R7	0.03727	0.03727	0.03727	...	0.03727	0.03727	0.03727
R8	0.03673	0.03673	0.03673	...	0.03673	0.03673	0.03673
R9	0.03707	0.03707	0.03707	...	0.03707	0.03707	0.03708

(7) 计算各个指标的权重见表 5.9

表 5.9 基于 D-ANP 主观权重表

因素	指标	权重	因素	指标	权重
驱动因素 (D)	D1	0.03302	状态因素 (S)	S9	0.03747
	D2	0.03382		S10	0.03545
	D3	0.03428		S11	0.03476
	D4	0.03376		S12	0.03479
	D5	0.03439		S13	0.03739
	D6	0.03415		R1	0.03498
状态因素 (S)	S1	0.03578	响应因素 (R)	R2	0.03578
	S2	0.035		R3	0.03447
	S3	0.03451		R4	0.03453
	S4	0.03691		R5	0.03591
	S5	0.03764		R6	0.03774
	S6	0.03763		R7	0.03727
	S7	0.0374		R8	0.03673
	S8	0.03737		R9	0.03707

5.3.2 基于熵权法的客观权重确定

(1) 判断指标性质并处理数据标准化。判断指标的性质，将正向指标设置为“P”，负向指标设置为“N”判断结果见表 4.10。根据公式 (4.8) (4.9) 将原始数据及指标性质表导入 EXCEL 表格通过 EXCEL 表格中输入“=IF(Type="p", (B3-MIN)/DV, (MAX-B3)/DV) +0.001”并拉至全表得到标准化结果见表 5.11

表 5.10 正负项指标判断表

指标层	指标性质	指标层	指标性质
资产总额	P	总二氧化碳排放当量每万元营业收入	P
主营业务收入	P	铝灰产生量	N
企业纳税总额	P	大修渣产生量	N
净资产收益率	P	炭渣产生量	N
氧化铝生产量	P	总耗煤量	N
电解铝生产量	P	风力发电装机容量	P
二氧化硫排放量	N	太阳能发电装机容量	P
氮氧化物排放量	N	铝灰处置量	P
烟尘排放量	N	大修渣处置量	P
氧化铝板块二氧化碳排放当量	N	炭渣处置量	P
氧化铝板块二氧化碳排放强度	N	科技降碳技术研发	P
电解铝板块二氧化碳排放当量	N	碳排放自愿披露	P
电解铝板块二氧化碳排放强度	N	员工低碳教育	P
总体二氧化碳排放当量	N	企业低碳制度	P

表 5.11 标准化矩阵表

指标	2017	2018	2019	2020	2021
D1	0.736576	0.804745	1.01	0.246114	0.01
D2	0.01	0.011773	0.121446	0.075944	1.01
D3	0.01	0.083951	0.108234	0.295872	1.01
D4	0.212079	0.040023	0.01	0.018083	1.01
D5	0.01	0.214678	0.299474	0.512924	1.01
D6	0.01	1.01	0.331429	0.152857	0.456429
S1	0.372205	0.238346	0.01	0.899764	1.01
S2	0.252424	0.01	0.449394	0.873636	1.01
S3	0.952857	1.01	0.01	0.438571	0.724286
S4	0.64166	0.01	0.718479	0.828159	1.01
S5	0.517463	0.01	0.442836	0.636866	1.01
S6	0.582225	0.01	0.557937	1.01	0.750974
S7	0.565556	0.311587	0.01	0.946508	1.01
S8	1.01	0.01	0.234103	0.384571	0.453155
S9	1.01	0.574706	0.414706	0.379412	0.01
S10	0.01	0.01	1.01	0.806407	0.171677
S11	0.423386	0.423386	1.01	0.254094	0.01
S12	0.581429	0.581429	1.01	0.724286	0.01
S13	1.01	0.225622	0.716922	0.01	0.043916
R1	0.01	0.599502	1.00959	1.00959	1.01
R2	0.01	0.893494	0.893494	0.893494	1.01
R3	0.595227	0.470227	0.01	1.01	0.885
R4	0.375256	0.160334	0.01	0.319577	1.01
R5	0.503976	0.484699	0.01	0.508795	1.01
R6	0.41	0.01	0.21	0.81	1.01
R7	0.01	0.381428571	0.438571429	0.952857143	1.01

续表 5.11 标准化矩阵表

指标	2017	2018	2019	2020	2021
R8	0.01	0.295714286	0.152857143	0.724285714	1.01
R9	0.01	0.635	0.385	0.635	1.01

(2)计算概率矩阵 P。根据公式(4.10)继续输入指令“=B20/SUM(B\$20:B\$24)”并拉至全表得到概率矩阵 P 见表 5.12 (保留小数点后 5)。

表 5.12 概率矩阵表

指标	2017	2018	2019	2020	2021
D1	0.26237	0.28665	0.35976	0.08767	0.00356
D2	0.00814	0.00958	0.09880	0.06179	0.82170
D3	0.00663	0.05567	0.07177	0.19619	0.66974
D4	0.16438	0.03102	0.00775	0.01402	0.78283
D5	0.00489	0.10487	0.14629	0.25056	0.49339
D6	0.00510	0.51512	0.16903	0.07796	0.23279
S1	0.14710	0.09420	0.00395	0.35559	0.39916
S2	0.09726	0.00385	0.17315	0.33660	0.38914
S3	0.30387	0.32210	0.00319	0.13986	0.23098
S4	0.20000	0.00312	0.22394	0.25813	0.31481
S5	0.19772	0.00382	0.16920	0.24334	0.38591
S6	0.20000	0.00344	0.19166	0.34694	0.25797
S7	0.19888	0.10957	0.00352	0.33285	0.35518
S8	0.48283	0.00478	0.11191	0.18384	0.21663
S9	0.42280	0.24058	0.17360	0.15883	0.00419
S10	0.00498	0.00498	0.50297	0.40158	0.08549
S11	0.19963	0.19963	0.47622	0.11981	0.00472
S12	0.20000	0.20000	0.34742	0.24914	0.00344
S13	0.50337	0.11245	0.35731	0.00498	0.02189

续表 5.12 概率矩阵表

指标	2017	2018	2019	2020	2021
R1	0.00275	0.16476	0.27746	0.27746	0.27757
R2	0.00270	0.24145	0.24145	0.24145	0.27294
R3	0.20038	0.15830	0.00337	0.34002	0.29793
R4	0.20012	0.08550	0.00533	0.17043	0.53862
R5	0.20019	0.19253	0.00397	0.20211	0.40120
R6	0.16735	0.00408	0.08571	0.33061	0.41224
R7	0.00358	0.13657	0.15703	0.34118	0.36164
R8	0.00456	0.13485	0.06971	0.33029	0.46059
R9	0.00374	0.23738	0.14393	0.23738	0.37757

(3) 计算信息熵及信息效用值。根据公式(4.11)输入指令“B33=-LN(5)”、“=B\$33*SUMP(=LN(B\$27:B\$31))”得出熵值 e_j 及信息效用值 d_j 见表 5.13。

表 5.13 熵值及信息效用值表

指标	e_j	d_j	指标	e_j	d_j
D1	2.10914	-1.10914	S9	2.13388	-1.13388
D2	1.03928	-0.03928	S10	1.56936	-0.56936
D3	1.56296	-0.56296	S11	2.05379	-1.05379
D4	1.11644	-0.11644	S12	2.21592	-1.21592
D5	1.99414	-0.99414	S13	1.72058	-0.72058
D6	1.94315	-0.94316	R1	2.22186	-1.22186
S1	2.02884	-1.02884	R2	2.25284	-1.25284
S2	2.06890	-1.06891	R3	2.18986	-1.18986
S3	2.18690	-1.1869	R4	1.92323	-0.92323
S4	2.23456	-1.23456	R5	2.17392	-1.17392

续表 5.13 熵值及信息效用值表

指标	ej	dj	指标	ej	dj
S5	2.17874	-1.17874	R6	2.03341	-1.03341
S6	2.21265	-1.21266	R7	2.12043	-1.12043
S7	2.11990	-1.11991	R8	1.93679	-0.93679
S8	2.03578	-1.03578	R9	2.17337	-1.17337

(4) 计算熵权。对信息效用值并进行归一化处理，输入指令“=B37/SUM(\$B\$37:\$AC\$37)”最终得到每个指标的熵权 w_j ，经验算，各项熵权之和为1，结果合理。各指标熵权如表 5.14。

表 5.14 基于熵权法的客观权重表

因素	指标	熵权	因素	指标	熵权
驱动因素 (D) 0.14769	D1	0.04026	状态因素 (S) 0.53974	S9	0.04116
	D2	0.00143		S10	0.02067
	D3	0.02043		S11	0.03825
	D4	0.00423		S12	0.04413
	D5	0.03608		S13	0.02615
	D6	0.03423		R1	0.04435
状态因素 (S) 0.53974	S1	0.03734	响应因素 (R) 0.31258	R2	0.04547
	S2	0.03880		R3	0.04319
	S3	0.04308		R4	0.03351
	S4	0.04481		R5	0.04261
	S5	0.04278		R6	0.03751
	S6	0.04402		R7	0.04067
	S7	0.04065		R8	0.03400
	S8	0.03760		R9	0.04259

5.3.3 组合权重确定

根据公式（4.13）计算混合权重，其中 a 取 0.5，得到混合权重见表 5.15。

表 5.15 混合权重表

因素	指标	熵权	因素	指标	熵权
驱动因素 (D) 0.1359	D1	0.03664	状态因素 (S) 0.4858	S9	0.03931
	D2	0.01762		S10	0.02806
	D3	0.02736		S11	0.03650
	D4	0.01899		S12	0.03946
	D5	0.03524		S13	0.03177
	D6	0.03419		R1	0.03966
状态因素 (S) 0.4858	S1	0.03656	响应因素 (R) 0.3442	R2	0.04063
	S2	0.03690		R3	0.03883
	S3	0.03880		R4	0.03402
	S4	0.04086		R5	0.03926
	S5	0.04021		R6	0.03762
	S6	0.04082		R7	0.03897
	S7	0.03902		R8	0.03538
	S8	0.03748		R9	0.03984

5.4 评价标准及综合打分

与传统的财务审计相比，碳审计拥有一套更加严格的标准，通过制定计划标准、法规标准和标杆标准有助于更好地评估碳排放情况。铝企业碳审计指标评价标准如表 5.16 所示。

表 5.16 铝企业碳审计指标评分标准

评价指标	评分标准				来源
	0-30 差	30-60 一般	60-80 良好	80-100 优秀	
资产总额 (亿元)	<0.03	0.03-0.5	0.5-8	>8	条例标准 《统计上大中小 微型企业划分办 法(2017)》
主营业务 收入(亿 元)	<0.03	0.03-0.6	0.6-8	>8	条例标准 《统计上大中小 微型企业划分办 法(2017)》
企业纳税 总额	<4.7	4.7-5.34	5.34-7.49	>7.49	行业标杆
净资产收 益率	<0.3	0.3-6.6	6.6-9.3	>12.7	条例标准 企业绩效评价标 准值(2022)
氧化铝生 产量(万 吨)	<80	80-240	240-320	320>	条例标准 《铝行业规范条 件》
电解铝生 产量(万 吨)	<20	20-60	60-80	80>	条例标准 《铝行业规范条 件》
二氧化硫 排放量	>4.1	4.06-4.1	4.02-4.06	<4.02	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
氮氧化物 排放量	>1.28	1.27-1.28	1.26-1.27	<1.26	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
烟尘排放 量	>0.36	0.35-0.36	0.34-0.35	<0.34	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
氧化铝板 块二氧化 碳排放当 量	> 2700.86	2666.29-2700.86	2658.73-2666.29	< 2658.73	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
氧化铝板 块二氧化 碳排放强 度	>1.88	1.88-1.85	1.85-1.84	<1.84	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》

续表 5.16 铝企业碳审计指标评分标准

评价指标	评分标准				来源
	0-30 差	30-60 一般	60-80 良好	80-100 优秀	
电解铝板块二氧化碳碳排放当量	> 5021.88	5016.86-5021.88	5011.84-5016.86	<5011.84	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
电解铝板块二氧化碳碳排放强度	>12.95	12.94-12.95	12.92-12.94	<12.92	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
总体二氧化碳碳排放当量	> 8705.74	8617.8-8705.74	8529.87-8617.8	<8529.87	行业标杆 《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》
总二氧化碳碳排放当量每万元营业收入	>5.21	5.16-5.21	5.10-5.16	<5.05	行业标杆 《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》
铝灰产生量	>13.34	10-13.34	5-10	<5	行业标杆 《国家危险废物名录 2021》参
大修渣产生量	>11.47	9.56-11.47	7.65-9.56	<7.65	行业标杆 《国家危险废物名录 2021》参
炭渣产生量	>6.11	5.94-6.11	5.77-5.94	<5.77	行业标杆 《国家危险废物名录 2021》
总耗煤量（万吨）	> 1586.36	1543.15-1586.36	1499.941543.15	< 1499.9418	计划标杆 《中铝 ESG 报告 2021》
风力发电装机容量	> 1248.82	1248.82-1468.34	1468.34-1687.86	<1687.86	行业标杆 中国能源统计年鉴
太阳能发电装机容量	> 189.32	189.32-190.59	190.59-191.88	<191.88	行业标杆 中国能源统计年鉴
铝灰处置量	<0.44	0.44-1.24	1.24-2.06	>2.06	行业标杆 有色资讯
大修渣处置量	<0.54	0.54-1.51	1.51-2.52	>2.52	行业标杆 有色资讯

续表 5.16 铝企业碳审计指标评分标准

评价指标	评分标准				来源
	0-30 差	30-60 一般	60-80 良好	80-100 优秀	
炭渣处置量	<0.77	0.77-2.18	2.18-3.62	>3.62	行业标杆 有色资讯
科技降碳技术研发	<3	3-5	5-7	>7	行业标杆
碳排放自愿披露	<22	22-37	37-55	>55	行业标杆
员工低碳教育	<2	2-4	4-7	>7	行业标杆
企业低碳制度	<4	4-7	7-9	>9	行业标杆

上表采用的评价标准具体如下：

(1) 条例标准。是以由国际或本国颁布的法律法规及各项条例中提供的参考值作为评价标准。国际上，由国际铝业协会制定的《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》为铝企业碳排放总量减排率作出了规划预测^[85]。在国内，多部门联合印发的《统计上大中小微型企业划分办法（2017）》^[36]国务院国资委发布的《企业绩效评价标准值（2022）》为企业相关财务指标提供了评价参考意见。由生态环境部发布的《国家危险废物名录 2021》^[37]中危险废物产废系数为评价铝企业危废物产出提供了计算依据^[44]。

(2) 计划标准。企业制定的节能减排计划可以作为指标评价的参考方式。通过对比企业的实际减排数据。可以对企业实际减排情况以及减排计划的完成情况作出评价。根据《中铝 ESG 报告》（2017-2021）中提供的二氧化硫排放量、氮氧化物排放量、烟尘排放量、以及氧化铝电解铝碳排放量，对相应的指标设计评价标准。

(3) 行业标杆。将铝行业中节能减排处于领先地位的企业作为行业标杆，以其相关指标作为评价依据。可以对被审计单位节能减排情况进行评价。由于中国铝业为行业龙头企业以及全球最大的铝生产企业，受香港证券交易所要求在碳信息披露方面最为详细。因此采用中国铝业自身作为行业标杆，在降碳技术研发、碳信息披露、员工低碳教育和企业低碳制度方面运用截尾法制定评价标准。

5.5 中国铝业碳审计综合评价

5.5.1 三角模糊综合评价计算

(1) 计算三级指标因素模糊矩阵。由于确定评价对象、评价集及评价矩阵已在表 4.16 列出，在此不再反复赘述（评价集在实际计算时选取评分标准中间值，即 $V = [15、45、70、90]$ ）。根据公式（4.15-23），运用 Excel 表格进行计算。以 2017 年 D1 在 V1 评价区间为例，在表格中输入指令“=IF(K2<Q2,1,IF(K2<R2,(R2-K2)/(R2-Q2),0))”。在表格中输入“=MMULT(V2:Y2,\$AU\$1:\$AU\$4)”得到 D1 单指标模糊评价得分。分别得出 2017 年-2021 年三级指标模糊评价矩阵见附录 3 表 1-5。

(2) 计算二级指标因素模糊矩阵及总模糊矩阵。分别计算驱动力因素、状态因素、响应因素以及总模糊矩阵。以 2017 年驱动力因素 D 为例，输入 C32/\$A\$33 得到 \hat{W}_{D1} 权重。根据式（5.24-25）输入“=MMULT(\$K\$31:\$P\$31,V2:V7)”得到 2017 年 D 隶属度为 0.1090，同理可得

$$\hat{W}_D = [0.2087, 0.1004, 0.1558, 0.1082, 0.2007, 0.1947]$$

$$R_D = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_D = \hat{W}_D * R_D = [0.1082, 0.0000, 0.0000, 0.8604]$$

$$\hat{W}_s = [0.0723, 0.0729, 0.0767, 0.0808, 0.0795, 0.0807, 0.0771, 0.0741, 0.0777, \\ 0.0555, 0.0721, 0.0780, 0.0628]$$

$$R_S = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_S = \dot{W}_S * R_S = [0.5410, 0.0000, 0.0000, 0.4192]$$

$$\dot{W}_R = [0.1245, 0.1276, 0.1219, 0.1068, 0.1233, 0.1181, 0.1223, 0.1110,$$

$$0.1250]$$

$$R_R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_R = \dot{W}_R * R_R = [0.6105, 0.0591, 0.0591, 0.3520]$$

根据式 (4.26)，输入 “=MMULT(\$K\$34:\$M\$34,K36:K38)” 进行总评价体系测评：

$$W = [0.1359, 0.4858, 0.3442]$$

$$R_{\text{总}} = \begin{bmatrix} B_D \\ B_S \\ B_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1082 & 0.0000 & 0.0000 & 0.8604 \\ 0.5410 & 0.0000 & 0.0000 & 0.4192 \\ 0.6105 & 0.0203 & 0.0203 & 0.3520 \end{bmatrix}$$

$$B_{\text{总}} = W * R_{\text{总}} = [0.4876, 0.0203, 0.0203, 0.4416]$$

同理可得 2017-2021 二级模糊矩阵见表 5.17

表 5.17 二级模糊矩阵

年份	二级指标模糊值			
	D 隶属度	S 隶属度	R 隶属度	总隶属度
2017	0.1082	0.5410	0.6105	0.4876
	0.0000	0.0000	0.0591	0.0203
	0.0000	0.0000	0.0591	0.0203
	0.8604	0.4192	0.3520	0.4416
2018	0.1082	0.6150	0.1181	0.3541
	0.0000	0.0000	0.2459	0.0846
	0.0000	0.0000	0.2664	0.0917
	0.8604	0.3451	0.4502	0.4395
2019	0.1082	0.5333	0.0033	0.2749
	0.0000	0.0048	0.5422	0.1889
	0.0000	0.0760	0.3761	0.1664
	0.8604	0.3461	0.1590	0.3397
2020	0.1082	0.1508	0.0000	0.0879
	0.0000	0.0442	0.0000	0.0215
	0.0000	0.0186	0.2503	0.0952
	0.8604	0.7466	0.8302	0.7653
2021	0.1082	0.0309	0.0000	0.0297
	0.0000	0.1136	0.0000	0.0552
	0.0000	0.0704	0.0929	0.0662
	0.8604	0.7453	0.9877	0.8189

(3) 综合评价。根据式 (4.27) 对二级模糊矩阵、总模糊矩阵及评价集进行综合评价。以 2017 年为例, 输入 “=MMULT(K36:N36,\$AUS1:\$AUS\$4)” 得到 2017 年驱动力因素 D 综合评价分为 81.6345。

$$M_D = B_D * V = [0.1082, 0.0000, 0.0000, 0.8604] \begin{bmatrix} 15 \\ 45 \\ 70 \\ 90 \end{bmatrix} = 79.0576$$

$$M_S = B_S * V = [0.5410, 0.0000, 0.0000, 0.4192] \begin{bmatrix} 15 \\ 45 \\ 70 \\ 90 \end{bmatrix} = 45.8403$$

$$M_R = B_R * V = [0.6105, 0.0591, 0.0591, 0.3520] \begin{bmatrix} 15 \\ 45 \\ 70 \\ 90 \end{bmatrix} = 47.6249$$

$$M_{总} = B_{总} * V = [0.4876, 0.0203, 0.0203, 0.4416] \begin{bmatrix} 15 \\ 45 \\ 70 \\ 90 \end{bmatrix} = 49.3998$$

同理可得 2017-2021 综合评价结果见表 5.18

表 5.18 中国铝业碳审计综合评价表

指标	测评结果				
	2017	2018	2019	2020	2021
D	79.0576 良好	79.0576 良好	79.0576 良好	79.0576 良好	79.0576 良好
S	45.8403 一般	40.2840 一般	44.6818 一般	72.7428 良好	77.5754 良好
R	47.6249 一般	71.9990 良好	65.0827 良好	92.2437 优秀	95.3930 优秀
综合评价结果	49.3998 一般	55.0907 一般	54.8463 一般	77.8260 良好	81.2574 优秀

5.5.2 中国铝业碳审计结果评价

(1) 总体评价

通过 DSR 模型构建铝企业碳审计评价指标体系,运用 D-ANP 法和熵权法进行组合赋权得到综合权重,结合评价标准,采用三角模糊综合分析法对中国铝业碳减排工作作出综合评价。最后根据评价结果确认 2017-2019 年度该企业模糊评价为一般,2020 年为良好,2021 年为优秀。中国铝业股份有限公司(以下简称公司)2017-2021 年总体模糊综合评价柱状图如图 5.2 所示。

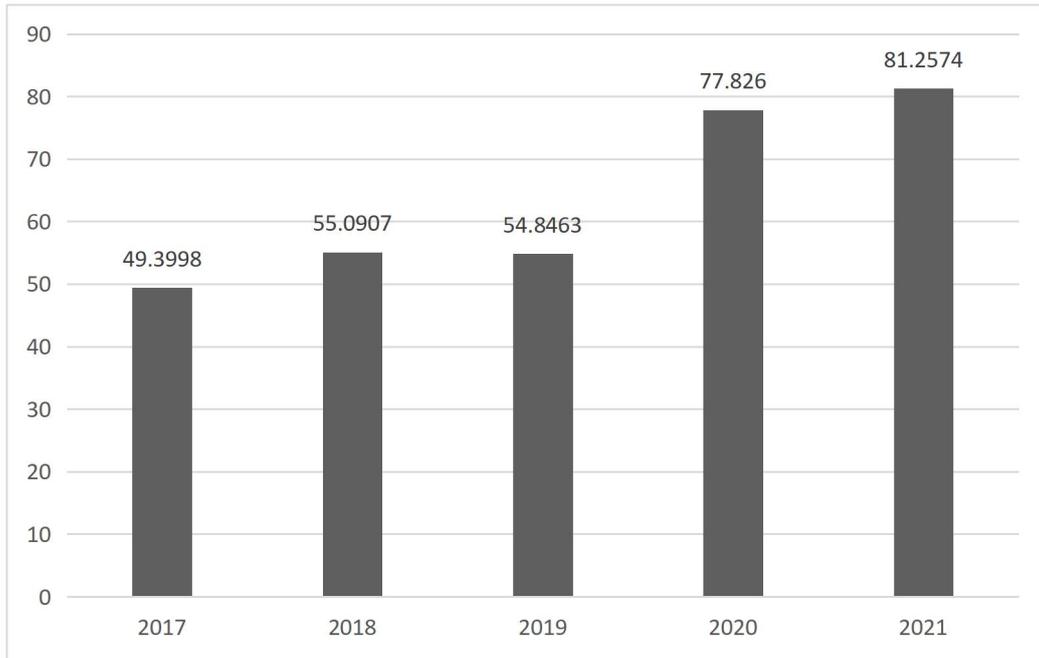


图5.2 中国铝业2017-2021年模糊综合评价图

如图 4.2 所示，公司在 2017-2021 年期间综合评价得分呈整体上升趋势，表明企业碳减排工作开展越来越深入，碳减排重视程度越来越高。其中 2019 年-2020 年期间评价得分上涨幅度最大，分析其原因可以主要归纳为政策、管理、技术三个方面。一方面在国家主席习近平做出双碳战略的重要之下，各项减排政策的出台为公司节能减排提供政策性指导。此外，2020 年，公司采取的降碳管理措施初见成效，从理念降碳、生产降碳、管理降碳、科技降碳和生活降碳五个方面入手全方面降低企业碳排放。在技术手段方面，公司积极投入技术 R&D 和推广，大力开发节能减排技术，以有效降低碳排放，实现可持续发展。如无炭渣阳极技术和 FHEST 节电技术在旗下生产分公司得到大力应用和推广。根据表 5.18 及图 5.2 可以表明，公司在 2017-2015 年期间一直积极履行低碳减排义务，并不断取得新的进步，在行业中取得领先地位。

（2）影响因素评价。

根据表 5.28 中各二级指标的模糊评价得分绘制中国铝业 2017-2021 年二级指标模糊综合评价柱状图如图 5.3 所示。

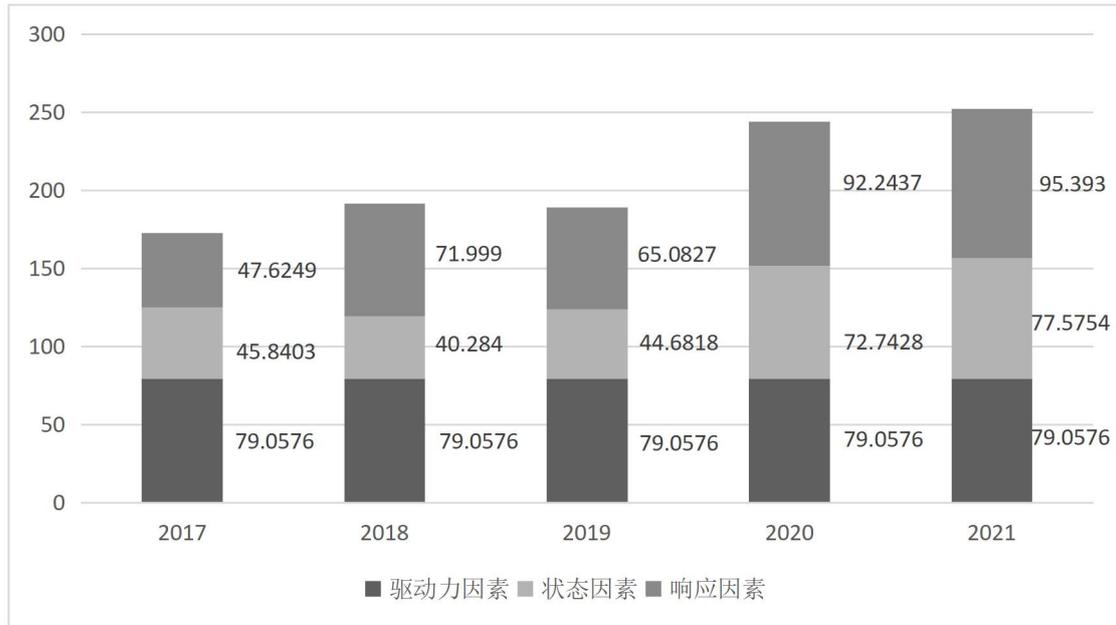


图5.3 中国铝业2017-2021年二级指标模糊综合评价图

从驱动力因素来看，公司各年综合评价得分相同，原因在于根据国家政策、规定所建立的条例标准下或根据行业平均水平来看，无论是从经营状况、财务状况、或生产规模来看，均远超于评价标准。这说明中国铝业作为全国铝行业领军企业，生产经营状况十分良好。从状态因素来看，公司状态指标得分呈总体上升状态，状态指标的评价标准主要根据《中铝集团 ESG 报告》中提出的减排目标设定，结合表 5.18 和附录表三，说明该公司减排目标完成度较高。尤其是 2020 年和 2021 年得分最高，2020 年起，公司采用每月跟踪落实制度监督产品降耗完成情况，氧化铝、电解铝等主要产品能耗大幅度下降。同时，面对火电高污染的问题，企业出台了《中铝火电机组运行优化指导意见》和《中铝火电机组节能降耗指导意见》，落实企业节能降碳项目的实施。2021 年中铝集团积极响应国家“双碳”政策，制定公司《十四五》发展规划以及新能源发展专项规划》，管理层高度重视减排工作，成立领导小组专门负责工作落实，主要围绕氧化铝、电解铝和发电三个方面开展降碳工作，圆满本年完成降碳计划。通过三级指标模糊评价结果显示，2020-2021 年度公司主要温室气体排放及企业主要产品二氧化碳排放当量等相关指标评分大多为 90 分。响应因素在 2020 年和 2021 年得到显著提升。主要原因是：其一，近年来，近年来，公司积极推广以太阳能和风力发电可再生能源技术。通过下发《中铝关于加快获取风能、太阳能资源的通知》等通知，

引导企业加快能源结构调整与转型，在此基础上，各分公司清洁能源使用比例得到显著提升。其二，对于能够间接造成碳排放的铝土矿、部分危险废弃物等。公司按照《内部环境保护管理办法》等规章制度进行处理。例如建立全封闭铝土矿仓、安装智能喷淋系统解决扬尘污染问题。同时提高危废物无害化处置率，建立危废物暂存库进行安全储存。避免了危废物处置不当产生的二次大气污染。其三，公司积极响应“30, 60”战略的号召，加强降碳管理工作。围绕氧化铝、电解铝、炭阳极等主要业务板块积极探索降碳技术；积极开展公司低碳宣传和员工低碳教育，通过多种多媒体方式倡导绿色运营、低碳生活等低碳理念，组织“三大平台”学习公司双碳目标和推进计划。在香港联交所发布的《ESG 指引（2019）》的指导下。公司披露的碳排放定量数据逐年增多；自 2020 年起逐年制定明确减排目标并对上年环境指标完成情况作出评价。

5.5.3 案例启示

（1）提高清洁能源使用比例，促进电力脱碳

铝生产是一个电能密集型过程。据统计，铝行业碳排放中 80%来源于电力生产。而铝生产超过 2/3 的电力需求，都是由旗下经营的化石能源发电厂满足。这与表 4.2 中国铝业碳审计评价指标数据表中总耗煤量、二氧化碳排放当量较高相吻合，根据指标模糊评价得分较低也证明了这一点。在此基础上，积极推广运用风能太阳能等清洁能源代替煤炭发电，可以有效降低碳排放量。本文采用公司风力发电装机容量和太阳能发电装机容量建设情况衡量企业的清洁能源使用效率。结果发现，虽然这风力、太阳能发电装机容量的建设增速整体呈上升趋势，但相比于全国风力、太阳能装机容量增速仍有不小的差距（见图 5.4、5.5）。因此，公司应该尽快落实相关指导文件，加强对清洁能源的使用，积极推进能源置换，以减少碳排放，最终实现电力脱碳的目标。

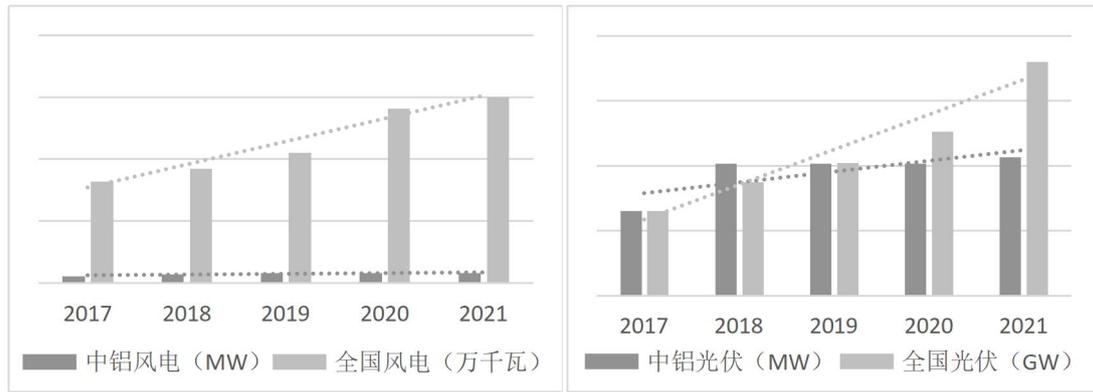


图4.4 中国铝业与全国风电装机容量对比。图4.5 中国铝业与全国光伏装机容量对比图

(2) 加大节能减排技术研发和推广力度促进生产降碳

强化技术节能降碳,研究制定低碳技术发展路线图是企业实现碳达峰和绿色低碳发展的关键和核心^[72]。工业减排的重点一方面在于突破工业流程中关键技术的低碳瓶颈。另一方面在于碳捕捉与转化材料再生技术。近年来,公司围绕主要生产板块,在氧化铝蒸发节能降耗、电解铝电解槽降耗、无炭渣阳极以及残极高效回收生产等技术方面实现重点突破,在综合评价中得分较高。但是,根据中铝2021年《ESG报告》显示部分技术手段还在测试或小面积试点阶段,未来公司应当加大成熟技术推广力度尽早实现技术全覆盖。同时对于重点领域技术加大攻关力度,制定降碳技术专项工作方案和发展路线,大力提升低碳铝冶炼水平。

(3) 提升降碳管理水平实现降碳目标

公司高度重视国家“双碳战略”,为落实碳排放管理制度,制定《“双碳”行动方案等战略规划》。各部门分工协作承担“双碳”日常工作落实,同时督促公司集团下各单位同步推进“双碳”工作,根据公司自身情况制定3年内减排短目标以及碳达峰碳中和长效目标。但是通过分析,公司在降碳管理工作汇总仍存在不足之处,在此提出改进建议。其一,通过建立碳排放实时检测系统提高碳审计相关信息披露效率。在进行数据搜集、评价指标选取和碳审计综合评价的过程中,部分数据缺失只能通过估算得到,还有少量关键指标因缺乏持续性稳定数据支撑只能剔除,对评价结果具有一定影响。因此公司需要建立检测系统及时汇总各分公司各类污染物实时数据并进行有效披露。其二,加强企业低碳宣传和员工低碳学习覆盖率。从公司提供的相关报告来看,公司组织各公司集中学习环境保护法律法规,开展低碳培训,并积极宣传低碳理念。但这些定性描述难以对企业

降碳管理工作进行评价，建议公司通过公司低碳宣传次数、员工低碳教育覆盖率等定量指标对这类低碳管理工作进行评价并披露。

（4）提高铝资源回收效率

据统计铝废料回收再加工形成的再生铝所产生的温室气体只有原生铝的 4%。根据国际铝协会的调查预计，如果将回收率提高至 100%，到 2050 年将减少 20% 的原铝需求，可以节约至少 3 亿吨的碳排放。但《中铝 ESG 报告》中并未体现公司对再生铝的重视。因此，本文建议公司应采取相应措施推行再生铝生产，制定相关政策进行指导相关工作，定期统计各子公司开展进程，将再生铝生产纳入生产分公司绩效评价体系和碳审计评价指标体系中。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

铝制品在电子行业、电气行业、轻工业、建筑行业、机械制造业等领域应用广泛,但以化石能源为主能源结构的铝制品生产过程中,排放了大量的温室气体。因此,在满足人类对铝金属需求日益增长的前提下,如何能不以碳排放进一步增加为代价,是当前我们亟待解决的问题。碳减排是一项系统、复杂的综合性工程,不同的行业所属企业采取的减排措施也存在一定差异,碳审计作为促进企业碳减排的有力工具,通过对不同行业企业开展分析,帮助企业评价碳减排工作的开展,促使其更好的履行社会责任。在我国,双碳战略的提出促进了碳审计的相关研究。但由于我国相关研究仅仅处于起步阶段,缺乏不同行业完整的碳审计评价体系。鉴于此,本文通过剖析碳审计相关概念,选取碳减排重点铝行业,通过碳足迹识别铝行业碳排放特点,结合国家铝行业碳减排政策、国际铝行业碳减排动向,通过建立碳审计评价指标体系,以中国铝业为典型代表,对其碳审计绩效进行全面评估,得出结论如下:

第一,通过前期开展梳理文献工作可以发现,基于国家双碳战略,国家对重点行业碳减排工作十分重视,先后公布温室气体排放核算指南涵盖了电力、钢铁、铝、水泥等 24 个行业。我国碳审计研究还处于探索阶段,目前我国学者在石油、电力、水泥等行业碳审计评价体系已有一定的探索,铝行业作为国民经济重要基础产业之一,碳排放量在我国工业占有一定比例。因此,为了国家双碳战略的顺利实施,为了有效地监督铝企业的碳排放行为,建立一套完善的碳审计评价指标体系是十分必要的。

第二,本文利用 DSR 模型对铝行业碳审计评价指标体系进行构建,具有一定的科学性和可行性。以 DSR 模型中目标因素、因素因素和响应因素为基础,选取合适的指标划入相应范围,并分析指标之间的关联性,从不同维度对被审计目标作出综合评价。以中国铝业作为被审计对象,运用 dematel-anp 法和熵权法相结合的组合赋权法对各指标权重进行赋值,同时结合条例标准、目标标杆、行业标杆和历史标准建立评价标准。

第三,本文选取三角模糊综合评价法作为评价法,能够对铝行业企业碳减排

情况作出合理评价。应用三角模糊综合评价法得出中国铝业 2017-2021 年期间碳减排工作不断进步，到 2021 年时评价结果为优秀。结合评价结果和企业实际数据，对企业碳减排工作作出肯定的同时，在电力脱碳、生产降碳、降碳管理和再生铝回收四个方面提出建议，为企业优化低碳工作提供参考。

6.2 研究展望

本文在研究过程中，还存在以下局限性。

第一，铝企业碳审计评价体系是碳审计评价体系的细划分，具有较高的专业性和微观性，本文根据国内外政策指导、铝企业碳排放识别、国内外相关研究，探索性的筛选部分指标构建了铝行业碳审计评价体系并选取代表性案例企业进行评价。但由于缺乏实际工作实践，这些指标是否能够准确反映中国铝业碳减排的实际情况以及对于铝行业其他企业是否具有适用性还需经过进一步的验证。希望今后有更多学者开展相关研究，通过实证研究分析体系内在逻辑，对评价指标体系进行完善和总结，为开展碳审计工作提供指导意见。

第二，本文在选取评价指标的过程中，部分关键性指标由于缺乏连续稳定的数据支撑被筛除，影响综合评价结论。此外，由于铝行业内其他企业碳审计披露水平远低于中国铝业，无法对行业内其他企业进行对比评价。希望国家不断强化企业碳排放披露责任，按行业出台有关政策指导企业碳信息披露，增强指标构建的科学性和验证指标体系评价的适用性。

第三，碳审计评价标准的设定和实施对于评估结果的准确性至关重要，采用科学、客观、公正的评价标准，将大大提高评估的可靠性。但评价标准的建立工作复杂多样，涉及多个学科领域。应由有关部门牵头相关领域专家学者通力合作尽快完善统一各行业碳审计工作的评价标准。

第四，不同企业指标体系之间既有一定共性也有差异性。在国家公布的 24 个重点减排行业中，本文只选取了铝企业中一个企业的作为研究对象。为了尽快发挥碳审计在碳减排工作中的作用，应当对其他具有代表性的铝企业开展碳审计，从而总结出具有一定普适性铝行业碳审计评价指标体系，做到铝企业碳审计评价横向纵向可比。在此基础上类比到各个重点各个行业当中，促进“双碳”战略的早日实现。

参考文献

- [1]Alan C.McKinnon.Product-level carbon auditing of supply chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management,2010,40:42-60.
- [2]American Institute of Certified Public Accountants. Attest Engagements on Greenhouse Gas Emissions Information,2003.
- [3]Andrew Treason.Local companies yet to come clean on carbon audits [J].Australian,2007(10).
- [4]Anonymous. Retailers urged to back carbon audits[J]. ProQuest,2010,153(17).
- [5]Andrew C,Lovell,Developing a Carbon Audit Framework To Support Corporate Level Carbon Reduction Strategies[J].University of East Anglia,2008(8):29-41.
- [6]Arrhenius,S.1896.On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground[J].Phil.Mag.,41:237-276.
- [7]Australian Department of Climate Change. National Greenhouse and Energy Reporting Guidelines,2008.
- [8]Babatunde A.Anifowose,Modupe T.Odubela.Oil facility operations:A multivariate analyses of water pollution parameters[J].Journal of Cleaner Production,2018(4):187.
- [9]Brendan P.Malone,Quentin Styc,etal.Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale:A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data[J].Geoderma,2017(9):290.
- [10]Clement Mouchet,Neil Urquhart,Rob Kemmer.Techniques for Auditing the ICT Carbon Footprint of an Organisation[J].International Journal of Green Computing(IJGC),2014(1):5.
- [11]Halsnaes,K.Comparable Assessment of National GHG Abatement Costs.Energy Policy,1994,22(11):925-934.
- [12]ISO.ISO 14064-3:Greenhouse Gases-Part3Specification with Guidance for the Validation and verification of Greenhouse Gases Assertions,2006.
- [13]J.J.de Gruijter,A.B.McBratney,et al.Farm-scale soil carbon auditing[J].Geoderma,2016(06).

- [14] Joseph H.K.Lai, Francis W.H. Yik, C.S. Man. Carbon audit: a literature review and an empirical study on a hotel[J]. *Facilities*, 2012, 30(9/10).
- [15] Jonathan Lash, Fred Wellington. competitive advantage on a warming planet[J]. *Harvard Business Review*, 2007(3):21-25 .
- [16] Lai, Joseph H K, Yik, Francis WH, Man, C S. Carbon audit: a literature review and an empirical study on a hotel[J]. *Facilities*, 2012:309.
- [17] Nava Subramaniam, Dina Wahyuni, Barry J. Cooper, et al. Integration of carbon risks and opportunities in enterprise risk management systems: evidence from Australian firms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(06):96.
- [18] Patlitzianas KD. Sustainable Energy Policy Indicators: Review and Recommendations. *Renewable Energy*, 2008, (33):966-973.
- [19] Salvador Enrique Puliafito, Josh Lusi Puliafito, Mariana Conte Grand, Modeling population dynamics and economic growth as competing species: An application to CO₂ global emissions[J]. *Ecological Economics*, 2008, (65):602-615.
- [20] Shiming Deng, John Burnett. Energy use and management in hotels in Hong Kong[J]. *International Journal of Hospitality Management*, 2012(04):24.
- [21] Shrestha R.M. Timilsina G.R. Factors Affecting CO₂ Intensities of Power Sector in Asia[J]. A Divisia Decomposition Analysis, *Energy Economics*, 1996, 18(4):283-293.
- [22] The White Paper on energy: will it really meet the United Kingdom's energy challenge?[J]. Subhes C. Bhattacharyya. *International Journal of Energy Sector Management*. 2007(4).
- [23] Torvanger A. Manufacturing Sector Carbon Dioxide Emissions in Nine DECD Countries, 1973-87: A Divisia Index Decomposition to Changes in fuel Mix, Emission Coefficients, Industry Structure[J]. *Energy Intensities and International Structure Energy Economics*, 1991, 13(3):168-186.
- [24] WBCS&WRI. The greenhouse gas protocol: A Corporate Account Reporting Standard (Revised Edition), 2004.
- [25] YANG Yi, GUO Yao-qi, ZHU Wen-song, et al. Environmental impact assessment of

- China's primary aluminum based on life cycle assessment[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2019,29(8):1784-1792.
- [26]从哥本哈根到巴黎[M].清华大学出版社,朱松丽,2016.
- [27]查奇芬,董洁,陈祖功.主客观组合赋权法在科技成果转化评价分析中的应用[J].统计与决策,2009(16):152-154.
- [28]陈瑶.低碳审计评价指标体系构建及应用研究[D].中南林业科技大学,2016.
- [29]陈衍泰,陈国宏,李美娟.综合评价方法分类及研究进展[J].管理科学学报,2004(02):69-79.
- [30]陈洋洋,王宗军.基于层次分析法下低碳审计评价指标体系初探[J].审计研究,2016(06):64-71.
- [31]董华涛.基于供应链视角的企业碳审计流程设计[J].财会通讯,2018(01):97-100.
- [32]第十三届全国人民代表大会第四次会议关于国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要的决议[J].中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报,2021(03):428-502.
- [33]发改委公布发电等10行业温室气体排放核算方法[J].有色冶金节能,2014,30(01):60.
- [34]傅双双.企业碳审计评价指标体系构建及其应用[D].江南大学,2014.
- [35]高建慧.低碳审计评价指标体系的构建——基于层次分析法(AHP)的设计理念[J].商业会计,2016(11):38-40.
- [36]国家统计局:《统计上大中小微型企业划分办法》[J].轻工标准与质量,2011(05):24.
- [37]国家危险废物名录(2021年版)[J].中华人民共和国国务院公报,2021(04):18-46.
- [38]高强,李秀莲,张旭丽,王春芝.碳审计相关问题探讨——基于政府审计公告的分析[J].财会通讯,2014(16):101-103.
- [39]管亚梅,李园园.“一带一路”战略下碳审计的实施策略[J].会计之友,2016(14):116-118.
- [40]管亚梅.免疫系统论下的碳审计模式构建[J].管理现代化,2013(05):26-28+40.
- [41]管亚梅,张桐.基于雾霾治理视角的碳审计指标构建与检验[J].经济与管理,2016,30(02):48-54.

- [42] 高铁男, 巩建强. 我国道路交通事故特征及致因分析[J/OL]. 安全与环境学报:1-12[2022-11-26].
- [43] 郭博昊. 有色金属行业碳达峰实施方案发布[N]. 证券时报, 2022-11-16(A02).
- [44] 国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016(33):15-21.
- [45] 胡钧铭, 黄洪钟, 黄鹏. 基于模糊层次分析法的工业机器人可靠性分配[J]. 科学与技术, 2021, 21(21):8965-8969.
- [46] 黄奇帆. 伟大复兴的关键阶段——学习《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》的认识和体会[J]. 人民论坛, 2021(15):6-10.
- [47] 黄溶冰, 王丽艳. 环境审计在碳减排中的应用: 案例与启示[J]. 中央财经大学学报, 2011(08):86-90.
- [48] 黄松琦. 水泥企业碳审计评价指标体系的构建及应用研究[D]. 四川师范大学, 2021.
- [49] 何雪峰, 刘斌. 碳审计理论结构初探[J]. 会计之友(下旬刊), 2010(10):25-26.
- [50] 《京都议定书》的前世、今生和未来[J]. 苏杨. 生态经济, 2005(04).
- [51] 解读《“十二五”节能减排综合性工作方案》[J]. 有色冶金节能, 2012, 28(02):1-5+10.
- [52] 金密, 张亚连. 化工企业碳审计评价指标体系构建——以中石化为例[J]. 财会月刊, 2018(21):103-110.
- [53] 蒋青, 苏义坤. 基于 DEMATEL-ANP 与质量屋模型的住宅工程质量综合评估[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1):888-892.
- [54] 李长亮, 李昊儒, 周美秀. 乡村振兴评价指标体系构建及实证[J/OL]. 统计与决策, 2022(22):66-70[2022-11-26].
- [55] 李海燕. 电力企业低碳审计评价指标体系的构建——基于 DSR-AHP[J]. 财会月刊, 2017(07):119-123.
- [56] 李鸿儒. 能源企业低碳审计评价指标体系构建应用研究[D]. 哈尔滨商业大学, 2019.
- [57] 卢浩浩, 王婉君, 代敏, 陈伟强, 石磊. 中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析

- 及减排对策[J].中国环境科学,2021,41(01):451-462.
- [58]刘宏博,郝雅琼,吴昊,田书磊,黄启飞.铝冶炼行业危险废物产生和利用处置现状与管理对策建议[J].环境工程技术学报,2021,11(06):1273-1280.
- [59]刘金玲.构建钢铁产业低碳经济评价指标体系及在鞍钢的应用研究[D].辽宁科技大学,2012.
- [60]李孟哲.环境价值链的碳审计评价指标体系的构建[J].财政监督,2016(13):97-99.
- [61]李明阳,高峰,孙博学,聂祚仁.基于目标情景的中国铝生产碳减排与碳达峰分析[J].中国有色金属学报,2022,32(01):148-158.
- [62]李曼.基于 ANP-灰色模糊评判的防火墙产品项目风险管理研究[D].北京邮电大学,2021.
- [63]李琼.嵩山低碳旅游发展评价与建议[J].河南科学,2015,33(11):2065-2070.
- [64]李玉娥,李高.气候变化影响与适应问题的谈判进展[J].气候变化研究进展,2007(05):303-307.
- [65]李治军,王涛.基于改进组合赋权法的区域水资源承载力评价[J].中国农村水利水电,2022(10):112-118.
- [66]马德里气候大会盘点及全球气候治理展望[J].樊星,王际杰,王田,高翔.气候变化研究进展.2020(03).
- [67]钱英莲,樊鹏燕.煤炭企业低碳审计内容与方法研究[J].会计之友(上旬刊),2010(11):14-17.
- [68]钱纯,苏宁,孟南.关于我国碳审计主体的思考[J].会计之友,2011(17):76~78.
- [69]施然,李长楚.基于 PSR 模型的碳交易审计评价指标体系研究[J].商业会计,2020(09):27-30.
- [70]宋双双,左忠义.基于 DEMATEL-ANP 与熵权的社会风险评价指标权重分析[J].大连交通大学学报,2016,37(03):1-5.
- [71]苏为华.多指标综合评价理论与方法问题研究[D].厦门大学,2000.
- [72]碳达峰、碳中和 100 问[M].人民日报出版社,陈迎,2021.11.
- [73]滕熙玉,李石新.基于熵权 TOPSIS 法的 JK 文化财务风险评价[J].湖南科技大学

- 学报(自然科学版),2022,37(03):104-112.
- [74]王爱国.国外的碳审计及其对我国的启示[J].审计研究,2012(05):36-41.
- [75]王爱华,李双双.企业低碳审计 DRS 模型评价指标体系构建[J].审计与经济研究,2016,31(02):42-51.
- [76]王爱国.国外的碳审计及其对我国的启示[J].审计研究,2012(05):36-41.
- [77]王东.基于三角数模糊层次分析法的商业银行非现场审计风险监测[J].内蒙古科技与经济,2020(18):35-38+58.
- [78]习近平向《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会世界领导人峰会发表书面致辞[N].人民日报,2021-11-02(001).
- [79]徐文杰.沈阳低碳城市评价指标体系与策略研究[D].沈阳建筑大学,2014.
- [80]杨博文.环境责任下我国碳审计与鉴证制度框架的构建[J].南京审计大学学报,2017,14(06):75-84.
- [81]余欢欢.浙江省低碳审计评价指标体系构建[D].湖南大学,2013.
- [82]杨娴雅.电力企业碳审计评价指标体系的构建研究[D].中南林业科技大学,2020.
- [83]张晨羽.基于 DEMATEL-ANP 方法的农村商业银行内部控制评价研究[D].山东财经大学,2022.
- [84]张焕敬.基于 AHP 的河南省低碳审计评价指标体系构建[J].现代商业,2018(28):128-129.
- [85]郑诗礼,叶树峰,王倩,马淑花,王志,孙峙,乔珊,仇小猛,张懿.有色金属工业低碳技术分析思考[J].过程工程学报,2022,22(10):1333-1348.
- [86]郑石桥.论碳审计内容[J/OL].财会月刊:1-4.
- [87]郑石桥.论碳审计本质[J].财会月刊,2022(04):93-97.
- [88]张涛.《2030 年前碳达峰行动方案》解读[J].生态经济,2022,38(01):9-12.
- [89]周旭东,郑石桥.论碳审计需求[J/OL].财会月刊:1-5[2022-03-17].
- [90]翟芸,胡冰,施端阳.基于改进 AHP-熵权法的雷达装备可靠性评估指标赋权方法[J].现代防御技术,2022,50(04):148-155.
- [91]张亚连,金密,樊行健.基于 DSR 模型的碳审计评价指标体系构建[J].财会月刊,2017(21):82-88.

- [92]赵玉珍.基于低碳审计的碳绩效评价指标体系构建[J].中国注册会计师,2017(09):110-113.
- [93]张志强,程国栋,徐中民.可持续发展评估指标、方法及应用研究[J].冰川冻土,2002(04):344-360.

附录 1 铝企业碳审计评价指标体系构建调查问卷

尊敬的专家、学者您好！

我是兰州财经大学的一名研究生，万分感谢您能填写此问卷。本问卷以有色金属铝行业碳审计评价指标体系为调查目标，对其各项指标的相关关系进行分析，不涉及商业用途和其他的非法用途。请您对因素之间的重要性给出判断。最后，再次为您能抽出宝贵的时间思考和填写本问卷，表示最诚挚的感谢。

一、问卷描述

本研究将有色金属铝企业碳审计评价指标体系运用 DSR 模型划分为三个层面，共 27 个指标，您所填的打分具体见下列重要性评价标度表，分值含义如表 1 所示。

表 1 影响关系标度表

重要性关系	无重要性	重要性较小	重要性中等	重要性较大	重要性非常强
数值	0	1	2	3	4

二、问卷内容

各项指标的具体描述如表 2 所示^[58]，请您根据相关描述判断因素之间的重要性相关关系进行评价，完成具体打分。

目标层	因素层	序号	指标层	相关描述
有色金属铝 企业碳审计 评价	驱动因 素 (D)	D1	资产总额	企业资产负债表的资产总计项。
		D2	主营业务收入	企业从事铝生产经营活动所取得的营业收入。
		D3	企业纳税总额	企业本年度纳税总计项
		D4	净资产收益率	企业自有资金获得净收益的能力
		D5	氧化铝生产量	企业本年度生产氧化铝总计项
		D6	电解铝生产量	企业本年度生产电解铝总计项
状态因 素 (S)	S1	二氧化硫排放量	二氧化硫化学式 SO ₂ ，无色气体， 大气主要污染物之一。	
	S2	氮氧化物排放量	企业本年度氮氧化物排放总计量。	

			氮氧化物会降低臭氧浓度，为大气污染物之一。
	S3	烟尘排放量	企业本年度氮氧化物排放总计量，烟尘在大气污染物中有载体作用。
	S4	氧化铝板块二氧化碳排放当量	在氧化铝板块碳排放过程中，不同温室气体以二氧化碳为度量计算温室气体效应
	S5	氧化铝板块二氧化碳排放强度	每单位企业氧化铝生产总值的增长所带来的二氧化碳排放量
	S6	电解铝板块二氧化碳排放当量	在电解铝板块碳排放过程中，不同温室气体以二氧化碳为度量计算温室气体效应
	S7	电解铝板块二氧化碳排放强度	每单位企业电解铝生产总值的增长所带来的二氧化碳排放量
	S8	总体二氧化碳排放当量	企业总体碳排放量计算过程中，不同温室气体以二氧化碳为度量计算温室气体效应
	S9	总二氧化碳排放当量每万元营业收入	企业总体碳排放当量每万元对应的营业收入
	S10	铝灰产生量	危险废物，是电解铝厂熔铸车间的下脚料，同时是再生铝原料之一。处置不当，会造成大气污染
	S11	大修渣产生量	固体危险废物，不合理处置会使废渣表面形成扬尘，二次污染大气
	S12	炭渣产生量	铝电解过程中的固体危险废物，会提高电解铝电能消耗
	S13	总耗煤量	企业本年度生产总消耗煤炭数量
响应因素 (R)	R1	风力发电装机容量	企业本年度内风力发电机总容量
	R2	太阳能发电装机容量	企业本年度内太阳能发电机总容量

量		
R3	铝灰处置量	企业本年度铝灰处置总计量，合理处置会防止造成大气污染，用于再生铝生产可降低企业碳排放
R4	大修渣处置量	企业本年度大修渣处置总计量，采用无害化处理方式可去除含有的粉尘及有害气体，降低大气污染
R5	炭渣处置量	企业本年度炭渣处置总计量，可降低企业能耗，进一步降低企业碳排放
R6	科技降碳技术研发	企业本年度开展降碳技术研发项目
R7	碳排放自愿披露	企业本年度在 ESG 报告、环境报告中公布碳排放等相关信息。
R8	员工低碳教育	本年度企业对企业员工开展低碳教育
R9	企业低碳制度	企业本年度设立遵守的低碳制度

三、填写问卷

因数据较为繁杂，为便于填写和搜集数据，本问卷调查通过问卷星填写，填写地址：<https://www.wjx.cn/vm/mBtzVXN.aspx>



附录2 dematel-anp 计算过程表

表1 直接影响矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
D1	0	14	11	14	13	15	14	10	15	14	12	13	13	14	12	13	12	14	14	14	10	10	11	11	12	11	13	13
D2	16	0	13	17	14	14	14	10	13	14	12	13	13	14	12	13	12	14	15	15	11	11	12	10	10	12	14	13
D3	14	16	0	15	14	14	15	11	13	14	12	13	13	14	12	13	12	14	14	16	11	12	13	11	11	13	13	13
D4	12	14	13	0	13	14	14	13	12	14	12	13	13	14	12	13	12	14	15	16	11	13	13	11	11	11	14	13
D5	15	14	13	14	0	14	11	14	13	15	12	13	14	14	13	13	13	14	16	15	12	14	12	11	12	12	13	11
D6	13	12	12	13	14	0	12	13	13	15	12	13	14	14	13	13	13	14	15	15	12	13	15	12	11	13	12	13
S1	16	14	14	16	14	14	0	13	13	15	12	13	14	14	13	13	13	14	17	16	11	13	15	11	12	15	13	14
S2	14	12	14	13	13	14	12	0	13	15	12	13	14	14	13	13	13	14	16	15	12	12	15	11	12	15	14	15
S3	16	12	13	14	13	15	12	13	0	15	12	13	14	13	13	13	13	14	15	15	14	11	12	12	13	14	12	12
S4	15	15	15	13	13	15	13	13	16	0	13	14	15	14	14	14	14	15	16	16	14	15	15	13	12	14	15	13
S5	15	16	14	14	15	15	15	14	15	16	0	14	15	14	14	14	15	15	16	16	13	15	15	12	13	15	15	12
S6	16	15	12	16	13	15	15	14	15	16	13	0	15	14	13	14	15	15	15	17	12	17	16	11	13	15	17	13

S7	18	17	15	16	13	16	15	14	14	16	13	14	0	14	13	14	14	15	17	17	12	17	14	12	14	13	12	11
S8	15	15	14	16	12	15	15	13	14	16	14	14	15	0	13	14	14	15	18	17	14	16	15	13	12	13	14	13
S9	15	14	14	16	12	15	14	14	14	16	14	14	15	14	0	14	14	15	12	17	15	16	13	15	13	14	16	15
S10	14	16	11	12	12	14	14	13	13	15	13	14	14	13	13	0	13	14	11	16	14	13	15	15	13	14	14	15
S11	13	17	14	15	13	14	14	14	13	15	13	13	14	13	13	13	0	14	14	15	11	13	12	13	13	12	12	11
S12	11	14	15	14	12	14	14	13	13	15	12	13	14	13	12	13	13	0	17	16	13	15	14	10	13	12	14	12
S13	16	14	11	13	16	17	16	17	16	15	15	16	18	15	13	12	11	12	0	14	13	11	10	15	17	14	15	16
R1	15	15	12	13	12	13	13	15	12	15	12	13	14	13	12	13	13	15	15	0	12	15	15	11	14	13	15	13
R2	15	16	14	13	11	13	13	15	13	15	12	13	14	13	12	13	13	15	14	16	0	14	16	12	14	14	15	14
R3	14	16	15	13	11	13	13	15	13	15	12	13	14	13	12	13	13	14	12	17	11	0	13	13	14	12	12	12
R4	12	13	12	13	11	14	15	15	13	15	13	13	14	13	12	13	14	14	11	15	11	14	0	13	13	14	14	14
R5	12	15	15	13	13	14	15	14	13	15	13	13	14	13	12	13	14	15	16	16	12	13	14	0	14	13	14	15
R6	16	16	16	14	15	13	16	15	13	16	14	14	15	13	13	14	15	15	15	16	12	14	15	12	0	15	15	16
R7	16	17	16	15	13	14	14	15	14	15	14	14	15	13	12	13	15	14	14	15	12	14	15	13	15	0	15	16
R8	15	16	15	15	12	12	13	14	14	15	13	15	15	13	12	13	15	14	16	16	13	16	15	12	13	15	0	15
R9	16	17	15	15	14	15	12	15	12	15	13	15	15	13	12	13	15	15	15	15	13	16	13	13	12	16	16	0

表 2 规范化矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
D1	0	0.03562	0.02799	0.03562	0.03308	0.03817	0.03562	0.02545	0.03817	0.03562	0.03053	0.033080	0.033080	0.035620
D2	0.04071	0	0.03308	0.04326	0.03562	0.03562	0.03562	0.02545	0.03308	0.03562	0.03053	0.033080	0.033080	0.035620
D3	0.03562	0.04071	0	0.03817	0.03562	0.03562	0.03817	0.02799	0.03308	0.03562	0.03053	0.033080	0.033080	0.035620
D4	0.03053	0.03562	0.03308	0	0.03308	0.03562	0.03562	0.03308	0.03053	0.03562	0.03053	0.033080	0.033080	0.035620
D5	0.03817	0.03562	0.03308	0.03562	0	0.03562	0.02799	0.03562	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.035620
D6	0.03308	0.03053	0.03053	0.03308	0.03562	0	0.03053	0.03308	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.035620
S1	0.04071	0.03562	0.03562	0.04071	0.03562	0.03562	0	0.03308	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.035620
S2	0.03562	0.03053	0.03562	0.03308	0.03308	0.03562	0.03053	0	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.035620
S3	0.04071	0.03053	0.03308	0.03562	0.03308	0.03817	0.03053	0.03308	0	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.033080
S4	0.03817	0.03817	0.03817	0.03308	0.03308	0.03817	0.03308	0.03308	0.04071	0	0.03308	0.035620	0.038170	0.035620
S5	0.03817	0.04071	0.03562	0.03562	0.03817	0.03817	0.03817	0.03562	0.03817	0.04071	0	0.035620	0.038170	0.035620
S6	0.04071	0.03817	0.03053	0.04071	0.03308	0.03817	0.03817	0.03562	0.03817	0.04071	0.03308	0	0.038170	0.035620
S7	0.04580	0.04326	0.03817	0.04071	0.03308	0.04071	0.03817	0.03562	0.03562	0.04071	0.03308	0.035620	0	0.035620
S8	0.03817	0.03817	0.03562	0.04071	0.03053	0.03817	0.03817	0.03308	0.03562	0.04071	0.03562	0.035620	0.038170	0

续表 2 规范化矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S9	0.03817	0.03562	0.03562	0.04071	0.03053	0.03817	0.03562	0.03562	0.03562	0.04071	0.03562	0.03562	0.038170	0.035620
S10	0.03562	0.04071	0.02799	0.03053	0.03053	0.03562	0.03562	0.03308	0.03308	0.03817	0.03308	0.03562	0.035620	0.033080
S11	0.03308	0.04326	0.03562	0.03817	0.03308	0.03562	0.03562	0.03562	0.03308	0.03817	0.03308	0.033080	0.035620	0.033080
S12	0.02799	0.03562	0.03817	0.03562	0.03053	0.03562	0.03562	0.03308	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.033080
S13	0.04071	0.03562	0.02799	0.03308	0.04071	0.04326	0.04071	0.04326	0.04071	0.03817	0.03817	0.040710	0.045800	0.038170
R1	0.03817	0.03817	0.03053	0.03308	0.03053	0.03308	0.03308	0.03817	0.03053	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.033080
R2	0.03817	0.04071	0.03562	0.03308	0.02799	0.03308	0.03308	0.03817	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.033080
R3	0.03562	0.04071	0.03817	0.03308	0.02799	0.03308	0.03308	0.03817	0.03308	0.03817	0.03053	0.033080	0.035620	0.033080
R4	0.03053	0.03308	0.03053	0.03308	0.02799	0.03562	0.03817	0.03817	0.03308	0.03817	0.03308	0.033080	0.035620	0.033080
R5	0.03053	0.03817	0.03817	0.03308	0.03308	0.03562	0.03817	0.03562	0.03308	0.03817	0.03308	0.033080	0.035620	0.033080
R6	0.04071	0.04071	0.04071	0.03562	0.03817	0.03308	0.04071	0.03817	0.03308	0.04071	0.03562	0.035620	0.038170	0.033080
R7	0.04071	0.04326	0.04071	0.03817	0.03308	0.03562	0.03562	0.03817	0.03562	0.03817	0.03562	0.035620	0.038170	0.033080
R8	0.03817	0.04071	0.03817	0.03817	0.03053	0.03053	0.03308	0.03562	0.03562	0.03817	0.03308	0.038170	0.038170	0.033080
R9	0.04071	0.04326	0.03817	0.03817	0.03562	0.03817	0.03053	0.03817	0.03053	0.03817	0.03308	0.038170	0.038170	0.033080

续表 2 规范化矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
D1	0.03053	0.03308	0.03053	0.03562	0.03562	0.03562	0.02545	0.02545	0.02799	0.02799	0.03053	0.02799	0.03308	0.03308
D2	0.03053	0.03308	0.03053	0.03562	0.03817	0.03817	0.02799	0.02799	0.03053	0.02545	0.02545	0.03053	0.03562	0.03308
D3	0.03053	0.033080	0.03053	0.03562	0.03562	0.04071	0.02799	0.03053	0.03308	0.02799	0.02799	0.03308	0.03308	0.03308
D4	0.03053	0.03308	0.03053	0.03562	0.03817	0.04071	0.02799	0.03308	0.03308	0.02799	0.02799	0.02799	0.03562	0.03308
D5	0.03308	0.03308	0.03308	0.03562	0.04071	0.03817	0.03053	0.03562	0.03053	0.02799	0.03053	0.03053	0.03308	0.02799
D6	0.03308	0.03308	0.03308	0.03562	0.03817	0.03817	0.03053	0.03308	0.03817	0.03053	0.02799	0.03308	0.03053	0.03308
S1	0.03308	0.03308	0.03308	0.03562	0.04326	0.04071	0.02799	0.03308	0.03817	0.02799	0.03053	0.03817	0.03308	0.03562
S2	0.03308	0.03308	0.03308	0.03562	0.04071	0.03817	0.03053	0.03053	0.03817	0.02799	0.03053	0.03817	0.03562	0.03817
S3	0.03308	0.03308	0.03308	0.03562	0.03817	0.03817	0.03562	0.02799	0.03053	0.03053	0.03308	0.03562	0.03053	0.03053
S4	0.03562	0.03562	0.03562	0.03817	0.04071	0.04071	0.03562	0.03817	0.03817	0.03308	0.03053	0.03562	0.03817	0.03308
S5	0.03562	0.03562	0.03817	0.03817	0.04071	0.04071	0.03308	0.03817	0.03817	0.03053	0.03308	0.03817	0.03817	0.03053
S6	0.03308	0.03562	0.03817	0.03817	0.03817	0.04326	0.03053	0.04326	0.04071	0.02799	0.03308	0.03817	0.04326	0.03308
S7	0.03308	0.03562	0.03562	0.03817	0.04326	0.04326	0.03053	0.04326	0.03562	0.03053	0.03562	0.03308	0.03053	0.02799
S8	0.03308	0.03562	0.03562	0.03817	0.04580	0.04326	0.03562	0.04071	0.03817	0.03308	0.03053	0.03308	0.03562	0.03308

续表 2 规范化矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
S9	0	0.03562	0.03562	0.03817	0.03053	0.04326	0.03817	0.04071	0.03308	0.03817	0.03308	0.03562	0.04071	0.03817
S10	0.03308	0	0.03308	0.03562	0.02799	0.04071	0.03562	0.03308	0.03817	0.03817	0.03308	0.03562	0.03562	0.03817
S11	0.03308	0.03308	0	0.03562	0.03562	0.03817	0.02799	0.03308	0.03053	0.03308	0.03308	0.03053	0.03053	0.02799
S12	0.03053	0.03308	0.03308	0	0.04326	0.04071	0.03308	0.03817	0.03562	0.02545	0.03308	0.03053	0.03562	0.03053
S13	0.03308	0.03053	0.02799	0.03053	0	0.03562	0.03308	0.02799	0.02545	0.03817	0.04326	0.03562	0.03817	0.04071
R1	0.03053	0.03308	0.03308	0.03817	0.03817	0	0.03053	0.03817	0.03817	0.02799	0.03562	0.03308	0.03817	0.03308
R2	0.03053	0.03308	0.03308	0.03817	0.03562	0.04071	0	0.03562	0.04071	0.03053	0.03562	0.03562	0.03817	0.03562
R3	0.03053	0.03308	0.03308	0.03562	0.03053	0.04326	0.02799	0	0.03308	0.03308	0.03562	0.03053	0.03053	0.03053
R4	0.03053	0.03308	0.03562	0.03562	0.02799	0.03817	0.02799	0.03562	0	0.03308	0.03308	0.03562	0.03562	0.03562
R5	0.03053	0.03308	0.03562	0.03817	0.04071	0.04071	0.03053	0.03308	0.03562	0	0.03562	0.03308	0.03562	0.03817
R6	0.03308	0.03562	0.03817	0.03817	0.03817	0.04071	0.03053	0.03562	0.03817	0.03053	0	0.03817	0.03817	0.04071
R7	0.03053	0.03308	0.03817	0.03562	0.03562	0.03817	0.03053	0.03562	0.03817	0.03308	0.03817	0	0.03817	0.04071
R8	0.03053	0.03308	0.03817	0.03562	0.04071	0.04071	0.03308	0.04071	0.03817	0.03053	0.03308	0.03817	0	0.03817
R9	0.03053	0.03308	0.03817	0.03817	0.03817	0.03817	0.03308	0.04071	0.03308	0.03308	0.03053	0.04071	0.04071	0

表 3 综合影响矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
D1	0.55600	0.59884	0.54507	0.57659	0.52811	0.57931	0.55998	0.54445	0.55204	0.60586	0.51553	0.54839	0.57685	0.55104
D2	0.60857	0.57818	0.56232	0.59685	0.54247	0.59008	0.57274	0.55703	0.55978	0.61967	0.52729	0.56091	0.59003	0.56360
D3	0.61174	0.62534	0.53771	0.59982	0.54950	0.59773	0.58257	0.56678	0.56704	0.62778	0.53418	0.56820	0.59774	0.57090
D4	0.59806	0.61155	0.56147	0.55429	0.53916	0.58904	0.57178	0.56334	0.55642	0.61867	0.52642	0.55997	0.58908	0.56263
D5	0.61592	0.62243	0.57144	0.59911	0.51671	0.59955	0.57481	0.57570	0.56883	0.63206	0.53582	0.56992	0.60197	0.57262
D6	0.60689	0.61340	0.56515	0.59257	0.54727	0.56101	0.57316	0.56947	0.56485	0.62772	0.53213	0.56598	0.59783	0.56863
S1	0.64179	0.64631	0.59569	0.62681	0.57211	0.62250	0.56978	0.59531	0.59056	0.65618	0.55637	0.59176	0.62500	0.59445
S2	0.62373	0.62808	0.58335	0.60666	0.55780	0.60947	0.58679	0.55091	0.57822	0.64252	0.54475	0.57941	0.61198	0.58202
S3	0.62014	0.61959	0.57319	0.60089	0.55039	0.60372	0.57893	0.57507	0.53850	0.63396	0.53743	0.57163	0.60377	0.57193
S4	0.65824	0.66782	0.61565	0.63804	0.58644	0.64318	0.61959	0.61291	0.61513	0.63880	0.57518	0.61159	0.64579	0.61189
S5	0.67083	0.68293	0.62500	0.65268	0.60244	0.65543	0.63619	0.62701	0.62442	0.69085	0.55414	0.62325	0.65811	0.62359
S6	0.67291	0.68032	0.62003	0.65716	0.59739	0.65514	0.63594	0.62682	0.62416	0.69059	0.58593	0.58864	0.65785	0.62333
S7	0.67376	0.68106	0.62343	0.65337	0.59408	0.65382	0.63238	0.62307	0.61824	0.68658	0.58253	0.61940	0.61726	0.61982
S8	0.66607	0.67580	0.62056	0.65277	0.59112	0.65088	0.63181	0.62030	0.61768	0.68600	0.58443	0.61891	0.65352	0.58483

续表 3 综合影响矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S9	0.66777	0.67530	0.62237	0.65450	0.59257	0.65245	0.63098	0.62424	0.61919	0.68780	0.58590	0.62048	0.65513	0.62077
S10	0.63128	0.64530	0.58337	0.61171	0.56209	0.61674	0.59868	0.58992	0.58515	0.65032	0.55367	0.58873	0.61928	0.58662
S11	0.61727	0.63577	0.57958	0.60753	0.55425	0.60548	0.58776	0.58133	0.57442	0.63834	0.54351	0.57555	0.60789	0.57592
S12	0.61313	0.62926	0.58246	0.60561	0.55231	0.60600	0.58828	0.57967	0.57494	0.63892	0.54165	0.57613	0.60853	0.57641
S13	0.66877	0.67341	0.61364	0.64581	0.60082	0.65567	0.63407	0.62977	0.62247	0.68375	0.58684	0.62371	0.66068	0.62164
R1	0.62558	0.63468	0.57819	0.60619	0.55495	0.60654	0.58874	0.58716	0.57538	0.64201	0.54428	0.57892	0.61144	0.57918
R2	0.63948	0.65120	0.59590	0.61975	0.56495	0.62008	0.60188	0.60013	0.59059	0.65628	0.55641	0.59181	0.62503	0.59208
R3	0.61488	0.62861	0.57757	0.59811	0.54518	0.59841	0.58088	0.57925	0.56997	0.63344	0.53695	0.57111	0.60319	0.57145
R4	0.61093	0.62235	0.57130	0.59889	0.54586	0.60155	0.58632	0.58015	0.57071	0.63432	0.54006	0.57190	0.60404	0.57216
R5	0.63446	0.65094	0.60022	0.62179	0.57169	0.62453	0.60860	0.59976	0.59250	0.65843	0.56062	0.59376	0.62712	0.59403
R6	0.67491	0.68475	0.63138	0.65437	0.60401	0.65233	0.64017	0.63093	0.62118	0.69256	0.59000	0.62484	0.65974	0.62278
R7	0.66680	0.67890	0.62386	0.64887	0.59206	0.64680	0.62781	0.62333	0.61604	0.68187	0.58292	0.61732	0.65178	0.61525
R8	0.65531	0.66729	0.61294	0.63992	0.58146	0.63317	0.61682	0.61253	0.60761	0.67249	0.57259	0.61123	0.64288	0.60676
R9	0.66349	0.67561	0.61844	0.64566	0.59145	0.64597	0.61993	0.62031	0.60831	0.67851	0.57769	0.61666	0.64860	0.61223

续表 3 综合影响矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
D1	0.51030	0.53573	0.54077	0.57874	0.59895	0.62879	0.49279	0.55005	0.55223	0.49080	0.51824	0.53990	0.56420	0.54349
D2	0.52192	0.54792	0.55309	0.59191	0.61495	0.64556	0.50644	0.56513	0.56728	0.49963	0.52533	0.55461	0.57949	0.55589
D3	0.52873	0.55507	0.56037	0.59965	0.62057	0.65638	0.51306	0.57496	0.57717	0.50857	0.53463	0.56430	0.58466	0.56317
D4	0.52105	0.54701	0.55222	0.59094	0.61390	0.64689	0.50562	0.56901	0.56882	0.50121	0.52688	0.55142	0.57854	0.55502
D5	0.53273	0.55674	0.56441	0.60143	0.62711	0.65597	0.51703	0.58142	0.57649	0.51018	0.53874	0.56359	0.58640	0.56011
D6	0.52905	0.55289	0.56060	0.59730	0.62039	0.65143	0.51349	0.57515	0.57967	0.50908	0.53267	0.56213	0.58000	0.56097
S1	0.55300	0.57800	0.58603	0.62441	0.65330	0.68340	0.53436	0.60122	0.60576	0.52978	0.55939	0.59241	0.60893	0.58892
S2	0.54149	0.56594	0.57387	0.61139	0.63739	0.66680	0.52561	0.58638	0.59327	0.51872	0.54771	0.58024	0.59858	0.57907
S3	0.53431	0.55841	0.56616	0.60327	0.62662	0.65791	0.52336	0.57603	0.57830	0.51410	0.54276	0.57010	0.58583	0.56425
S4	0.57165	0.59745	0.60575	0.64525	0.66999	0.70359	0.55741	0.62378	0.62361	0.55026	0.57598	0.60744	0.63164	0.60383
S5	0.58255	0.60884	0.61969	0.65754	0.68280	0.71701	0.56558	0.63565	0.63548	0.55832	0.58936	0.62138	0.64366	0.61300
S6	0.57993	0.60862	0.61949	0.65730	0.68015	0.71913	0.56295	0.64022	0.63766	0.55573	0.58915	0.62115	0.64815	0.61515
S7	0.57661	0.60511	0.61340	0.65350	0.68096	0.71497	0.55963	0.63633	0.62915	0.55484	0.58807	0.61272	0.63258	0.60684
S8	0.57609	0.60456	0.61293	0.65293	0.68275	0.71436	0.56398	0.63357	0.63104	0.55681	0.58290	0.61229	0.63682	0.61107

续表 3 综合影响矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
S9	0.54554	0.60618	0.61467	0.65474	0.67034	0.71629	0.56785	0.63537	0.62810	0.56296	0.58671	0.61631	0.64325	0.61741
S10	0.54801	0.54082	0.58092	0.61891	0.63324	0.67733	0.53671	0.59596	0.60059	0.53447	0.55666	0.58486	0.60585	0.58601
S11	0.53802	0.56229	0.53803	0.60745	0.62864	0.66254	0.51974	0.58478	0.58231	0.51996	0.54638	0.56925	0.58987	0.56574
S12	0.53609	0.56276	0.57056	0.57354	0.63621	0.66549	0.52501	0.59015	0.58762	0.51337	0.54701	0.56986	0.59517	0.56868
S13	0.57619	0.59991	0.60604	0.64594	0.63926	0.70729	0.56170	0.62186	0.61935	0.56147	0.59469	0.61490	0.63926	0.61827
R1	0.53867	0.56550	0.57340	0.61328	0.63452	0.62955	0.52511	0.59297	0.59282	0.51823	0.55199	0.57499	0.60044	0.57386
R2	0.55066	0.57810	0.58619	0.62692	0.64625	0.68353	0.50717	0.60372	0.60838	0.53217	0.56420	0.59021	0.61378	0.58905
R3	0.53149	0.55799	0.56572	0.60283	0.61902	0.66219	0.51571	0.54830	0.58027	0.51597	0.54458	0.56490	0.58533	0.56376
R4	0.53220	0.55873	0.56897	0.60362	0.61749	0.65834	0.51645	0.58363	0.54912	0.51672	0.54296	0.57052	0.59086	0.56928
R5	0.55250	0.57996	0.59046	0.62894	0.65321	0.68575	0.53859	0.60333	0.60554	0.50429	0.56604	0.58979	0.61338	0.59330
R6	0.58161	0.61037	0.62127	0.65921	0.68217	0.71879	0.56455	0.63489	0.63707	0.55967	0.55875	0.62301	0.64534	0.62408
R7	0.57222	0.60067	0.61385	0.64894	0.67159	0.70779	0.55771	0.62721	0.62943	0.55528	0.58837	0.57876	0.63757	0.61664
R8	0.56431	0.59238	0.60542	0.63997	0.66697	0.70040	0.55243	0.62336	0.62078	0.54536	0.57573	0.60708	0.59209	0.60585
R9	0.56938	0.59770	0.61081	0.64809	0.67064	0.70431	0.55735	0.62891	0.62161	0.55257	0.57845	0.61480	0.63681	0.57447

表 4 加权超矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
D1	0.03122	0.03311	0.03285	0.03320	0.03324	0.03334	0.03326	0.03271	0.03345	0.03310	0.03312	0.03315	0.03305	0.03330
D2	0.03417	0.03197	0.03389	0.03437	0.03414	0.03396	0.03402	0.03346	0.03392	0.03385	0.03388	0.03391	0.03381	0.03406
D3	0.03435	0.03458	0.03241	0.03454	0.03458	0.03440	0.03460	0.03405	0.03436	0.03429	0.03432	0.03435	0.03425	0.03450
D4	0.03358	0.03382	0.03384	0.03192	0.03393	0.03390	0.03396	0.03384	0.03371	0.03380	0.03382	0.03386	0.03375	0.03400
D5	0.03459	0.03442	0.03444	0.03450	0.03252	0.03450	0.03414	0.03458	0.03447	0.03453	0.03442	0.03446	0.03449	0.03460
D6	0.03408	0.03392	0.03406	0.03412	0.03444	0.03229	0.03404	0.03421	0.03422	0.03429	0.03419	0.03422	0.03426	0.03436
S1	0.03604	0.03574	0.03590	0.03609	0.03601	0.03582	0.03384	0.03576	0.03578	0.03584	0.03574	0.03578	0.03581	0.03592
S2	0.03502	0.03473	0.03516	0.03493	0.03511	0.03507	0.03485	0.03309	0.03503	0.03510	0.03500	0.03503	0.03507	0.03517
S3	0.03482	0.03426	0.03455	0.03460	0.03464	0.03474	0.03438	0.03455	0.03263	0.03463	0.03453	0.03456	0.03460	0.03456
S4	0.03696	0.03693	0.03711	0.03674	0.03691	0.03701	0.03680	0.03682	0.03727	0.03490	0.03695	0.03698	0.03700	0.03698
S5	0.03767	0.03776	0.03767	0.03758	0.03792	0.03772	0.03778	0.03767	0.03783	0.03774	0.03560	0.03768	0.03771	0.03768
S6	0.03779	0.03762	0.03737	0.03784	0.03760	0.03770	0.03777	0.03765	0.03782	0.03772	0.03764	0.03559	0.03769	0.03767
S7	0.03783	0.03766	0.03758	0.03762	0.03739	0.03763	0.03756	0.03743	0.03746	0.03751	0.03743	0.03745	0.03537	0.03745
S8	0.03740	0.03737	0.03740	0.03759	0.03720	0.03746	0.03752	0.03726	0.03743	0.03747	0.03755	0.03742	0.03745	0.03534

续表 4 加权超矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S9	0.03750	0.03734	0.03751	0.03769	0.03730	0.03755	0.03747	0.03750	0.03752	0.03757	0.03764	0.03751	0.03754	0.03751
S10	0.03545	0.03568	0.03516	0.03522	0.03538	0.03549	0.03556	0.03544	0.03545	0.03552	0.03557	0.03559	0.03548	0.03545
S11	0.03466	0.03515	0.03493	0.03498	0.03488	0.03484	0.03491	0.03492	0.03480	0.03487	0.03492	0.03480	0.03483	0.03480
S12	0.03443	0.03479	0.03511	0.03487	0.03476	0.03487	0.03494	0.03482	0.03484	0.03490	0.03480	0.03483	0.03487	0.03483
S13	0.03755	0.03724	0.03699	0.03719	0.03781	0.03773	0.03766	0.03783	0.03772	0.03735	0.03770	0.03771	0.03786	0.03756
R1	0.03513	0.03509	0.03485	0.03491	0.03493	0.03491	0.03497	0.03527	0.03486	0.03507	0.03497	0.03500	0.03504	0.03500
R2	0.03591	0.03601	0.03592	0.03569	0.03556	0.03568	0.03575	0.03605	0.03578	0.03585	0.03575	0.03578	0.03581	0.03578
R3	0.03453	0.03476	0.03481	0.03444	0.03431	0.03444	0.03450	0.03480	0.03453	0.03460	0.03450	0.03453	0.03456	0.03453
R4	0.03431	0.03441	0.03443	0.03449	0.03436	0.03462	0.03482	0.03485	0.03458	0.03465	0.03470	0.03458	0.03461	0.03457
R5	0.03563	0.03599	0.03618	0.03580	0.03598	0.03594	0.03615	0.03603	0.03590	0.03597	0.03602	0.03590	0.03593	0.03590
R6	0.03790	0.03786	0.03806	0.03768	0.03802	0.03754	0.03802	0.03790	0.03764	0.03783	0.03791	0.03778	0.03780	0.03763
R7	0.03744	0.03754	0.03760	0.03736	0.03726	0.03722	0.03729	0.03744	0.03733	0.03725	0.03745	0.03732	0.03735	0.03718
R8	0.03680	0.03690	0.03694	0.03685	0.03660	0.03644	0.03663	0.03680	0.03682	0.03674	0.03679	0.03695	0.03684	0.03667
R9	0.03726	0.03736	0.03727	0.03718	0.03722	0.03717	0.03682	0.03726	0.03686	0.03706	0.03711	0.03728	0.03716	0.03700

续表 4 加权超矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
D1	0.03314	0.03320	0.03302	0.03319	0.03313	0.03302	0.03288	0.03270	0.03283	0.03305	0.03311	0.03287	0.03309	0.03317
D2	0.03390	0.03396	0.03378	0.03394	0.03401	0.03390	0.03379	0.03359	0.03373	0.03364	0.03356	0.03377	0.03399	0.03392
D3	0.03434	0.03440	0.03422	0.03439	0.03432	0.03447	0.03423	0.03418	0.03432	0.03425	0.03415	0.03436	0.03429	0.03437
D4	0.03384	0.03390	0.03372	0.03389	0.03396	0.03397	0.03374	0.03382	0.03382	0.03375	0.03366	0.03358	0.03393	0.03387
D5	0.03460	0.03450	0.03447	0.03449	0.03469	0.03445	0.03450	0.03456	0.03428	0.03435	0.03441	0.03432	0.03440	0.03418
D6	0.03436	0.03427	0.03423	0.03425	0.03431	0.03421	0.03426	0.03419	0.03447	0.03428	0.03403	0.03423	0.03402	0.03423
S1	0.03592	0.03582	0.03579	0.03581	0.03613	0.03589	0.03565	0.03574	0.03602	0.03567	0.03573	0.03607	0.03572	0.03594
S2	0.03517	0.03507	0.03505	0.03506	0.03526	0.03502	0.03507	0.03486	0.03527	0.03493	0.03499	0.03533	0.03511	0.03534
S3	0.03470	0.03461	0.03457	0.03460	0.03466	0.03455	0.03492	0.03424	0.03438	0.03462	0.03467	0.03471	0.03436	0.03443
S4	0.03713	0.03703	0.03699	0.03700	0.03706	0.03695	0.03719	0.03708	0.03708	0.03705	0.03679	0.03699	0.03705	0.03685
S5	0.03784	0.03773	0.03784	0.03771	0.03777	0.03765	0.03774	0.03778	0.03778	0.03760	0.03765	0.03784	0.03775	0.03741
S6	0.03767	0.03772	0.03783	0.03769	0.03762	0.03777	0.03756	0.03806	0.03791	0.03742	0.03763	0.03782	0.03802	0.03754
S7	0.03745	0.03750	0.03746	0.03748	0.03767	0.03755	0.03734	0.03782	0.03741	0.03736	0.03757	0.03731	0.03710	0.03703
S8	0.03742	0.03747	0.03743	0.03744	0.03776	0.03752	0.03763	0.03766	0.03752	0.03749	0.03724	0.03728	0.03735	0.03729

续表 4 加权超矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
S9	0.03543	0.03757	0.03754	0.03755	0.03708	0.03762	0.03789	0.03777	0.03734	0.03791	0.03748	0.03753	0.03773	0.03768
S10	0.03559	0.03352	0.03548	0.03549	0.03503	0.03557	0.03581	0.03542	0.03571	0.03599	0.03556	0.03561	0.03554	0.03576
S11	0.03494	0.03485	0.03286	0.03483	0.03477	0.03479	0.03468	0.03476	0.03462	0.03501	0.03490	0.03466	0.03460	0.03452
S12	0.03482	0.03488	0.03484	0.03289	0.03519	0.03495	0.03503	0.03508	0.03494	0.03457	0.03494	0.03470	0.03491	0.03470
S13	0.03742	0.03718	0.03701	0.03704	0.03536	0.03714	0.03748	0.03696	0.03682	0.03781	0.03799	0.03744	0.03750	0.03773
R1	0.03499	0.03505	0.03502	0.03517	0.03510	0.03306	0.03504	0.03525	0.03525	0.03490	0.03526	0.03501	0.03522	0.03502
R2	0.03577	0.03583	0.03580	0.03595	0.03574	0.03590	0.03384	0.03589	0.03617	0.03583	0.03604	0.03594	0.03600	0.03595
R3	0.03452	0.03458	0.03455	0.03457	0.03424	0.03478	0.03441	0.03259	0.03450	0.03474	0.03479	0.03440	0.03433	0.03440
R4	0.03457	0.03463	0.03475	0.03462	0.03415	0.03457	0.03446	0.03469	0.03265	0.03479	0.03468	0.03474	0.03466	0.03474
R5	0.03589	0.03594	0.03606	0.03607	0.03613	0.03601	0.03594	0.03586	0.03600	0.03396	0.03616	0.03591	0.03598	0.03621
R6	0.03778	0.03783	0.03794	0.03780	0.03773	0.03775	0.03767	0.03774	0.03788	0.03769	0.03569	0.03794	0.03785	0.03808
R7	0.03717	0.03723	0.03749	0.03721	0.03715	0.03717	0.03721	0.03728	0.03742	0.03739	0.03759	0.03524	0.03740	0.03763
R8	0.03665	0.03671	0.03697	0.03670	0.03689	0.03678	0.03686	0.03705	0.03691	0.03672	0.03678	0.03697	0.03473	0.03697
R9	0.03698	0.03704	0.03730	0.03717	0.03709	0.03699	0.03719	0.03738	0.03696	0.03721	0.03695	0.03744	0.03735	0.03506

表 5 极限超矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
D1	0.03303	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302
D2	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382
D3	0.03428	0.03428	0.03429	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428
D4	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376
D5	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439
D6	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415
S1	0.03578	0.03579	0.03578	0.03578	0.03578	0.03579	0.03579	0.03579	0.03579	0.03578	0.03579	0.03579	0.03578	0.03578
S2	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500
S3	0.03450	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451
S4	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03692	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691
S5	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03765	0.03764	0.03764	0.03764
S6	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763
S7	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740
S8	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737

续表 5 极限超矩阵表

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S9	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747
S10	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545
S11	0.03476	0.03475	0.03475	0.03475	0.03476	0.03476	0.03476	0.03475	0.03476	0.03476	0.03475	0.03476	0.03476	0.03476
S12	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479
S13	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739
R1	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498
R2	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578
R3	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03448	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447
R4	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453
R5	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591
R6	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774
R7	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727
R8	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673
R9	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707

续表 5 极限超矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
D1	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03303	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302	0.03302
D2	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382	0.03382
D3	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428	0.03428
D4	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376	0.03376
D5	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439	0.03439
D6	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415	0.03415
S1	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03579	0.03578	0.03578	0.03579	0.03579	0.03578	0.03579	0.03578
S2	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500	0.03500
S3	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03450	0.03451	0.03451	0.03451	0.03451	0.03450	0.03451	0.03451
S4	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691	0.03691
S5	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764	0.03764
S6	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763	0.03763
S7	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740	0.03740
S8	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03736	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737	0.03737

续表 5 极限超矩阵表

	S9	S10	S11	S12	S13	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
S9	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747	0.03747
S10	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545	0.03545
S11	0.03475	0.03476	0.03476	0.03476	0.03476	0.03476	0.03476	0.03476	0.03476	0.03475	0.03475	0.03476	0.03476	0.03476
S12	0.03479	0.03479	0.03479	0.03480	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479	0.03479
S13	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03739	0.03738	0.03739	0.03739	0.03739
R1	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498	0.03498
R2	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03579	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578	0.03578
R3	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03448	0.03447	0.03447	0.03448	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447	0.03447
R4	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453	0.03453
R5	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591	0.03591
R6	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03774	0.03775	0.03774	0.03774	0.03774
R7	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727	0.03727
R8	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673	0.03673
R9	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03707	0.03708

附录3 三角模糊综合评价法运用

表1 2017年三级指标模糊评价矩阵

指标层	优秀	良好	一般	差	得分
D1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
D5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S8	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S10	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S11	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S12	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S13	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
R2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
R3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R4	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R6	0.0000	0.5000	0.5000	0.0000	57.5000
R7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
R8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
R9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000

表 2 2018 年三级指标模糊评价矩阵

指标层	优秀	良好	一般	差	得分
D1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
D5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S9	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S10	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S11	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S12	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S13	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R1	0.0000	0.7849	0.2151	0.0000	50.3776
R2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R3	0.0000	0.0000	0.2195	0.7805	85.6098
R4	0.0000	0.0000	0.3168	0.6832	83.6634
R5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
R7	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000	53.3333
R8	0.0000	0.6000	0.4000	0.0000	55.0000
R9	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	75.0000

表 3 2019 年三级指标模糊评价矩阵

指标层	优秀	良好	一般	差	得分
D1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
D5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S2	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S4	0.0000	0.0593	0.9407	0.0000	68.5165
S5	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S6	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S7	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S9	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S10	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S11	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S12	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S13	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R1	0.0000	0.0000	0.7476	0.2524	75.0474
R2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R3	0.0000	0.6049	0.3951	0.0000	54.8765
R4	0.0309	0.9691	0.0000	0.0000	44.0722
R5	0.0000	0.1544	0.8456	0.0000	66.1404
R6	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	45.0000
R7	0.0000	0.5455	0.4545	0.0000	56.3636
R8	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	45.0000
R9	0.0000	0.4000	0.6000	0.0000	60.0000

表 4 2020 年三级指标模糊评价矩阵

指标层	优秀	良好	一般	差	得分
D1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
D5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S4	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S7	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S8	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
S9	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S10	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S11	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S12	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S13	0.0000	0.7039	0.2961	0.0000	52.4026
R1	0.0000	0.0000	0.7476	0.2524	75.0474
R2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R4	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R7	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R8	0.0000	0.0000	0.5714	0.4286	78.5714
R9	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	75.0000

表 5 2021 年三级指标模糊评价矩阵

指标层	优秀	良好	一般	差	得分
D1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.0000
D5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
D6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S4	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S7	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S8	0.4171	0.5829	0.0000	0.0000	32.4869
S9	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S10	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S11	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
S12	0.0000	0.5000	0.5000	0.0000	57.5000
S13	0.0000	0.5000	0.5000	0.0000	57.5000
R1	0.0000	0.0000	0.7458	0.2542	75.0838
R2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R3	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R4	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R5	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R6	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R7	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R8	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000
R9	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	90.0000

致 谢

行文至此，感慨万千。三年研究生时光转瞬即逝，至今仍能回想起当年初入校园的稚嫩与兴奋，如今放眼望去，校园中处处都充满回忆，现将所思所想所感所悟写于此处。

万爱千恩百苦，疼我孰知父母？我对我父母所提供的安全、舒适和安心的生活环境深表感激。我从小就不是一个听话懂事的孩子，但父母永远对我无条件的包容，在我不知所措的时候带领我，在我垂头丧气的时候鼓励我，在我误入歧途的时候教育我，犹记小时候得了水痘，父亲守在我床前一夜未睡照顾我。养育之恩，无以为报，祝愿二老退休快乐，身体健康。

东西南北春常在，唯有师恩留心间。研究生期间有幸拜读在导师门下，虽然我并非老师最优秀的学生，但我对他深表敬意。导师学识渊博、处事严谨、视野广阔无不使我受益匪浅。研究生期间，遇到困难时常去老师家叨扰，犹记导师指导我如何完成课题申请、学术汇报，选择工作时帮我分析利弊提供建议。本人才疏学浅，研究生期间学有所获全凭老师悉心指导。师恩重于山，学生不敢忘。

殷勤图后会，勉强就前程。感谢卢卡同学，相逢恰喜，相识亦相知。感谢姚同学，指导我健身使我减重 20 公斤成功摆脱重度脂肪肝。感谢俞同学，对我学习过程中的答疑解惑。感谢舍友，三年的朝夕相处让我的生活多姿多彩。感谢师门同窗，在过去的三年里，我们相互支持、相互学习，建立起了牢固的友情。感谢学业期间认识的每一位益友，有幸相识，无比荣幸。祝大家前程似锦，期待与你们再次相遇。

欲买桂花同载酒，终不似，少年游。毕业论文的收尾意味着研究生论文即将画上句号，但对于我的人生来说，这仅仅是一个逗号，感谢所有的遇见，感谢所有的经历。