

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 碳达峰背景下海螺水泥企业碳审计
评价指标体系研究

研究生姓名: 王正宏

指导教师姓名、职称: 杨荣美 教授 潘敏 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： 王子宏 签字日期： 2023.6.13

导师签名： 杨荣美 签字日期： 2023.6.15

导师(校外)签名： 潘斌 签字日期： 2023.6.16

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： 王子宏 签字日期： 2023.6.13

导师签名： 杨荣美 签字日期： 2023.6.15

导师(校外)签名： 潘斌 签字日期： 2023.6.16

Research on Carbon Audit Evaluation Index System of Conch Cement Enterprises under the Background of Carbon Peak

Candidate : Wang Zhenghong

Supervisor: Yang Rongmei Pan Min

摘 要

随着发展低碳经济共识的达成，碳审计也顺势而生。而水泥行业作为“碳排放大户”、我国经济支柱性产业，尚未建立一套完整的碳审计评价指标体系和相应的评价标准。因此，论文首先梳理了碳审计国际国内的政策背景、行业背景及案例背景后，整理了国内外碳审计的现状、方法和评价指标体系的相关文献，得出应分行业针对性的构建碳审计评价指标体系的结论；并以可持续发展等相关基础理论为前提，系统性的为构建碳审计评价指标体系提供了科学依据。其次，基于 DSR 模型，本文对海螺水泥企业二氧化碳排放源进行了深入分析，筛选出 25 个评价指标，包括驱动力层、状态层和响应层，以此为基础，最终构建了一套针对性的碳审计评价指标体系，以期获得更准确的结果。再运用熵权法和主成分分析法对海螺水泥企业履行碳排放责任情况进行鉴证和评价，并详细分析各因素层的评价结果，在政策性、经济性和技术性三方面提出了保障评价指标体系运行的基础。

结果显示，海螺水泥企业的评价结果和其经营真实状况一致，表明本文在通过应用 DSR 模型，建立了一个针对海螺水泥企业科学、合理的碳审计评价指标体系，并通过主成分分析法评价海螺水泥企业的碳排放水平能客观真实地反映企业实际情况，为海螺水泥企业今后开展碳审计工作提供了参考。

关键词：碳审计 评价指标体系 DSR 模型 主成分分析法

Abstract

With the consensus of developing low-carbon economy, carbon audit has also emerged. As a 'carbon emitter' and a pillar industry of China's economy, no complete carbon audit evaluation index system and its corresponding criteria has yet been established by the cement industry. Therefore, the paper first combs the international and domestic policy background, industry should be the primary focus of the development of an evaluation index system for carbon audit, as evidenced by a thorough examination of the existing literature on the current state of affairs, techniques, and evaluation index system of carbon audit both domestically and internationally. A scientific foundation for the construction of a carbon audit evaluation index system is systematically established, based on pertinent fundamental theories such as sustainable development. Secondly, investigating the sources of carbon dioxide release from Conch cement businesses, the driving force-state-response' (DSR) model serves as the basis, and 25 evaluation indexes of driving force layer index, state layer index and response layer index are selected. Finally, The paper, having chosen the conch cement enterprise as its case, endeavored to construct a set of carbon audit evaluation index systems. Utilizing entropy weight and principal component analysis methods, it verified and assessed the carbon emission responsibility of the conch

cement enterprise, and thoroughly examined the evaluation results of each index layer. Additionally, the basis of ensuring the operation of the evaluation index system is put forward in three aspects : policy, economy and technology.

The results demonstrate that the evaluation of conch cement enterprises is in line with their actual operational circumstances, thus making it both scientific and reasonable to construct a DSR model-based carbon audit evaluation index system for conch cement enterprises. Principal component analysis is of great research value in evaluating the performance of carbon emission responsibility of conch cement enterprises, and also provides constructive suggestions for the carbon emission reduction behavior of conch cement enterprises.

Keywords: Carbon audit; Evaluation index system; DSR model; Principal component analysis

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	3
1.2.1 理论意义	3
1.2.2 实践意义	3
1.3 国内外研究综述	3
1.3.1 国外研究现状	3
1.3.2 国内研究现状	6
1.3.3 文献评述	11
1.4 主要研究内容和技术路线	12
1.4.1 研究内容	12
1.4.2 技术路线	14
1.5 研究方法	15
2 概念界定与理论基础	16
2.1 概念界定	16
2.1.1 碳达峰	16
2.1.2 碳审计	16
2.1.3 碳审计评价体系	16
2.2 理论基础	17
2.2.1 低碳经济理论	17
2.2.2 可持续发展理论	17
2.2.3 环境审计理论	17
3 海螺水泥企业案例分析	19
3.1 海螺水泥企业概况	19
3.2 碳审计的需求分析	20

3.2.1	碳达峰背景的引导	20
3.2.2	水泥行业现状的敦促	20
3.2.3	海螺水泥企业碳审计现状	20
3.3	水泥行业二氧化碳排放源分析	20
3.3.1	水泥行业碳足迹系统边界分析	21
3.3.2	水泥行业二氧化碳排放源识别	21
4	基于 DSR 模型的海螺水泥企业碳审计评价指标体系构建	23
4.1	碳审计评价指标体系构建基础	23
4.1.1	DSR 模型	23
4.1.2	碳审计评价指标的设计原则	23
4.1.3	碳审计评价指标体系	24
4.2	海螺水泥企业碳审计评价指标的选取	25
4.3	确定碳审计评价指标权重	27
4.3.1	PCA 法计算指标层权重	28
4.3.2	熵权法计算因素层权重	29
4.4	碳审计评价方法	30
5	海螺水泥企业碳审计评价指标体系的应用	31
5.1	数据来源	31
5.2	评价指标权重确定及分析	32
5.2.1	指标层权重及分析	32
5.2.2	因素层权重确定	45
5.3	评价结果分析	49
6	研究结论与建议	52
6.1	研究结论	52
6.2	指标体系应用保障	53
6.2.1	碳减排的政策性	53
6.2.2	碳减排的经济性	53
6.2.3	碳减排的技术性	53

6.3 研究不足和展望	54
6.3.1 创新与不足	55
6.3.2 研究展望	55
参考文献	57
致谢	65

1 绪 论

1.1 研究背景

人类正面临着严峻的全球气候变化挑战,这给我们的生存和发展带来了巨大的威胁。世界气象组织公布了 2020 年是气象记录历史中三个温度最高的年份之一,与工业化时期的平均气温相比升高了 1.2℃左右,上升速度比料想快得多,气候变化已经成为一个不可回避的问题,IPCC 的报告指出包含人口组成、气候变化等在内的八项灾难性威胁已经迫在眉睫,刻不容缓的需要世界各国予以高度重视。任职于联合国的古特雷斯表示,世界各国都处于生死存亡的风口浪尖,为了应对气候变化,我们必须团结一致。此外,2021 年 WGEA(世界审计组织规模最大的工作组)调查还发现,气候变化应对行动和清洁能源成为未来三年最重要的审计主题事项,这与我国双碳目标不谋而合。

我国可持续发展战略目标的关键在于应对气候变化。我国在规划经济发展时充分将气候变化考虑在内,始终贯彻绿色、低碳、和谐的发展理念。习近平主席不止一次表示,气候变化的应对是全人类应主动承担的责任。2011 年 CSI 在公示的第三版《水泥行业二氧化碳和能源议定书》中加入了碳排放量计算方法,有助于碳足迹数据化。2016 年 3 月,“十三五”规划提出了一项重大目标,即提高低碳发展水平,有效控制碳排放总量,这是中国五年规划中第一次明确提出这一要求,以此来推动可持续发展。2017 年 10 月 18 日,习近平主席在中共十九大上表示,我国将积极参与应对气候变化,共同应对挑战,在生态文明建设中发挥引领作用。2021 年 3 月,“十四五”规划提出,2030 年碳达峰规划将主要减少碳排放强度,并辅助性地控制碳排放量,以促进我国从高耗能向绿色低碳的发展方式转变,以积极的态度应对气候变暖问题。同年 3 月中旬,习近平主席强调,在 2018 年将生态文明建设被写入宪法的基础之上,进一步把碳达峰囊括到生态文明建设内,以此来推动我国特色社会主义建设的发展,这一举措具有重要的意义。2021 年 4 月 22 日,习近平总书记发表的的重要讲话中提出“六个坚持”,旨在鼓励重点行业和企业率先达到碳排放峰值,共同推动中国的碳减排技术的普

及。

按行业看，工业行业是仅次于电热行业的第二大碳排放行业，包含钢铁、水泥、化工等，而水泥在城市基建和各类建筑中应用广泛，是世界上使用频率最高的建筑材料。伴随着城市化的快速蔓延，不论是纵横交错、畅行无阻的公路，还是城市间的高楼大厦，这些生活中常见的基础建设，都对水泥这一建筑材料高度依赖，但由于水泥在生产过程中需要研磨石灰石、窑内达 1450℃ 高温等特殊流程，不可避免的产生大量了二氧化碳，引人重视。尽管近几年我国水泥行业产量增速放慢了脚步，但我国水泥行业仍然是全球水泥客户的最大供应商。在 2014 年我国水泥生产总量达到峰值，在之后几年中仅 2016 年、2019 年略微增长，为水泥行业碳减排作出了巨大努力。2021 年，中国建材行业呼吁：建材行业于 2025 年前实现碳达峰。在“30·60”战略背景下，水泥等高排放量、高污染行业必须在 2060 年前实现碳中和。因此，为了更有效地实现深度碳排放，海螺水泥企业应当针对性的建立一套碳审计评价指标体系，以提升碳审计工作的效率，并有助于在 2030 年前实现碳排放的最终达峰。

安徽海螺水泥股份有限公司拥有海螺水泥企业的高比例股份，这是国内首家将海螺水泥企业与香港同步上市的企业，具有重要意义，在香港碳审计标准相对健全的背景下，海螺水泥企业作为国内水泥行业的典型代表，多年来积极的履行低碳责任。该企业在中国最早应用纯低温余热发电技术，2018 年在柬埔寨建成了为当地实现碳减排的第一条生物质燃料系统，年节约标准煤约 7.5 万吨，相当于减少二氧化碳排放近 20 万吨，2021 年 4 月 17 日，研发的 SCR 脱硝系统关键技术项目跻身国际先进水平。此外，长期致力于绿色矿山的建设，2020 年在全国绿色矿山名录上海螺水泥上榜 13 座，还建设了数字化矿区，多管齐下降污减排，为建设绿色矿山竭尽心力。因此，海螺水泥企业主动承担起永续、绿色发展的责任，以控制碳排放量为目标，响应保护生态环境的号召，每年碳排放数据也经第三方机构核查调整，具有一定的可参考性。因而，本文将海螺水泥企业作为案例进行分析，希望对其他水泥企业甚至整个水泥行业起到参考作用。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

(1) 在 DSR 模型下以主成分分析法和熵权法综合赋权后,用主成分分析法做评价,系统性、科学性的评价指标体系能真实客观的反映海螺水泥企业碳审计的实际情况。

(2) 夯实了碳审计相关理论。相比国外,我国碳审计起步较晚,碳审计理论研究仍有待加强,而碳审计评价指标体系的构建主要集中在电力、化工等行业,但是,仅仅以具体案例企业为研究对象,探索某一行业的碳审计评价指标体系,仍然存在一定的局限性。经过系统的研究和归纳,本文以海螺水泥企业为研究对象,建立了一套针对性的碳审计评价指标体系,从而为我国碳审计提供了一种新的参考方式,有效地丰富了现有的碳审计评价指标体系。

1.2.2 实践意义

(1) 监督企业碳排放行为。以数据形式列示碳足迹,借助构建的海螺水泥企业碳审计评价指标体系,对该企业碳排放行为进行监督和鉴证,直观的展示了碳审计结果,有利于海螺水泥企业针对性的优化碳减排行为,为水泥行业的其他企业提供了参考依据,早日实现深度脱碳目标。

(2) 有助于企业树立良好形象。随着全民低碳意识的不断提升,人们越来越重视绿色发展,并且更加信任那些认真履行 ESG 社会责任的企业。因此,建立海螺水泥企业碳审计评价指标体系,以及对其碳排放行为的评级,将有助于衡量企业在生态环境保护方面的贡献,从而为企业树立良好的形象,提升行业竞争力。

1.3 国内外研究综述

1.3.1 国外研究现状

各国学者对碳审计进行了多角度研究,本节主要归纳了碳审计的现状、碳审

计方法和碳审计评价指标体系三个方面进行研究：

第一，碳审计的现状。

Andrew Treason (2007) 发现澳大利亚的企业在了解到高碳排放对全球气候有严重危害的情况下，仍拒绝向民众公示碳排放数据，抵制碳审计的发展^[2]。相反，Frances Stewart (2008) 等大力支持发展碳审计，强调碳审计不仅可以为企业提供一个良好的声誉，还能够有效地检验和评估企业的碳排放行为，从而促进环境保护。^{[17][8][13]}。而 Mckinnon 等 (2010) 认为深度脱碳是十分必要的，值得付诸于时间和经济成本，但针对产品本身，为了获得低碳标签进行的碳审计意义不大^[23]。随着碳审计的发展，Julia Edwards 等 (2011) 分析、解决不同销售渠道在产品生产源头进行碳审计时遇到的困难，一定程度上完善了碳审计的实施路径^[20]。随着行业的发展，Easwar Krishna Iyer; Bhavana Rao (2014)、Clément Mouchet 等 (2014) 集中研究了 ICT 行业碳排放量，模拟出持续上升的碳排放量未来会产生 3 种恶果、5 类挟制，这一研究为 ICT 行业清除发展障碍提供了思路，也为使用 ICT 提供了可靠的碳足迹审计工具^{[12][9]}。对于农业行业，A.B.Mc Bratney 等 (2016)、J.J.de Gruijter 等 (2019) 介绍了一种用于农田尺度土壤碳审计的优化采样设计的软件工具——Ospats，能使利润最大化的基础上封存碳价^{[14][15]}。对于能源行业，Babatunde A.Anifowose 等 (2018) 运用主成分分析法对尼日利亚的石油实施情况进行首次碳审计，试图构建下游管道运行的新模式^[5]。Bhagat GV; Savoikar PP (2021) 采用生命周期评价方法对绿色混凝土的碳减排潜力进行评估，证实了绿色混凝土有利于减少碳足迹^[6]。McKay Ellen 等 (2022) 发现 COVID-19 (新型冠状病毒肺炎) 期间实施的线上医疗咨询显著降低了诊所的碳足迹^[22]。

第二，碳审计方法。

Philippe Moor (2005) 对比了碳审计和财务报表审计的异同点，发现审计流程大体相近，且都倾向于鉴证控制系统^[26]。而 Olson, Eric G (2010) 认为碳审计和财报审计区别较大，监督企业碳排放行为十分必要^[24]。Anonymous (2010) 对比了实施碳税地域的碳排放行为，发现碳税能抑制碳排放量^[3]；Amnon Levy (2014) 在此研究基础上进一步得出碳税是检查和鉴证企业碳排放行为的方法之一^[1]。Jpsé María González 等 (2011) 指出在金融市场进行碳审计有利于碳资产的整理，

加强金融操作的规范性^[19]。Joseph H.K,Lai 等（2012）以实证研究法调查酒店的碳足迹，结果显示酒店的二氧化碳源于外购电力，且有必要设置统一的碳排放基准，以进一步分析碳排放行为^[18]。还有一些学者立足于民生，研究了农业种植的碳足迹。Brendan Malone 等（2018）运用统计模型测量试验田上的碳储量，为碳资产的管理提供了依据。^[7]。Rajpoot SudhirK（2021）认为相比传统棉-小麦种植系统，移栽棉-洋葱-饲料豇豆+饲料玉米的种植体系碳消耗(668.9kgCEha-1)和碳输出(21431.3kgCEha-1)显著提高，碳效率(32.0)和碳可持续性指数(31.0)显著提高，减少了约 20%的碳足迹^[28]。

第三，碳审计评价指标体系。

如 Olson（2010）等人指出，由于缺乏可供参考的统一碳审计标准，企业的审计信用风险激增^[24]。因此，国内外都在努力建立一个统一的碳审计评价指标体系，以确保企业的碳减排得到有效控制和降低，但目前碳审计评价指标方面并不完善，大都集中于影响碳排放水平的探索中。Mathis Wackemagel&William Rees（1996）和 Shrestha R.M&Timilsina G.R（1996）提出“生态足迹模型”指标体系，能作为判断可持续发展水平的标准^{[4][30]}。UgurSoytas 等（2007）借助 VAR 模型探讨美国国内生产总值、能耗状况和二氧化碳强度间的逻辑关联，发现与二氧化碳强度有直接联系的是能耗状况，与国内生产总值关系甚微，因此要重点关注能耗情况，并以此为切入点控制二氧化碳排放强度^[31]。Salvador Enrique Puliafito（2008）通过种群竞争模型研究二氧化碳排放强度的影响因素，发现二氧化碳排放强度与人口数量成正相关^[29]。

此外，Lynn Price 等（2013）讨论了通常用于城市间、区域或国家间比较的宏观水平指标的问题，提出了一种为中国制定更有力的低碳指标的方法，并按照能源使用和 CO₂ 排放水平对中国六个省市城市进行排名，跟踪能源效率和减排的进展，以此建立基准^[21]。Jianyi Lin;Jessica Jacoby 等（2014）以厦门为例，通过分解的方法将城市层面的碳强度目标与低碳城市指标体系进行整合，提出了一个通过情景分析和计算确定的目标综合指标体系，这些指标和数值可以帮助地方政府实现其降低碳强度的目标^[16]。除对城市进行低碳指标的研究外，还有学者对其他视角进行了研究。DavidR.J.Moore（2016）分析了碳交易审计在组织结构、战略与产业间的作用机理^[10]。Panayis Pitrakkos（2020）采用内容分析法对约翰

内斯堡证券交易所上市的 50 家公司的碳交易审计结果以及碳披露质量进行了指标评价^[25]。2011 年, ISO 公布了测算 CO₂ 和 SO₂ 排放量的方法, 并对污染物征税, 以产生共同效益^[11]。Plaza Javier 等 (2021) 通过应用牛奶质量和碳足迹指标的多元统计技术, 经过了因子分析、聚类分析和群体规范分析的多元统计程序, 根据收集到的数据构建农场的评价指标体系^[27]。

1.3.2 国内研究现状

我国研究碳审计领域的学者与日俱增, 但由于起步较晚, 我国碳审计现今发展与国外相比, 仍有很广泛的研究空间, 为了进一步了解我国碳审计在理论方面的研究现状, 本节主要对归纳了碳审计的现状、碳审计方法和碳审计评价指标体系三个方面:

第一, 碳审计的现状。

刘少瑜, 苟中华等 (2009) 讲述了香港对建筑物进行碳审计的具体过程^[53]。在此基础上, 孙莹, 章蓓蓓等 (2010) 提出中国实施建筑物碳审计时须政策引导和法律约束^[58]。并且杨应杰 (2013) 除了研究全面实施建筑物碳审计的香港外, 也学习了美国宣传绿色生活方式的碳审计做法。陆婧婧, 苏宁 (2010) 指出随着碳审计越来越受到各国的关注, 需要实施碳关税政策来约束不履行《京都议定书》的地区^[55]。为控制企业碳排放, 王斯颖, 何兴邦 (2011) 指出我国政府已将碳税的征收提上了议事日程, 但对其实施的影响仍在考量^[63]。刘轩昊 (2011) 认为碳税补贴政策能够降低碳税累退性, 并且碳税制度和碳排放权交易制度协调使用能更好的发挥减排效果^[54]。管亚梅 (2013) 基于刘家义审计长的“免疫系统”论, 构建了适宜我国低碳经济发展情境的碳审计发展模式^[39]。姚丽琼 (2016) 结合风险导向机制采用碳足迹追踪法对资源型企业碳审计风险识别过程进行了分析^[70]。朱朝晖和梁胜浩 (2015) 通过从供应链的角度出发, 重点关注上下游的碳排放, 并建立了碳审计程序^[80], 弥补了企业对间接排放的缺乏。董华涛 (2018) 也以同样的视角, 深入探讨了这一问题, 将国家电网当做案例企业, 对独立第三方的碳审计程序进行了完善和改进^[35]。但大多学者的研究基于理论层面, 庄尚文, 蒋屠鉴, 王丽 (2020) 认为国内碳审计在实操过程中仍存在审计理论不完善、缺乏法律依据等不足^[81]。针对碳审计准则的理论层面, 郑石桥 (2022) 依据经典审计体

系,构建出碳审计方法的结构体系,认为要想最大限度彰显碳审计的价值,需要专门制定碳审计准则^[77]。王爱华,李双双(2015)发现关于我国碳审计大多集中于理论层面,以企业真实经营情况为对象进行研究的空間很充分^[61]。仲怀公,马圆明(2021)也指出研究人员需要将理论知识运用到碳审计的实施过程中,在各行业积极开展碳审计研究^[79]。

第二,碳审计方法。

钱英莲,樊鹏燕(2010)使用生命周期法对应用水煤浆是否属于低碳技术及产品进行低碳评估^[56]。金珺(2011)表示碳审计方法可以参考风险导向审计的工作思路,审计工作的开展完全取决于对导向“风险”的评估^[43]。李飞(2010)针对半导体行业制定了碳审计方法,分别从确定审查领域、分析二氧化碳排放源、运用审计手段、录入指标数据、列示碳排放明细、阐释不可控因素六方面操作^{[47][46]}。杨渝蓉,齐砚勇(2011)介绍了水泥行业开展碳审计的方法:首先编写CO₂排放清单;再结合组织边界进行加权汇总后可以编写出水泥行业的碳审计报告^[69]。郑立乔(2014)从国际和国内七个交易试点的运行状况中发现碳审计标准的完善空间,设计出适合我国国情的碳审计制度框架^[76]。而姚林(2019)基于我国的碳审计框架,立足于独立的第三方为具体案例企业针对性的构建了一套碳审计程序^[71]。郭建超(2021)基于政府审计视角,研究了实施碳审计时体系的构建和方法路径^[40]。孙翰雯(2016)不再拘泥于框架研究,指出完整的碳审计流程包括前期计划、中期运用和后期公示^[57]。童瑞连,庄尚文(2020)建议构建大审计平台共用机制和资源合作互补机制^[59]。熊欢欢等(2016)提出可通过需求分析来开发碳审计软件^[64]。郑石桥(2022)提出了一系列碳审计技术方法,包括碳数据分析、数据验证和碳绩效评价,以期更好地实现碳排放的监测和管理^[77]。

第三,碳审计评价指标体系。

学者们利用DSR模型和AHP方法构建了一个碳审计评价指标体系,李海燕(2017)和张亚连等人利用这一理论,为电力企业和钢铁企业提供了一个可行的碳审计评价指标体系,以更好地评估它们的碳排放情况^{[49][75]}。而王爱华、李双双(2016)不同于传统的DSR模型,在以往模型上做了创新,设计出DRS模型,并把环境和经济指标连接在一起使用^[60]。还有学者在AHP赋权后,采用不同方法进行综合评价。金密,张亚连(2018)、曹纳(2020)以DSR模型为基础,采用

AHP 和模糊数学综合评价法对化工企业、制糖企业进行碳审计评价指标体系构建^{[44][32]}。高建慧（2013）采用 KPI 法和 AHP 法对能源企业构建了碳审计评价指标体系^[37]。杨娴雅（2020）、黄松琦（2021）基于 DSR 模型采用 AHP 法确定权重后，利用环境优值模型分别对对华电集团、HL 水泥行业进行审计评价^{[67][42]}。李鸿儒（2019）结合 AHP 层次分析法与专家打分法构建的评价指标体系后，加权评分法对能源企业进行评价^[50]。而陈瑶（2016）用专家打分法和 AHP 层次分析法赋权后，使用 Topsis 评价法核查宝钢实施碳审计的效果^[34]。傅双双（2014）则在 DSR 模型基础上使用人工神经网络模型对国电企业进行客观评价^[36]。王涵，李谦（2019）基于“3E”理论，使用一定创新性的熵权法与和环境优值模型对火电企业承担的 ESG 社会责任实施鉴证和评级^[62]。另有一些学者如管亚梅，管亚梅，张桐（2016）、李孟哲（2016）基于雾霾治理视角或环境价值链视角采用 AHP 法建立了企业的碳审计评价指标体系^{[38][51]}。

除以企业或行业为研究对象外，学者们正在努力探索建立低碳城市的碳审计评价指标体系，杨录强（2013）提出了以环境保护、科技发展等四个维度的低碳城市评价指标体系^[66]，而陈洋洋和王宗军（2016）则采用 AHP 法，从政策、经济状况等五个角度，对山西、宁夏等三十个省的碳排放进行了评价^[33]，以此作为低碳城市建设的参考标准。余欢欢（2013）提出了一种新的碳审计评价指标体系，该体系基于 AHP 法，旨在评估浙江省低碳资金和低碳技术的综合效益。^[72]。张焕敬（2018）使用 AHP 法以政策制定、环境状态等五个角度设计了河南省碳审计评价指标体系^[74]。

为更加直观，将碳审计评价指标体系具体研究成果见表 1.1：

表 1.1 碳审计评价指标体系研究成果

学者	模型	方法	研究对象	指标的具体方面
李海燕（2017）	DSR	AHP	电力企业	综合能源消费量、公司纳税总额等 21 个指标

续表 1.1 碳审计评价指标体系研究成果

学者	模型	方法	研究对象	指标的具体方面
张亚连 (2017)			钢铁企业	节约燃料成本、氮氧化物排放量等 19 个指标
王爱华、李双双 (2016)	DRS	专家意见法	企业	低碳专项资金到位率、环境污染事故预防等 46 个指标
金密, 张亚连 (2018)	DSR	AHP 和模糊数学综合评价法	化工企业	企业投资收益率、CO ₂ 排放量等 35 个指标
曹纳 (2020)			制糖企业	企业总资产额、产品含硫量等 20 个指标
高建慧 (2013)	低碳生产技术、低碳经济效益、低碳职能管理、相关政策支持	KPI 法以及 AHP 法	能源企业	新增节能建筑的比率、企业财务管理低碳化改造等 20 个指标
杨娴雅 (2020)	经济性、效率性、效果性	AHP 法和环境优 值模型	华电集团	研发投入、供电煤耗等 32 个指标
黄松琦 (2021)	DSR		水泥企业	主要颗粒物排放总量、吨水泥综合能耗等 18 个指标

学者	模型	方法	研究对象	指标的具体方面
李鸿儒 (2019)	环境因素、经济因素、技术因素、人员因素	AHP 法与专家打分法、加权评分法	能源企业	COD 排放量、原油加工量等 16 个指标
陈瑶 (2016)		AHP 法与专家打分法、Topsis 评价法、加权评分法	钢铁企业	废水排放量、次生资源综合利用率等 24 个指标
傅双双 (2014)	DSR	人工神经网络模型	国电集团	企业煤炭产量、节约燃料成本等 19 个指标
王涵, 李谦 (2019)	经济性、效率性、效果性	熵权法和环境优选模型	国电电力	排污费支出、线路损失率等 26 个指标
管亚梅, 张桐 (2016)	低碳环境指标、低碳经济指标、低碳管理指标和低碳社会指标		雾霾治理视角	环境费用收益率、新能源开发技术改进程度等 24 个指标
李孟哲 (2016)	产品设计、生产、销售、回收、低碳技术使用、低碳政策支持、低碳配套设施建设	AHP 法	环境价值链视角	单位产量的“三废”综合利用率、低碳改造业务生产规模占比等 18 个指标
杨录强 (2013)	环境低碳、基础设施低碳、科技低碳、经济低碳、社会低碳		低碳城市建设	人均绿地覆盖率、交通碳排放等 31 个指标

续表 1.1 碳审计评价指标体系研究成果

学者	模型	方法	研究对象	指标的具体方面
陈洋洋, 王宗军 (2016)	从经济效益、低碳消费、低碳技术、环境资源和低碳政策	AHP 法	山西、宁夏等 30 个省市	第三产业占 GDP 的比重、碳生产力等 34 个指标
余欢欢 (2013)	能源情况、碳排放情况、能源利用情况以及低碳经济目标	功效系数法 (标准化处理)、AHP 法	浙江省	低碳贷款率、非化石能源生产增长率等 18 个指标
张焕敬 (2018)	低碳环境、低碳经济、低碳政策、低碳消费以及二氧化碳效益	AHP 法	河南省	工业废气治理设施数、碳信息披露制度健全性等 14 个指标

1.3.3 文献评述

国外的碳审计开始时间相对早一些,甚至在 19 世纪初部分国家就展开了探究,到 1990 年,一些发达国家开始认识到气候变化与人类生存的密切关系,逐渐产生碳审计这一新型职业。在 2000 年碳审计的理论研究逐渐完善,研究了不同行业、农田尺度土壤、牛奶质量等与民生息息相关的内容,采用了生命周期法、主成分分析法、多元统计技术等方法,英美在碳审计方面开展较早,有很多值得其他国家借鉴的理论知识。尽管国外碳审计研究资料丰富,仍存在碳审计有效性的证据数据不足、审计方法单一的问题,有待学者进一步深入探讨。

国内的碳审计开始时间相对靠后,2000 年国外碳审计井喷式发展之时,我国才开始推行,自香港开始实施建筑物碳审计以来,国内在八年后才逐渐发展起来。基于雾霾、供应链等不同视角探讨碳审计,主要以 DPRIS、DSR 等模型为框架,运用 Topsis 评价法、熵权法、AHP 等方法做评价,选取火电、能源等领域,将“5E”、煤耗量、环境费用收益率等作为评价指标,而对碳排放大户

的水泥行业研究较少。通过国内研究现状可以发现，学者们大多基于 DSR 模型采用 AHP 法对碳审计效率、效果等进行研究，但是生产工艺和生产流程的不同，必然会产生不同的碳排放行为，评价指标和权重有所变动。因此，应该根据不同行业的特点，制定针对性的评价指标体系，以拓展我国碳审计评价研究的领域。

因此，本文在 DSR 模型下，通过分析二氧化碳排放源，按生产流程筛选出评价指标，并通过主成分分析法和熵权法综合赋权后，使用主成分分析法对海螺水泥企业的碳审计进行评价，并通过分析给出研究启示，为海螺水泥企业或水泥行业的其他企业加强碳审计的实施效果给出启示，也进一步丰富了我国碳审计评价指标体系的研究内容。

1.4 主要研究内容和技术路线

1.4.1 研究内容

本文共分了五个部分为水泥行业碳审计评价指标体系的构建与应用展开研究和分析：

第一部分：绪论。在国内外推行碳审计的政策引导下，梳理了水泥整体行业背景和海螺水泥企业的典型性，得出研究意义，此后梳理国内外在碳审计的现状、碳审计方法和碳审计评价指标体系三方面的文献，得出我国水泥行业研究不足，并对论文整体思路进行建构，明确研究方法。

第二部分：概念界定和理论基础。将本文中出現频率较高的碳达峰、碳审计和碳审计评价指标体系的概念作了阐述。并阐释了低碳经济理论、可持续发展理论两个宏观理论及环境审计理论这一微观理论。

第三部分：碳达峰背景下 DSR 模型的水泥行业碳审计评价指标体系的构建。首先以案例介绍和碳审计必要性作为承上启下的过渡章节，再结合水泥行业二氧化碳排放源，以 DSR 为评价模型，根据科学性与可操作性、短期与长期相结合和全面性原则，构建指标体系时挑选适合的指标，并对主成分分析法和熵权法进行介绍。

第四部分：海螺水泥企业碳审计评价指标体系的应用。介绍了海螺水泥企业的数据来源后，以 DSR 模型为框架，使用熵权法确定因素层权重，利用主成分

分析法确定指标层权重,并以此作为评价方法分析海螺水泥企业碳审计现状和问题。

第五部分:研究结论与建议。对研究结论做了归纳并提出海螺水泥企业碳审计评价指标体系顺利实施的保障性建议,也指出文中存在的创新与不足之处,期望未来建立一套完善的碳审计评价指标体系,以支撑水泥行业的可持续发展。

1.4.2 技术路线

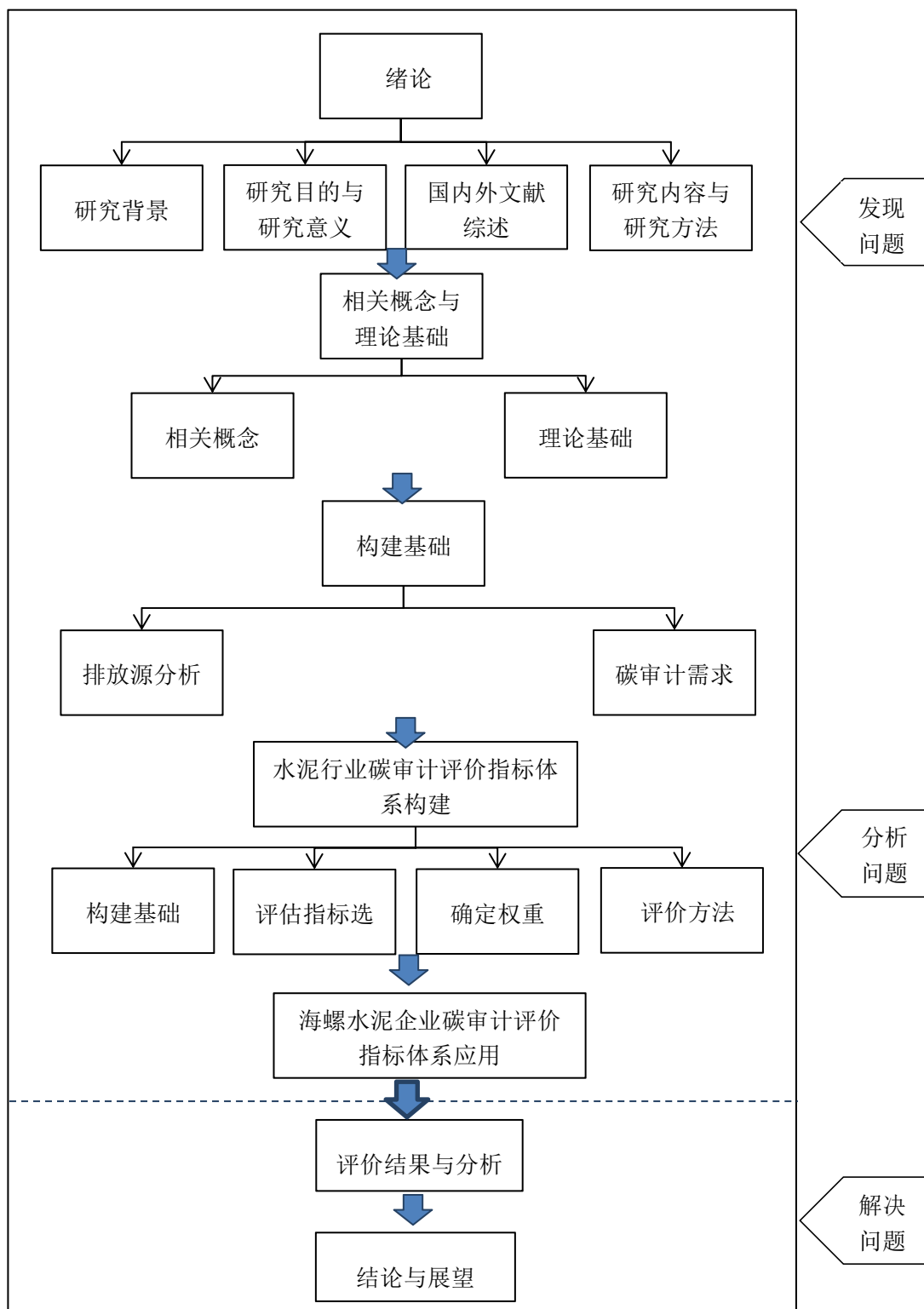


图 1.1 技术路线图

1.5 研究方法

(1) 文献分析法。通过对国内外有关低碳审计的现状、碳审计方法和评价指标体系等文献的研究,本文旨在利用图书馆资源,系统总结和归纳可持续发展、低碳经济等相关理论,为海螺水泥企业碳审计评价指标体系的构建提供有力的理论支撑。

(2) 案例分析法。选取依照香港的严格要求出具 ESG 报告的海螺水泥企业作为研究案例,以 2018-2021 年间评价指标的相关数据,用熵权法和主成分分析法进行综合赋权,再以主成分分析法做评价,科学评价海螺水泥企业控制碳排放的行为,并在评价结果前提下提出对应的改进措施。

(3) 理论分析法。对碳审计、碳达峰的内容及低碳经济理论、可持续发展理论和环境审计理论进行了分析,从其内涵上对构建及应用碳审计评价指标体系的意义和重要性进行了阐述。

2 概念界定与理论基础

2.1 概念界定

2.1.1 碳达峰

碳达峰，指某地在某个时刻的碳排放总量达到最大值，在之后的时间中碳排放量渐渐回落、不继续增长。即碳达峰是碳排放由增转降的重要拐点，意味着经济发展水平与碳强度不再关联。

2.1.2 碳审计

碳审计指对企业在生产流程中消耗原材料、使用火电过程中直接或间接形式产生的 CO₂、SO₂ 等影响气候变化的排放量进行鉴证和监督。开展碳审计时先分析二氧化碳排放源，再参照评价标准对企业碳排放行为进行评级。碳审计作为没有利益关联的三方，按照相应法律规章、审计流程，真实客观评价被审单位的碳排放责任履行情况，也为碳交易市场的顺利运行保驾护航。

2.1.3 碳审计评价体系

通常来说，碳审计评价体系包括评价指标、方法和标准三部分。其中碳审计评价指标是在绿色发展的背景下，参照碳足迹对被审单位经营状况和碳排放影响的程度筛选出的指标。评价方法是对选出的评价指标进行运用的方式，在选择评价方法时需要综合考虑，包括数据相关性、指标的正负性等，以往研究中使用较多的有 LCA、Topsis、AHP 等。评价标准指站在客观中立的角度，将评价结果具象化为等级结果，清晰直观的看到被审单位碳减排效果，也有利于致力于低碳发展的企业脱颖而出，树立良好的企业形象。

2.2 理论基础

2.2.1 低碳经济理论

低碳经济理论，指国家经济发展过程中意识到生态保护的重要性，将经济增长和绿色低碳的发展协同处理，促进清洁能源的研发和使用。推广低碳经济不仅可以加快企业实现深度碳排放，而且还能够在全球共同体的大背景下展现出大国的责任感和担当精神，为人类的未来做出贡献。能彻底改变以往人们“先污染后治理”的思想，意识到绿水青山的可贵和蕴含的自然价值，逐步解决从前遗留的环境问题。

依托于低碳经济理论，我国正在努力实现 2030 年前碳排放量达到顶峰的战略目标，能够更具体的落实低碳经济的发展理念，具象化的减排目标能推动水泥、火电等高碳高污染行业通过技术整改、投入环保资金等方式向生态产业转型发展的步伐，实现绿水青山和金山银山的同步，为碳减排助力。

2.2.2 可持续发展理论

可持续发展理论是 1980 年英国因发展工业导致环境污染的背景下提出的，该理论受经济水平、人口增长等多种因素影响，在此基础上，针对碳减排实施的碳审计发展起来，使企业能从宏观经济学视角分析自身走可持续发展道路的手段。可持续发展理论与实施碳审计的目标一致，都是为了保护生态环境的平衡。因此，本文以可持续发展理论为依据，为海螺水泥企业走可持续发展道路提供实务建议，使企业在碳达峰背景下符合国家政策引导，企业在降低碳税基础上提高企业竞争力，有助于企业稳健发展，而良好的经济环境和生存环境也对我国应对气候变化、展示负责的大国形象起到了积极作用。

2.2.3 环境审计理论

环境审计指由政府机构、科研人员带头，对从事正常经营活动时影响环境状态的企事业单位实施监查，使盈利组织做到自觉控制日常活动对环境的不良影响。

但在进行环境审计的过程中，要注意调整监管力度，实现环境保护和经济发展平衡的同时，也不影响人民的正常生活，从而实现自然生态的和谐发展。此外，在进行环境监查时要善用科学技术，以现代化手段对环境状况进行实时、准确监督，实现环境保护和现代化发展的共频。因此，环境审计理论和产生碳审计的初衷相似，都是在构建评价指标体系的基础上，实现生态保护和资源利用的目标。

3 海螺水泥企业案例分析

3.1 海螺水泥企业概况

海螺水泥公司创建于一九九七年，并于十月，海螺水泥企业在香港上市，这是中国水泥行业第一家在海外上市的企业。公司以生产、销售水泥为主，以“海螺”牌高档水泥、商品水泥集料为主要产品。公司凭借技术发展助力企业尽快实现深度脱碳，并第一个建立起了水泥智能化工厂，并把大数据技术融入生产水泥的过程中，根本上实现了生产变智。公司以可持续发展为宗旨，采用了能耗低的新型干法水泥工艺技术，并在国际上创建了全球首个 CCUS 项目，多途径控制水泥行业的碳排放强度。

现在海螺水泥企业能利用设备余热产生电量的总装机容量约 1263MW，每天能生产五千吨熟料的生产线通过余热会产生 220000kW·h 电力，即每年煤炭节约量为 23200t，能减少 61900t 的碳排放，2021 年在陕甘区域 5 家和安徽省内 9 家公司实施余热发电超零排放技改，并在 2022 年进行投运。2018 年，海螺水泥企业为节约煤炭、柴油消耗，在柬埔寨使用水稻秸秆、稻糠等生物质作为燃料，取得了显著效果。2020 年在安徽铜陵组建了国内第一条生物质燃料系统，每年能将 150000t 稻糠等生物质作为燃料，能减少约一半的煤炭使用，每年碳减排约 200000t。因此，海螺水泥企业在碳减排方面做的相对靠前，且出具的 ESG 报告内容详实，可作为水泥行业的典型案例进行研究。^①

本文将海螺水泥企业当作了一个研究案例，针对性的构建了一套碳审计评价指标体系，对海螺水泥企业履行减碳责任的程度进行了评级，并根据评估的等级和存在的不足，提出了相应建议，以期能够对海螺水泥企业，甚至于水泥行业其他企业的发展起到一定的指导作用。

^①资料来源：安永碳中和课题组. 一本书读懂碳中和[M]. 北京:机械工业出版社, 2021:103-104.

3.2 碳审计的需求分析

3.2.1 碳达峰背景的引导

全球气候变化是当前世界各国面临的最严峻的环境问题，各国在应对气候变化上取得了广泛的一致，并采取了相应的措施。要防止极端气候事件的发生，就需要把增温幅度控制在 1.5 摄氏度以下。中国在 2020 年的九月二十二日，再次宣布在 2030 年之前实现二氧化碳排放量的最大值。同年十二月，习近平总书记将把“碳达峰”作为来年的八大重要任务之一，这也就意味着，中国将更快实现碳达峰，然而，时间上也只有十年，任务繁重。这对党中央来说，是一个非常重要的决策，促进了行业的转型发展和全民绿色低碳意识的提高，就像二十世纪末所倡导的，要把经济发展作为一个新的发展方向，应将民生放在首位，并将生态环境置于最重要的位置。中国将在可持续发展的指引下，推进经济和社会的整体发展向绿色低碳转变。

3.2.2 水泥行业现状的敦促

在全球碳排放总量中，水泥行业有着百分之七的高额占比，在城市基建和各类建筑中应用广泛，是世界上使用频率最高的建筑材料。伴随着城市化的快速蔓延，不论是纵横交错、畅行无阻的公路，还是城市间的高楼大厦，这些生活中常见的基础建设，都对水泥这一建筑材料有着高度依赖，但由于水泥在生产过程中需要研磨石灰石、窑内达 1450℃ 高温等特殊流程，不可避免的产生大量了二氧化碳，引人重视；同时，又由于水泥属于支撑我国经济建设的重要原材料，水泥行业在经济发展过程中起着夯基垒石的重要作用，因此，敦促水泥行业承担碳减排责任十分必要。

3.2.3 海螺水泥企业碳审计现状

海螺水泥积极布局环保产业，收购中国海螺环保控股有限公司，旨在推动企业绿色转型，实现 1+1 大于 2 的高质量可持续发展。海螺水泥 1997 年在香港上

市，2008年出具3月按照香港相关要求发布了第一份ESG报告，此后海螺水泥企业每年ESG报告中公布的碳排放数据均会经过第三方机构核查调整，具有一定的可参考性。此外，海螺水泥出具的ESG报告内容详实，在指标数据调整中列示了温室气体排放等各类研究数据，但其出具的ESG报告中仅对数据进行了简单罗列，并没有设置一定标准对其碳减排履行情况进行评价，也没有对核心的碳排放指标进行筛选，因此，本文将海螺水泥企业作为案例企业进行碳审计评价指标体系研究。

3.3 水泥行业二氧化碳排放源分析

3.3.1 水泥行业碳足迹系统边界分析

鉴于水泥行业工序的复杂性和能源碳排放的高比例，有必要通过研究水泥行业的碳足迹筛选出适用于该行业的评价指标。为了分析关键问题，本文根据上游原料开发、中游生产制作和下游基础建设的流程，经过将混入石灰石的生料磨成粉状、1450℃的水泥窑内煅烧和将烧制的熟料磨成粉状这三个步骤，并将以上碳足迹流程做了图示，如图3.1所示。^①

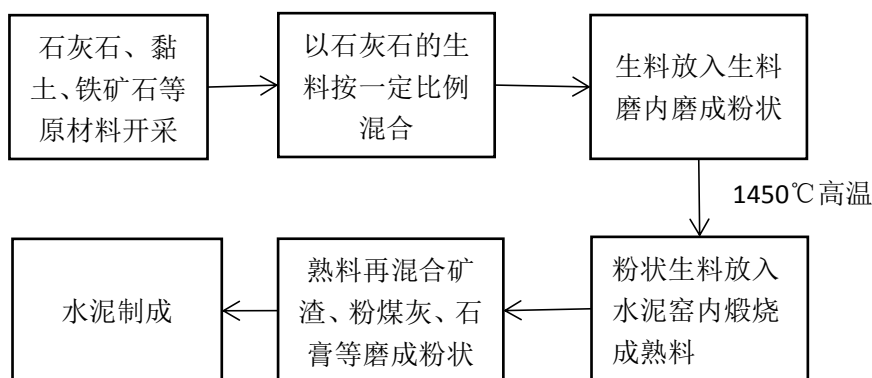


图 3.1 水泥行业碳足迹研究的系统边界

3.3.2 水泥行业二氧化碳排放源识别

在全球碳排放总量中，水泥行业有着百分之七的高额占比，在工业生产领域仅比排名首位的钢铁行业略低一点，也是二氧化碳排放大户，其排出的二氧化碳

^①资料来源：安永碳中和课题组. 一本书读懂碳中和[M]. 北京：机械工业出版社, 2021: 103-104.

中，大约百分之五十来源于混入石灰石的生料在高温分解下产生的，百分之四十源于水泥窑达到 1450℃ 高温时所消耗的燃料，余下的百分之十则是采掘原材料、使用设备耗损的煤炭或外购材料中间接产生的二氧化碳。由此可见，在筛选碳审计评价指标时需要关注吨熟料二氧化碳排放量、煤炭消耗量等数据和设备对材料的利用程度。

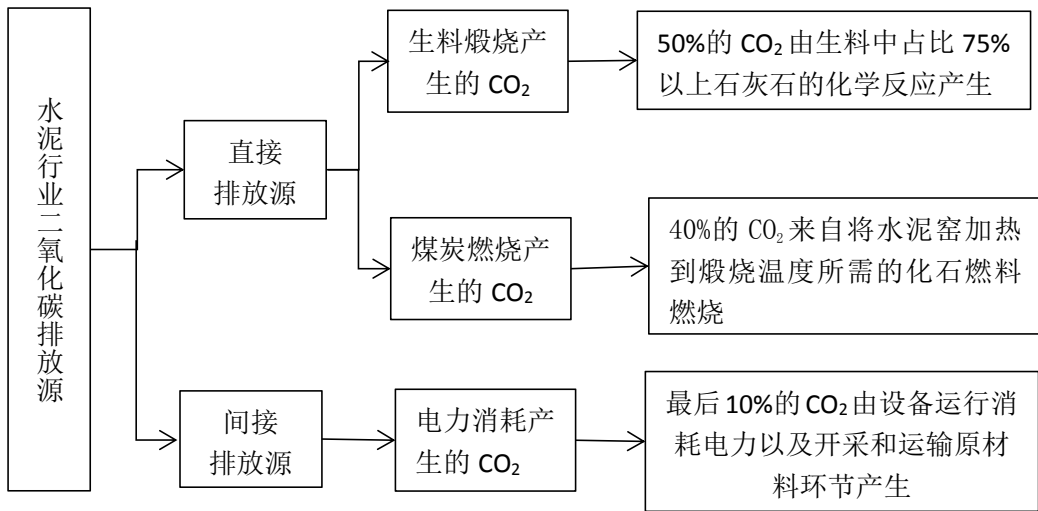


图3.2 水泥行业CO₂排放源分析

4 基于 DSR 模型的海螺水泥企业碳审计评价指标体系构建

4.1 碳审计评价指标体系构建基础

4.1.1 DSR 模型

目前，DSR 理论主要建立在 PSR 理论基础上，但该理论更多地关注单一的环境问题，无法对可持续发展问题进行更全面的评估。为此，构建的 DSR 模型中将 Pressure 换为 Driving，加入的动态指标能表现出碳排放对气候产生的影响，当“驱动力”作用于城市发展和企业经营的“状态”时，“响应”的实施可以有效地提升和调节系统的可持续性，从而实现全面发展，最终形成了 DSR 模型——分别由驱动力、状态和响应组成。以 DSR 模型为基础，建立一个碳审计评价指标体系，有助于为碳审计工作提供一个全面、科学的指导，具体如图 4.1 所示。

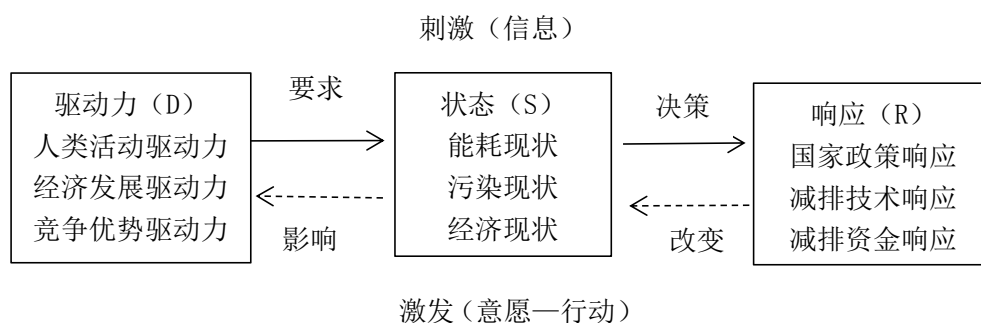


图4.1 DSR模型图

4.1.2 碳审计评价指标的设计原则

(1) 科学性与可操作性

可操作性指数据能够方便取得的同时运算方便，对海螺水泥企业来说，在实际操作中能较方便的运用这种评价指标体系；对审计主体来说，借助这种评价指标体系，有助于为企业实现低碳发展提供针对性的意见与对策。该企业在设立评价指标的过程中，必须符合国家政策和相关要求，并不是恣意妄为的。通过分析海螺水泥企业碳排放元素数据，真实反映该企业碳排放水平，推动传统企业绿色

转型，助力我国双碳目标的实现。构建碳审计指标体系过程中，选取指标时要有科学依据，注意精简、全面，且有合理依据，要把我国环保方面的政策与制度作为挈领。因此，该原则能兼顾实用性和合理性，且在此基础上建立的评价指标体系会更令人信服。

（2）短期与长期相结合原则

在对海螺水泥企业构建碳审计评价指标体系的时候，不能仅以该企业当前经营状态为基础，还要对该企业的曾经和未来综合考量；做到既对现时审计目标进行考量的同时，也对长期审计目标进行考量，要始终关注对环境的保护，推动可持续发展。因此，将两者有机地联系起来，有助于提高我国碳审计的可预测性。

（3）全面性原则

指标体系要包含整个审计过程，使指标评价的结果能对企业发展、政策出台等具有指导意义。然而全面性并不意味着面面俱到，而是要有的放矢、紧抓重点。所以，在碳达峰战略背景下选择对企业经营有重要影响，且能全面反映企业情况的指标。

4.1.3 碳审计评价指标体系

本文基于 DSR 模型构建了一个水泥行业碳审计评价指标体系，该体系由三个层次组成：第一层是目标层，表达了水泥行业碳审计指标体系的总目标。第二层是影响因素层，由驱动力、状态和响应三个层次构成。第三层是指标层，它是对水泥行业碳减排进行评估的基础指标，是整个指标体系的最基本的构成单位。具体见图 4.2。

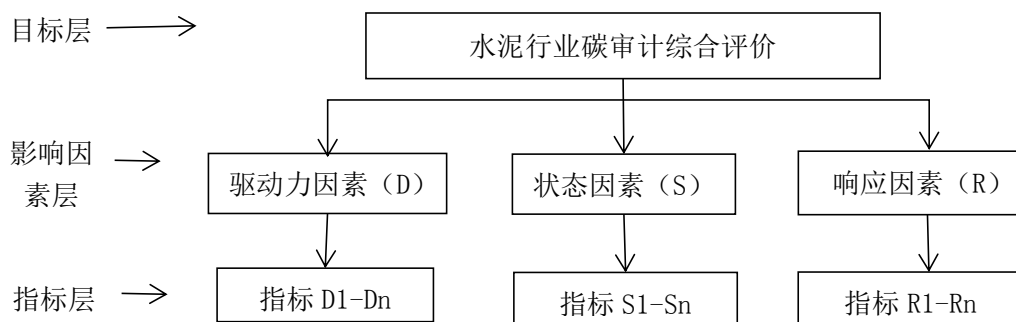


图 4.2 水泥行业碳审计评价指标体系框架结构

4.2 海螺水泥企业碳审计评价指标的选取

在水泥行业中，建立和使用碳审计评价指标体系，对企业的碳减排工作展开了一个客观、全面的评判，为控制气候变化提出了一些优化对策。因此，本文重点选择典型、可以体现水泥行业经营情况导致的气候变化的评价指标。

现在有关碳审计评价指标体系的研究成果，大部分都是在之前学者的研究成果上，对与生产水泥的工艺、流程和经营有关的指标进行梳理，之后再以指标体系为依据，建立评价模型，并结合行业自身特性，对其进行遴选，从而获得确定后的碳审计评价指标。在指标选择方面，本文也对此进行了参照，经过对前人研究成果的具体总结，再在此基础上对其进行了筛选，因为高频出现的指标通常情况下典型性也很强。因为在目前的碳审计评价指标体系的研究中，水泥行业还有所不足，因此，本文以水泥行业的碳排放特征为基础，对选取的指标进行优化后，确定了本文的评价指标。再结合国家统计局、能源局等指定的《建筑碳中和》等政策，构建了相应的评估指标体系。最后，在此基础上，依据 DSR 模式将各指标按其在此体系中所扮演的角色，进行指标层的分类。

(1) 驱动力指标选取。在全球碳排放总量中，水泥行业有着百分之七的高额占比。2020 年，由于生料燃烧而直接排放的二氧化碳，和制造时由于使用电能而间接排放的二氧化碳，大约占了我国碳排放总量的百分之十三，导致在抵抗新冠肺炎疫情冲击、发展经济的同时对空气质量造成了一定影响。驱动力指标主要是反应企业促进经济发展时，为了追求经济利益，不惜牺牲环境保护，给环境带来了很大的冲击。具体的指标主要有：资产总额（D1）、利润总额（D2）、主营业务收入（D3）、水泥及熟料经营量（D4）、企业纳税总额（D5）。

(2) 状态指标选取。状态指标主要反应了生产水泥时产生的影响，可用水泥行业当前的能消水平、清洁能源使用程度等表达。其指标主要有：吨产品二氧化碳排放量（S1）、氮氧化物排放量（S2）、二氧化硫排放量（S3）、主要颗粒物排放总量（S4）、吨熟料实物煤耗（S5）、柴油消耗总量（S6）、电耗总量（S7）、消耗煤炭总量（S8）、吨水泥综合电耗（S9）、清洁生产审核通过率（S10）。

(3) 响应指标选取。响应指标反映了水泥行业对资源与环境状况的响应程

度。在选择响应指标时，可以从废弃物利用效果、污染物减排效果、资金投入等方面入手。具体指标主要包括二氧化碳减排率（R1）、氮氧化物减排率（R2）、二氧化硫减排率（R3）、主要颗粒物减排率（R4）、低温余热发电量（R5）、“环保技改”行动累计投资额（R6）、应用余热发电煤炭节约量（R7）、应用余热发电 CO₂ 减排量（R8）、协同处置总量（R9）、低碳减排项目投资额（R10）。水泥行业碳审计评价指标设置如表 4.1 所示。

表 4.1 水泥行业碳审计评价指标体系

目标层	因素层	指标层	指标性质
企业碳审计综合评价	驱动力因素（D）	D1 资产总额	定量指标（+）
		D2 利润总额	定量指标（+）
		D3 主营业务收入	定量指标（+）
		D4 水泥及熟料经营量	定量指标（+）
		D5 企业纳税总额	定量指标（+）
	状态因素（S）	S1 吨产品二氧化碳排放量	定量指标（-）
		S2 氮氧化物排放量	定量指标（-）
		S3 二氧化硫排放量	定量指标（-）
		S4 主要颗粒物排放总量	定量指标（-）
		S5 吨熟料实物煤耗	定量指标（-）
响应因素（R）	S6 柴油消耗总量	定量指标（-）	
	S7 电耗总量	定量指标（-）	
	S8 消耗煤炭总量	定量指标（-）	
	S9 吨水泥综合电耗	定量指标（-）	
	S10 清洁生产审核通过率	定量指标（+）	
	R1 二氧化碳减排率	定量指标（+）	
	R2 氮氧化物减排率	定量指标（+）	

表 4.1 水泥行业碳审计评价指标体系

目标层	因素层	指标层	指标性质
企业碳审计综合评价	响应因素 (R)	R3 二氧化硫减排率	定量指标 (+)
		R4 主要颗粒物减排率	定量指标 (+)
		R5 低温余热发电量	定量指标 (+)
		R6 “环保技改”行动累计投资额	定量指标 (+)
		R7 应用余热发电煤炭节约量	定量指标 (+)
		R8 应用余热发电 CO ₂ 减排量	定量指标 (+)
		R9 协同处置总量	定量指标 (+)
		R10 低碳减排项目投资额	定量指标 (+)

说明：“+”表示正向指标 N，“-”表示负向指标 P。

部分数据说明：

2021 年消耗煤炭总量是以 2020 年消耗煤炭总量为基准，减去 2021 年煤炭节约总量计算得出。即 2021 年消耗煤炭总量-2.02 万吨（建成 19 个合计 200MW 光伏发电项目）-0.9 万吨（生物质燃料系统）。

2021 年“环保技改”行动累计投资额分别在出现过两个数据，经计算汇总在正文中的 21.06 亿元更加精准。

低碳减排项目投资额=“环保技改”行动累计投资额-其他技改投入（收尘颗粒去减排+无组织排放管控+脱硫技改+脱硝+污水技改投入）

数据来源于 2017-2021 年社会责任报告及年报。

4.3 确定碳审计评价指标权重

本文采用主成分分析法和熵权法结合，对评价体系进行综合赋权，以确定其权重。指标层使用主成分分析法计算出该层的占比，降低了人为筛选指标时产生的误差，准则层使用熵权法确定权重，规避使用主成分分析时再一次增加样本之间的差距，更有利于提高评价结果的可信性。

4.3.1 PCA 法计算指标层权重

主成分分析法 (PCA) 使用线性变换, 使原来较多的原始指标间形成互不关联的主成分, 同时尽量保留原始数据中的信息。通过使用 SPSS Modeler, 本文提出了一种基于主成分的分析方法, 可以有效地解释原始数据中的多变量, 从而更好地理解数据的复杂性和可靠性

(1) 进行指标筛选, 构建分级指标体系。

$$\begin{aligned} X &= \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1s_1}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2s_2}, x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rs_r}\} \\ &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

n 为指标数量。通过汇总得到样本数据集 $\{X_{ij}\}_{m \times n}$, m 为样本个数, 并将数据标准化处理。

(2) 用标准化方法对数据规格化见式 (4.2)。

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S(x_j) \quad (4.2)$$

(3) 用赋权法得到各指标重要性权重 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。并对规格化数据按列乘权见式 (4.3)。

$$Z'_{ij} = \omega_j Z_{ij} \quad i=1, \dots, m; j=1, \dots, n \quad (4.3)$$

构造理想点和负理想点

$$a = \{\max_i Z'_{ij} | i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\} = \{Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_n^+\}$$

$$b = \{\min_i Z'_{ij} | i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\} = \{Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_n^-\}$$

(4) 求协方差阵。

$$V = \{v_{ij}\}_{n \times n} \quad (4.4)$$

$$\text{其中 } v_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Z'_{ij} - Z'_j)(Z'_{ik} - Z'_k) \quad j, k=1, \dots, n, \quad m \quad (4.5)$$

(5) 由 $|V - \lambda I| = 0$ 求 V 阵的特征根 λ_i 、特征向量 L_i 和累积方差贡献率 α_i 。

其中

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}, \quad \sum_{j=1}^n L_{ij}^2 = 1 \quad i=1, \dots, n \quad (4.6)$$

(6) 利用方差贡献率计算海螺水泥企业的各主成分权重 F 。

4.3.2 熵权法计算因素层权重

熵权法是一种基于信息熵的综合评价方法，它计算出各个指标的离散程度，来确定它们的权重，从而更准确地反映未经处理数据中的隐藏讯息，并抑制人的主观心理对结果的影响。因此，采用此方式获得的指标权重值，其可靠性远超 AHP 等主观赋权方法，具体计算过程如下：

(1) 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。所得的余矩阵 X 见式 (4.7)

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

(2) 指标的标准化处理

使用 min-max 标准化法，分别将正负向指标以式 (4.8) (4.9) 为依据，来计算出正、负向标准化数值，最终形成了一个规范化矩阵，如图 (4.10) 所示。

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \left[\frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})} \right] + 0.0001 \quad (4.8)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \left[\frac{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})} \right] + 0.0001 \quad (4.9)$$

根据标准化公式，得到平移后的标准化矩阵

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} & \dots & X'_{1n} \\ X'_{21} & X'_{22} & \dots & X'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X'_{m1} & X'_{m2} & \dots & X'_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

(3) 计算概率矩阵 P ，计算公式为 (3.11)：

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad i=1, \dots, n; j=1, \dots, m \quad (4.11)$$

(4) 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。

其中第 j 项的信息熵计算公式为 (4.12)

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \left(\frac{1}{\ln n} > 0 \text{ 且 } e_j \geq 0 \right) \quad (4.12)$$

信息效用值计算： $d_j = 1 - e_j$

最后将信息效用值归一化处理，计算公式为 (4.13)

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (4.13)$$

4.4 碳审计评价方法

结合熵权法做出的因素层权重，将主成分分析用于评价的系统分析，各自表达式如下。

驱动力层级指数表达式：

$$D = \sum_{i=0}^n Y_i * W_i \quad (4.14)$$

式中，D 为驱动力层级指数； Y_i 代表资产总额、利润总额、主营业务收入等要素的值； W_i 为第 i 个要素所对应之权重。

状态层级指数表达式：

$$S = \sum_{i=0}^n Y_i * W_i \quad (4.15)$$

式中，S 为状态层级指数； Y_i 代表主要颗粒物排放总量、吨熟料实物煤耗、柴油消耗总量、电耗总量等要素的值； W_i 为第 i 个要素所对应之权重。

响应层级指数表达式：

$$R = \sum_{i=0}^n Y_i * W_i \quad (4.16)$$

式中，R 为驱动力层级指数； Y_i 代表主要颗粒物减排率、低温余热发电量等要素的值； W_i 为第 i 个要素所对应之权重。

碳审计评价表达式：

$$CAE = \sum_{i=0}^n A_i * W_i \quad (4.17)$$

式中，CAE 为海螺水泥碳审计评价； A_i 表示驱动力层、状态层和响应层评价结果的值； W_i 为各因素层所对应之权重。

根据碳审计和各因素层指数大小以此划定评价标准，参考相关文献，确定以 0.15 的基本刻度单位作评价等级，指数值与等级度成正相关，可划分为五个等级（表 4.2）。

表 4.2 海螺水泥碳审计评价等级表

指数	(-0.37, -0.22)	(-0.22, -0.07)	(-0.07, 0.08)	(0.08, 0.23)	(0.23, 0.38)
分级	极差	差	中	良	优

5 海螺水泥企业碳审计评价指标体系的应用

5.1 数据来源

根据海螺水泥企业的 ESG 报告与年报中公布的数据，整理出表 5.1 所示的 2018—2021 年碳审计评价指标相关原始数据。

表 5.1 海螺水泥企业碳审计评价指标原始数据

指标	单位	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
资产总额	亿元	1495.4735	1787.7718	2018.5292	2305.1466
利润总额	亿元	396.29	445.57	471.08	441.16
主营业务收入	亿元	1238.41	1481.14	1479.54	1679.5266
水泥及熟料经营量	亿吨	6.05	6.12	6.31	6.53
企业纳税总额	亿元	167.63	206.45	200.29	187.9
吨熟料二氧化碳排放量	吨	0.8432	0.8426	0.8402	0.8412
氮氧化物排放量	吨	140972	135453	113052	84250
二氧化硫排放量	吨	14448	8854	8292	6065
主要颗粒物排放总量	吨	10032	7531	5470	3939
吨熟料实物煤耗	千克	144.39	142.97	140.53	110.54
柴油消耗总量	吨	94000	93873	91243	90136
电耗总量	亿千瓦时	152	154.5	144.7	137.8
消耗煤炭总量	万吨	3400	3500	3464	3461.08
吨水泥综合电耗	千瓦时	79.67	76.41	74.65	48
清洁生产审核通过率	%	84.26	86.11	100	77
二氧化碳减排率	%	0.0123	-0.0395	-0.0130	-0.0411

氮氧化物减排率	%	-0.0381	0.0391	0.1654	0.2548
二氧化硫减排率	%	0.0913	0.3872	0.0635	0.2686
主要颗粒物减排率	%	0.2984	0.2493	0.2736	0.2799
低温余热发电量	亿千瓦时	82.79	86.27	87.14	79.01705
“环保技改”行动 累计投资额	亿元	20.8	18.69	18.4	21.06
应用余热发电煤炭 节约量	万吨	298	276	279	252.9924
应用余热发电 CO ₂ 减排量	万吨	795	736	743	673.7396
协同处置总量	万吨	126.91	181.48	213.47	242.6817
低碳减排项目投资 额	亿元	19.24	15.47	18.4	21.06

数据来源：2018-2021年海螺水泥企业的年报及环境责任报告

5.2 评价指标权重确定及分析

5.2.1 指标层权重及分析

(1) 驱动力指标层权重确定

a. 海螺水泥企业驱动力指标体系权重。

对海螺水泥企业驱动力指标层标准化处理后，得到驱动力指标层中的五个指标在 2018-2021 年的标准化值如表 5.2。

表 5.2 海螺水泥企业驱动力指标标准化

指标	2018	2019	2020	2021
D1	0	0.3610	0.6460	1
D2	0	0.6589	1	0.5999

续表 5.2 海螺水泥企业驱动力指标标准化

D3	0	0.5503	0.5466	1
D4	0	0.1458	0.5417	1
D5	0	1	0.8413	0.5222

注：D1-D5代表的指标含义见表4.1。

通过 SPSS Modeler 软件对数据进行相关分析，得到的特征值和方差贡献度情况如表 5.3 所示。按照方差贡献度超过 85%为依据，能选择出 2 个主成分；其中累计方差贡献度为 96.732%，意味着 2 个主成分能体现 5 个指标 96.732%的信息值，并以 F1、F2 列示。

表 5.3 驱动力层因子方差贡献率

		解释总方差							
成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差贡献度 %	提取方差贡献度 %	合计	方差贡献度 %	累积贡献度 %	合计	方差的 %	累积 %
1	3.71	74.34	74.343	3.71	74.34	74.34	2.84	56.84	56.84
2	1.11	22.38	96.732	1.11	22.38	96.73	1.99	39.88	96.73
3	0.16	3.26	100.00						
4	-2.90E-16	-5.81E-15	100.00						
5	-7.62E-16	-1.52E-14	100.00						

旋转后的因子载荷矩阵能阐释驱动力层中 5 个指标和 2 个主成分间的逻辑关系，如表 5.4。

表 5.4 驱动力层旋转后的因子载荷矩阵

	旋转后的因子载荷矩阵	
	成分	
	F1	F2
D1	0.949	0.315
D2	0.398	0.879
D3	0.887	0.395
D4	0.990	0.101
D5	0.132	0.978

提取方法：主成分分析法。

旋转法：具有 Kaiser 标准化的最大方差法。

注：旋转在 5 次迭代后收敛

根据 SPSS Modeler 的输出模型，能得如下计算公式：

$$\text{主成分 F1} = 0.8524 * D1 - 0.1651 * D2 + 0.7545 * D3 + 0.9917 * D4 - 0.5106 * D5 - 0.8466$$

$$\text{主成分 F2} = -0.1529 * D1 + 1.162 * D2 + 0.01916 * D3 - 0.4973 * D4 + 1.426 * D5 - 1.222$$

b.驱动力指数及变化趋势。

运用公式 4.14，以表 5.3 中 F1、F2 的方差贡献率作权重，计算出海螺水泥企业驱动力层得分 D 的计算公式：

$$D = 56.842\% \times F1 + 39.889\% \times F2$$

表 5.5 2018-2021 年海螺水泥企业驱动力得分

年份	F1	F2	D
2018	-0.847	-1.222	-0.969
2019	-0.599	0.852	-0.000
2020	0.059	0.782	0.345
2021	1.386	-0.412	0.624

根据上面两个主成分的数据可知，第一主成分主要与资产总额（D1）、主营业务收入（D3）和水泥及熟料经营量（D4）这3项指标成正相关，即产量收入类，在2018-2021年间F1有显著增长，从2018年的-0.847增长到2021年的1.386，四年间增幅2.233。在第一主成分产量收入类指标中，主营业务的收入额会受到水泥及熟料经营量的影响，这一结论为后续研究奠定了基础和条件。

第二主成分主要与利润总额（D2）、企业纳税总额（D5）这2项指标有较好的正相关性，即利润与税收类，2018-2021年间利润与税收类指标呈现先上升后下降的状态，其中2018年出现最低值-1.222，随后2019年上升到最高值0.852，研究期间走势呈金字塔型曲线。表5.1中企业纳税总额（D5）在2019年达最大值206.45，与第二主成分利润与税收类指标整体趋势一致。

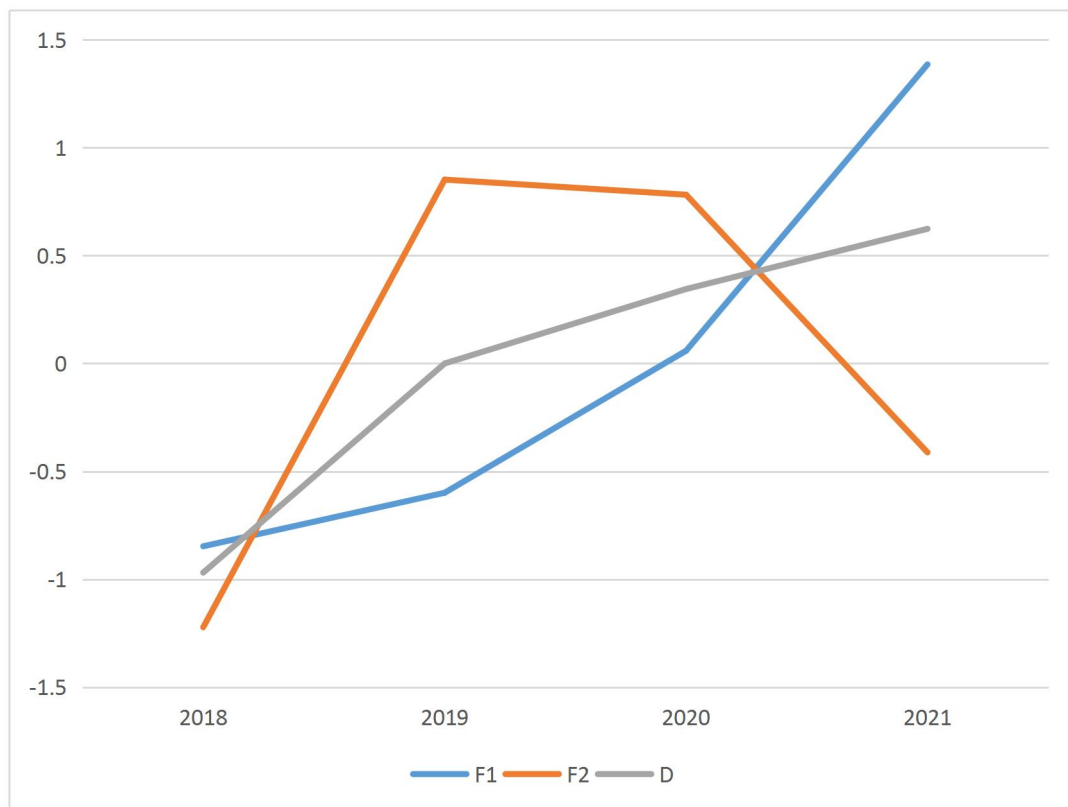


图 5.1 驱动力各主成分综合得分动态趋势图

海螺水泥企业驱动力层在2018-2021年4年间呈显著上升趋势，由2018年的-0.969上升到2021年的0.624。表明海螺水泥企业驱动力层在政策实施初期对水泥及熟料经营量进行控制，但效果并不理想，在2019年仍在降低主营业务收

入和资产总额情况下，控制水泥及熟料经营量，以控制碳排放量，效果显著，并在 2020 年开始对纳税额与收入等指标影响较小情况下，总体呈现良好结果，且在 2021 年整体达到最高值。

(2) 状态指标层权重确定

a. 海螺水泥企业状态指标体系权重。

对海螺水泥企业状态指标层标准化处理后，得到状态指标层中的十个指标在 2018-2021 年的标准化值如表 5.6。

表5.6 海螺水泥企业状态指标标准化

指标	2018	2019	2020	2021
S1	0	0.2	1	0.6667
S2	0	0.0973	0.4922	1
S3	0	0.6673	0.7343	1
S4	0	0.4105	0.7487	1
S5	0	0.0419	0.1140	1
S6	0	0.0329	0.7135	1
S7	0.1497	0	0.5868	1
S8	1	0	0.36	0.3892
S9	0	0.1029	0.1585	1
S10	0.3157	0.3961	1	0

注：S1-S10代表的指标含义见表4.1。

通过 SPSS Modeler 软件对数据进行相关分析，按照方差贡献度超过 85% 的依据，能选择出 2 个主成分，但在此标准下，S8 的共同度仅为 0.407，第 3 个指标的特征值为 1.143，故选择 3 个主成分更加科学，此时的累计方差贡献度为 100%，意味着 3 个主成分能完全体现 10 个指标的信息值；并以 F1、F2、F3 列示 F3 表示。

表 5.7 状态层因子方差贡献率

成分	解释总方差								
	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差贡献度 %	提取方差贡献度 %	合计	方差贡献度 %	累积贡献度 %	合计	方差的 %	累积 %
1	6.86	68.66	68.66	6.86	68.66	68.66	6.12	61.24	61.24
2	1.991	19.90	88.572	1.99	19.90	88.57	1.96	19.61	80.86
3	1.143	11.42	100.00	1.14	11.42	100.00	1.91	19.14	100.00
4	4.01E-16	4.01E-15	100.00						
5	3.02E-16	3.02E-15	100.00						
6	-5.01E-17	-5.01E-16	100.00						
7	-1.02E-16	-1.02E-15	100.00						
8	-2.36E-16	-2.36E-15	100.00						
9	-4.28E-16	-4.28E-15	100.00						
10	-1.33E-15	-1.33E-14	100.00						

旋转后的因子载荷矩阵能阐释状态层中 10 个评价指标和 3 个主成分间的逻辑关系，如表 5.8。

表 5.8 状态层旋转后的因子载荷矩阵

	旋转后的因子载荷矩阵		
	成分		
	F1	F2	F3
S1	0.783	0.277	0.557
S2	0.962	0.202	-0.182
S3	0.686	0.727	-0.038

续表 5.8 状态层旋转后的因子载荷矩阵

	旋转后的因子载荷矩阵		
	F1	F2	F3
S4	0.870	0.493	0.029
S5	0.831	0.133	-0.540
S6	0.988	0.145	0.055
S7	0.996	-0.018	-0.093
S8	-0.041	-0.996	-0.074
S9	0.831	0.189	-0.524
S10	-0.100	0.071	0.993

提取方法：主成分分析法。

旋转法：具有 Kaiser 标准化的最大方差法。

注：旋转在 4 次迭代后收敛

根据 SPSS Modeler 的输出模型，可得如下计算公式：

$$\begin{aligned} \text{主成分 F1} = & 0.4094 * S1 + 0.3677 * S2 + 0.0005266 * S3 + 0.2372 * S4 \\ & + 0.2376 * S5 + 0.4222 * S6 + 0.5155 * S7 + 0.4872 * S8 + 0.2226 \\ & * S9 + 0.1548 * S10 - 1.2928 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{主成分 F2} = & -0.09216 * S1 - 0.1018 * S2 + 0.8746 * S3 + 0.3615 * S4 \\ & - 0.04912 * S5 - 0.2425 * S6 - 0.4895 * S7 - 1.671 * S8 \\ & + 0.03104 * S9 - 0.1112 * S10 + 0.46439 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{主成分 F3} = & 0.81 * S1 - 0.05901 * S2 - 0.08619 * S3 + 0.1119 * S4 - 0.4963 \\ & * S5 + 0.236 * S6 + 0.1191 * S7 + 0.1752 * S8 - 0.5065 * S9 \\ & + 1.307 * S10 - 0.8507 \end{aligned}$$

b.状态指数及变化趋势。

运用公式 4.15，以选出的主成分的方差贡献率为权数，计算出海螺水泥企业状态层得分 S 计算公式：

$$S = 61.246\% \times F1 + 19.614\% \times F2 + 19.140\% \times F3$$

表 5.9 2018-2021 年海螺水泥企业状态得分

年份	F1	F2	F3	S
2018	-0.679	-1.315	-0.245	-0.720
2019	-0.968	1.117	-0.254	-0.422
2020	0.473	0.061	1.422	0.574
2021	1.174	0.137	-0.924	0.569

从各主成分构成来看，第一主成分关键和二氧化碳排放量（S1）、氮氧化物排放量（S2）、主要颗粒物排放总量（S4）、吨熟料实物煤耗（S5）、柴油消耗总量（S6）、电耗总量（S7）和吨水泥综合电耗（S9）这 7 项指标有较好的相关性，能概括为大气污染类，在 2018-2021 年间 F1 产生了显著波动，以上升趋势为主，其中在 2019 年处于研究期间的最低值-0.968，随后逐年上升，至 2021 年达到最高水平 1.174。

第二主成分主要与二氧化硫排放量（S3）、消耗煤炭总量（S8）这 2 项指标有较好的相关性，即排硫与煤耗指标，在主成分 F2 中 2018-2021 年这 4 年间总体呈上升趋势，从 2018 年的-1.315 增长至 2021 年的 0.137，变化显著。在 2018-2019 年排硫与煤耗指标由-1.315 增加至 1.117，涨幅将近一倍，可能与使用高硫石灰石有关，而将消耗煤炭总量（S8）也包含在 F2 中，进一步验证了主成分分析法对海螺水泥企业碳审计评价的适用性，因为熟料的分解与燃料的燃烧产生了 SO₂，以煤炭含硫量 1.5% 计算，得到水泥生产中有 2019-2020 年排很可能会造成硫排放异常。2020 年煤耗指标有所下降，由 1.117 下降至 0.061，2021 年排硫与煤耗指标大幅上升了 0.076，达到 4 年间的最高值 0.137，同时表明海螺水泥企业排硫与煤耗指标不稳定。

第三主成分仅与清洁生产审核通过率（S10）指标有一定相关性，即审核清洁生产指标，其中在 2018-2019 年清洁生产审核通过率由-0.245 增加至-0.254，基本呈平稳趋势，2020 年指数大幅上升至 1.422 并且达到 4 年间的最高值，但随后 2021 年清洁生产审核通过率下降至-0.924。表明海螺水泥企业审核清洁生产指标波动幅度较大，可能与我国双碳目标的实施有关，在绿色发展背景下，审核

清洁生产的企业大幅增加，竞争力有所增加，审核过程更加严苛、细化。

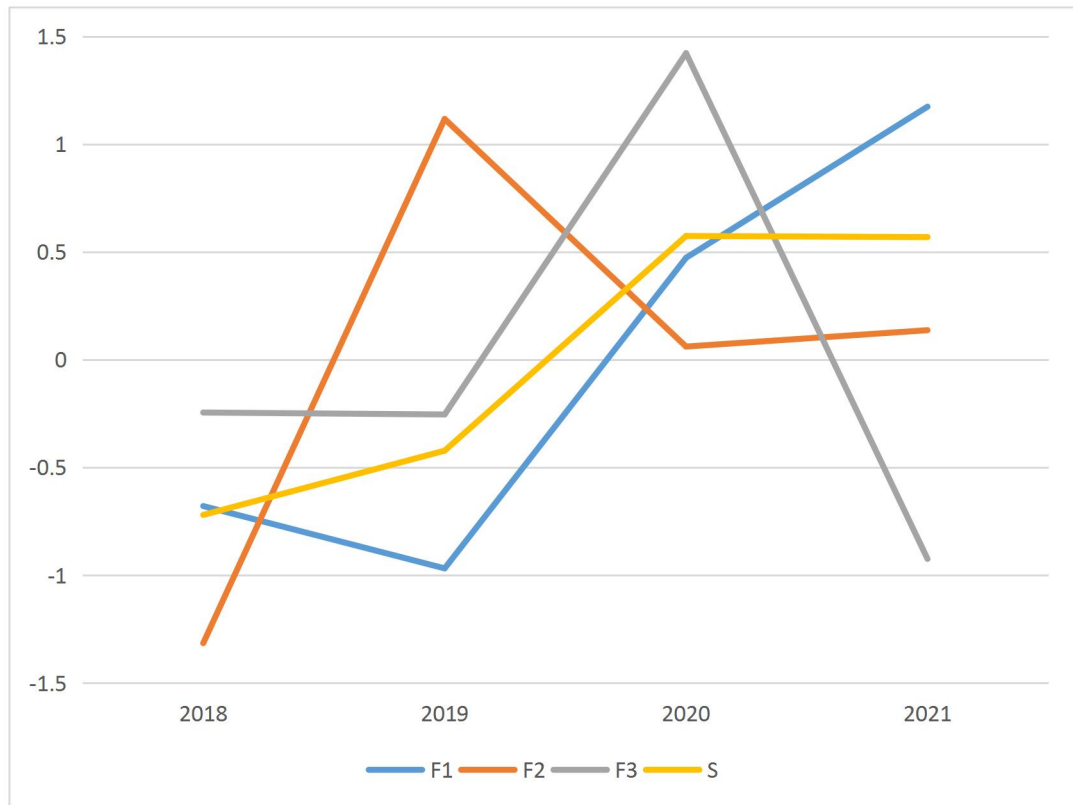


图 5.2 状态各主成分综合得分动态趋势图

研究期间海螺水泥企业状态层指数上升明显，由 2018 年的 -0.720 上升到 2021 年的 0.569，增加了 1.289，其中 2018-2020 年一直处于大幅上升趋势，2021 年趋势平稳。状态层指数在 2018 年得分最低，在 2019 年除排硫与煤耗指标表现较好外，其他污染指标得分并不理想，因此在 2020 年对 F1 有大幅改善，状态层指数总得分 0.574，涨幅较大，改善明显，且在 2021 年总体持平，体现了海螺水泥在积极承担自身社会责任中做了努力。

(3) 响应指标层权重确定

a. 海螺水泥企业响应指标体系权重。

对海螺水泥企业响应层标准化处理后，得到响应指标层中的十个指标在 2018-2021 年的标准化值如表 4.10。

表5.10 海螺水泥企业响应指标标准化

指标	2018	2019	2020	2021
R1	1	0.0314	0.5268	0
R2	0	0.2636	0.6948	1
R3	0.0860	1	0	0.6336
R4	1	0	0.4949	0.6232
R5	0.4645	0.8929	1	0
R6	0.9023	0.1090	0	1
R7	1	0.5112	0.5778	0
R8	1	0.5134	0.5712	0
R9	0	0.4714	0.7477	1
R10	0.6744	0	0.5242	1

注：R1-R10代表的指标含义见表3.1。

通过 SPSS Modeler 软件对数据进行相关分析，得到的特征值和方差贡献度情况如表 5.11 所示。按照方差贡献度超过 85%为依据，能选择出 2 个主成分,但在此标准下，R3 的共同度仅为 0.549，其特征值为 1.266，因此选用 3 个主成分更加合理，且此时的累计方差贡献度达到 100%,意味着 3 个主成分能体现 10 个指标全部信息值，并以 F1、F2、F3 列示。

表 5.11 响应层因子方差贡献率

解释总方差									
成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差贡献度 %	提取方差贡献度 %	合计	方差贡献度 %	累积贡献度 %	合计	方差的 %	累积 %
1	5.16	51.59	51.59	5.16	51.59	51.59	4.37	43.79	43.79
2	3.57	35.74	87.33	3.57	35.74	87.33	3.08	30.87	74.66
3	1.26	12.66	100.00	1.26	12.66	100.00	2.53	25.33	100.00

4	6.76E-16	6.76E-15	100.00
5	6.12E-16	6.12E-15	100.00
6	3.19E-16	3.19E-15	100.00
7	2.03E-16	2.03E-15	100.00
8	-1.16E-16	-1.16E-15	100.00
9	-3.72E-16	-3.72E-15	100.00
10	-3.98E-16	-3.98E-15	100.00

旋转后的因子载荷矩阵能阐释响应层中 10 个指标和 3 个主成分间的逻辑关系，如表 5.12。

表 5.12 响应层旋转后的因子载荷矩阵

旋转后的因子载荷矩阵			
	成分		
	F1	F2	F3
R1	0.681	0.102	0.725
R2	-0.991	0.115	0.065
R3	-0.155	-0.016	-0.988
R4	0.252	0.676	0.693
R5	0.266	-0.959	0.100
R6	0.055	0.998	0.036
R7	0.899	-0.208	0.386
R8	0.903	-0.204	0.379
R9	-0.995	-0.038	-0.095
R10	-0.400	0.778	0.485

提取方法：主成分分析法。

旋转法：具有 Kaiser 标准化的最大方差法。

注：旋转在 5 次迭代后收敛

根据 SPSS Modeler 的输出模型，能得如下计算公式：

$$\begin{aligned} \text{主成分 F1} = & 0.1621 * R1 - 0.6945 * R2 + 0.3202 * R3 + 0.04575 * R4 - 0.116 \\ & * R5 + 0.2497 * R6 + 0.4309 * R7 + 0.4392 * R8 - 0.6909 * R9 \\ & - 0.3116 * R10 + 0.1585 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{主成分 F2} = & -0.01571 * R1 - 0.1929 * R2 + 0.321 * R3 + 0.4187 * R4 - 0.7975 \\ & * R5 + 0.7551 * R6 - 0.1038 * R7 - 0.09571 * R8 - 0.2761 * R9 \\ & + 0.4121 * R10 - 0.1381 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{主成分 F3} = & 0.5217 * R1 + 0.4904 * R2 - 1.091 * R3 + 0.5165 * R4 + 0.379 \\ & * R5 - 0.3255 * R6 + 0.1679 * R7 + 0.154 * R8 + 0.367 * R9 \\ & + 0.5097 * R10 - 0.9591 \end{aligned}$$

b. 响应指数及变化趋势。

运用公式 5.16, 以选出的主成分的方差贡献率为权数, 计算出海螺水泥响应层得分 R 计算公式:

$$R = 43.794\% \times F1 + 30.870\% \times F2 + 25.337\% \times F3$$

表 5.13 2018-2021 年海螺水泥企业响应得分

年份	F1	F2	F3	R
2018	1.225	0.682	0.533	0.882
2019	0.344	-0.731	-1.264	-0.395
2020	-0.512	-0.976	1.018	-0.268
2021	-1.057	1.024	-0.287	-0.220

从各主成分构成来看, 第二主成分主要与低温余热发电量 (R5)、“环保技改”行动累计投资额 (R6) 这 4 项指标有较好的相关性, 可主要表征技改减排类指标, 在 2018-2021 年间 F1 总体下滑, 在研究的第一年为最高值 1.225, 至 2021 年达到四年间的最低值-1.057, 总体降幅 2.282。进一步结合表 4.1 及表 4.10 可知, 氮氧化物减排率 (R2) 在研究期间持续上升, 在 2018 年数值为-0.0381, 到 2021 年达到 0.2548, 表现较好, 但表 5.13 中第一主成分却持续下降, 与氮氧化物减排率占比较低有关, 且应用余热发电煤炭节约量 (R7)、应用余热发电 CO₂ 减排量 (R8) 两项指标在研究期间均有不同幅度的持续下降。

第二主成分主要与低温余热发电量（R5）、“环保技改”行动累计投资额（R6）这2项指标有较好的相关性，即技改投资与发电指标，在主成分F2中2018-2020年间呈持续下降趋势，由2018年处于中等偏高水平的0.682下降到2020年的-0.976，但整体走势呈“V”型曲线，在2021年迅猛增长至研究期间的最高值1.024。进一步结合表5.1及表5.10进行分析，研究期间低温余热发电量（R5）由2018年的82.79降至2021年的79.0171，该项指标得分并不理想，而第二主成分在2020-2021年间技改投资与发电指标得分增长了2.0，正是由于“环保技改”行动累计投资额（R6）整体呈增长态势，2021-2021年由18.40涨至21.06。

第三主成分仅与二氧化碳减排率（R1）、二氧化硫减排率（R3）、主要颗粒物减排率（R4）、低碳减排项目投资额（R10）指标有一定相关性，可主要表征为污染物减排率及减排投资额指标，2018-2021年F3波动较大，2018年处于高级水平0.533，随后出现波动，2019年为研究期间的最低值-1.264，而后在2020年大幅增长至1.018，2021年降至中等偏下水平-0.287，除2020年外，其他研究年份均处于下降态势。表5.1中2020年二氧化碳减排率（R1）和低碳减排项目投资额（R10）分别增长了0.0281、2.93，可见2020年对低碳减排项目的投资有显著效果，且为研究期间的最高值。而表5.13中第三主成分污染物减排率及减排投资额指标在2020-2021年间下降了1.305，也主要由二氧化碳减排率（R1）和低碳减排项目投资额（R10）下降所致。

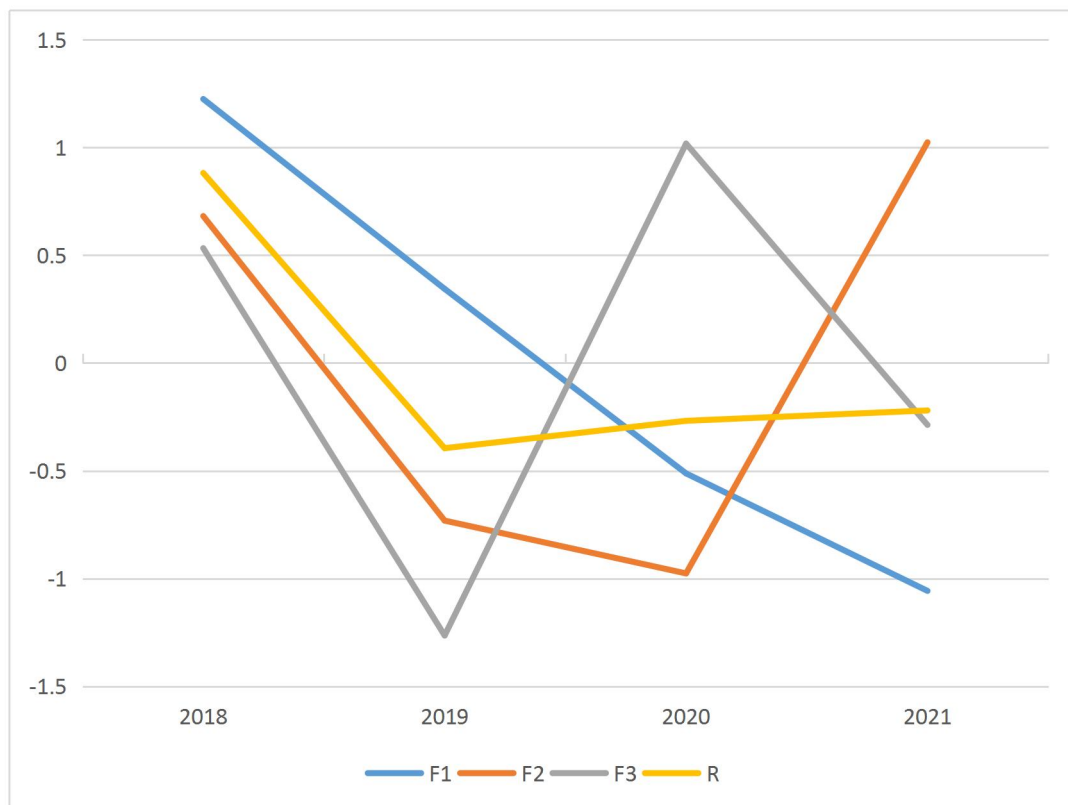


图 5.3 响应各主成分综合得分动态趋势图

研究期间海螺水泥企业响应层指数总体呈下降趋势，在研究的第一年为最高值 0.882，次年降至研究期间的最低值-0.395，降幅明显，在 2019-2021 两年间有小幅增长，总体平稳。表 5.1 中 2018 年 R1、R4、R7 和 R8 均为四年间最高水平，在 2019 年 R1、R3、R4 和 R10 大幅下降，可知低碳减排项目投资额与响应层指数得分有很强的正相关性。

5.2.2 因素层权重确定

(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 4.1。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) + 0.0001”并拉至全表得到平移后的标准化结果见表 5.14。

表 5.14 平移后的标准化矩阵表

指标	2018	2019	2020	2021
D1	0.0001	0.3611	0.6461	1.0001
D2	0.0001	0.6590	1.0001	0.6000
D3	0.0001	0.5504	0.5467	1.0001
D4	0.0001	0.1459	0.5418	1.0001
D5	0.0001	1.0001	0.8414	0.5223
S1	0.0001	0.2001	1.0001	0.6668
S2	0.0001	0.0974	0.4923	1.0001
S3	0.0001	0.6674	0.7344	1.0001
S4	0.0001	0.4106	0.7488	1.0001
S5	0.0001	0.0420	0.1141	1.0001
S6	0.0001	0.0330	0.7136	1.0001
S7	0.1498	0.0001	0.5869	1.0001
S8	1.0001	0.0001	0.3601	0.3893
S9	0.0001	0.1030	0.1586	1.0001
S10	0.3158	0.3962	1.0001	0.0001
R1	1.0001	0.0315	0.5269	0.0001
R2	0.0001	0.2637	0.6949	1.0001
R3	0.0861	1.0001	0.0001	0.6337
R4	1.0001	0.0001	0.4950	0.6233
R5	0.4646	0.8930	1.0001	0.0001
R6	0.9024	0.1091	0.0001	1.0001
R7	1.0001	0.5113	0.5779	0.0001
R8	1.0001	0.5135	0.5713	0.0001
R9	0.0001	0.4715	0.7478	1.0001
R10	0.6745	0.0001	0.5243	1.0001

(1) 计算概率矩阵 P。根据公式 (4.11) 继续输入指令“= B14/

SUM(B\$14: B\$17)”并拉至全表得到概率矩阵 P 见表 5.15（保留小数点后 6 位）。

表 5.15 概率矩阵表

指标	2018	2019	2020	2021
D1	0.000050	0.179887	0.321861	0.498203
D2	0.000044	0.291694	0.442667	0.265594
D3	0.000048	0.262415	0.260686	0.476852
D4	0.000059	0.086459	0.320971	0.592511
D5	0.000042	0.423077	0.355949	0.220931
S1	0.000054	0.107173	0.535653	0.357120
S2	0.000063	0.061260	0.309653	0.629024
S3	0.000042	0.277848	0.305757	0.416353
S4	0.000046	0.190114	0.346744	0.463095
S5	0.000086	0.036363	0.098698	0.864852
S6	0.000057	0.018873	0.408529	0.572540
S7	0.086245	0.000058	0.337911	0.575787
S8	0.571616	0.000057	0.205818	0.222508
S9	0.000079	0.081655	0.125696	0.792569
S10	0.184420	0.231399	0.584123	0.000058
R1	0.641666	0.020196	0.338074	0.000064
R2	0.000051	0.134612	0.354755	0.510581
R3	0.050075	0.581460	0.000058	0.368407
R4	0.472073	0.000047	0.233657	0.294222
R5	0.197042	0.378745	0.424171	0.000042
R6	0.448559	0.054245	0.000050	0.497147
R7	0.478644	0.244703	0.276604	0.000048
R8	0.479661	0.246302	0.273989	0.000048
R9	0.000045	0.212423	0.336923	0.450610
R10	0.306743	0.000045	0.238407	0.454804

(2) 计算信息熵及信息效用值。根据公式(3.12)输入指令“ $K = -1/\text{LN}(4)$ ”、“ $e_j = \text{SUMPRODUCT}(B\$27:B\$31, \text{LN}(B\$27:B\$31))$ ”、“ $d_j = 1 - e_j$ ”得出熵值 e_j 及信息效用值 d_j 见表 5.16。

表 5.16 熵值及信息效用值表

指标	e_j	d_j	指标	e_j	d_j
D1	0.736547	0.263453	S9	0.469055	0.530945
D2	0.773784	0.226216	S10	0.696148	0.303852
D3	0.761129	0.238871	R1	0.527136	0.472864
D4	0.639907	0.360093	R2	0.707864	0.292136
D5	0.768687	0.231313	R3	0.601357	0.398643
S1	0.679502	0.320498	R4	0.760654	0.239346
S2	0.596049	0.403951	R5	0.758848	0.241152
S3	0.781496	0.218504	R6	0.624422	0.375578
S4	0.750085	0.249915	R7	0.759647	0.240353
S5	0.342966	0.657034	R8	0.759373	0.240627
S6	0.548576	0.451424	R9	0.761220	0.238780
S7	0.646601	0.353399	R10	0.766867	0.233133
S8	0.706913	0.293087			

(3) 计算熵权。对信息效用值并进行归一化处理，根据公式(4.13)输入指令“ $= B24/\text{SUM}(B\$24:Z\$24)$ ”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 5.17。

表 5.17 基于熵权法的因素层权重表

因素	指标	熵权	因素	指标	熵权
驱动力 因素 (D) 0.1635	D1	0.19959	响应因素 (R) 0.3681	S9	0.14036
	D2	0.17138		S10	0.08033
	D3	0.18097		R1	0.15907
	D4	0.27281		R2	0.09828
	D5	0.17524		R3	0.13411
状态因素 (S) 0.4684	S1	0.08473		R4	0.08052
	S2	0.10679		R5	0.08112
	S3	0.05777		R6	0.12635
	S4	0.06607		R7	0.08086
	S5	0.17370		R8	0.08095
	S6	0.11934	R9	0.08033	
	S7	0.09343	R10	0.07843	
	S8	0.07748			

5.3 评价结果分析

运用公式 4.17，结合表 5.5、表 5.9、表 5.13 计算出综合指数，继而根据表 4.2 海螺水泥碳审计评价等级表得出见表 5.18 的评价等级。

表 5.18 海螺水泥企业碳审计综合得分

年份	驱动力因素 (D)		状态因素 (S)		响应因素 (R)		综合指数	评价等级
	指数	权重	指数	权重	指数	权重		
2018	-0.969	0.1635	-0.720	0.4684	0.882	0.3681	-0.1710	差
2019	-0.000	0.1635	-0.422	0.4684	-0.395	0.3681	-0.3431	极差
2020	0.345	0.1635	0.574	0.4684	-0.268	0.3681	0.2266	良
2021	0.624	0.1635	0.569	0.4684	-0.220	0.3681	0.2875	优

(1) 整体分析。使用熵权法计算出因素层权重后，再通过主成分分析法计算出海螺水泥企业各指标层指数，根据计算结果对照表 3.2 可以知道 2018 年碳审计评价等级为差，2019 年碳审计评价等级为极差，2020 年碳审计评价等级为良，2021 年碳审计评价等级为优。

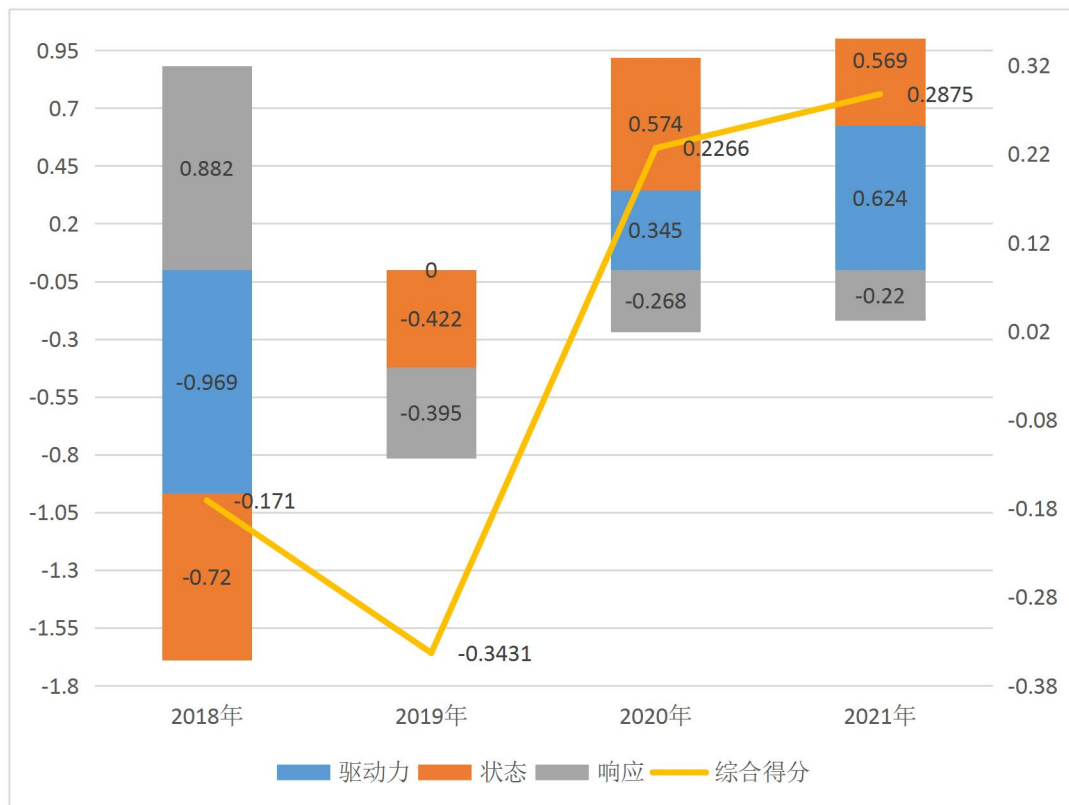


图 5.4 海螺水泥企业 2018-2021 年总体趋势

由图 5.4 可知，2018-2021 年间海螺水泥企业持续上升的综合得分，表示减碳措施是有效果的，其中 2019 年评价等级为极差，此后开始持续上升，且 2019-2020 年上升幅度较大，至 2021 年仍有小幅增长，其评价等级为优。

海螺水泥企业在 2018-2021 年间大力推进节能减排和环保技改投资，自己创新了 SNCR、CCUS 等技术，这些技术在 2020 年得到大范围应用，使得企业的驱动力、状态和响应因素指数均有了显著提高，并在 2021 年处于最高水平。结果表明，海螺水泥企业的综合指数变化显著，碳排放量整体表现出明显的增长趋势。根据表 5.18 海螺水泥企业碳审计综合得分，海螺水泥企业在碳审计中取得了显著成就，从表 2018 中的-0.1710 到 2021 年的 0.2875，实现了转差为优的目的。

标，这说明该企业一直在努力实现低碳减排的目标。

(2) 影响因素分析。指标层中这四年指数得分分别为 0、0.001、-0.001。

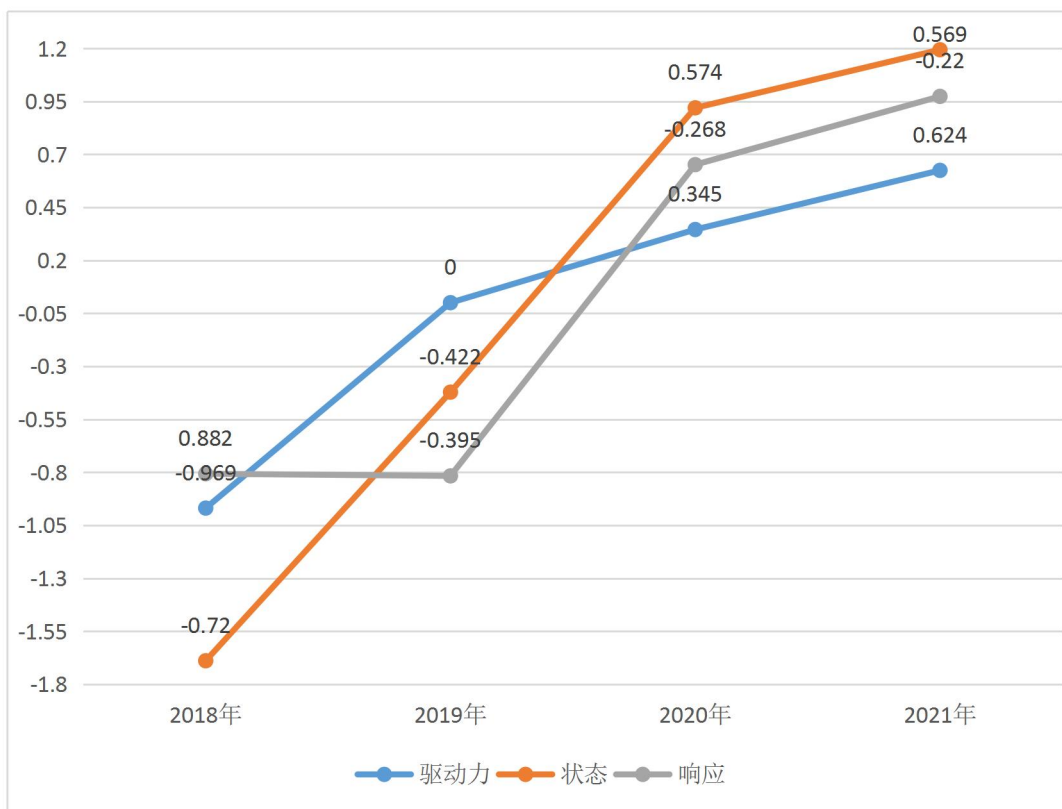


图 5.5 海螺水泥企业 2018-2021 年影响因素趋势

根据图 5.5 可以得知，海螺水泥企业在状态因素节能减排做的比较好，其指数得分最高，根本原因在于其排放量均已达标，其中 S1 和 S9 更是达到了国家先进水平。然而，2020 年，S2、S3、S5 得分均出现了轻微的下降，但考虑到这三项指标都是负向的，因此，2020 年状态层得分轻微下滑，这反映出 R2、R3 效果显著，S9 也得到了有效控制。相比之下，驱动力因素指数得分在过去四年中一直处于最低水平，而且呈现出逐年递减的趋势。主要原因是海螺水泥企业二氧化碳减排率等指标与如水泥行业节能减排先锋中国建材股份有限公司这类行业标杆企业还存在一定差距，且低温余热的熟料煅烧技术仍有改进之处，导致响应因素中低温余热发电量、煤炭节约量及应用余热发电 CO₂ 减排量等方面表现并不理想。

6 研究结论与建议

6.1 研究结论

中国的水泥生产主要依赖煤炭化石燃料，其中 98% 的能源来源于此。化石能源作为社会发展的动力，在为社会经济带来资源和便利的同时，也导致了人们对能源的日益消耗。过度开采和利用化石能源已经严重破坏了生态环境，大量温室气体排放加剧了全球变暖的趋势，因此，如何在保护自然生态环境的同时，实现社会经济的可持续发展，已经成为当务之急。随着低碳经济的发展，碳审计作为一种有效的减排手段，可以有效地监督企业的碳排放行为，从而更好地实现社会责任，促进企业低碳治理和发展。

目前国内在针对具体案例碳审计评价指标体系上有一定研究基础，但水泥行业的研究还有待使用不同的研究方法继续完善，为此，本文基于 DSR 理论模型，构建了一套针对海螺水泥企业的碳审计评价指标体系，以主成分分析法为评价方法，对海螺水泥企业碳排放行为做了评价，得出了以下几个结论：

本文梳理已有研究文献发现，目前我国对水泥企业构建碳审计评价指标体系时使用的方法较为单一，且难以以某个企业充分代表所处行业，因此，本文在构建碳审计评价指标体系时，仅选择海螺水泥这一具体案例进行研究的，且本文中的权重赋值均以研究期间初始数据为依据计算得出的，是可信、客观且真实的。

第二，通过 DSR 模型构建的碳审计评价指标体系，在水泥行业的实践中得到了有效的应用，它能够准确地反映出研究对象的总体情况，并且能够根据水泥行业的特点，将指标划分为三个层次：目标层、因素层和指标层，以便更好地评估碳排放的影响。海螺水泥公司采用了综合的主成分分析法和熵权法来评估碳排放指标，使得这些指标下的权重值更加合理。

第三，本文采用主成分分析法来衡量海螺水泥公司的碳排放水平，该方法可以帮助我们更好地了解公司的碳排放状况，并且可以为同行业其他案例企业的研究和改进提供参考。主成分分析法将海螺水泥公司的碳排放指标分解成几个独立的指标，以此来构建一个统一、全面的评估指标体系，以便更准确地衡量公司的碳排放水平。经过主成分分析法的评估，该企业的碳排放水平达到了良好的状态，

与实际情况基本吻合，证明了其可操作性和实用性。

6.2 指标体系应用保障

6.2.1 碳减排的政策性

一是优化碳审计标准。为了更好地进行碳审计，各行业必须建立一套完善的、统一的评价标准，以便准确反映碳审计的实际情况，以期能够更好地评估碳审计的效果。这套评价标准的建立和实施对于提高碳审计的可信度、科学性和适用性至关重要，因此必须加以重视。2011年CSI发布的《水泥行业二氧化碳和能源议定书》中提出了更加全面的碳审计指标，以便更好地分析指标之间的相互作用，并且更加准确地评估指标权重，从而更好地实施和应用碳审计。

二是出台有关水泥石灰石矿山资源专项政策。组织开展熟料生产企业配备矿山资源督查，^[54]填补当前惩戒措施薄弱的缺口，并且给予绿色矿山项目更大的政策支持，解决治理难度大、治理成本高的问题。

三是建立全供应链碳达峰管理体系。海螺水泥公司可以将碳排放指标作为一个重要的考核因素，来决定是否选择供应商。此外，公司还会与每一家关键供应商一起制定减排目标，并在年末进行审查，以确保它们能够实现年初设定的目标。这些审查结果将作为下一年度供应商选择的重要参考。此外，随着环保意识的普及，企业越来越重视与供应链合作伙伴的碳减排，特别是将他们的低碳行为纳入考核标准，以便更好地了解多个供应链的碳排放情况。企业应当积极推进碳达峰目标的实现，以构建一个完善的碳排放管控体系，通过不断探索低碳技术、优化SCM，努力推动供应链碳排放量的最小化。

6.2.2 碳减排的经济性

一是增加碳减排的资金投入。资金投入是一个复杂的过程，受到多种因素的影响，其中包含资本周转率、投资回报率等。为了实现企业的可持续发展，经营者需要从长期角度出发，加强对“环保技改”行动和低碳减排的投资，并将其作为技术R&D的重点。通过推动绿色技术创新体系的建立，我们可以在节能环保

等领域实施一系列具有先进性、战略意义和革新性的技术攻关，并利用国家科技成果转化引导创业基金投入等多种形式，促进绿色技术创新的有效运用。企业应该采取多种方式，从不同的渠道募集资金，以支持其碳减排计划的实施。

二是制定企业碳审计投资战略。对于化工企业而言，制定碳审计投资战略是至关重要的，它可以帮助企业确定未来发展的方向、目标、任务和政策，并有效地调配资源，从而实现节能减排的目标。通过对低碳项目的全面分析，我们可以制定出有效的业务规划，并采取有针对性的措施，以确保采购的设备既经济又环保，同时还要尽量避免在能源、碳消耗密集的地区建厂投产，采用可再生能源取代传统的能源，以最大限度地减少碳排放，从而提升能源的生产和利用效率。例如使用水泥窑协同处置废弃物技术减少煤的使用，将废弃物作为水泥煅烧的替代燃料，有利于水泥行业控制生产成本。

6.2.3 碳减排的技术性

一是从源头限制碳排放。通过升级生产水泥工艺流程，提高窑内热效率利用程度，尽可能充分地利用水泥窑的余热，可以有效地回收窑头窑尾排放的余热废气，并通过余热锅炉产生的蒸汽发电。此外，采取水泥窑协同处理技术，不仅可以减少水泥的能源消耗，还可以减少废弃物对环境的破坏，从而达到“物尽其用”、既能节约资源又保护环境的目标。

二是从终端二次封锁碳排放。为避免影响现有的水泥生产过程、大幅改变水泥的生产工艺，建议采用化学吸附法对水泥厂燃烧后的废气中捕集二氧化碳，通过管理水泥生产的能源策略和启动流程中对现有和新建水泥厂的传统窑炉进行改造，使改造风险降至最低。

三是利用其他手段减少碳排放。积极建设绿色矿山，通过种草、植树等一系列环境治理措施修复“满目疮痍”的矿山，使其重新变成二氧化碳的“吸尘器”。利用先进的科学技术、完善的矿山自动化系统，通过实时的动态监测，确保矿山的生产能够达到最佳的效率与质量，便于提升整个企业的经营业绩。

6.3 研究不足和展望

6.3.1 创新与不足

本文虽然有一定的创新性：

(1) 目前，大多数研究都关注于煤炭、电力等行业，但是关于水泥行业的研究却相对稀缺，只做了以某个具体案例研究所在行业的研究，说服力不强。因此，本文试图通过 DSR 模型，深入分析海螺水泥企业的碳排放行为，并尝试构建一套针对性强的碳审计评价需求的指标体系，从而为该行业碳审计的发展带来一定启发。

(2) 本文综合使用了两种方法，并相互弥补了单独应用时的缺陷。利用主成分分析方法选取关键的综合评价因子，简化评价工作又弥补熵权法赋权信息重叠的缺陷。

但是，由于能获取的相关文献较少，所掌握的数据资料有限，使得本研究存在一些不足之处。

第一，碳审计评价指标的设计需进一步完善。经过深入的分析和综述，本文选择了适用于海螺水泥企业的碳审计评价指标。我们综合考虑了国内外的相关文献和先前的研究成果，并根据该行业的特点，提出了一系列可供参考的指标，在写作中做了努力，然而，我们仍然需要进一步的验证这些指标是否适用于评估企业的碳减排情况。此外，本文采用 DSR 模型构建碳审计评价指标体系，没有与其它模型做比较，并且未能在水泥行业的其他企业中得到应用，因此，这种模型的可靠性仍然存在疑问，必须进一步加以验证。

第二，碳审计评价指标权重确定的方法客观性较强。本文中主成分分析法和熵权法均属于典型的客观分析方法，并未进一步使用 DEMATEL、AHP 等主观性赋权方法，可能导致评价结果不全面。

6.3.2 研究展望

根据以上的分析和总结，为今后在碳审计领域的深化研究提出几点展望，期望在日后的研究过程中继续深入研究并解决存在问题。

扩大调研范围，获取量化数据。本文的基础数据来源于海螺水泥企业官网发布的 ESG 报告和年度财务报告，但由于各家企业的低碳发展状况存在较大差异，因此，为了确保指标体系的准确性，未来将进一步加强行业研究，收集更多行业特性的数据，并结合实际，给出有效的评价体系，为未来的低碳发展提供参考。

建立评价标准，完善评价体系。由于研究能力和市场不规范等因素，目前本文仅针对海螺水泥企业的碳减排行为做了评价指标体系的案例研究，研究范围狭窄，希望未来能进行水泥行业或者水泥行业的其他案例企业的研究，以弥补当前研究适用性低的缺陷。

参考文献

- [1] Amnon Levy. Can a Carbon Tax Be Effective without a Grand Coalition? [J]. Theoretical Economics Letters,2014.
- [2] Andrew Treason. Local companies yet to come clean on carbon audits[J]. Australian,2007(10).
- [3] Anonymous. Retailers urged to back carbon audits[J]. ProQuest,2010,153(17).
- [4] B.Meredith Burke. Book Review Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Mathis Wackemagel and William Rees. Philadelphia, PA and Gabriola Island, B.C., Canada: New Society Publishers,1996. Hardback and paperback; 160 pages [J]. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers,1997,19(2).
- [5] Babatunde A. Anifowose, Modupe T. Odubela. Oil facility operations: A multivariate analysis of water pollution parameters [J]. Journal of Cleaner Production,2018,187.
- [6] Bhagat G V; Savoikar P P. Auditing carbon reduction potential of green concrete using life cycle assessment methodology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021.
- [7] Brendan Malone, Carolyn Hedley, Pierre Roundier, Budiman Minasny, Edward Jones, Alex McBratney. Auditing on-farm soil carbon stocks using downscaled national mapping products: Examples from Australia and New Zealand [J]. Geoderma Regional,2018,13.
- [8] Bruce Bellingham. Carbon audits, a good step [J]. Sunday Tasmanian,2008(11).
- [9] Clément Mouchet; Neil Urquhart; Rob Kemmer. Techniques for Auditing the ICT Carbon Footprint of an Organisation [J]. International Journal of Green Computing,2014.
- [10] David R.J. Moore; Ken McPhail. Strong structuration and carbon accounting [J]. Accounting, Auditing & Accountability Journal,2016.

- [11] Don Fullerton;Daniel H. Karney. Multiple pollutants, co-benefits, and suboptimal environmental policies [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*,2018.
- [12] Easwar Krishna Iyer; Bhavana Rao. A 360 degree carbon audit of the ICT industry [J]. *International Journal of Intercultural Information Management*,2014.
- [13] Frances Stewart. Carbon audit advice for small operators[J].*Advertiser*,2008(09).
- [14] J.J. de Gruijter;A.B. McBratney;B. Minasny;I. Wheeler;B.P. Malone;U. Stockmann. Farm-scale soil carbon auditing [J]. *Geoderma*,2016.
- [15] J.J. de Gruijter;I. Wheeler;B.P. Malone. Using model predictions of soil carbon in farm-scale auditing a software tool [J]. *Agricultural Systems*,2019.
- [16] Jianyi Lin;Jessica Jacoby;Shenghui Cui;Yuan Liu;Tao Lin. A model for developing a target integrated low carbon city indicator system: The case of Xiamen, China [J]. *Ecological Indicators*,2014.
- [17] Jonathan Lash,Fred Wellington. Competitive Advantage on a Warming Planet[J]. *Harvard Business Review*,2007(3):21-25.
- [18] 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).
- [19] Jpsé María González,Constancio Zamora Romíez. Contribution of Finance to the Low Carbon Economy[J]. *Scaientific Research Publishing*,2011,(2).
- [20] Julia Edwards;Alan McKinnon;Sharon Cullinane. Comparative carbon auditing of conventional and online retail supply chains: a review of methodological issues [J]. *Supply Chain Management: An International Journal*,2011.
- [21] Lynn Price;Nan Zhou;David Fridley;Stephanie Ohshita;Hongyou Lu;Nina Zheng;Cecilia Fino-Chen. Development of a low-carbon indicator system for China [J]. *Habitat International*,2013.
- [22] McKay Ellen;Manuel Krystal Schimp;Ranger Gurpreet Singh. An Audit of Carbon Emissions Generated by Virtual and In-Person Clinic Appointments

- During The COVID-19 Pandemic [J]. *European Journal of Surgical Oncology (EJSO)*,2022.
- [23] Mckinnon, Alan C. Product-level carbon auditing of supply chains[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*,2010.(2):42-60.
- [24] Olson, Eric G. Challenges and opportunities from greenhouse gas emissions reporting and independent auditing[J]. *Managerial Auditing Journal*,2010:934-942.
- [25] Panayis Pitrakkos; Warren Maroun. Evaluating the quality of carbon disclosures [J]. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*,2020.
- [26] Philippe Moor, Ignace Beelde. Environmental Auditing and the Role of the Accountancy Profession: A Literature Review[J]. *Environmental Management*,2005,36(2).
- [27] Plaza Javier; Revilla Isabel; Nieto Jaime; Hidalgo Cristina; Sánchez García Mario; Palacios Carlos. Milk Quality and Carbon Footprint Indicators of Dairy Sheep Farms Depend on Grazing Level and Identify the Different Management Systems [J]. *SJPD20762615075M*,2021.
- [28] Rajpoot Sudhir K.; Rana D.S.; Choudhary Anil K. Crop and water productivity, energy auditing, carbon footprints and soil health indicators of Bt-cotton transplanting led system intensification [J]. *Journal of Environmental Management*,2021.
- [29] Salvador Enrique Puliafito, Josh Luis 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.
- [30] 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.

- [31] UgurSoytas,RamazanSari,Bradley T.Ewing.Energy consumption,income,and carbon emissions in the United States[J].Ecological Economics,2007,62:482-489.
- [32] 曹纳. 制糖工业碳排放绩效评价方法研究[J]. 甘蔗糖业, 2020,49(04):116-121.
- [33] 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.
- [34] 陈瑶. 低碳审计评价指标体系构建及应用研究[D]. 长沙. 中南林业科技大学, 2016.
- [35] 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.
- [36] 傅双双. 企业碳审计评价指标体系构建及其应用[D]. 无锡. 江南大学, 2014.
- [37] 高建慧. 低碳审计评价体系构建理论分析与实证研究[D]. 宁波. 宁波大学, 2013.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 郭建超. 国有高耗能企业碳审计框架设计与实施路径研究[D]. 兰州. 兰州财经大学, 2021.
- [41] 胡漾, 唐金平, 陈友良, 张强. 基于 PCA 与熵权的贝叶斯地下水环境质量评价模型[J]. 节水灌溉, 2018(12):60-64.
- [42] 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]. 成都. 四川师范大学, 2021.
- [43] 金珺. 碳审计框架探讨[J]. 现代商贸工业, 2011,23(14):176-177.
- [44] 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.
- [45] 李春瑜. 大气环境治理绩效实证分析——基于 PSR 模型的主成分分析法[J]. 中央财经大学学报, 2016(03):104-112.
- [46] 李飞. 半导体企业碳审计方法[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2010(10):305-306.

- [47] 李飞. 企业开展碳审计的方法学[J]. 企业技术开发, 2010,29(13):129-130.
- [48] 李富平, 吴自民, 李良玉, 鲁明星. 水泥行业清洁生产评价方法初探[J]. 硅酸盐通报, 2007(02):320-323.
- [49] 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.
- [50] 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. 哈尔滨商业大学, 2019.
- [51] 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.
- [52] 刘鹤, 刘鑫, 吴文瀚, 王博. 利用 AHP-BP 法建立水泥企业循环经济评价指标体系的研究[J]. 环境工程, 2014,32(06):148-152.
- [53] 刘少瑜, 苟中华, 巴哈鲁丁. 建筑物温室气体排放审计——香港建筑物碳审计指引介绍[J]. 中国能源, 2009,31(06):30-33.
- [54] 刘轩昊. 我国碳税立法研究[D]. 长沙. 中南大学, 2011.
- [55] 陆婧婧, 苏宁. 碳审计的国际比较及启示[J]. 商业会计, 2010(16):29-30.
- [56] 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.
- [57] 孙翰雯. 浅谈碳审计的方法[J]. 时代金融, 2016(29):250-251.
- [58] 孙莹, 章蓓蓓, 张涛, 马吉, 黄有亮. 试论建筑物碳审计的引入与推行[J]. 建筑经济, 2010(09):25-28.
- [59] 童瑞连, 庄尚文. 审计职业教育与国民教育融合发展路径研究[J]. 南京审计大学学报, 2020,17(03):33-39.
- [60] 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.
- [61] 王爱华, 李双双. 企业低碳审计研究综述[J]. 当代会计, 2015(01):3-5.
- [62] 王涵, 李谦. 火电行业低碳绩效审计评价指标体系构建及应用研究[J]. 河南财政税务高等专科学校学报, 2019,33(06):27-33.
- [63] 王斯颖, 何兴邦. 建筑物低碳审计初探[J]. 中国乡镇企业会计, 2011(01):145-146.

- [64] 熊欢欢, 杨赛得斯, 邓文涛, 阮涵淇. 国外碳审计经验及启示[J]. 财会通讯, 2016(25):111-113.
- [65] 阳秋林, 游友珍. 两型社会建设中水泥行业社会责任会计指标体系构建[J]. 财会月刊, 2012(09):52-55.
- [66] 杨录强. 低碳城市建设的碳审计目标与评价指标[J]. 现代企业, 2013(10):50-51.
- [67] 杨娴雅. 电力企业碳审计评价指标体系的构建研究[D]. 长沙. 中南林业科技大学, 2020.
- [68] 杨应杰. 碳审计应用的国际比较与经验借鉴[J]. 现代企业, 2013(06):66-67.
- [69] 杨渝蓉, 齐砚勇. 水泥企业碳审计方法及其应用[J]. 新世纪水泥导报, 2011, 17(03):14-19+74.
- [70] 姚丽琼. 资源型企业低碳审计风险识别、评估与管理研究[J]. 邵阳学院学报(社会科学版), 2016, 15(06):82-86.
- [71] 姚林. SQ 公司碳审计制度框架与流程设计研究[D]. 武汉. 湖北经济学院, 2019.
- [72] 余欢欢. 浙江省低碳审计评价指标体系构建[D]. 长沙. 湖南大学, 2013.
- [73] 余丽, 周旭磊. 碳达峰目标实现的国际经验及中国路径[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2022.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 郑立乔. 低碳经济背景下国内企业碳审计制度框架研究[D]. 北京. 北京交通大学, 2014.
- [77] 郑石桥. 论碳审计方法[J]. 财会月刊, 2022.
- [78] 郑欣. 基于主成分分析法和熵权法的鄂尔多斯市生态承载力研究[D]. 合肥. 安徽大学, 2019.
- [79] 仲怀公, 马圆明. 我国碳审计问题研究[J]. 商业会计, 2021(08):14-19.
- [80] 朱朝晖, 梁胜浩. 供应链碳足迹与企业碳审计[J]. 中国注册会计师, 2015(12):92-96.

- [81] 庄尚文, 蒋屠鉴, 王丽. 新时代推进碳审计全覆盖的问题与对策[J]. 财会月刊, 2020(17):86-91.

致 谢

感戴天地，感谢生活。

感恩父母奉献，数载无微不至，争执中谅解，嫌弃中挂怀。

感恩师长解惑，数科传道授业，抱怨中成长，怀疑中遗憾。

感恩同窗结缘，数日互勉共进，珍惜且欢喜，陪伴且常念。

感恩祖国培育，数次追逐梦想，望不负盛世，焕青春色彩。