

分类号 C8/321
UDC

密级
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目：基于改进直觉模糊集的甘肃省生态安全评价

研究生姓名：郑乐乐

指导教师姓名、职称：郭精军、教授

学科、专业名称：统计学 应用统计硕士

研究方向：经济统计应用

提交日期：2022年5月30日

独创性声明

本人声明所提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: 郑乐乐 签字日期: 2022.5.30

导师签名: 郭林 签字日期: 2022.5.30

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内容.

学位论文作者签名: 郑乐乐 签字日期: 2022.5.30

导师签名: 郭林 签字日期: 2022.5.30

Evaluation of Ecological Security in Gansu Province Based on Improved Intuitionistic Fuzzy Sets

Candidate : Zheng Lele

Supervisor:Guo Jingjun

摘 要

近年来,全球生态环境变化剧烈,自然灾害频发,生态环境安全已成为国际生态研究的热点。黄河流域是我国重要的经济、文化建设地区,能源开发区,其生态环境状况事关民生福祉、民族未来。甘肃省位于黄河流域上游地区,地处三大高原、生态屏障建设交汇之处,生态地位极为重要。因此,定量分析甘肃省区域生态环境状况,探究生态安全等级,对推进黄河流域生态高质量发展、高原生态屏障建设乃至全国生态文明战略实施具有重要意义。

本文首先基于集对分析、逼近理想解 TOPSIS、欧氏距离、汉明距离以及豪斯多夫距离等方法,对直觉模糊集理论进行改进;其次运用改进的直觉模糊集方法对甘肃省整体生态环境安全状况进行评价;然后将不同生态安全评价方法的评估结果进行对比分析,确定最优改进的生态安全评价方法;最后,依据最优改进的直觉模糊集理论对甘肃省区域生态环境状况进行评估,分析其生态安全变化趋势,结果表明:

(1) 结合集对分析、各贴适度测度改进的直觉模糊集理论,对甘肃省整体生态环境安全状况进行评价。结果表明:甘肃省 2012-2019 年生态安全由中等等级逐渐改善为普通等级,环境状态不断上升。将各贴适度改进的直觉模糊集与集对分析集对势的生态安全综合评价结果进行对比分析,可以得出基于集对分析、逼近理想解 TOPSIS 改进的直觉模糊集综合评价理论具备较好的科学性与实际应用性,其精确度与灵敏度相对更高。

(2) 基于最优改进的直觉模糊集理论,对甘肃省区域生态状况进行综合评估。结果表明:甘肃省偏北部地区 2012-2019 年生态环境状况改善明显,酒泉市生态安全稳定于轻微等级,嘉峪关市生态安全等级由极其严重改善到中等;甘肃省中部地区 2012-2019 年生态环境建设状况良好,金昌市、武威市生态安全等级由中等提升至普通,白银市生态安全由严重改善至中等等级,兰州市生态安全未有变化,张掖市生态状况由普通改善至轻微安全;甘肃省偏南部地区 2012-2019 年生态状况较好,天水市、甘南州生态安全等级由普通提升至轻微,临夏州生态安全状况由中等改善至轻微安全,平凉市生态安全先下降至严重等级,后逐渐提升至普通安全等级,庆阳市生态安全由严重恶化至极其严重等级,随后逐渐改善

并稳定于中等安全等级，定西市、陇南市生态安全逐渐接近于轻微等级。

在此基础上提出甘肃省生态安全建设相关建议：促进甘肃省供给侧结构性改革，调整能源消费结构，提高资源利用效率，促进生态、绿色率较高的产业发展；提升生产生活废物的利用效率与科学研发的支持力度，研发推广环保、清洁新技术，拓展无碳能源的适用领域；完善环保制度体系，加强监督与检测，加大工业企业违规行为的惩处力度，促进生态文明建设。

关键词：生态安全 直觉模糊集 集对分析 TOPSIS 甘肃省

Abstract

In recent years, the global ecological environment has changed dramatically, natural disasters have occurred frequently, and ecological environment safety has become a hot spot in international ecological research. The Yellow River Basin is an important economic and cultural construction area and an energy development zone in China. Its ecological environment is related to people's well-being and the future of the nation. Gansu Province is located in the upper reaches of the Yellow River Basin, where the three major plateaus and the construction of ecological barriers meet, and its ecological status is extremely important. Therefore, it is of great significance to quantitatively analyze the regional ecological environment in Gansu Province and explore the ecological security level, which is of great significance to promote the high-quality ecological development of the Yellow River Basin, the construction of the plateau ecological barrier, and even the implementation of the national ecological civilization strategy.

This paper firstly improves the intuitionistic fuzzy set theory based on the method of set pair analysis, approximate ideal solution TOPSIS, Euclidean distance, Hamming distance and Hausdorff distance. Then, the evaluation results of different ecological security evaluation methods are compared and analyzed to determine the optimal and improved ecological security evaluation method. Analyzing the trend of changes in its

ecological security, the results show that:

(1) Combining set pair analysis and improved intuitionistic fuzzy set theory for each closeness measure, this paper evaluates the overall ecological environment security in Gansu Province. The results show that from 2012 to 2019, the ecological security of Gansu Province has gradually improved from a medium level to an ordinary level, and the environmental status has continued to rise. Comparing the comprehensive evaluation results of the ecological safety of the improved intuitionistic fuzzy sets with each closeness degree and the set-pair analysis set pairing potential, it can be concluded that the comprehensive evaluation method of the intuitionistic fuzzy sets based on the set-pair analysis and approaching the ideal solution TOPSIS is better. Scientific, effective and applicable, its accuracy and sensitivity are higher.

(2) Based on the optimal improved intuitionistic fuzzy set theory, a comprehensive assessment of the regional ecological status in Gansu Province was carried out. The results show that: the ecological environment in the northern part of Gansu Province has improved significantly from 2012 to 2019, the ecological security of Jiuquan City is stable at a slight level, and the ecological security level of Jiayuguan City has improved from extremely serious to medium; the ecological environment construction in central Gansu Province from 2012 to 2019 In good condition, the ecological security level of Jinchang City and Wuwei

City has been improved from medium to normal, Baiyin City's ecological security has been improved from serious to medium level, Lanzhou City's ecological security has not changed, and Zhangye City's ecological security has improved from normal to slightly safe; From 2012 to 2019, the ecological status of the southern region was relatively good. The ecological security level of Tianshui City and Gannan Prefecture increased from normal to mild, and the ecological security status of Linxia Prefecture improved from moderate to slightly safe. The ecological security of Qingyang City deteriorated from a serious level to an extremely serious level, and then gradually improved and stabilized at a moderate level of security. The ecological security of Dingxi City and Longnan City gradually approached a mild level.

On this basis, relevant suggestions on the construction of ecological security in Gansu Province are put forward: promote the supply-side structural reform in Gansu Province, adjust the energy consumption structure, improve the efficiency of resource utilization, and promote the development of industries with high ecological and green rates; improve the utilization efficiency of production and domestic waste. With the support of scientific research and development, research and development and promotion of environmental protection and clean new technologies, expand the application field of carbon-free energy; improve the environmental protection system, strengthen supervision and testing,

increase the punishment of industrial enterprises for violations, and promote the construction of ecological civilization.

Keywords: Ecological security; Intuitionistic fuzzy set; Set pair analysis; TOPSIS; Gansu Province

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究目的与意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 国外研究进展.....	3
1.2.2 国内研究进展.....	5
1.2.3 研究述评.....	8
1.3 研究思路.....	9
1.4 研究技术路线图.....	10
1.5 研究技术概述.....	11
1.6 研究的可能创新之处.....	12
2 研究理论与方法	13
2.1 研究理论.....	13
2.1.1 集对分析理论.....	13
2.1.2 直觉模糊集理论.....	14
2.1.3 权重理论.....	15
2.1.4 改进理论.....	16
2.2 研究方法.....	17
2.2.1 生态安全评价指标体系构建原则.....	17
2.2.2 生态安全评价指标体系.....	17
2.2.3 生态安全评价指标安全等级.....	19
2.2.4 改进方法.....	21
3 甘肃省整体生态安全研究	23
3.1 研究区域概况.....	23
3.2 数据来源.....	23
3.3 决策过程.....	24
3.4 甘肃省整体生态安全综合评价结果分析.....	25
3.4.1 集对分析-直觉模糊集-TOPSIS 测度结果分析.....	26
3.4.2 集对分析-直觉模糊数欧式距离测度结果分析.....	28

3.4.3 集对分析-直觉模糊数汉明距离测度结果分析.....	29
3.4.4 集对分析-直觉模糊集豪斯多夫距离测度结果分析.....	30
3.4.5 集对分析集对势测度结果分析.....	31
3.5 生态安全评估结果对比分析.....	32
3.6 小结.....	33
4 甘肃省区域生态安全研究.....	35
4.1 甘肃省行政区划.....	35
4.2 甘肃省地理区域划分.....	35
4.3 甘肃省区域生态安全综合评价.....	36
4.3.1 甘肃省北部地区生态评价.....	36
4.3.2 甘肃省中部地区生态安全评价.....	38
4.3.3 甘肃省东南部地区生态安全评价.....	41
4.3.4 甘肃省南部地区生态安全评价.....	43
4.3.5 甘肃省西南部地区生态安全评价.....	44
4.4 小结.....	47
5 结论与展望.....	48
5.1 主要结论.....	48
5.2 不足与展望.....	49
5.3 政策建议.....	50
参考文献.....	51
后 记.....	58
攻读博/硕士学位期间发表的论文和其他科研情况.....	59

1 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

生态环境是一切生物存在的基础,加强建设与保护生态环境是满足人民日益增长的美好生活需要的重要举措。1972年“第一届联合国人类环境会议”指出生态环境保护应与各国的经济发展相结合,是环境保护事业正式引起世界各国政府重视的开端。我国开展生态环境保护事业相对较晚,2000年《全国生态保护纲要》中首次提出“生态安全”的概念,2012年党的十八大报告中将“生态文明建设”写入党章并被纳入中国特色社会主义建设“五位一体”的总体布局之中,突出生态文明建设的重要地位。2016年十三五规划突出“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念,以提高环境质量为核心,推进生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化。2017年十九大报告提出“建立健全绿色低碳循环发展的经济体系”,注重绿色经济的发展。2019年习近平总书记甘肃之行,强调要注重生态环境建设与保护,致力于生态环境与经济社会的协调发展。2020年十九届五中全会提出“十四五”时期经济社会发展要以推动各方面高质量发展为主题,构建新发展格局。综合我国近10年生态环保政策可以看出,党中央紧紧围绕生态环境和经济社会协调发展,提出了一系列的战略、思想理念,包括经济、社会、生态等各方面高质量发展战略、绿水青山就是金山银山思想、建设生态环境就是增进人民福祉理念等新时代中国特色社会主义发展理念。

生态环境安全是实现生态文明建设的基础,是中国特色社会主义事业的重要内容,事关“两个一百年”奋斗目标和中华民族的伟大复兴。习总书记曾在全国生态环境大会上指出:“生态环境安全是国家安全的重要组成部分,是经济社会健康发展的重要保障”。西部大开发与“一带一路”倡议实施以来,西部地区、城镇发展迅速,在获得较大经济效益的同时,生态环境面临着极大的考验。甘肃省是西部开发、生态屏障及国家生态安全战略实施的重要地区,当前资源滥用、过度开发、环境污染形势严峻,生态建设已成为地区发展的重要内容之一,如2012

年甘肃省“十二五”环境保护规划提出开展重要生态功能区保护和管理、加强自然资源开发的生态保护监管、建立法规制度和生态补偿机制以及环境信息能力建设等，保障生态文明与国家生态安全屏障建设。2020年甘肃省“十四五”生态环境保护规划编制工作座谈会从筑牢国家西部生态安全屏障、水生态修复、土壤污染治理与修复、环保设施建设、生态文明试点示范等方面，对生态环境保护提出相关规划与建议。2021年生态环境部制定印发了《生态保护红线监管指标体系（试行）》，从面积、性质、功能、管理四个方面监测生态环境状况。2021年甘肃省召开《甘肃省黄河流域环境保护与污染治理专项实施方案》视频评审会，会议指出甘肃省黄河流域生态环境保护是政治要求、是经济协调发展的客观要求，具有维护国家生态安全的重要作用。因此，甘肃省生态安全的综合研究与量化评估能够实现区域生态环境和经济社会的可持续、高质量协调发展提供一定的理论支撑与实践建议。

1.1.2 研究目的与意义

（1）研究目的

在区域生态安全理论的基础上，参考前人学者的研究成果，基于甘肃省生态环境状况构建生态环境安全状况评价指标体系。在此框架下，对多属性决策直觉模糊集理论进行合理改进，并将其应用于甘肃省的生态环境安全状况的综合评估中，以充分反映甘肃省总体以及各地区的生态环境状况，并为生态环境综合评价方法的探索、政府发布相关环境保护制度文件、公众提升生态环保素养以及实施国家生态安全战略相关建设措施提供参考。

（2）研究意义

对甘肃省生态环境安全的科学评估有助于推进黄河流域高质量发展建设、高原生态屏障建设以及国家生态文明战略的实施。因此，生态环境状况综合评估方法的改进探索及区域应用研究，提升其评估精度与科学性，具有重要的理论意义和现实应用意义。具体如下：

理论意义：通过将集对分析理论引入直觉模糊集中，依据集对分析联系系数的定量分析阶段数据的特性，合理地解决直觉模糊集原始决策矩阵的主观性强的问题，使得直觉模糊集理论的适用范围更加广阔，在一定程度上丰富了集对分析与

直觉模糊集间的相关联系转换的理论知识,为后续的相关研究提供研究分析思路。

现实意义:通过在直觉模糊集中引入集对分析理论对二者的几何意义、理论关系有了更为精确地理解和认知。将集对分析改进的直觉模糊集理论方法应用于生态环境安全状况的综合评估中,根据甘肃省地区生态环境状况评价指标数据,进行黄河流域区域生态安全综合评价,既有助于验证直觉模糊集理论经集对分析改进的合理性与科学性,又可为甘肃省政府围绕国家生态安全战略,制定实施相关环保措施提供合理的建议,切实推进甘肃省生态环境与经济的协调高质量发展,对其生态环境的建设与保护具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究进展

目前,生态安全问题已经成为全球面临的需合理解决的关键性问题。由于西方国家工业化较早,生态环境问题出现的时间节点也较早。因此,国外对于生态环境保护事业的关注于20世纪70年代就已经开始了,其围绕生态环境建设、产业生态效率、环境建设与经济协调发展、节能减排等方面进行了大量的理论与应用研究。20世纪80年代,世界环境与发展委员会(WCED)和国际应用系统分析研究所(IIASA)首次使用了“环境安全”一词,检测世界环境发展的关键问题,并提出相关行动建议。在此之后,关于生态环境安全方面的讨论与研究逐渐增多,例如,在生态环境安全状况评估方法研究方面,Solovjova(1999)将对生态系统的动态建模与风险评估的筛选方法进行结合,对黑海大陆架西北部生态环境安全状况进行更加准确地估计与预测。Suter等(2005)介绍了世界卫生组织(WHO)将人类健康风险评估与非人类生物体和生态系统风险评估相结合,制定了一个执行风险评估的框架,以提高评估的效率和质量。Lange等(2010)将实验室毒理学与人口、社会、生态系统联系起来,从有机体层面的敏感性到更高组织层面的脆弱性对生态环境状况综合分析思维进行拓展,提出了一种新的通用框架对生态环境状况进行量化分析。Solovjova(2019)基于动态模型、概率生态筛选风险评估和观测数据(EERO),提出了一种在自然、人为、气候和入侵因素共同作用下的海洋生态系统数学建模和生态风险评估方法。Ermakov等(2021)

分析讨论了工业设施运行、危险化学品使用以及对物流运输基础设施等因素影响环境状况的定量和定性评估方法,探究环境安全背景下更优的生态环境状况评估方法。在生态环境安全状况的评估应用方面,Ramesh 等(2015)提出在城市规划和微观层面的建筑设计中,需适当考虑生态环境完整性和环境保护,系统地阐述了以景观、生态斑块及其连通性为基础建立一个生态走廊,以加强城市生态系统,降低城市定居点的热岛效应,通过微观层面的调整,达到对城市生态环境系统完整性宏观层面的建设。Telichenko 等(2016)依据回顾和预测性指标数据,对俄罗斯联邦 2010-2020 年间大气空气生态安全状况进行了综合分析。Shvartsburg 等(2017)在能源分析的基础上,建立塑造工艺能源转换效率和生态安全之间的相互关系,通过整体环境质量指数对工艺过程的生态安全进行数值评估,基于生态安全准则对不同类型的工艺塑造过程进行综合比较分析。Belete (2018)以湿地水域面积、水质、污水排放为指标,对埃塞俄比亚哈瓦萨市、哈瓦萨湖和切莱卡湿地工业的生态环境可持续性潜力进行综合的分析研究。Nassania 等(2021)依据矿产丰富经济体可用数据系列对矿产等自然资源的生态足迹进行研究,以降低人类对生态环境的不利影响。纵观近 20 年国外对生态环境安全状况方面的研究,由对生态环境系统进行研究,分析其存在的风险状况,到基于自然环境、人类社会等多系统、多因素的共同作用,对人类-自然复合生态系统状况进行综合评估;由对自然生态环境状况的研究逐渐发展到对城市建设与生态规划相结合等方面的探索研究,总体主要集中于生态系统安全、生态环境风险评估、景观格局优化、生态可持续性潜力评估、能源安全评估等方面。

直觉模糊集作为多属性决策(MADM)的重要部分,旨在考虑有限目标属性的前提下,对可选择方案进行排序以及择优,是较为优秀的综合决策法。1986年 Atanassov 等根据实际需求,对模糊集理论进行改进,引入非隶属度和犹豫度,提出了直觉模糊集的概念,即利用有限的初始决策信息,建立直觉模糊数集,根据实际集与理想集间的距离测度进行近似推理、决策最优集合。由于直觉模糊集作为多属性决策的一种重要决策方法,符合现实中人们对客观事物的理解与描述,其能够较好地对象进行定量研究,后续学者们对其理论方法进行了多方面拓展。例如,Şahin (2016)考虑到区间直觉模糊集的犹豫程度,在聚集每个方案对应的区间直觉模糊信息时,利用区间直觉模糊加权聚集算子,提出一

种新的精度函数，对所有备选选项进行排序。Afzali 等（2016）将直觉模糊集拓展为区间直觉模糊集，提出了具有群体决策的模糊多目标线性规划模型。Davoudabadi 等（2021）将数据包络分析法与区间值直觉模糊集相结合，提升其理论方法在不同环境中的适用性，用于进行综合评估与最优决策等。与此同时，由于其能够利用已有有限的决策信息，结合不同距离测度方法进行近似推理、决策最优，直觉模糊集被广泛应用于管理、医疗、军事等领域。Bharati 等（2018）将直觉模糊集扩展为区间直觉模糊集，定义一个免疫模糊数及其期望区间和期望值，并应用于区间直觉模糊运输问题中。Khalid 等（2015）提出了基于豪斯多夫距离的直觉模糊软集之间的相似性度量，以及区间值模糊软集和区间直觉模糊软集的汉明距离和欧氏距离。此外，由于其能够定量刻画不确定研究对象的概念，直觉模糊集被广泛应用于军事、管理等领域。例如学者们以水-能源-食品间的安全关系、乡村道路建设的承包商选择、地面作战目标的威胁性、公私合营项目的方案选择、车货匹配主体的方案抉择以及老年代步车的优化设计等为研究对象，结合多属性决策直觉模糊集方法进行最优决策。

1.2.2 国内研究进展

保护与建设生态环境，是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计。我国对于生态环境安全方面的研究相对较晚，主要是对生态安全概念的界定、区域性生态系统安全现状的定性评价等。如吴国庆（2001）通过建立资源生态环境综合评价指标体系，在区域农业可持续发展背景下，对农业生态安全概念以及特点进行综合研究。左伟等（2002）在对局部地区的生态安全态势研究中，制定评价指标体系概念框架。王韩民等（2002）将生态环境安全提升到与军事、政治、经济安全同等重要的地位，对国家生态安全的概念、特点等进行研究。吴开亚等（2004）通过主成分投影评价模型，探究新型区域生态安全评估指标的选取及赋权方式。刘勇（2004）依据土地资源状况，合理建立生态安全综合评价指标体系，对区域土地资源的生态安全状况进行研究。王宏昌等（2006）将生态安全划分为自然、经济和社会三个方面，从生态系统完整性方面对生态环境安全概念进行综合界定。

生态环境安全状况是生态环境现状的定量体现，既有助于高质量发展的变革，也有助于生态文明战略的实施。在 21 世纪，中国关于生态安全的研究逐渐从理

论概念界定发展到实际案例研究,由宏观的全球、海洋大陆等大范围区域转变为针对地区、生态系统等细致方面的探究,生态环境问题备受关注。例如,为响应联合国的千年发展目标,2006年我国发起并成立了国际生态安全合作组织(the International Organization for Ecological Security Cooperation, IESCO)。在此之后,国内学者们围绕国家生态环境安全建设,进行了多方面的探索,主要集中于两个方面:一是对区域影响生态环境的污染物浓度时空分布特征、景观分布格局、生态足迹、自然资源开发以及与经济社会协调发展等方面的应用研究;二是对生态环境安全状况综合评价指标体系的构建、权重设计以及环境质量评估方法的拓展等方面的理论探索。

在生态环境安全评价的应用研究方面,Liu等(2020)提出一种基于贝叶斯网络的概率方法,定量预测流域重金属混合污染的生态环境状况。Lu等(2021)提出一种基于网格的网络环境分析(FEM-NEA)框架,对具有多种土地类型的景观规模矿区生态系统进行安全状况评估。Dai等(2021)基于最小累积阻力模型,提出一种景观生态与经济集聚双重作用的综合生态安全网络(ESN)评估方法,对区域城市生态协调发展进行研究。Chen等(2021)将水-碳-生态足迹相结合,形成基于生态压力、碳排放和水资源压力指数的生态环境综合评价指标框架,提出以三维生态足迹模型来定量分析评估资源环境压力的时空变化过程。白中科(2021)对国土空间生态保护与修复的科学方法、发展战略进行了较为细致的研究。徐雯雯等(2021)利用遥感信息与GIS空间分析技术,对国土空间开发的合理性进行综合评估,并结合土地发展利用现状研究地区的发展潜力及风险,为生态环境保护、城镇建设、农业生产提供合理建议。Chen等(2020)在研究采矿绿色化过程中,以资源、环境和社会经济效益的可持续性为核心对绿色矿山建设现状进行评价,提出改善绿色矿山建设和矿业可持续发展的战略框架。林凯等(2021)结合扎根理论通过词云、热点分析等技术对长江经济带高质量发展和生态环境保护进行综合分析,为其经济、生态共同高质量发展提供合理建议。吴秦豫等(2021)利用GIS和突变级数法建立风险分级标准,对黄河流域中段矿区生态系统退化风险区域进行综合识别,分析其退化风险和影响因素,以对黄河流域高质量发展与生态系统的建设与保护提供参考。刘世栋等(2012)基于地区经济、社会指标,基于滨海地区生态环境安全状况,分析人类活动因素区域生态安

全状况的影响。郭二果等（2021）基于生态安全战略，对内蒙古生态服务功能基础进行综合分析，为其生态安全屏障建设提供合理的思路与建议。

在生态环境安全评价方法的理论探索方面，孙枫等（2021）基于集成生态系统服务量化方法，对高度城市化地区的城市生态安全格局进行综合分析研究。李强华等（2021）基于 DPSIR 模型构建生态安全评价指标体系，对三亚市海岸带复合生态系统进行综合安全评估。何刚等（2021）探究经济生态协调发展过程中，将 Lotka-Volterra 共生概念引入生态安全评价中，并结合 BP-DEMATEL 模型、熵权法对安徽省生态环境安全状况、影响因素及其内在相互作用关系进行探究分析。Li 等（2011）针对生态安全体系的模糊性，利用层次分析法与模糊综合评价法进行生态安全综合评估。Gao 等（2019）基于社会经济、资源环境的应激-状态-响应生态环境安全状况评价指标体系，将粗糙集、综合指数、灾难级数理论相结合提出了一种新的渐进式生态环境状况评估系统。Huang 等（2021）基于电路理论和生态退化风险评估，提出一种识别生态环境空间范围、内部缺陷和外部威胁的综合方法，以确定生态环境恢复和保护的优先区域。Tang 等（2021）在评估流域生态流量过程中，提出了一种将生态流量指标和生态相关水文指标相结合的生态水文状况系统评估方法。Ke 等（2021）基于“驱动-压力-状态-影响-响应”（DPSIR）模型，建立城市生态安全评价指标体系，并结合空间自相关分析法来探索影响城市生态环境安全状况差异变化的空间机制。Ma 等（2021）基于数据包络分析法识别区域旅游生态安全系统质量，结合计量模型对区域旅游生态安全状况的空间效应进行分析研究。Xiao 等（2021）基于网络爬虫技术和多源遥感数据，对区域煤炭资源开发和社会生态系统修复状况进行综合评估。总体来说，生态安全的研究方法涉及多个学科领域，对其评价方法进行拓展研究，有助于多方面、多角度的综合把握区域生态环境状况，深度优化评估结果的精确度、有效性以及实际意义，为政府决策提供更加合理的理论支撑与参考意见。

集对分析理论是我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种新的可较为精确地解决信息缺失问题的理论方法。在多属性决策问题中其被广泛应用，如 Shen 等（2020）在区间直觉模糊集环境中，运用集对分析理论进行多属性决策。韩承豪等（2020）将集对分析与可变模糊集合相结合，对顶板水害防治进行科学决策。陈闻鹤等（2020）将集对分析与马田系统赋权法相结合，对企业疫情防控风险态

势进行综合评估。杨亚锋等（2021）将集对分析与偏联系数法相结合，构建一种融合信息演化的综合评价模型，对区域水资源承载力进行综合评估。王甜甜等（2019）将集对分析与动态权理论相结合，确立水源识别区间，构建水源识别模型对矿井突水水源进行综合分析。徐昕军等（2018）将集对分析与云理论相结合，针对城市地下病害风险评估问题的模糊性进行定量分析，评估其病害的危险性。此外，诸多学者通过利用集对分析理论解决不同环境下的实际决策问题，如侯丁冉等（2021）依据集对分析理论对旅游业的综合发展能力进行测度，深入探究其时空差异特征。施洲等（2021）将集对分析理论应用于风险评估中，对大型桥梁沉井基础施工过程中的动态风险进行综合测度分析。董娜等（2020）结合集对分析理论度建筑业过程中的施工项目进行绿色评价，以分析其绿色环保水平。童磊等（2020）基于集对分析理论，对城市人口健康的脆弱性、敏感性及应对性进行综合分析。与此同时，集对分析理论在食品工业低碳创新能力的综合评估、沿海地市低碳转型与其时空差异性的综合评估分析、水资源的合理分配与城市水资源需求量的预测、雾霾风险等级的综合评估、城市人口增长与空间扩展协调性的综合分析研究、分析风电机组汇聚时区域风电出力波动不同时空尺度下的同一度与差异性变化特性以及盐岩储气库运营期稳定性的综合评估等方面有着较为广泛的应用。

1.2.3 研究述评

在对生态环境安全的研究中，国外学者在理论方法方面，围绕生态系统的动态建模与风险评估结合、人类健康风险与生态系统风险评估相结合以及复杂因素共同作用下的海洋生态评估等方法进行了相关研究；在应用方面，通过对城市建设、大气环境、能源生产、资源开发以及湿地探测等方面进行研究，以达到对生态环境状况进行测定的目的。而国内学者将理论研究与应用充分结合，在国家生态安全战略背景下，一方面对景观分布格局、生态足迹以及与经济社会协调发展等进行应用研究；另一方面对生态环境安全状况综合评价指标体系的构建、权重设计以及环境质量评估方法的拓展等进行理论探索。在国内外学者对于生态安全评价理论以及应用研究中，其不同学科间的相互交融是主流，如风险评估与生态建模结合、毒理学与生态评估结合、贝叶斯概率预测生态状况、空间遥感技术分

析生态风险、词云分析技术对生态进行评价等等，不同领域跨学科合作研究在理论方法的拓展及验证中发挥了重要作用。

多属性决策（MADM）是现代决策理论的重要部分，旨在考虑有限目标属性的前提下，对可选择方案进行排序以及择优，进行综合决策。其中，直觉模糊集作为多属性决策的一种重要决策方法，更加符合现实中人们对客观事物的理解与描述，被诸多学者不断的发展改进。但是直觉模糊集的初始决策矩阵主要来源于决策者对信息缺失的目标的主观意愿，原始数据主观性较强。虽然通过将直觉模糊集发展为区间值直觉模糊集，使得原固定的隶属度和非隶属度转换为隶属度区间和非隶属度区间，但其依然过于依赖决策者的偏好，其决策结果的精确性与有效性不强，而集对分析是一种较好地分析处理不确定性信息系统的新理论方法，其在模糊领域的应用也较为广泛。由于直觉模糊集多适用于信息模糊的评估对象及研究领域，而集对分析却能较好地处理定量数据指标的不确定性问题，且直觉模糊集理论发展相对成熟，应用领域较为广泛，是一种适用性较强的综合决策方法，但关于生态环境方面的研究应用不多。因此，通过对直觉模糊集理论进行改进优化，将其合理应用于生态环境评价领域，是对其理论与应用双重方面的拓展，也是对生态环境状况评估方法的探索，具有较强的科研与实际意义。

1.3 研究思路

文章基于改进的直觉模糊集理论方法对甘肃省生态环境安全状况进行综合评估，对该理论方法的基础上进行了如下几方面的研究：

（1）构建评价指标体系。生态安全等级评估包含各方面自然环境因素和社会经济因素复杂状况的综合水平评估。文章在综合分析国内外学者在研究生态环境安全评估相关经验成果的基础上，深入研究分析影响生态环境安全的关键指标，依据科学性、合理性与实际可操作性原则，结合甘肃省生态环境实际状况，从社会、经济、环境、自然资源四个方面发展状况出发，构建甘肃省整体以及区域生态环境安全评估指标体系框架。

（2）划分指标量值等级。查阅我国《生态县建设规划》建设指标要求、《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）等资料，参照我国经济增长速度中低速、稳步、快速、较快、高速等级划分、地区生产总值所包含的类型、地区政府财政支

出项目类型以及能源生产与消费的类型构成等,对环境评估指标数据进行集对分析联系数等级划分。

(3) 改进直觉模糊集理论。在集对分析与直觉模糊集理论的几何意义指导下,推导集对分析联系数的模糊数化公式,将经过集对分析联系数化的生态环境安全状况指标数据合理地转化为直觉模糊集中的直觉模糊数,解决直觉模糊集原始决策矩阵来源的主观性强的问题。

(4) 分析最优改进方法。结合熵权法确定的生态环境安全状况指标数据的客观权重,利用逼近理想解 TOPSIS 法对甘肃省总体生态环境指标数据的直觉模糊数按照与理想解的接近程度进行排序,选择最优生态安全等级。与此同时,将其生态安全状况综合评估结果与传统欧氏距离、汉明距离等不同距离测度下的综合评估结果进行对比分析,以验证其理论方法的科学性与合理性。

(5) 实际应用最优改进的直觉模糊集理论。基于甘肃省区域生态环境评价指标体系,依据甘肃省 14 个地州市生态环境状况评价指标数据,结合改进的直觉模糊集综合评估方法,对甘肃省地区生态环境状况进行评估研究。

1.4 研究技术路线图

依据文章研究思路及行文流程,结合 EdrawMax 软件做本文研究技术路线图,如下:

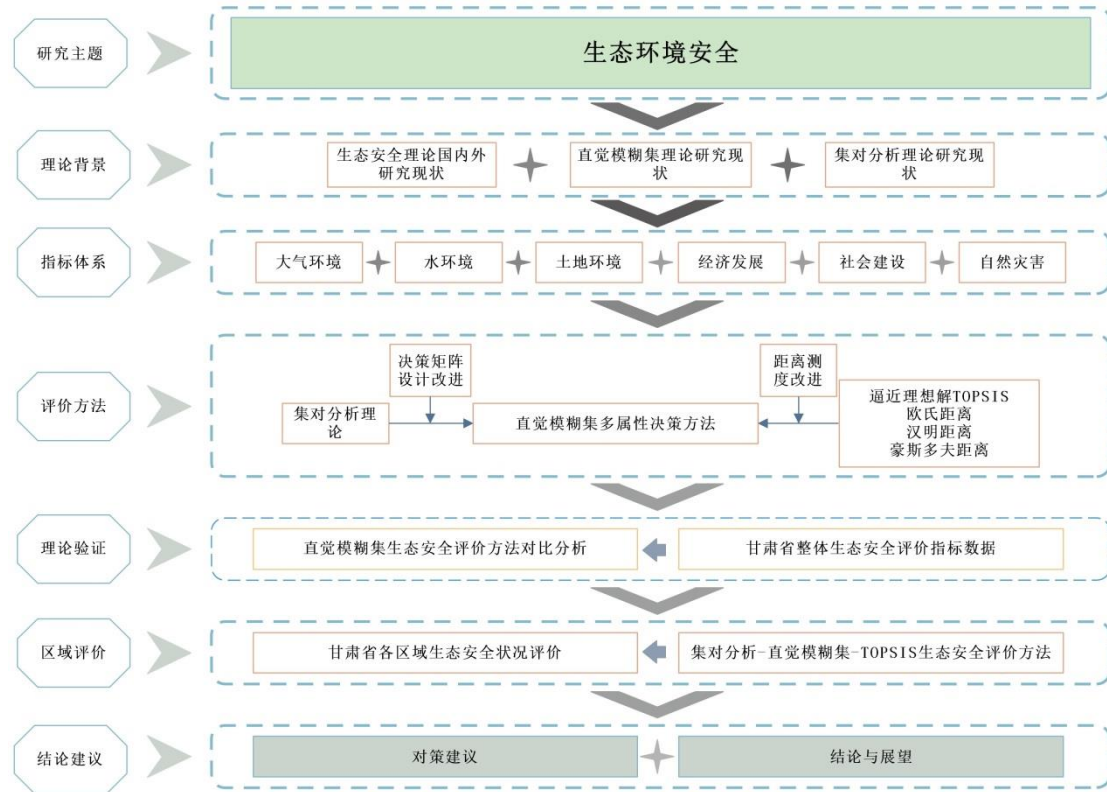


图 1.1 研究路线图

1.5 研究技术概述

(1) 文献分析：本文通过文献分析研究了解前人学者关于集对分析与直觉模糊集理论方面的联系与拓展，及生态环境安全的相关理论知识，以便于开展本研究所要进行研究的基本工作，基于改进的集对分析-直觉模糊集对生态环境安全状态进行综合评价。

(2) 统计研究：通过查找和阅读近几年的中国环境状况公报、中国环境统计年报等资料，在官网上查找有关内容，引用了最新的数据，并对这些资料进行了系统分析，通过图表的形式将其表现出来，从而使论文更具有说服力。

(3) 集对分析与直觉模糊集理论：基于直觉模糊集与集对分析理论几何意义，推导集对分析与直觉模糊集间的相互转化公式以及集对分析联系数公式，运用集对分析方法反方向来确定直觉模糊集的初始判断矩阵，通过逼近理想解 TOPSIS 分析法进行综合评估与排序，选择最优隶属区间，确定最终的评估结果。

(4) 距离贴近度：逼近理想解 TOPSIS 法、欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离。

1.6 研究的可能创新之处

论文在前人学者关于生态安全方面研究的基础上,结合收集的相关资料与理论知识进行分析探究,根据研究内容总结为以下几方面的创新之处:

(1) 本研究将直觉模糊集多属性决策理论应用于生态环境安全的综合评价中,在不同学科间的交融互惠中,对甘肃省总体以及地区的生态安全状况进行动态评估,揭示并掌握甘肃省生态环境发展的现状与波动变化趋势。

(2) 本研究先将集对分析三元联系数改进至五元联系数,后以拓展后的集对分析理论为辅助,对直觉模糊集进行改进完善,使得集对分析联系数合理转化为直觉模糊数,以解决直觉模糊集原始决策矩阵设计的主观性强的问题,最终使得改进后的直觉模糊集理论能够在定量数据的前提下,较好地适用于生态环境安全评估领域。

(3) 本研究在集对分析改进直觉模糊集理论的基础上,继续结合逼近理想解 TOPSIS 贴近度测度方法,对其结果测算过程继续进行改进,为更加精确、合理、符合实际情况地评估甘肃省生态环境状况,并与常见的贴近测度如欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离等进行比较分析,验证结合各贴近度测度方法后的集对分析-直觉模糊集综合评估方法的优劣性,为之后甘肃省区域生态安全评价方法的选择提供理论依据。

2 研究理论与方法

2.1 研究理论

2.1.1 集对分析理论

(1) 集对分析是一种把所论集合之间的确定性和不确定性关系作为一种确定-不确定性系统进行综合分析的系统与数学分析方法。其核心思想是将两个集合中同时具备的特征称之为同一性, 相互矛盾、对立的特征记为对立性, 而其他的一些特征记为差异性, 从“同”、“异”、“反”三个方面研究两个事物间的特性、结构、状态以及相互联系。集对分析有两个基本概念, 一个为集对, 另一个为联系度。集对就是具有一定联系的两个集合组成的一个基本单位, 而联系度是两个集合之间的同一性、对立性、差异性的具体定量表现。

设集对 $H=(A,B)$ 有 N 个特征, 集合 A 与 B 所共有的特征数为 S , 所对立的特征数为 P , 所差异的特征数为 F , 则其基本公式为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

式中, μ 为联系度, a 、 b 和 c 分别是同一联系度、差异联系度及对立联系度, $a, b, c \in [0, 1]$, 且 $a + b + c = 1$; i 为差异联系度的标记, $i \in [-1, 1]$; j 是相反联系度的标记, 且 $j = -1$ 。

(2) 依据集对分析三元联系度理论, 将式 (1) 三元联系度扩展为五元联系度, 即强对立、强差异、同一度、弱差异和弱对立。其基本公式为:

$$\mu = a + (b_1 + b_2)i + (c_1 + c_2)j = a + b_1i^+ + b_2i^- + c_1j^+ + c_2j^- \quad (2)$$

式中, $a + b_1 + b_2 + c_1 + c_2 = 1$; $i^+ \in [0, 1]$; $i^- \in [-1, 0]$; $j^+ \in \{0, 1\}$; $j^- = -1$ 。由其负向指标五元联系度的计算公式, 推导相应五元正向指标联系度的计算公式, 具体见表 2.1:

表 2.1 集对分析五元联系数

成本型	收益型
$\mu_1 = \begin{cases} 1 & x_k \in [0, s_1) \\ \frac{s_1}{x_k} + \frac{x_k - s_1}{x_k} i^- & x_k \in [s_1, s_2) \\ \frac{s_1}{x_k} + \frac{s_2 - s_1}{x_k} i^- + \frac{x_k - s_2}{x_k} j^- & x_k \in [s_2, s_5) \end{cases}$	$\mu'_1 = \begin{cases} 1 & x_k \in (s_4, s_5] \\ \frac{s_5 - s_4}{s_5 - x_k} + \frac{s_4 - x_k}{s_5 - x_k} i^- & x_k \in (s_3, s_4] \\ \frac{s_5 - s_4}{s_5 - x_k} + \frac{s_4 - s_3}{s_5 - x_k} i^- + \frac{s_3 - x_k}{s_5 - x_k} j^- & x_k \in (0, s_3] \end{cases}$
$\mu_2 = \begin{cases} \frac{s_2 - s_1}{s_2 - x_k} + \frac{s_1 - x_k}{s_2 - x_k} i^+ & x_k \in [0, s_1) \\ 1 & x_k \in [s_1, s_2) \\ \frac{s_2 - s_1}{x_k - s_1} + \frac{x_k - s_2}{x_k - s_1} i^- & x_k \in [s_2, s_3) \\ \frac{s_2 - s_1}{x_k - s_1} + \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_1} i^- + \frac{x_k - s_3}{x_k - s_1} j^- & x_k \in [s_3, s_5) \end{cases}$	$\mu'_2 = \begin{cases} \frac{s_4 - s_3}{x_k - s_3} + \frac{x_k - s_4}{x_k - s_3} i^+ & x_k \in (s_4, s_5] \\ 1 & x_k \in (s_3, s_4] \\ \frac{s_4 - s_3}{s_4 - x_k} + \frac{s_3 - x_k}{s_4 - x_k} i^- & x_k \in (s_2, s_3] \\ \frac{s_4 - s_3}{s_4 - x_k} + \frac{s_3 - s_2}{s_4 - x_k} i^- + \frac{s_2 - x_k}{s_4 - x_k} j^- & x_k \in (0, s_2] \end{cases}$
$\mu_3 = \begin{cases} \frac{s_3 - s_2}{s_3 - x_k} + \frac{s_2 - s_1}{s_3 - x_k} i^+ + \frac{s_1 - x_k}{s_3 - x_k} j^+ & x_k \in [0, s_1) \\ \frac{s_3 - s_2}{s_3 - x_k} + \frac{s_2 - x_k}{s_3 - x_k} i^+ & x_k \in [s_1, s_2) \\ 1 & x_k \in [s_2, s_3) \\ \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_2} + \frac{x_k - s_3}{x_k - s_2} i^- & x_k \in [s_3, s_4) \\ \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_2} + \frac{s_4 - s_3}{x_k - s_2} i^- + \frac{x_k - s_4}{x_k - s_2} j^- & x_k \in [s_4, s_5) \end{cases}$	$\mu'_3 = \begin{cases} \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_2} + \frac{s_4 - s_3}{x_k - s_2} i^+ + \frac{x_k - s_4}{x_k - s_2} j^+ & x_k \in (s_4, s_5] \\ \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_2} + \frac{x_k - s_3}{x_k - s_2} i^+ & x_k \in (s_3, s_4] \\ 1 & x_k \in (s_2, s_3] \\ \frac{s_3 - s_2}{s_3 - x_k} + \frac{s_2 - x_k}{s_3 - x_k} i^- & x_k \in (s_1, s_2] \\ \frac{s_3 - s_2}{s_3 - x_k} + \frac{s_2 - s_1}{s_3 - x_k} i^- + \frac{s_1 - x_k}{s_3 - x_k} j^- & x_k \in (0, s_1] \end{cases}$
$\mu_4 = \begin{cases} \frac{s_4 - s_3}{s_4 - x_k} + \frac{s_3 - s_2}{s_4 - x_k} i^+ + \frac{s_2 - x_k}{s_4 - x_k} j^+ & x_k \in [0, s_2) \\ \frac{s_4 - s_3}{s_4 - x_k} + \frac{s_3 - x_k}{s_4 - x_k} i^+ & x_k \in [s_2, s_3) \\ 1 & x_k \in [s_3, s_4) \\ \frac{s_4 - s_3}{x_k - s_3} + \frac{x_k - s_4}{x_k - s_3} i^- & x_k \in [s_4, s_5) \end{cases}$	$\mu'_4 = \begin{cases} \frac{s_2 - s_1}{x_k - s_1} + \frac{s_3 - s_2}{x_k - s_1} i^+ + \frac{x_k - s_3}{x_k - s_1} j^+ & x_k \in (s_3, s_5] \\ \frac{s_2 - s_1}{x_k - s_1} + \frac{x_k - s_2}{x_k - s_1} i^+ & x_k \in (s_2, s_3] \\ 1 & x_k \in (s_1, s_2] \\ \frac{s_2 - s_1}{s_2 - x_k} + \frac{s_1 - x_k}{s_2 - x_k} i^- & x_k \in (0, s_1] \end{cases}$
$\mu_5 = \begin{cases} \frac{s_5 - s_4}{s_5 - x_k} + \frac{s_4 - s_3}{s_5 - x_k} i^+ + \frac{s_3 - x_k}{s_5 - x_k} j^+ & x_k \in [0, s_3) \\ \frac{s_5 - s_4}{s_5 - x_k} + \frac{s_4 - x_k}{s_5 - x_k} i^+ & x_k \in [s_3, s_4) \\ 1 & x_k \in [s_4, s_5) \end{cases}$	$\mu'_5 = \begin{cases} \frac{s_1}{x_k} + \frac{s_2 - s_1}{x_k} i^+ + \frac{x_k - s_2}{x_k} j^+ & x_k \in (s_2, s_5] \\ \frac{s_1}{x_k} + \frac{x_k - s_1}{x_k} i^+ & x_k \in (s_1, s_2] \\ 1 & x_k \in (0, s_1] \end{cases}$

根据集对分析理论，集对势 $SHI(\mu)$ 反映集对分析两个研究集合同异反的联系程度，即同一联系度占对同一联系度与立联系度之和的比例，公式如下：

$$SHI(\mu) = \frac{a}{a+c} = \frac{a}{a+c_1+c_2} \quad (c \neq 0) \tag{3}$$

2.1.2 直觉模糊集理论

模糊集理论(fuzzy set)是由美国学者 Zadeh 提出的一种为处理模糊不确定性现象的理论，在多属性决策领域应用较为广泛。随着多属性决策问题所包含的信

息不完备以及系统越来越复杂, Atanassov 等对研究对象信息模糊、不确定的决策问题进行深入研究, 将模糊集理论拓展延伸后提出了多属性决策理论直觉模糊集的概念, 使其在处理不确定性方面更加具有灵活性和真实性, 更符合人们对客观事物的认知。

设 X 是一个研究集合, 则 A 在 X 中的直觉模糊集为 $A = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \rangle | x \in X \}$, $u_A(x)$ 和 $v_A(x)$ 分别表示元素 x 属于 X 的隶属度和非隶属度, $u_A: X \rightarrow [0, 1]$ 及 $v_A: X \rightarrow [0, 1]$, 并满足 $0 \leq u_A(x) + v_A(x) \leq 1$, ($x \in X$)。此外, $\pi_A(x) = 1 - u_A(x) - v_A(x)$ 表示 x 属于 X 的犹豫度, 且 $\pi_A: X \rightarrow [0, 1]$ 。通常称 $\langle u_A(x), v_A(x) \rangle$ 为直觉模糊数, 常被定义为 $\langle u, v \rangle$, $u \in [0, 1]$, $v \in [0, 1]$, $0 \leq u + v \leq 1$ 。

2.1.3 权重理论

熵权法是一种能够根据样本中各项指标数据信息量的大小得出各个指标权重的客观赋权法。如果不确定性事物提供的信息量越大, 系统越无序, 熵值就越小; 反之, 这组不确定事物所提供的信息量越小, 系统越有序, 则熵值就越大; 如果某一个事物的指标值全部都相等, 则该事物指标对总体综合评价的影响效果为零。

具体为设被评价的对象有 n 个, 每个评价对象的评价指标有 g 个, 则判断矩阵为:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, g, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

无量纲化判断矩阵:

$$\text{收益型指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

$$\text{成本型指标: } x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

计算信息熵:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^g p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (7)$$

$$\text{式中: } p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^g x'_{ij}}, \quad k = \frac{1}{\ln(g)}。$$

定义指标权重：

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (8)$$

式中： $w_j \in [0,1]$ ，且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ，权重向量为 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。

2.1.4 改进理论

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是非空论域， $A = \langle u_A(x), v_A(x) \rangle$ 是论域 X 的直觉模糊数，且对于任何 $x_i \in X$ 都有 $u_A(x_i) > 0$ ，则集对分析系数 μ 的计算公式为：

$$\mu = a_A(x_i) + b_A(x_i)i + c_A(x_i)j \quad (9)$$

式中， $a_A(x_i) = u_A(x_i)(1 - v_A(x_i))$ ， $b_A(x_i) = 1 - u_A(x_i)(1 - v_A(x_i)) - v_A(x_i)(1 - u_A(x_i))$ ， $c_A(x_i) = v_A(x_i)(1 - u_A(x_i))$ 。依据以上文献中关于直觉模糊数的集对分析系数化相关思想内容，以及集对分析与直觉模糊集理论的几何意义如图 2.1，文章反向推出集对分析系数向直觉模糊数转化的计算公式。即根据直觉模糊集 $A = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \rangle \mid x \in X \}$ 与集对分析 $\mu = \{ \langle x_i, a_A(x_i) + b_A(x_i)i + c_A(x_i)j \mid x_i \in X \}$ ：

$$u_A(x_i) = a_A(x_i)(1 - c_A(x_i)) \quad (10)$$

$$\pi_A(x_i) = 1 - a_A(x_i)(1 - c_A(x_i)) - c_A(x_i)(1 - a_A(x_i)) \quad (11)$$

$$v_A(x_i) = c_A(x_i)(1 - a_A(x_i)) \quad (12)$$

式中， $u_A(x_i)$ 、 $\pi_A(x_i)$ 、 $v_A(x_i)$ 分别表示元素 x_i 在论域 X 上的隶属度、犹豫度与非隶属度。



图 2.1 集对分析与直觉模糊集几何概念图

2.2 研究方法

2.2.1 生态安全评价指标体系构建原则

生态安全是国家安全的重要组成部分,是指整体或区域生态环境,不受生态条件的状况、变化以及社会各方面发展的损害,处于较良好的演变发展状态,具体可从自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全等方面进行解读研究。因此,为合理地解决经济社会发展与环境建设之间的矛盾点,在经济发展、社会建设背景下对区域生态环境安全综合评价尤为重要。本文根据评价指标选取的原则,基于甘肃省地区实际生态环境状况及可持续发展基本理论,参考区域生态环境安全评价相关的研究成果,从社会、经济、环境、自然资源四个方面发展状况出发,建立甘肃省总体生态安全评价指标体系,并在此基础上,建立甘肃省各地区生态安全评价指标体系,此外,结合已有研究成果对生态环境综合评价指标进行安全等级划分。其构建指标体系原则如下:

(1) 科学性原则:基于准确、客观、可靠的指标数据,依据科学的研究背景以及各地区客观的经济、社会发展现状,合理构建生态环境安全状况综合评价指标体系。

(2) 全面性原则:通过研究分析区域生态安全的理论,结合研究区域的实际情况,使得选取的生态安全评价指标能够充分地反映研究区域经济、社会、生态环境等方面状况,指标遴选尽可能地覆盖影响研究区域生态安全的各方面因素。

(3) 可行性原则:在构建生态安全评价指标体系的过程中,所选取指标的数据应能够通过官方公布的统计年鉴、统计公报以及各种自然资源公报中获得,以提升环境安全评价结果的客观性、准确性。

2.2.2 生态安全评价指标体系

生态安全是实现生态环境的可持续,保持自然资源的保值增值,与经济、社会发展相协调的状态,包括自然资源安全、经济发展安全与社会建设安全。其中,经济发展是建设生态的关键与核心,社会建设是生态保护的现代化延深,二者对生态建设即是动力,也是压力,对生态环境有积极和消极两方面影响。文章基于

生态环境安全内涵、中国科学院可持续发展指标体系、甘肃省生态环境与社会经济发展现状，参考各文献关于生态安全指标体系构建准则，从自然资源开发、环境保护、经济建设与社会发展四个方面出发，综合考虑各个评价指标对生态环境状况的影响性质，将指标类型划分为成本型指标和收益型指标两大类，选取 24 个指标构建甘肃省总体生态安全综合评价指标体系，考虑指标数据的可获取性，合理构建甘肃省地区生态安全体系。具体见表 2.2。

表 2.2 甘肃省总体生态安全综合评价指标

目标层	类型层	变量	指标层	单位
甘肃省总体生态安全评价指标	收益型 (正向)	X1	空气质量达到二级以上天数占全年比重	%
		X2	建成区绿化覆盖率	%
		X3	有效灌溉面积占比	%
		X4	林业增加值占比	%
		X5	农林水财政支出比例	%
		X6	电力、热力以及燃气的生产和供应业投资占比	%
		X7	工业固体废物综合利用率	%
		X8	城市燃气普及率	%
		X9	研究与试验发展 (R&D) 经费内部支出占比	%
		X10	项目课题经费内部支出占比	%
	成本型 (负向)	X11	旱涝灾害受灾面积占比	%
		X12	单位耕地面积化肥使用量	kg/hm ²
		X13	可吸入颗粒物 (PM10) 年平均浓度	μg/m ³
		X14	二氧化硫年平均浓度	μg/m ³
		X15	二氧化氮年平均浓度	μg/m ³
		X16	居民生活用水占比	%
		X17	工业废水排放量占比	%
		X18	第二产业生产总值占比	%
		X19	建筑业总产值比例	%
		X20	工业废水化学需氧量排放量占比	%

X21	私人汽车拥有量占比	%
X22	城区面积占比	%
X23	工业烟（粉）尘排放量占比	%
X24	人均 GDP 增长率	%

其中，自然资源方面如电力、热力以及燃气的生产和供应业投资、有效灌溉面积在较大层面上节约煤炭、木材、水等资源的使用，对生态环境有收益性影响，而水资源的开发使用对生态环境有成本性的影响。环境保护方面如空气质量达到二级以上天数反映大气环境状况水平，而旱涝灾害受灾面积、可吸入颗粒物（PM10）年平均浓度、二氧化硫年平均浓度、二氧化氮年平均浓度、工业废水排放量、工业废水化学需氧量排放量、工业烟（粉）尘排放量等指标对生态环境有成本性的影响，其值越大，环境状况越差。经济建设方面如林业增加值、农林水财政支出、工业固体废物综合利用等指标体现了政府在经济中对环保的重视程度，对生态环境有收益性影响，而单位耕地面积化肥使用量、第二产业生产总值、建筑业总产值、私人汽车拥有量等指标在经济中对生态环境有着直接的成本性影响，其中人均 GDP 增长率越高，对生态环境的压力就越大。社会发展方面如建成区绿化、城市燃气普及率等指标对生态环境有收益性影响，其中研究与试验发展（R&D）经费内部支出、项目课题经费内部支出从教育科研方面，侧面体现了政府对生态环保技术研发的支持力度，同样对生态环境有收益性影响，而城区面积指标对生态环境有成本性影响。

2.2.3 生态安全评价指标安全等级

文章依据集对分析理论对甘肃省生态安全评价指标数据进行处理测算，需对各指标进行安全等级划分。综合参考已有文献中的评价指标等级划分思路，查阅我国《生态县建设规划》建设指标要求、《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）等资料，参照我国经济增长速度中低速、稳步、快速、较快、高速等级划分、地区生产总值所包含的类型、地区政府财政支出项目类型以及能源生产与消费的类型构成，对以上生态环境评估指标进行安全等级划分，具体见表 2.3。

表 2.3 生态安全评价指标安全等级

类型	变量	指标层	轻微, 普通, 中等, 严重, 极其严重
收益型	X1	空气质量达到二级以上天数占全年比重	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X2	建成区绿化覆盖率	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X3	有效灌溉面积占比	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X4	林业增加值占比	25-20, 20-15, 15-10, 10-5, 5-0
	X5	农林水财政支出比例	25-20, 20-15, 15-10, 10-5, 5-0
	X6	电力、热力以及燃气的生产和供应业投资占比	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X7	工业固体废物综合利用率	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X8	城市燃气普及率	100-80, 80-60, 60-40, 40-20, 20-0
	X9	研究与试验发展(R&D)经费内部支出占比	25-20, 20-15, 15-10, 10-5, 5-0
	X10	项目课题经费内部支出占比	25-20, 20-15, 15-10, 10-5, 5-0
成本型	X11	旱涝灾害受灾面积占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X12	单位耕地面积化肥使用量	0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-250
	X13	可吸入颗粒物(PM10)年平均浓度	0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150
	X14	二氧化硫年平均浓度	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X15	二氧化氮年平均浓度	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X16	居民生活用水占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X17	工业废水排放量占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X18	第二产业生产总值占比	0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50
	X19	建筑业总产值比例	0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25
	X20	工业废水化学需氧量排放量占比	0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50
	X21	私人汽车拥有量占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
	X22	城区面积占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100

X23	工业烟（粉）尘排放量占比	0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100
X24	人均 GDP 增长率	0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25

2.2.4 改进方法

(1) 逼近理想解 TOPSIS 法又称优劣解距离法，基本原理是依据研究对象与理想化目标的接近程度，进行排序择优。具体为假设决策问题有 α 个备选项，每个备选项有 β 个属性，直觉模糊集初始判断矩阵为 $R = [r_{\alpha\beta}]_{a \times b} = \langle u_{\alpha\beta}, v_{\alpha\beta} \rangle$ ，其中 $\alpha = 1, 2, \dots, a$ ， $\beta = 1, 2, \dots, b$ ，则：

确定直觉模糊集正理想解与负理想解：

$$A_{\beta}^{+} = \langle u_{\beta}^{+}, v_{\beta}^{+} \rangle = \langle \max_{\alpha} u_{\alpha\beta}, \min_{\alpha} v_{\alpha\beta} \rangle \quad (13)$$

$$A_{\beta}^{-} = \langle u_{\beta}^{-}, v_{\beta}^{-} \rangle = \langle \min_{\alpha} u_{\alpha\beta}, \max_{\alpha} v_{\alpha\beta} \rangle \quad (14)$$

其直觉模糊集中的正负理想解分别为隶属度的最大临界值与非隶属度的最小临界值。

测算每个隶属度和非隶属度分别到正理想解与负理想解间的距离尺度：

$$D_{\alpha\beta}^{+} = \sqrt{(u_{\beta}^{+} - u_{\alpha\beta})^2 + (v_{\beta}^{+} - v_{\alpha\beta})^2} \quad (15)$$

$$D_{\alpha\beta}^{-} = \sqrt{(u_{\beta}^{-} - u_{\alpha\beta})^2 + (v_{\beta}^{-} - v_{\alpha\beta})^2} \quad (16)$$

测算第 α 个备选项第 β 个属性值距离理想解得分：

$$D_{\alpha\beta} = \frac{D_{\alpha\beta}^{-}}{D_{\alpha\beta}^{+} + D_{\alpha\beta}^{-}} \quad (17)$$

定义第 α 个备选项的综合得分：

$$D_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^b D_{\alpha\beta} w_{\beta}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, a, \quad \beta = 1, 2, \dots, b \quad (18)$$

式中， w_{β} 为每一个属性的客观权重； $0 \leq D_{\alpha} \leq 1$ ，当 $D_{\alpha} = 0$ ，此备选项为最劣选项；当 $D_{\alpha} = 1$ ，此备选项为最优选项。因此根据 D_{α} 的值对备选项进行排序， D_{α} 值最大的备选项即为最优决策选项。

(2) 借鉴 Garg 的研究思想，推导两直觉模糊集间的权重距离公式。设 $A = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \rangle | x \in X \}$ 、 $B = \{ \langle x, u_B(x), v_B(x) \rangle | x \in X \}$ 分别是 A 、 B 在研究集合

X 中的两个直觉模糊集，并设 ω_i 为不同直觉模糊集的权重， $\omega_i > 0$ 且对于存在的所有元素 $x_i \in X$ ， $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ，则直觉模糊集 A 、 B 间的欧式距离公式为：

$$d^1(A, B) = \left(\frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n \omega_i \left\{ |u_A(x_i) - u_B(x_i)|^2 + |v_A(x_i) - v_B(x_i)|^2 + |\pi_A(x_i) - \pi_B(x_i)|^2 \right\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

汉明距离公式为：

$$d^2(A, B) = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n \omega_i \left\{ |u_A(x_i) - u_B(x_i)| + |v_A(x_i) - v_B(x_i)| + |\pi_A(x_i) - \pi_B(x_i)| \right\} \quad (20)$$

豪斯多夫距离公式为：

$$d^3(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \left\{ \max \left\{ |u_A(x_i) - u_B(x_i)|, |v_A(x_i) - v_B(x_i)|, |\pi_A(x_i) - \pi_B(x_i)| \right\} \right\} \quad (21)$$

3 甘肃省整体生态安全研究

3.1 研究区域概况

甘肃省地处黄河中上游，位于丝绸之路经济带的中心位置，是我国“一带一路”建设中的咽喉之地，东西蜿蜒 1600 多千米，南北宽 530 千米，总面积 42.58 万平方千米。地貌地势复杂，类型丰富多样，大部分地区气候干燥，自然灾害严重，如草地退化、湿地功能减弱、土地荒漠化、水土流失、旱灾水灾、冰雹、沙尘暴等，自然资源分配极为不均，高原交汇，植被稀疏，生态系统复杂脆弱，是西北地区乃至全国自然生态类型最为复杂的地区之一，生态环境建设与保护的难度较高。甘肃省作为青藏高原生态屏障、黄土高原—川滇生态屏障以及北方防沙带的重要组成部分，生态地位突出，在国家生态安全建设中处于关键一环。因此，甘肃省生态环境安全综合评估对我国生态文明战略规划的实施以及甘肃省生态环境的治理与建设具有重要意义。



图 3.1 研究区域概况图

3.2 数据来源

本研究所使用自然资源、社会经济、能源开发以及空气质量等方面的数据主要来源于《甘肃省统计年鉴 2013—2020》、《中国环境统计年鉴 2013—2014》以及甘肃省水资源统计公报、环境状况公报。

3.3 决策过程

步骤 1：确定权重。依据甘肃省生态环境与社会经济状况，查询甘肃省 2012-2019 年生态安全评价指标数据。假设共有 m 个评价指标，时间跨度为 n ，其中，每个评价指标的五元等级即为该指标的备选项 t ，对指标数据进行无量纲化，根据熵权法确定每个指标的权重 ω_l 。

步骤 2：测算集对分析联系数。结合集对分析五元联系数理论、表 2 生态安全指标等级划分和表 3 集对分析五元联系数，测算生态安全综合评价指标的集对分析联系数集矩阵 H 以及每个指标理想值的联系度 H^* ：

$$H_l = \begin{pmatrix} \mu_{11} = a_{11} + b_{11}i + c_{11}j & \mu_{12} = a_{12} + b_{12}i + c_{12}j & \cdots & \mu_{15} = a_{1t} + b_{1t}i + c_{1t}j \\ \mu_{21} = a_{21} + b_{21}i + c_{21}j & \mu_{22} = a_{22} + b_{22}i + c_{22}j & \cdots & \mu_{25} = a_{2t} + b_{2t}i + c_{2t}j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{m1} = a_{m1} + b_{m1}i + c_{m1}j & \mu_{m2} = a_{m2} + b_{m2}i + c_{m2}j & \cdots & \mu_{m5} = a_{mt} + b_{mt}i + c_{mt}j \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$H^* = \begin{pmatrix} \mu_1^* = a_1^* + b_1^*i + c_1^*j \\ \mu_2^* = a_2^* + b_2^*i + c_2^*j \\ \vdots \\ \mu_m^* = a_m^* + b_m^*i + c_m^*j \end{pmatrix} \quad (23)$$

其中， $k=1,2,\dots,m$ ， $t=1,2,\dots,5$ ， $l=1,2,\dots,n$ ， $b_{mt}i = b_{mt}i^-$ 或者 $b_{mt}i = b_{mt}i^+$ ，即弱差异或强差异； $c_{mt}i = c_{mt}i^-$ 或者 $c_{mt}i = c_{mt}i^+$ ，即弱对立或者强对立。

步骤 3：测算直觉模糊数。根据集对分析联系数的模糊数化，测算各评价指标的直觉模糊数、直觉模糊决策矩阵 D 、理想直觉模糊数 D^* ：

$$D_l = \begin{pmatrix} \langle u_{11}, v_{11} \rangle & \langle u_{12}, v_{12} \rangle & \cdots & \langle u_{15}, v_{15} \rangle \\ \langle u_{21}, v_{21} \rangle & \langle u_{22}, v_{22} \rangle & \cdots & \langle u_{25}, v_{25} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle u_{m1}, v_{m1} \rangle & \langle u_{m2}, v_{m2} \rangle & \cdots & \langle u_{m5}, v_{m5} \rangle \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$D^* = \begin{pmatrix} \langle u_1^*, v_1^* \rangle \\ \langle u_2^*, v_2^* \rangle \\ \vdots \\ \langle u_m^*, v_m^* \rangle \end{pmatrix} \quad (25)$$

步骤 4：测算直觉模糊集综合得分。依据逼近理想解 TOPSIS 分析法，确定直觉模糊集正负理想解、各个备选项在各指标中的得分矩阵以及各备选项的综合得分矩阵：

$$A^+ = (\langle u_1^+, v_1^+ \rangle \quad \langle u_2^+, v_2^+ \rangle \quad \cdots \quad \langle u_m^+, v_m^+ \rangle) \quad (26)$$

$$A^- = (\langle u_1^-, v_1^- \rangle \quad \langle u_2^-, v_2^- \rangle \quad \cdots \quad \langle u_m^-, v_m^- \rangle) \quad (27)$$

$$D_l^1 = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{15} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \cdots & D_{m5} \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$D_l^2 = (D_1 \quad D_2 \quad \cdots \quad D_l) \quad (29)$$

步骤 5: 利用公式 (4)、(5) 两直觉模糊集间的距离测度“ d^1 , d^2 , d^3 ”, 测算每个评价指标的直觉模糊数与理想直觉模糊数间的欧式距离、汉明距离以及豪斯多夫距离, 其中理想直觉模糊数为该等级区间的完全隶属度或完全非隶属度, 即:

$$A^+ = (\langle 1_1, 0_1 \rangle \quad \langle 1_2, 0_2 \rangle \quad \cdots \quad \langle 1_m, 0_m \rangle) \quad (30)$$

$$A^- = (\langle 0_1, 1_1 \rangle \quad \langle 0_2, 1_2 \rangle \quad \cdots \quad \langle 0_m, 1_m \rangle) \quad (31)$$

步骤 6: 确定最优改进理论。将基于集对分析改进-直觉模糊集-TOPSIS 法得到的甘肃省 2012—2019 年生态安全评价结果与传统欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离以及集对分析集对势综合评价结果进行对比分析。

3.4 甘肃省整体生态安全综合评价结果分析

依据步骤 1, 甘肃省总体生态安全评估指标数据进行赋权, 具体见表 3.1:

表 3.1 生态安全评价指标权重

收益型		成本型	
指标	权重	指标	权重
X1	0.0169	X11	0.0369
X2	0.0484	X12	0.0257
X3	0.0516	X13	0.0456
X4	0.0545	X14	0.0228
X5	0.0467	X15	0.0196
X6	0.0484	X16	0.0409

续表 3.1

指标	权重	指标	权重
X7	0.0381	X17	0.0635
X8	0.0290	X18	0.0293
X9	0.0334	X19	0.0438
X10	0.0458	X20	0.0683
		X21	0.0814
		X22	0.0332
		X23	0.0405
		X24	0.0357

3.4.1 集对分析-直觉模糊集-TOPSIS 测度结果分析

首先, 通过步骤 2 对指标数据进行集对分析联系数的测算, 得出联系数矩阵 H_i 以及理想联系数矩阵 H^* ; 然后根据步骤 3 集对分析联系数的模糊数化, 得出直觉模糊数矩阵 D_i ; 最后通过步骤 4 得出甘肃省 2012—2019 年生态环境安全状况直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合评分矩阵 D_i^2 , 具体结果见表 3.2:

表 3.2 集对分析改进的直觉模糊集 TOPSIS 测度

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$D_1 = 0.607778$	$D_2 = 0.722307$	$D_3 = 0.754210$	$D_4 = 0.730209$	$D_5 = 0.666834$
2013	$D_1 = 0.609221$	$D_2 = 0.714221$	$D_3 = 0.733091$	$D_4 = 0.726542$	$D_5 = 0.676306$
2014	$D_1 = 0.622055$	$D_2 = 0.726005$	$D_3 = 0.731103$	$D_4 = 0.706335$	$D_5 = 0.661026$
2015	$D_1 = 0.625227$	$D_2 = 0.722261$	$D_3 = 0.725017$	$D_4 = 0.701403$	$D_5 = 0.650716$
2016	$D_1 = 0.648363$	$D_2 = 0.722912$	$D_3 = 0.709786$	$D_4 = 0.701112$	$D_5 = 0.643300$
2017	$D_1 = 0.667808$	$D_2 = 0.720396$	$D_3 = 0.707601$	$D_4 = 0.695318$	$D_5 = 0.626215$
2018	$D_1 = 0.684039$	$D_2 = 0.742615$	$D_3 = 0.703385$	$D_4 = 0.678008$	$D_5 = 0.619719$
2019	$D_1 = 0.689226$	$D_2 = 0.753313$	$D_3 = 0.720792$	$D_4 = 0.672014$	$D_5 = 0.603001$

结合表 3.2, 根据逼近理想解 TOPSIS 理论综合结果越大越好原则, 可以得出, 甘肃省 2012-2015 年生态环境安全综合评价结果为 D_3 , 生态安全等级具体为中等; 2016-2019 年生态环境综合评价结果为 D_2 , 生态环境安全状况达到普通等级。依据甘肃省 2012-2019 年生态环境状况综合评估结果可以看出, 甘肃省近些年来生态环境整体状况逐渐改善, 生态安全等级逐渐提高, 环境质量不断上升。其中, 2012-2013 年甘肃省生态环境安全综合评估结果虽为 D_3 , 但其贴近值 0.754210、0.733091 与 D_4 的贴近值 0.730209、0.726542 更为接近, 说明 2012-2013 年甘肃省生态环境安全等级为中等, 但是其生态环境状况更加接近于严重等级所代表的生态环境状况, 生态环境质量不高, 特别是在林业保护、农林水财政支出、科研试验、项目申请、农用化肥使用、空气质量农业废气排放等方面需提升关注程度、各方面采取有效措施, 减轻生态建设压力。2014-2015 年甘肃省生态环境综合评估结果虽为 D_3 , 但其贴近值 0.731103、0.725017 接近于 D_2 的贴近值 0.726005、0.722261, 生态环境状况有所改善。同理, 2016-2019 年甘肃省生态环境综合评估结果虽为 D_2 , 但其值接近于 D_3 , 生态环境质量有所提高, 但整体状况与中等安全等级的生态环境状况接近。2018-2019 年甘肃省生态环境综合评估结果为 D_2 , 安全等级为普通, 表明甘肃省紧紧围绕国家生态安全战略部署, 生态建设成效显著, 但其生态安全等级均接近于 D_3 所代表的中等等级, 生态安全处于普通等级的初级阶段, 生态环境仍需加强建设。

依据甘肃省生态环境安全综合评估指标数据可以得出: 2012-2019 年甘肃省生态环境收益型指标空气质量达二级以上天数占比、电力、热力以及燃气的生产和供应业投资占比波动变化较大; 建成区绿化覆盖率、城市燃气普及率提升明显。成本型指标旱涝灾害受灾面积占比、可吸入颗粒物年均浓度以及私人汽车拥有量增长率波动变化明显; 单位耕地面积化肥使用量、二氧化硫、二氧化氮年均浓度、工业废水排放量占比、工业废水化学需氧量排放量占比等指标下降明显。综合指标变化趋势, 根据空气质量达二级以上天数、可吸入颗粒物年均浓度变化趋势可以看出, 甘肃省大气环境质量不够稳定, 时有起伏, 工业烟(粉)尘排放量占比较高, 政府应加强监督工业企业废气排放是否达标、农作物秸秆焚烧等, 积极促进植树造林、退耕还林、合理规划放牧, 降低沙尘等不良天气的发生概率, 注重空气质量的检测与治理。由有效灌溉面积占比、居民生活用水占比等指标变化可

以得出，甘肃省人民政府应继续积极推行节水环保政策，强化节水宣传，合理配置水资源，提升农业用水效率。由私人汽车拥有量占比、建筑业总产值比例、人均GDP 增长率、工业废水化学需氧量排放量占比、第二产业生产总值占比等指标变化趋势可以看出，甘肃省近年来经济发展较快，居民生活水平提高，私家车拥有量增长较大，工业发展势头迅猛，但对生态环境保护方面的压力增大，政府应促进私家车限号出行政策、强化监督，在进行经济建设的同时，注重生态城市的发展。研究与试验发展（R&D）经费内部支出占比、项目课题经费内部支出占比等指标变化趋势可以看出，甘肃省在科学研究方面虽有发展，但支持力度相对不大，省政府应持续推进科研福利变革，多方面引进、培养人才。

3.4.2 集对分析-直觉模糊数欧式距离测度结果分析

根据步骤 2 对指标数据进行集对分析联系数的测算，得出联系数矩阵 H_i 以及理想联系数矩阵 H^* ；然后根据步骤 3 集对分析联系数的模糊数化，得出直觉模糊数矩阵 D_i 以及理想模糊数矩阵 D^* ；最后通过步骤 5 得出甘肃省 2012—2019 年生态环境安全状况直觉模糊数与理想直觉模糊数的欧式距离 d_{it}^1 ，具体见表 3.3：

表 3.3 集对分析改进的直觉模糊集欧式距离测度

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$d_1^1 = 0.098973$	$d_2^1 = 0.081610$	$d_3^1 = 0.074506$	$d_4^1 = 0.078276$	$d_5^1 = 0.091869$
2013	$d_1^1 = 0.098824$	$d_2^1 = 0.084129$	$d_3^1 = 0.077542$	$d_4^1 = 0.078940$	$d_5^1 = 0.090651$
2014	$d_1^1 = 0.096807$	$d_2^1 = 0.081539$	$d_3^1 = 0.077852$	$d_4^1 = 0.082214$	$d_5^1 = 0.093362$
2015	$d_1^1 = 0.096207$	$d_2^1 = 0.081713$	$d_3^1 = 0.078103$	$d_4^1 = 0.082841$	$d_5^1 = 0.094267$
2016	$d_1^1 = 0.093402$	$d_2^1 = 0.082128$	$d_3^1 = 0.080144$	$d_4^1 = 0.084585$	$d_5^1 = 0.095348$
2017	$d_1^1 = 0.091378$	$d_2^1 = 0.081255$	$d_3^1 = 0.081176$	$d_4^1 = 0.085999$	$d_5^1 = 0.097207$
2018	$d_1^1 = 0.088564$	$d_2^1 = 0.078714$	$d_3^1 = 0.082111$	$d_4^1 = 0.088554$	$d_5^1 = 0.098554$
2019	$d_1^1 = 0.087248$	$d_2^1 = 0.076021$	$d_3^1 = 0.080031$	$d_4^1 = 0.089070$	$d_5^1 = 0.101236$

结合表 3.3，根据集对分析改进的直觉模糊集欧式距离贴近度最小原则，可

以得出,甘肃省 2012-2017 年生态环境安全综合评估结果为 d_3^1 , 生态安全等级为中等, 但 2012-2015 年甘肃省生态安全评估结果虽为 d_3^1 , 但更接近于 d_4^1 , 即更接近于严重等级所代表的生态环境质量, 生态环境状况不容乐观; 2016-2017 年甘肃省生态环境安全综合评估结果虽为 d_3^1 , 但更接近于 d_2^1 , 即接近于普通等级所代表的生态环境质量, 生态环境状况有所改善。2018-2019 年甘肃省生态环境安全综合评价结果为 d_2^1 , 生态安全等级为普通, 但更接近于 d_3^1 , 即中等生态安全等级, 生态环境建设虽然有了较大的发展, 环境质量提升明显, 但生态环境总体应对自然灾害的能力不强, 旱涝灾害严重, 空气质量指标如可吸入颗粒物、二氧化氮年均浓度均未达到国家规定的一级浓度限值。因此, 甘肃省人民政府应继续响应党中央的号召, 提升自然资源的能源利用效率, 减小损耗, 合理降低化石能源的开发与消费量, 开发利用新型清洁能源如天然气、电力等作为机械能源, 促进城市生态建设, 发展城乡融合生态圈。

3.4.3 集对分析-直觉模糊数汉明距离测度结果分析

根据步骤 3 集对分析联系数的模糊数化, 得出直觉模糊数矩阵 D_l 以及理想模糊数矩阵 D^* ; 然后通过步骤 5 得出甘肃省 2012—2019 年生态环境安全状况直觉模糊数与理想直觉模糊数的汉明距离 d_n^2 , 具体结果见表 3.4:

表 3.4 集对分析改进的直觉模糊集汉明距离测度

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$d_1^2 = 0.016290$	$d_2^2 = 0.011836$	$d_3^2 = 0.010790$	$d_4^2 = 0.011687$	$d_5^2 = 0.013966$
2013	$d_1^2 = 0.016123$	$d_2^2 = 0.012210$	$d_3^2 = 0.011721$	$d_4^2 = 0.011817$	$d_5^2 = 0.013502$
2014	$d_1^2 = 0.015597$	$d_2^2 = 0.011640$	$d_3^2 = 0.011788$	$d_4^2 = 0.012721$	$d_5^2 = 0.014135$
2015	$d_1^2 = 0.015465$	$d_2^2 = 0.011829$	$d_3^2 = 0.012027$	$d_4^2 = 0.012904$	$d_5^2 = 0.014552$
2016	$d_1^2 = 0.014472$	$d_2^2 = 0.011882$	$d_3^2 = 0.012713$	$d_4^2 = 0.012867$	$d_5^2 = 0.014727$
2017	$d_1^2 = 0.013692$	$d_2^2 = 0.012004$	$d_3^2 = 0.012836$	$d_4^2 = 0.013058$	$d_5^2 = 0.015384$
2018	$d_1^2 = 0.012965$	$d_2^2 = 0.011010$	$d_3^2 = 0.013059$	$d_4^2 = 0.013846$	$d_5^2 = 0.015633$

$$2019 \quad d_1^2 = 0.012825 \quad d_2^2 = 0.010556 \quad d_3^2 = 0.012279 \quad d_4^2 = 0.014092 \quad d_5^2 = 0.016404$$

结合表 3.4，根据集对分析改进的直觉模糊集汉明距离贴近度最小原则，可以得出，甘肃省 2012-2013 年生态环境安全评估结果为 d_3^2 ，生态环境安全等级为中等，但与严重安全等级较为接近，生态环境状况不容乐观；2014 年甘肃省生态环境状况综合评估结果为 d_2^2 ，为普通安全等级，但与中等安全等级接近，生态环境状况有所改善；2015-2019 年甘肃省生态环境状况综合评估结果为 d_2^2 ，安全等级为普通，生态环境建设效果明显，环境质量有所提高，但其结果相对接近于 d_3^2 ，即中等安全等级，表明甘肃省生态环境仍需加强保护与建设，在大力发展经济的同时，也需注重经济社会与生态环境的协调发展。

3.4.4 集对分析-直觉模糊集豪斯多夫距离测度结果分析

结合表 2.1 甘肃省生态安全评价指标以及表 3.1 权重数据，根据步骤 3 集对分析联系数的模糊数化，得出直觉模糊数矩阵 D_i 以及理想模糊数矩阵 D^* ；然后通过步骤 5 得出甘肃省 2012—2019 年生态环境安全状况直觉模糊数与理想直觉模糊数间的豪斯多夫距离 d_i^3 ，具体结果见表 3.5：

表 3.5 集对分析-直觉模糊集豪斯多夫距离测度

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$d_1^3 = 0.024435$	$d_2^3 = 0.017754$	$d_3^3 = 0.016184$	$d_4^3 = 0.017530$	$d_5^3 = 0.020950$
2013	$d_1^3 = 0.024184$	$d_2^3 = 0.018315$	$d_3^3 = 0.017582$	$d_4^3 = 0.017726$	$d_5^3 = 0.020253$
2014	$d_1^3 = 0.023396$	$d_2^3 = 0.017461$	$d_3^3 = 0.017681$	$d_4^3 = 0.019082$	$d_5^3 = 0.021203$
2015	$d_1^3 = 0.023198$	$d_2^3 = 0.017743$	$d_3^3 = 0.018041$	$d_4^3 = 0.019356$	$d_5^3 = 0.021828$
2016	$d_1^3 = 0.021709$	$d_2^3 = 0.017823$	$d_3^3 = 0.019069$	$d_4^3 = 0.019300$	$d_5^3 = 0.022090$
2017	$d_1^3 = 0.020537$	$d_2^3 = 0.018006$	$d_3^3 = 0.019253$	$d_4^3 = 0.019587$	$d_5^3 = 0.023075$
2018	$d_1^3 = 0.019448$	$d_2^3 = 0.016515$	$d_3^3 = 0.019588$	$d_4^3 = 0.020768$	$d_5^3 = 0.023450$
2019	$d_1^3 = 0.019237$	$d_2^3 = 0.015834$	$d_3^3 = 0.018419$	$d_4^3 = 0.021137$	$d_5^3 = 0.024606$

结合表 3.5，根据集对分析改进的直觉模糊集豪斯多夫距离最小原则，可以得出，甘肃省 2012-2013 年生态环境安全综合评估结果为 d_3^3 ，生态安全等级为中等；2014-2019 年甘肃省生态环境安全综合评估结果逐渐由 d_3^3 转变为 d_2^3 ，即由中等安全等级逐渐改善至普通，生态环境质量有所提高。但 2015-2019 年生态环境安全综合评价结果为 d_2^3 ，甘肃省围绕国家生态安全战略，制定实施一系列环保举措效果凸显，但其结果接近于 d_3^3 ，即中等生态安全等级，生态环境状况并未达到满足人民美好生活需要的程度，沙尘天气时有发生，土地沙化严重，资源利用效率不高，生态环境建设仍需政府与人民的坚持与努力。

3.4.5 集对分析集对势测度结果分析

根据表 2.1 生态环境安全等级评价指标、表 2.2 生态安全指标等级划分、表 2.3 集对分析五元联系度、以及集对分析基本理论，对甘肃省生态环境安全等级进行综合评估，具体结果见表 3.6：

表 3.6 集对分析集对势测度

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$SHI(\mu_1) = 0.6560$	$SHI(\mu_2) = 0.8063$	$SHI(\mu_3) = 0.8977$	$SHI(\mu_4) = 0.8623$	$SHI(\mu_5) = 0.7167$
2013	$SHI(\mu_1) = 0.6526$	$SHI(\mu_2) = 0.7923$	$SHI(\mu_3) = 0.8849$	$SHI(\mu_4) = 0.8504$	$SHI(\mu_5) = 0.7244$
2014	$SHI(\mu_1) = 0.6737$	$SHI(\mu_2) = 0.8036$	$SHI(\mu_3) = 0.8759$	$SHI(\mu_4) = 0.8353$	$SHI(\mu_5) = 0.7024$
2015	$SHI(\mu_1) = 0.6755$	$SHI(\mu_2) = 0.8076$	$SHI(\mu_3) = 0.8685$	$SHI(\mu_4) = 0.8239$	$SHI(\mu_5) = 0.6957$
2016	$SHI(\mu_1) = 0.6972$	$SHI(\mu_2) = 0.8135$	$SHI(\mu_3) = 0.8615$	$SHI(\mu_4) = 0.8011$	$SHI(\mu_5) = 0.6836$
2017	$SHI(\mu_1) = 0.7131$	$SHI(\mu_2) = 0.8239$	$SHI(\mu_3) = 0.8544$	$SHI(\mu_4) = 0.7847$	$SHI(\mu_5) = 0.6668$
2018	$SHI(\mu_1) = 0.7307$	$SHI(\mu_2) = 0.8306$	$SHI(\mu_3) = 0.8645$	$SHI(\mu_4) = 0.7696$	$SHI(\mu_5) = 0.6514$
2019	$SHI(\mu_1) = 0.7434$	$SHI(\mu_2) = 0.8546$	$SHI(\mu_3) = 0.8665$	$SHI(\mu_4) = 0.7649$	$SHI(\mu_5) = 0.6350$

结合表 3.6，根据集对分析集对势最大理论，可以得出，甘肃省 2012-2019 年生态环境状况综合评估结果均为 $SHI(\mu_5)$ ，生态安全等级为中等，生态环境状况不容乐观。其中，2012-2015 年甘肃省生态安全综合评估结果虽为 $SHI(\mu_3)$ ，但更接近于 $SHI(\mu_4)$ ，即严重生态安全等级，生态环境质量较低，工业废物综合利用率不高，环境污染严重，水资源、矿产资源开发利用较大，清洁能源的适用领

域较为局限，生态环境状况令人堪忧；2016-2019年甘肃省生态环境状况综合评估结果虽仍为 $SHI(\mu_3)$ ，但接近于 $SHI(\mu_2)$ ，生态环境质量不断提高，环保治理成效显著。

3.5 生态安全评估结果对比分析

将集对分析改进的直觉模糊集 TOPSIS 测度与集对分析-直觉模糊集欧氏距离测度、汉明距离测度以及集对分析集对势测度生态安全等级综合评价结果进行对比分析，具体如表 3.7:

表 3.7 生态安全不同测度综合评估结果对比

类别	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
集对分析-直觉模糊集 TOPSIS 距离测度	中等	中等	中等	中等	普通	普通	普通	普通
集对分析-直觉模糊集欧式距离测度	中等	中等	中等	中等	中等	中等	普通	普通
集对分析-直觉模糊集汉明距离测度	中等	中等	普通	普通	普通	普通	普通	普通
集对分析-直觉模糊集-豪斯多夫距离	中等	中等	普通	普通	普通	普通	普通	普通
集对分析集对势测度	中等	中等	中等	中等	中等	中等	中等	中等

根据表 3.7，可以得出，结合甘肃省 2012-2019 年生态环境与经济社会发展综合指标数据，基于集对分析改进的直觉模糊集逼近理想解 TOPSIS 生态安全评估方法能够较好地对甘肃省生态环境状况进行综合评估，其安全等级综合评价结果能够较为清晰地反映甘肃省 2012—2019 年生态环境状况的变化趋势。其中，基于集对分析改进的直觉模糊集 TOPSIS 法对甘肃省 2012—2019 年生态安全状况进行综合评价，其结果与传统贴近度测度方法欧氏距离、汉明距离以及豪斯多夫距离的评价结果大致相同，即甘肃省生态环境安全状况大致由 2012 年严重等级逐渐改善提高到 2019 年普通等级，生态环境建设效果显著，而集对分析集对势的综合评估结果均为中等安全等级，未能较清晰地反映甘肃省 2012-2019 年间

生态环境状况的变化趋势。

在实际应用方面,根据集对分析改进的直觉模糊集-逼近理想解法距离测度方法,2012-2015年甘肃省生态环境安全状况综合评估结果为中等等级,由接近于严重等级逐渐改善为接近于普通安全等级,2017-2019年甘肃省生态环境安全状况为普通,在轻微等级上的综合贴进度,逐年上升,且通过根据各安全等级间的接近程度,能够反映出甘肃省2013年由于自然灾害等因素影响,环境状况有所下降,相比于其他改进方法,其结果较为贴合实际,综合评估结果能够较好地反映甘肃省生态环境状况的变化波动趋势。

在理论方面,逼近理想解 TOPSIS 理论相比于以上其他距离贴进度,具有提取原始数据的信息更加充分、反应各个研究对象间的差异更加客观的优点,能够较优地达到集中反映总体情况和综合分析评价目的,普适性较强。故基于集对分析改进的直觉模糊集-逼近理想解 TOPSIS 生态安全等级综合评价方法具有较强的实用性、科学性与合理性,其评价结果能够清晰地反映甘肃省2012—2019年生态环境状况的恶化、改善变化趋势,本文将其确定为最优改进的直觉模糊集理论,将其应用于甘肃省区域生态安全综合评价分析中。

3.6 小结

本章节首先依据甘肃省总体2012-2019年生态环境状况构建生态安全评价指标体系,并结合熵值法测算各指标权重指数;其次结合集对分析理论、生态安全指标等级划分,测算生态安全综合评价指标的集对分析联系数集矩阵以及每个指标理想值的联系度;然后根据集对分析联系数的模糊数化,测算各评价指标的直觉模糊决策矩阵、理想直觉模糊数矩阵,并通过逼近理想解 TOPSIS 分析法,确定直觉模糊集正负理想解、各个备选项在各指标中的得分矩阵以及各备选项的综合得分矩阵;最后测算每个评价指标的直觉模糊数与理想直觉模糊数间的欧式距离、汉明距离以及豪斯多夫距离,并将基于集对分析-直觉模糊集-TOPSIS 法得到的甘肃省2012-2019年生态安全评价结果与传统欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离等贴进度以及集对分析集对势测度综合评价结果进行对比分析。结果表明:依据各距离贴进度改进集对分析-直觉模糊集理论,甘肃省2012-2019年生态环境状况基本呈现改善趋势,生态安全等级逐渐上升,环境质量不断提高,而基于

逼近理想解距离测度的集对分析-直觉模糊集生态安全综合评价方法能够科学、合理地对甘肃省生态环境状况进行综合评估,其结果具有良好的灵敏性、精确性。

4 甘肃省区域生态安全研究

4.1 甘肃省行政区划

甘肃省是内陆各地区通往西部大部分地区以及内陆接壤国家的必经之地，是我国西部地区的交通物流枢纽和文化交流要道。截止 2018 年，甘肃省下辖 12 个地级市（兰州市、嘉峪关市、金昌市、白银市、天水市、武威市、张掖市、平凉市、酒泉市、庆阳市、定西市、陇南市），2 个自治州（临夏回族自治州、甘南藏族自治州）。

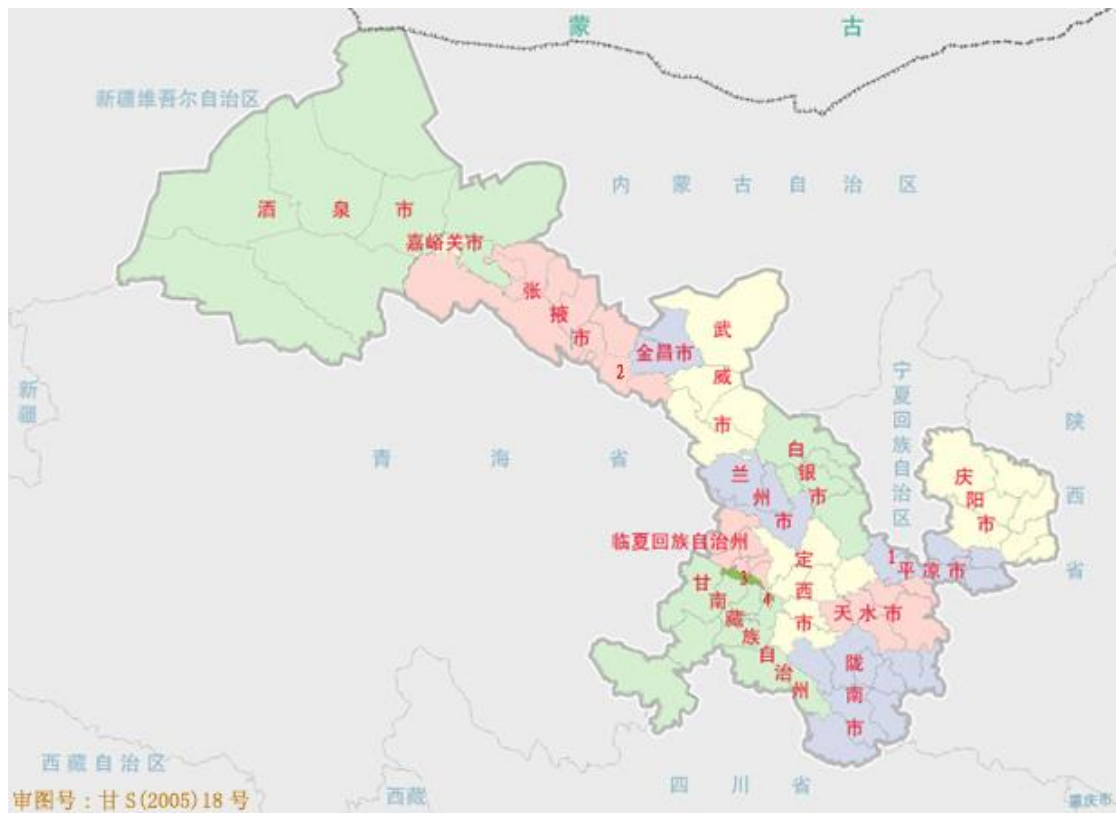


图 4.1 研究区域行政区划图

4.2 甘肃省地理区域划分

依据甘肃省地域状况、历史文化以及地理位置，参考甘肃省河西、陇中、陇南以及陇西地域区分，查阅朱立祥、杨雪获等人的相关成果，以武威、白银、兰州等地为地理中心，将甘肃省地区生态环境状况评估区域划分为北部、中部、东南部、南部以及西南部地区，其中，甘肃北部包括酒泉市、嘉峪关市、张掖市；

中部包括金昌市、武威市、兰州市、白银市、定西市；东南部包括庆阳市、平凉市；南部包括陇南市、天水市；西南部包括甘南州、临夏州。

4.3 甘肃省区域生态安全综合评价

甘肃省各地州市高原山地分布不同，地势地貌复杂，自然资源分配不均，矿产资源分布大相径庭，各地州市经济发展与环境建设的侧重点不同，因此，结合甘肃省地区生态环境安全状况指标数据，根据熵值法理论，分别测算甘肃省各地州市生态环境状况评估指标权重。

4.3.1 甘肃省北部地区生态评价

依据甘肃省北部地区各地市生态环境与经济社会发展状况，根据表 2.1 甘肃省地区生态安全状况综合评价指标体系，查询相关指标数据。结合章节 3.3，首先，根据熵权法理论与步骤 1，测算生态环境安全状况评价指标权重；其次，通过步骤 2 对指标数据进行集对分析联系数的测算，得出联系数矩阵 H_i 以及理想联系数矩阵 H^* ；然后根据步骤 3 集对分析联系数的模糊数化，得出直觉模糊数矩阵 D_i ；最后通过步骤 4-6 得出甘肃省北部地区各地市 2012—2019 年地区生态环境安全直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合得分，并对生态安全等级进行数值量化，如：1—轻微安全等级；2—普通安全等级；3—中等安全等级；4—严重安全等级；5—极其严重安全等级。具体结果见图 4.2：

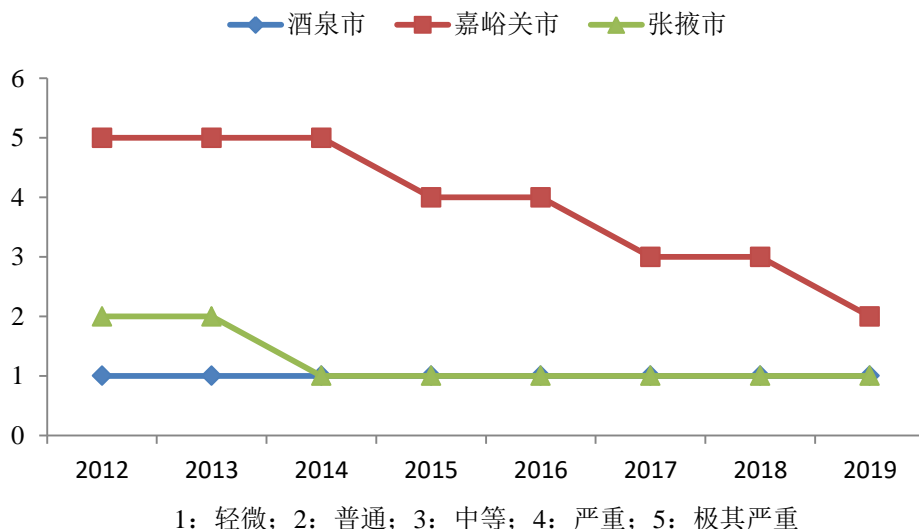


图 4.2 甘肃省北部地区生态环境安全状况

由图 4.2 可以得出, 甘肃省北部地区 2012-2019 年生态环境状况逐渐改善, 变化明显。其中, 酒泉市 2012-2019 年生态环境状况维持于轻微安全等级, 生态安全状况良好且稳定; 嘉峪关市 2012-2014 年生态环境状况为极其严重等级, 2015-2019 年逐渐从严重安全等级转变为普通安全等级, 其原因主要为受个别指标异常值的影响, 例如农林水财政支出占比、工业固体废物综合利用率、单位耕地面积化肥施用量等; 张掖市 2012-2013 年生态安全状况维持于普通等级, 2014-2019 年改善至轻微安全等级。总体上甘肃省北部地区生态环境建设成效显著, 生态屏障建设落实良好。

甘肃省北部地区是通往新疆的交通要塞、现代航天的摇篮、国家西部重要的生态安全屏障、河西地区旅游重点城市、重要的商贸流通枢纽以及农副产品加工和能源基地。区内高山盆地交错, 属大陆性气候明显, 干燥寒冷, 降水较少, 矿产资源、清洁能源相对丰富。依据生态安全评估结果, 甘肃省北部地区主要从以下几个方面进行加强环保建设: ①、保障土地生态资源的可持续发展, 加强干旱自然灾害的应对能力, 增设雨水收集、节水灌溉设施; ②、加强环保宣传, 促进水资源的循环利用, 提升公民生活垃圾分类意识, 降低垃圾处理对环境的污染; ③、发展科学技术, 提升工业企业废弃物的综合利用率, 充分开发太阳能资源, 提升居民对热力、燃气等清洁能源的需求, 科学实施农用化肥, 降低土壤污染程度, 严格公路私家车限号政策, 减少汽车尾气排放, 保障大气环境安全; ④、促进防护林工程建设, 以减少土地沙化状况以及降低沙尘天气的发生概率, 完善环境突发情况的应急体系, 最大限度地减小恶劣天气对生态环境的持续损害。

其中, 嘉峪关市 2012-2019 年生态环境状况变化较大, 则依据甘肃省嘉峪关市地区生态环境与经济社会发展状况, 基于章节 3.3 中步骤 1-6 进行生态安全评估, 具体结果见表 4.1:

表 4.1 嘉峪关市地区生态环境安全等级

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$D_1 = 0.648027$	$D_2 = 0.596388$	$D_3 = 0.584583$	$D_4 = 0.626964$	$D_5 = 0.652048$
2013	$D_1 = 0.637707$	$D_2 = 0.585619$	$D_3 = 0.568466$	$D_4 = 0.622890$	$D_5 = 0.664639$
2014	$D_1 = 0.635988$	$D_2 = 0.580569$	$D_3 = 0.551382$	$D_4 = 0.610096$	$D_5 = 0.672879$

2015	$D_1 = 0.603170$	$D_2 = 0.604419$	$D_3 = 0.607725$	$D_4 = 0.611554$	$D_5 = 0.609036$
2016	$D_1 = 0.640039$	$D_2 = 0.626486$	$D_3 = 0.606045$	$D_4 = 0.643758$	$D_5 = 0.638504$
2017	$D_1 = 0.680358$	$D_2 = 0.660158$	$D_3 = 0.682660$	$D_4 = 0.626477$	$D_5 = 0.611658$
2018	$D_1 = 0.667863$	$D_2 = 0.671327$	$D_3 = 0.675151$	$D_4 = 0.623004$	$D_5 = 0.620172$
2019	$D_1 = 0.662252$	$D_2 = 0.669844$	$D_3 = 0.643595$	$D_4 = 0.616835$	$D_5 = 0.616835$

结合表 4.1，根据逼近理想解 TOPSIS 理论综合评估结果越大越好原则，可以得出，嘉峪关市 2012-2014 年生态环境安全综合评价结果为 D_5 ，生态安全等级为极其严重；2015-2016 年生态环境综合评价结果为 D_4 ，生态环境安全状况为严重等级；2017-2018 年生态环境状况综合评价结果为 D_3 ，生态安全等级为中等等级；2019 年生态环境综合评价结果为 D_2 ，安全等级改善为普通等级。

依据嘉峪关市 2012-2019 年生态环境状况综合评估结果，总体可以看出，嘉峪关市近年来受其地理位置的局限，生态环境建设难度较大，但生态安全等级逐渐依旧提高。其中，2012-2014 年嘉峪关市生态环境安全综合评估结果为极其严重，其林业增加值占比、农林水财政支出占比、科研经费支出等方面支持力度不足，单位耕地面积化肥使用量、工业废水排放量、工业烟尘排放量、第二产业生产总值等占比过大，生态安全状况不佳；2015-2018 年生态环境状况逐年改善，逐渐接近于中等安全等级；2019 年生态安全状况达到轻微等级，表明嘉峪关市在注重经济发展、社会建设的同时，在生态环境保护建设方面也做出了较大的成就。

4.3.2 甘肃省中部地区生态安全评价

依据甘肃省中部地区各地市生态环境与经济社会发展状况，根据表 2.1 甘肃省地区生态安全状况综合评价指标体系，查询相关指标数据。结合章节 3.3 集对分析-直觉模糊集 TOPSIS 理论测算步骤，得出甘肃省中部地区各地市 2012—2019 年地区生态环境安全直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合得分，具体结果见图 4.3：

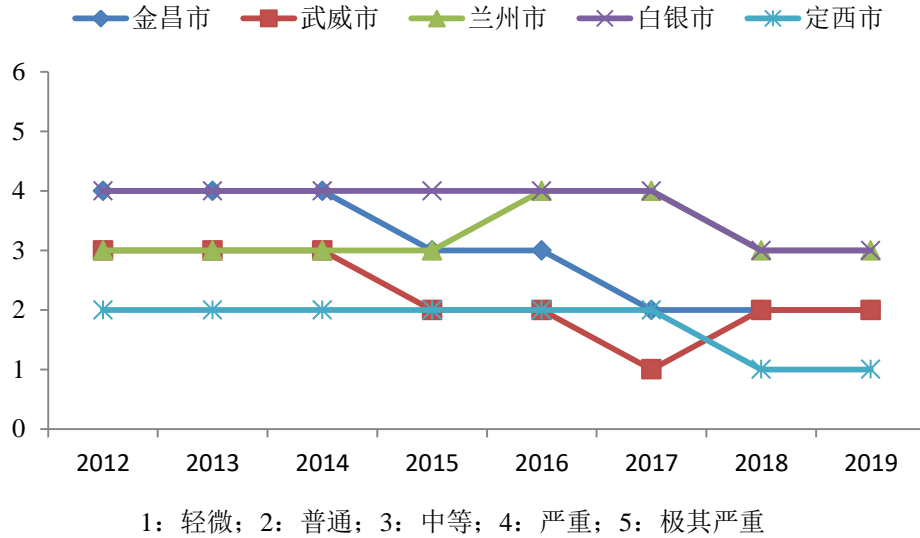


图 4.3 甘肃省中部地区生态环境安全状况

由图 4.3 可以得出，甘肃省中部地区生态环境状况逐年改善，其中，金昌市 2012-2014 年生态环境状况为严重等级，2015-2016 年转变为中等等级，2017-2019 年持续改善至普通安全等级；武威市 2012-2014 年生态环境状况维持于中等安全等级，2015-2017 年逐渐改善至轻微安全等级，2018-2019 年稳定与普通安全等级；兰州市 2012-2015 年生态环境状况为中等等级，2016-2017 年环境状况有所下降，转变为严重等级，2018-2019 年又回复至中等等级；白银市 2012-2017 年生态环境状况维持于严重等级，环境状况不佳，2018-2019 年转变为中等安全等级；定西市 2012-2017 年生态环境状况维持于普通安全等级，2018-2019 年达到轻微安全等级，生态环境状况良好。

甘肃省中部地处河西走廊中段，气候类型属温带大陆性气候，水资源分布地域差异明显，矿产资源、生物资源丰富。依据生态安全评估结果，甘肃省中部地区主要从以下几个方面进行加强环保建设：①、加强环保监督，严格检测空气质量，排查重污染工业企业的脱硫、脱硝、除尘设施是否完备，工业固体废物综合利用能力是否达标，废水处理设施是否完善，制定相关规章制度，加大处罚力度，减少污染物排放；②、发展科技，提升自然资源的利用效率，降低能源损耗，整治矿区生态恢复工作，降低农用化肥的使用量，提高工业废弃物的循环利用效率；③、加强预防旱涝等自然灾害的预警与整治，注重防护林工程建设，建设相关垃圾收集处理设施，减少居民生活垃圾污染，降低化学需氧量、氨氮化物、重金属污染物等的排放；④、提升环保财政支出，促进城市-乡村绿化建设、林业发展，

提升有效灌溉、生产生活水资源的循环利用效率，建设多水源收集、储存设施，在水资源缺乏地区，降低对地下水源的需求压力。

其中，兰州市 2012-2019 年生态环境状况变化较大，则依据甘肃省嘉峪关市地区生态环境与经济社会发展状况，基于章节 3.3 中步骤 1-6 进行生态安全评估，具体结果见表 4.2:

表 4.2 兰州市地区生态环境安全等级

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$D_1 = 0.613174$	$D_2 = 0.718652$	$D_3 = 0.763765$	$D_4 = 0.713039$	$D_5 = 0.650888$
2013	$D_1 = 0.624045$	$D_2 = 0.718482$	$D_3 = 0.743695$	$D_4 = 0.702168$	$D_5 = 0.647891$
2014	$D_1 = 0.623098$	$D_2 = 0.692699$	$D_3 = 0.732418$	$D_4 = 0.712597$	$D_5 = 0.656043$
2015	$D_1 = 0.618109$	$D_2 = 0.695137$	$D_3 = 0.726682$	$D_4 = 0.722218$	$D_5 = 0.660231$
2016	$D_1 = 0.631853$	$D_2 = 0.693094$	$D_3 = 0.730752$	$D_4 = 0.740510$	$D_5 = 0.648306$
2017	$D_1 = 0.632625$	$D_2 = 0.705823$	$D_3 = 0.737070$	$D_4 = 0.741336$	$D_5 = 0.649009$
2018	$D_1 = 0.631754$	$D_2 = 0.709838$	$D_3 = 0.743871$	$D_4 = 0.737752$	$D_5 = 0.642705$
2019	$D_1 = 0.665014$	$D_2 = 0.720522$	$D_3 = 0.724622$	$D_4 = 0.713043$	$D_5 = 0.624533$

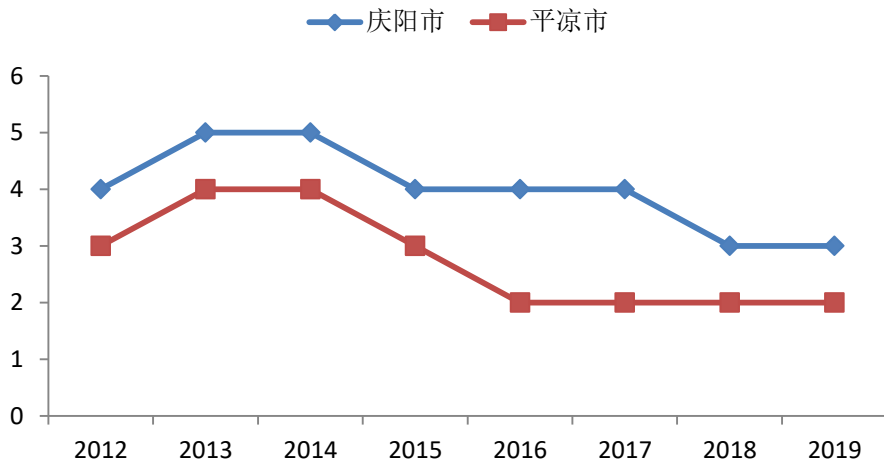
结合表 4.2，根据逼近理想解 TOPSIS 理论综合评估结果越大越好原则，可以得出，兰州市 2012-2013 年生态环境安全综合评价结果为 D_3 ，生态安全等级为中等；2014-2017 年生态环境综合评价结果由 D_3 逐渐降低至 D_4 ，生态环境安全状况转变为严重等级；2018-2019 年生态环境综合评价结果为 D_3 ，生态安全等级改善至中等等级，并接近于普通安全等级。

依据兰州市 2012-2019 年生态环境状况综合评估结果，总体可以看出，兰州市近年来生态环境状况逐渐改善。其中，2014-2015 年兰州市生态环境安全综合评估结果虽为 D_3 ，但其结果与 D_4 更为接近，即生态环境安全状况虽为中等，但接近于严重等级；2016-2017 年其生态环境安全状况降低为严重，结合兰州市生态环境安全状况指标数据，究其原因在于兰州市 2014-2017 年空气质量达二级以上天数占比有所降低，单位耕地面积化肥施用量、可吸入颗粒物年均浓度、私人

汽车拥有量占比以及工业烟（粉）尘排放量占比等高居不下，环境保护压力较大，在经济发展、社会建设等因素的多方面综合影响下，生态安全等级有所下降；2018-2019年兰州市生态环境安全等级虽为中等等级，但逐渐接近普通安全等级，生态状况持续改善。

4.3.3 甘肃省东南部地区生态安全评价

依据甘肃省东南部地区各地市生态环境与经济社会发展状况，根据表 2.1 甘肃省地区生态安全状况综合评价指标体系，查询相关指标数据。结合章节 3.3 集对分析-直觉模糊集 TOPSIS 理论测算步骤，得出甘肃省东南部地区各地市 2012—2019 年地区生态环境安全直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合得分，具体结果见图 4.4:



1: 轻微; 2: 普通; 3: 中等; 4: 严重; 5: 极其严重

图 4.4 甘肃省东南部地区生态环境安全状况

由图 4.4 可以得出，甘肃省东南部地区生态环境状况波动变化较大，环境质量不够稳定，其中，庆阳市 2012 年生态环境状况为严重等级，2013-2014 年降低至极其严重等级，2015-2017 年又回复至严重等级，2018-2019 年转变至中等安全等级；平凉市 2012 年生态环境状况为中等等级，2013-2014 年降低至严重等级，2015 年回复至中等等级，2016-2019 年逐渐稳定于普通安全等级。

甘肃省东南部地区冬冷常晴，夏热丰雨，有南湿、北干、东暖、西凉的特点，水资源、生物资源储量丰富，是甘肃省重要的农林产品生产基地和畜牧业、经济作物主产区。依据生态安全评估结果，甘肃省东南部地区主要从以下几个方面进

行加强环保建设：①、合理提升农林水财政支出，发展优势产业，促进林业发展，加强旱涝等自然灾害的防治工作，降低自然环境变化对农林牧业经济发展的冲击；②、提升水环境的污染检测能力，确保水源生态稳定，提升居民的绿色生活意识，促进水资源循环利用，降低居民生活用水量；③、增强节水灌溉能力，提升有效灌溉面积，促进水资源的科学开发利用，改进电力、热力、天然气等清洁能源的利用技术，提升清洁能源的适用领域，减少大气污染物的排放；④、加强环保监督，抓好自然资源的污染防治、规划和项目的环评工作推动全市生态环境状况良好发展。

其中，平凉市 2012-2019 年生态环境状况变化较大，则依据甘肃省嘉峪关市地区生态环境与经济社会发展状况，基于章节 3.3 中步骤 1-6 进行生态安全评估，具体结果见表 4.3：

表 4.3 平凉市地区生态环境安全等级

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$D_1 = 0.660607$	$D_2 = 0.689226$	$D_3 = 0.711714$	$D_4 = 0.695192$	$D_5 = 0.614940$
2013	$D_1 = 0.640936$	$D_2 = 0.687459$	$D_3 = 0.706160$	$D_4 = 0.706614$	$D_5 = 0.645160$
2014	$D_1 = 0.640438$	$D_2 = 0.688835$	$D_3 = 0.707325$	$D_4 = 0.707906$	$D_5 = 0.646370$
2015	$D_1 = 0.647430$	$D_2 = 0.699785$	$D_3 = 0.723192$	$D_4 = 0.690637$	$D_5 = 0.626065$
2016	$D_1 = 0.711780$	$D_2 = 0.743234$	$D_3 = 0.695065$	$D_4 = 0.616477$	$D_5 = 0.582327$
2017	$D_1 = 0.736768$	$D_2 = 0.737633$	$D_3 = 0.684386$	$D_4 = 0.605011$	$D_5 = 0.566205$
2018	$D_1 = 0.713738$	$D_2 = 0.716168$	$D_3 = 0.686617$	$D_4 = 0.608505$	$D_5 = 0.569854$
2019	$D_1 = 0.702036$	$D_2 = 0.718371$	$D_3 = 0.665784$	$D_4 = 0.609954$	$D_5 = 0.574770$

结合表 4.3，根据逼近理想解 TOPSIS 理论综合评估结果越大越好原则，可以得出，平凉市 2012 年生态环境安全综合评价结果为 D_3 ，生态安全等级为中等；2013-2014 年生态环境综合评价结果为 D_4 ，生态安全等级为严重；2015 年生态环境综合评价结果为 D_3 ，生态安全等级为中等；2016-2019 年生态环境状况综合评价结果为 D_2 ，生态安全为普通等级。

依据平凉市 2012-2019 年生态环境状况综合评估结果, 总体可以看出, 平凉市近年来生态环境质量逐渐提高, 虽有所波动, 但生态安全等级最终达到普通等级。其中, 2012 年平凉市生态环境安全综合评估结果虽为 D_3 , 但其结果与 D_4 较为接近, 生态状况接近于严重等级下的环境状况; 2013-2014 年生态安全等级下降为严重等级, 生态安全状况不佳, 结合平凉市生态环境安全状况指标数据, 究其原因在于 2013-2014 年平凉市空气质量达二级以上天数占比降低较大, 单位耕地面积化肥施用量、可吸入颗粒物(PM10)年均浓度、二氧化硫年均浓度、工业烟(粉)尘排放量占比增长幅度明显, 大气环境污染状况较为严重; 2015 年生态安全等级又回复至中等, 环境安全状况有所好转; 2016-2019 年平凉市生态环境安全等级转变为普通, 但生态环境质量由接近于中等等级逐渐转变为接近于轻微等级, 生态环境状况改善良好, 生态安全建设成果凸显。

4.3.4 甘肃省南部地区生态安全评价

依据甘肃省南部地区各地市生态环境与经济社会发展状况, 根据表 2.1 甘肃省地区生态安全状况综合评价指标体系, 查询相关指标数据。结合章节 3.3 集对分析-直觉模糊集 TOPSIS 理论测算步骤, 得出甘肃省南部地区各地市 2012—2019 年地区生态环境安全直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合得分, 具体结果见图 4.5:

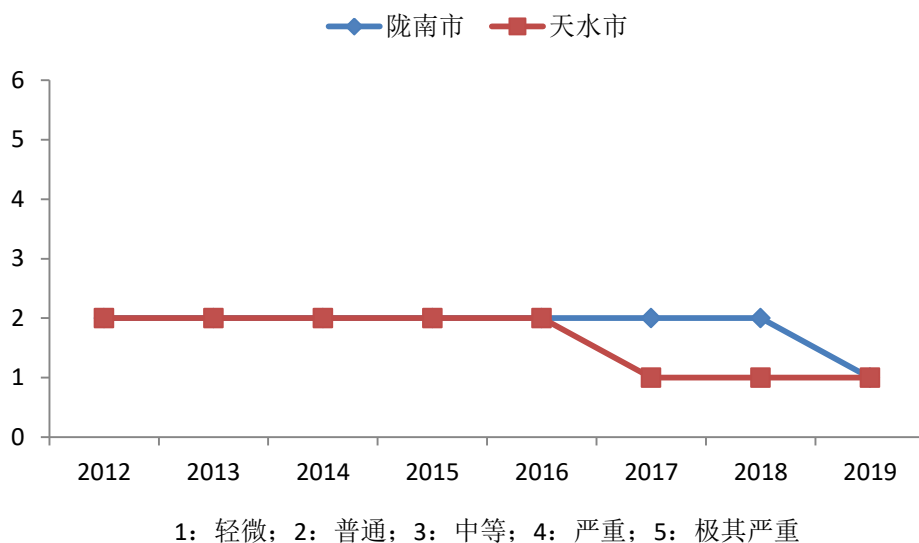


图 4.5 甘肃省南部地区生态环境安全状况

由图 4.5 可以看出, 甘肃省南部地区生态环境状况稳步提升, 其中, 陇南市

2012-2018 年生态环境状况稳定于普通等级，2019 年转变为轻微安全等级；天水市 2012-2016 年生态环境状况稳定于普通安全等级，2017-2019 年转变为轻微安全等级，环境保护较好。

甘肃省南部处于秦巴山区、黄土高原、青藏高原的交接区域，气候类型属于温带半湿润气候，生物资源、矿产资源丰富，水力资源富集。依据生态安全评估结果，甘肃省南部地区主要从以下几个方面进行加强环保建设：①、建设绿色经济体系，利用自身条件，开发旅游、农耕、林舍等经济，发展中药材种植、收购、加工、销售一体化、林舍旅游住宿经济链；②、提倡低碳生活，促进生活水资源的循环利用，完善灌溉设施，降低水资源的消耗；③、加强工业企业的环保监督，对于矿产开采区，实施严格的采后生态恢复标准，对于违规操作、乱排滥采工业企业提升惩处力度，保障生态环境质量在优良基础上的更优建设；④、切实推进环境污染防治工作，针对工业企业废水废气排放，制定更加严格的法规制度，减低大气污染程度，建设生态居住区；⑤、发展科学技术，提高工业废物的综合利用效率以及自然资源的开发利用率，促进山水林田湖草系统的综合治理以及混合生态农业的有效发展，并开展国土绿化工作，保障土地安全。

4.3.5 甘肃省西南部地区生态安全评价

依据甘肃省西南部地区各地市生态环境与经济社会发展状况，根据表 2.1 甘肃省地区生态安全状况综合评价指标体系，查询相关指标数据。结合章节 3.3 集对分析-直觉模糊集 TOPSIS 理论测算步骤，得出甘肃省西南部地区各地市 2012—2019 年地区生态环境安全直觉模糊数与理想直觉模糊数的 TOPSIS 综合得分，具体结果见图 4.6:

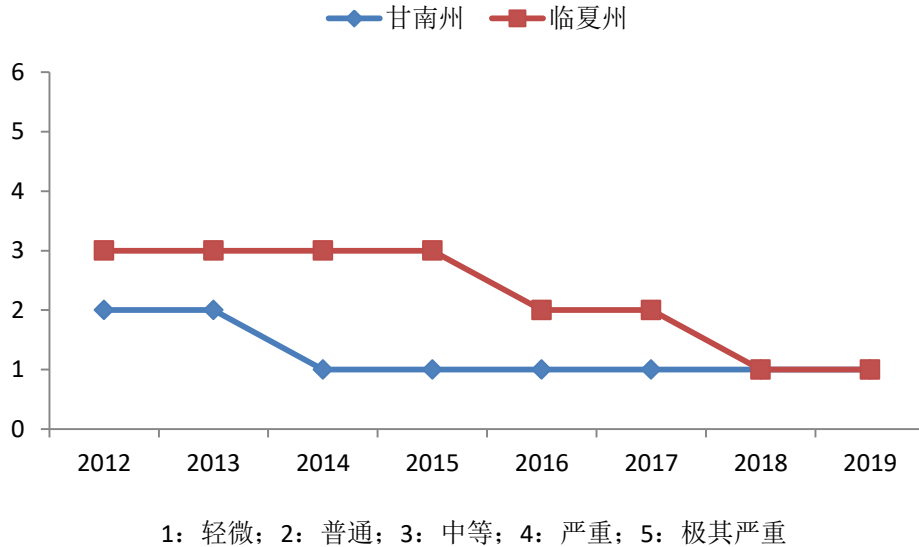


图 4.6 甘肃省西南部地区生态环境安全状况

由图 4.6 可以得出，甘肃省西部地区生态环境状况改善明显，生态文明建设效果突出，其中，甘南州 2012-2013 年生态环境状况为普通等级，2014-2019 年改善为轻微等级；临夏州 2012-2015 年生态环境状况稳定于中等等级，2016-2019 年逐年改善至轻微安全等级，环境建设效果明显。

甘肃省西南部地区是黄河上游重要的水源涵养区、补给区和生态安全屏障，国家确定的生态主体功能区、生态文明先行示范区，矿产资源、水能资源储量丰富、充沛。依据生态安全评估结果，甘肃省西南部地区主要从以下几个方面进行加强环保建设：①、适度提升林业建设财政支出，植树造林，退耕还林，治理水土流失，促进生态屏障工程建设；②、发展科学技术，充分利用水能丰富资源发电，提升清洁能源的适用领域，降低化石能源的消耗；③、提升空气质量检测技术，严格管理工业企业废气达标排放，提升城乡生态绿化建设，改善大气环境，提倡水资源的循环利用，降低居民生活消耗；④、加强环境保护监督与测查，完善各部门间的联合执法体系，制定相关法规，对环境违法行为严格管制，建立常态化的环境保护管理体系，保障黄河水源补给区生态安全；⑤、改进灌溉设施，增加有效灌溉面积，促进城市绿化建设，打造生态城市圈，保障土地资源安全。

其中，临夏州 2012-2019 年生态环境状况变化较大，则依据甘肃省嘉峪关市地区生态环境与经济社会发展状况，基于章节 4.1 中步骤 1-6 进行生态安全评估，具体结果见表 4.4:

表 4.4 临夏州地区生态环境安全等级

年份	轻微	普通	中等	严重	极其严重
2012	$D_1 = 0.609750$	$D_2 = 0.723607$	$D_3 = 0.821877$	$D_4 = 0.777087$	$D_5 = 0.646272$
2013	$D_1 = 0.600567$	$D_2 = 0.713303$	$D_3 = 0.819889$	$D_4 = 0.775971$	$D_5 = 0.653134$
2014	$D_1 = 0.642375$	$D_2 = 0.741445$	$D_3 = 0.794256$	$D_4 = 0.726636$	$D_5 = 0.618817$
2015	$D_1 = 0.642859$	$D_2 = 0.762177$	$D_3 = 0.800151$	$D_4 = 0.720575$	$D_5 = 0.616636$
2016	$D_1 = 0.681300$	$D_2 = 0.755680$	$D_3 = 0.754382$	$D_4 = 0.672257$	$D_5 = 0.591450$
2017	$D_1 = 0.696033$	$D_2 = 0.745265$	$D_3 = 0.717851$	$D_4 = 0.663822$	$D_5 = 0.589231$
2018	$D_1 = 0.698704$	$D_2 = 0.694232$	$D_3 = 0.685505$	$D_4 = 0.666525$	$D_5 = 0.593271$
2019	$D_1 = 0.760868$	$D_2 = 0.725684$	$D_3 = 0.689345$	$D_4 = 0.641713$	$D_5 = 0.528906$

结合表 4.4，根据逼近理想解 TOPSIS 理论综合评估结果越大越好原则，可以得出，临夏州 2012-2015 年生态环境综合评估结果为 D_3 ，安全等级为中等；2016-2017 年生态环境综合评估结果为 D_2 ，生态安全等级为普通；2018-2019 年生态环境安全综合评价结果为 D_1 ，生态安全等级为轻微安全等级。

依据临夏州生态环境状况综合评估结果，总体可以看出，临夏州 2012-2019 年生态安全状况变化趋势较好，安全等级达到轻微等级。其中，2012-2015 年临夏州生态环境安全综合评估结果由接近于严重等级逐渐转变为接近于普通安全等级，生态环境状况良好；2016-2019 年生态环境安全等级逐年改善至轻微安全等级，结合生态环境安全状况指标数据，可以看出 2016-2019 年间，甘南州空气质量达二级以上天数占比、建成区绿化覆盖率、农林水财政支出占比、城市燃气普及率等提升明显，旱涝灾害受灾面积占比、可吸入颗粒物 (PM10)、二氧化硫、二氧化氮年均浓度、第二产业生产总值占比、工业废水化学需氧量排放量占比等下降明显，大气环境污染状况明显好转，自然灾害预防与治理效果显著，生态环境质量逐年上升；但是 2016-2018 年生态环境安全等级虽为轻微，但与普通相对接近，环保建设需持续关注。

4.4 小结

本章节基于集对分析、逼近理想解 TOPSIS 理论改进的直觉模糊集生态安全评价理论，对甘肃省各个地州市的生态环境状况进行综合评估，结果表明：

(1) 白银市、天水市、张掖市、酒泉市、定西市、陇南市、甘南州等地区生态安全等级虽变化幅度相对较小，但其生态环境质量不断提高，与更良好的生态安全等级间的接近度逐年提升，生态安全状况逐年提升，不断稳固。

(2) 甘肃省各地州市 2012-2019 年生态环境整体上改善状况良好，如嘉峪关市、金昌市、平凉市、庆阳市、临夏州等地区生态安全等级逐渐上升，生态安全状况变化明显。其中，2019 年天水市、张掖市、酒泉市、定西市、陇南市、临夏州以及甘南州生态安全达到轻微等级，生态安全状况良好；嘉峪关市、金昌市、武威市、平凉市生态安全等级达到普通，生态安全建设效果显著；兰州市、白银市、庆阳市生态安全等级稳定于中等，环保建设仍需大力实施。

(3) 个别地区生态环境质量有所波动，如兰州市 2016-2017 年生态环境状况受空气质量达二级以上天数、单位耕地面积化肥施用量、可吸入颗粒物年均浓度、私人汽车拥有量以及工业烟（粉）尘排放量等因素的影响，生态环境安全等级降为严重；平凉市 2013-2014 年受大气污染相关因素的影响生态环境状况有所恶化，生态安全等级降低至严重；庆阳市 2013-2014 年生态环境受农林水财政支出、电力、热力以及燃气的生产和供应业投资、旱涝灾害受灾面积、工业废水排放量、工业废水化学需氧量排放量、私人汽车拥有量等因素的影响，生态环境安全状况降低明显。

5 结论与展望

5.1 主要结论

论文基于区域生态环境安全的理念, 构建地区生态环境安全评价指标体系, 结合熵值法确定指标权重。设定直觉模糊集多属性决策理论为核心理论, 采用集对分析、逼近理想解 TOPSIS 为辅助理论, 对其决策矩阵设计、贴近度测算进行合理改进, 结合甘肃省 2012-2019 年整体生态环境状况, 将其与欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离等贴近度测度及集对分析综合评估方法分别进行应用对比分析, 确定理论方法改进的科学性、合理性。在此基础上, 运用基于集对分析、逼近理想解理论改进的直觉模糊集综合评估方法, 对甘肃省各地州市的生态环境安全状况进行综合评价, 确定各地区生态安全等级。论文的主要研究结论如下:

(1) 基于集对分析与各距离测度改进的直觉模糊集理论对甘肃省总体进行生态安全评价。集对分析、逼近理想解 TOPSIS 理论改进的直觉模糊集法, 对甘肃省 2012-2019 年生态安全状况进行综合评价, 其结果与传统贴近度测度方法欧氏距离、汉明距离以及豪斯多夫距离的评价结果基本一致, 甘肃省生态环境安全状况由严重等级逐渐提高到普通等级, 相比于集对分析集对势测度结果, 其生态环境安全综合评价结果更加贴近甘肃省生态状况的实际变化趋势。通过各个改进理论评估结果对比分析可得, 在应用研究方面, 基于集对分析、逼近理想解改进的直觉模糊集测度相比于传统欧氏距离、汉明距离、豪斯多夫距离测度, 其综合评估结果能够较好地反映甘肃省生态环境状况的变化波动趋势, 较为贴合实际情况; 在理论研究方面, 逼近理想解 TOPSIS 理论相比于以上其他距离贴近度, 具有提取原始数据的信息更加充分、反应各个研究对象间的差异更加客观的优点, 能够集中反映总体情况, 普适性较强。因此, 本研究选择基于集对分析、逼近理想解改进的直觉模糊集测度作为最优改进的生态安全评价方法。

(2) 基于最优改进的直觉模糊集理论对甘肃省区域生态环境进行评价。甘肃省偏北部地区如酒泉市、嘉峪关市 2012-2019 年生态环境状况改善明显, 酒泉市生态安全等级由普通提升至轻微, 嘉峪关市生态安全等级由极其严重改善到中等, 并接近于普通等级, 且由于地理、气候等自然因素, 嘉峪关市生态环境状况相对恶劣, 环境保护与建设难度较大。甘肃省中部地区如张掖市、金昌市、武威

市、兰州市、白银市 2012-2019 年生态环境建设状况良好。其中，张掖市、兰州市、白银市生态安全等级由中等提升至普通，金昌市生态安全等级由严重改善至普通，武威市生态安全等级虽未有变化，但由接近于中等转变为接近于轻微安全等级，整体生态建设良好。甘肃省偏南部地区如甘南州、临夏州、定西市、天水市、平凉市、庆阳市、陇南市 2012-2019 年生态环境保护状况较好，生态安全等级逐年提升。其中，甘南州生态安全等级由普通提升至轻微，临夏州生态安全等级由中等改善至轻微，天水市、平凉市生态安全等级由中等提升至普通，庆阳市生态环境状况波动变化较大，生态安全等级由中等恶化至极其严重，随后逐渐改善至普通，最终稳定于中等，且与普通安全等级较为接近。此外，定西市、陇南市生态环境安全状况稳定于普通等级，且与轻微等级较为接近。整体上生态环境保护与建设状况较好，生态趋于稳定，环境质量较优。

5.2 不足与展望

论文基于直觉模糊集理论对甘肃省区域生态环境状况进行分析研究，虽结合集对分析、逼近理想解 TOPSIS 理论对其进行一定程度上的改进，但依旧存在不足：

(1) 本研究所使用的甘肃省总体、各地州市生态环境指标，由于很多指标数据存在缺失或无更细致分地区等原因，而被迫放弃选择使用，从而影响生态环境综合评价结果的精确度。因此，在以后的研究中，需拓展生态安全评价指标选择的领域，延长选取指标的时间年限，提高数据的利用效率，以更好地对区域生态环境安全状况进行综合评估。

(2) 在生态安全评价结果的测算过程中，选择熵权法作为其指标权重系数的主要赋权方法，但大范围、小区域的生态环境状况差异性较大，环境建设困难程度不尽相同。因此，在未来的研究中，应注重主、客观赋权法相结合的权重测算方式，以提高区域生态安全综合评价指标权重系数的精确性、实际性，使得最终的生态安全评估结果具有更优的有效性。

(3) 依据集对分析理论对生态环境安全综合评价指标数据进行处理时，对指标数据的等级划分需要更加的细致、全面，且对集对分析三元联系数的拓展中，应结合相关指标数据的具体划分，拓展为更加细致的联系数，如七元联系数、九

元联系数等，使得区域生态环境状况综合评估结果的时空异质性更强，以更加清晰地凸显区域生态环境状况的波动变化趋势。

5.3 政策建议

(1) 甘肃省偏北部地区如酒泉、嘉峪关、张掖市，由于气候干燥，自然条件相对较差，应注重保障土地生态资源的可持续发展，加强干旱自然灾害的应对能力，增设雨水收集、节水灌溉设施，促进水资源的循环利用；充分开发太阳能资源，科学实施农用化肥，降低土壤污染程度，促进防护林工程建设，完善环境突发情况的应急体系，最大限度地减小恶劣天气对生态环境的持续损害。

(2) 甘肃省中部地区如金昌、白银、兰州、武威、定西市，矿产、生物资源丰富，应注重加强环保监督，严格检测空气质量，排查重污染工业企业的工业固体废物综合利用能力是否达标，废水处理设施是否完善，对违规企业加大处罚力度；降低能源损耗，整治矿区生态恢复工作；建设相关垃圾收集处理设施，减少居民生活垃圾污染；提升环保财政支出，促进城市-乡村绿化建设、林业发展。

(3) 甘肃省偏南部地区如庆阳、平凉、陇南、天水市，自然条件相对较好，应注重坚持建设绿色经济体系，利用自身条件，开发旅游、农耕、林舍等经济，发展中药材种植、收购、加工、销售一体化经济链；提倡低碳生活，促进生活水资源的循环利用；提升水环境的污染检测能力，确保水源生态稳定；改进电力、热力、天然气等清洁能源的利用技术，提升清洁能源的适用领域，减少大气污染物的排放。

(4) 甘肃省整体上促进自然资源的合理开发，提高资源利用效率，对资源开发区实施严格管控，重视开发后的生态恢复状况，重视水土流失、土地荒漠化治理；促进供给侧结构性改革，调整能源消费结构，适当限制高耗能高污染产业的发展，拓展清洁能源的适用领域；推动产业转型升级，促进一、二、三产业相互结合协同发展；坚持实施严格的源头保护制度、损害赔偿制度、责任追究制度以及“生态底线不可触碰”原则；广泛结合生态学原理规划建设城市，合理规划城区结构，使得城市发展与自然环境有机结合，生态调控系统更加完善。

参考文献

- [1] Afzali A, Rafsanjani M K, Saeid A B. A fuzzy multi-objective linear programming model based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets for supplier selection[J]. *Int. J. Fuzzy Syst*,2016,18:864–874.
- [2] Atanassov K T, Rangasamy P. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets & Systems*,1986,20(1):87-96.
- [3] Belete M D. Ecohydrology to harmonize industrialization and ecological safety in urban environment: Case of Hawassa Lake, industries and Cheleleka wetland[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*,2018,18(2):192-200.
- [4] Bharati S K, Singh S R. Transportation problem under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. *Int. J. Fuzzy Syst*,2018,20:1511–1522.
- [5] Chen J H, Jiskani I M, Chen J L, et al. Evaluation and future framework of green mine construction in China based on the DPSIR model[J]. *Sustainable Environment Research*, 2020, 30(1). DOI: 10.1186/s42834-020-00054-8.
- [6] Chen Y Z, Lu H W, Yan P D, et al. Analysis of water–carbon–ecological footprints and resource–environment pressure in the Triangle of Central China[J]. *Ecological Indicators*,2021,125:107448.
- [7] Dai L, Liu Y B, Luo X Y. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China[J]. *Science of The Total Environment*,2021,754:141868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141868>.
- [8] Davoudabadi R, Mousavi S M, Mohagheghi V. A new decision model based on DEA and simulation to evaluate renewable energy projects under interval-valued intuitionistic fuzzy uncertainty[J]. *Renewable Energy*,2021,164:1588-1601.
- [9] De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives[J]. *Science of The Total Environment*,2010,408(18):3871-3879.
- [10] Ermakov S, Volkova L, Kapustina I. Ecosystems measurement: risk assessment methods and ecological safety principles[J]. *Transportation Research*

- Procedia,2021,54:47-57.
- [11]Gao S, Sun H H, Zhao L, et al. Dynamic assessment of island ecological environment sustainability under urbanization based on rough set, synthetic index and catastrophe progression analysis theories[J]. Ocean & Coastal Management,2019,178:104790.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.04.017>.
- [12]Garg H, Kumar K. Distance measures for connection number sets based on set pair analysis and its applications to decision-making process[J]. Appl Intell,2018,48:3346–3359.
- [13]Ge W, Li Z K, Li W, et al. Risk evaluation of dam-break environmental impacts based on the set pair analysis and cloud model[J]. Nat Hazards,2020,104:1641–1653.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107448>.
- [14]Huang L Y, Wang J, Fang Y, et al. An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region[J]. Sustainable Cities and Society,2021,69:102865. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102865>.
- [15]Ke X L, Wang X Y, Guo H X, et al. Urban ecological security evaluation and spatial correlation research—based on data analysis of 16 cities in Hubei Province of China[J]. Journal of Cleaner Production,2021,311:127613.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127613>.
- [16]Khalid A, Abbas M. Distance measures and operations in intuitionistic and interval-valued intuitionistic fuzzy soft set theory[J]. Int. J. Fuzzy Syst,2015,17:490–497.
- [17]Li H W, Lv M, Ye S. The research and practice of ecological safety evaluation methods(I) evaluation index and model[J]. Procedia Environmental Sciences,2011,11:1204-1210.
- [18]Liu J, Liu R Z, Yang Z F, et al. Quantifying and predicting ecological and human health risks for binary heavy metal pollution accidents at the watershed scale using Bayesian Networks[J]. Environmental Pollution,2021,269:116125.

- <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116125>.
- [19] Lu J Z, Lu H W, Wang W P, et al. Ecological risk assessment of heavy metal contamination of mining area soil based on land type changes: An information network environ analysis[J]. *Ecological Modelling*,2021,455:109633. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109633>.
- [20] Ma X B, Sun B, Hou G L, et al. Evaluation and spatial effects of tourism ecological security in the Yangtze River Delta[J]. *Ecological Indicators*,2021,131:108190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108190>.
- [21] Nassani A A, Aldakhil A M, Zaman K. Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources[J]. *Resources Policy*,2021,74:102271. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102271>.
- [22] Ramesh S, Kaplana K. Ecological integrity and environmental protection for Vijayawada region – Scattered Eastern Ghats[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*,2015,4(1):109-116.
- [23] Şahin R. Fuzzy multicriteria decision making method based on the improved accuracy function for interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. *Soft Comput*,2016,20:2557–2563.
- [24] Shen Q, Huang X, Liu Y. et al. Multiattribute decision making based on the binary connection number in set pair analysis under an interval-valued intuitionistic fuzzy set environment[J]. *Soft Comput*,2020,24:7801–7809.
- [25] Shvartsburg L E, Butrimova E V, Yagolnitsers O V. Energy efficiency and ecological safety of shaping technological processes[J]. *Procedia Engineering*,2017,206:1009-1014.
- [26] Solovjova N V. Ecological risk modelling in developing resources of ecosystems characterized by varying vulnerability levels[J]. *Ecological Modelling*,2019,406:60-72.
- [27] Solovjova N V. Synthesis of ecosystemic and ecoscreening modelling in solving problems of ecological safety[J]. *Ecological Modelling*,1999,124(1):1-10.
- [28] Suter G W, Vermeire T, Munns W R, et al. An integrated framework for health

- and ecological risk assessment[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*,2005,207(2):611-616.
- [29]Tang Y M, Chen L H, She Z Y. Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*,2021,130:108104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108104>.
- [30]Telichenko V I, Slesarev M U, Kuzovkina T V. The analysis of methodology of the assessment and expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the russian federation for 2010-2020 years[J]. *Procedia Engineering*,2016,153:736-740.
- [31]Xiao W, Chen W Q, Deng X Y. Coupling and coordination of coal mining intensity and social-ecological resilience in China[J]. *Ecological Indicators*,2021,131:108167. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108167>.
- [32]白中科.国土空间生态修复若干重大问题研究[J].*地学前缘*,2021,28(4):1-13.
- [33]陈克恭,师安隆.“绿水青山就是金山银山”对发展生态经济的新启示——以甘肃省为例[J].*环境保护*,2019,47(5):8-12.
- [34]陈闻鹤,常志朋,宫晓虹.基于马田系统的企业疫情防控风险集对评估模型[J].*软科学*,2020,34(11):137-144.
- [35]刁尚东.我国特大城市生态文明评价指标体系研究[D].中国地质大学,2013.
- [36]董建红,张志斌,张文斌.基于三维生态足迹的甘肃省自然资本利用动态变化及驱动力[J].*生态学杂志*,2019,38(10):3075-3085.
- [37]董娜,卿青,李鲁洁.基于组合赋权和集对分析的施工项目绿色集成评价[J].*科技管理研究*,2020,40(18):87-94.
- [38]吴亚玲,李巧云.基于改进 PSR 模型的洞庭湖区生态安全评价及主要影响因素分析[J].*农业现代化研究*,2021,42(1):132-141.
- [39]郭二果,李现华,祁瑜,等.国家北方重要生态安全屏障保护与建设[J].*中国环境管理*,2021,13(2):80-85.
- [40]韩承豪,魏久传,谢道雷,等.基于集对分析-可变模糊集耦合的砂岩含水层富水性评价——以宁东矿区金家渠井田侏罗系直罗组含水层为例[J].*煤炭学*

- 报,2020,45(7):2432-2443.
- [41]韩燕,张玉婷.甘肃省城镇化与生态环境耦合协调度[J].水土保持研究,2021,28(3):256-263.
- [42]韩增林,郭媛媛,王泽宇,等.环渤海沿海地市低碳转型绩效评价与影响因素分析[J].人文地理,2017,32(3):108-116.
- [43]何刚,阮君,赵杨秋,等.基于 Lotka-Volterra 共生模型的区域生态安全动态评价[J/OL]. 安全与环境学报:1-11[2021-09-27].<https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.0569>.
- [44]侯丁冉,马慧强.基于集对分析的我国省域旅游综合发展能力评价研究[J].经济问题,2021(6):114-121.
- [45]胡启玲,董增川,杨雁飞,等.基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432.
- [46]姜德义,彭辉华,赵丽君,等.熵权集对分析法在盐岩储气库稳定性评价中的应用[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(2):284-289.
- [47]姜福川,周师,吴增彤,等.基于熵权-TOPSIS 法的煤矿安全投入决策分析[J].中国安全科学学报,2021,31(7):24-29.
- [48]蒋云良,赵克勤.集对分析在人工智能中的应用与进展[J].智能系统学报,2019,14(1):28-43.
- [49]晋王强,牛学乾,温飞,等.甘肃省生态环境保护长效机制建设研究[J].环境保护,2021,49(9):55-59.
- [50]李强华,闫靖勇.基于 DPSIR 模型的三亚市海岸带生态安全评价[J].海洋湖沼通报,2021,43(04):147-154.
- [51]李晴宇,李月芬,解小雨.基于集对分析的长吉图城市人口增长与空间扩张协调性研究[J].现代城市研究,2017(1):105-110.
- [52]林凯,顾锋,史玉民.长江经济带生态保护和高质量发展研究—基于扎根理论的分析[J].华东经济管理,2021,35(5):12-19.
- [53]刘世栋,薛东前,高峻.上海杭州湾北岸滨海地区生态安全评价[J].安全与环境学报,2012,12(6):124-130.
- [54]刘勇.区域土地资源可持续利用的生态安全评价研究[D].南京农业大学,2004.

- [55] 曲小瑜,张健东.我国食品工业低碳创新能力的实证研究—基于状态转移矩阵与集对分析耦合模型[J].科技管理研究,2017,37(12):24-30.
- [56] 盛小星,叶春明.基于集对分析法的长三角雾霾风险评估[J].资源开发与市场,2017,33(3):334-337+359.
- [57] 施洲,纪锋,余万庆,等.基于集对分析理论的大型沉井基础施工动态风险评估[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3):419-425.
- [58] 孙枫,章锦河,王培家,等.城市生态安全格局构建与评价研究:以苏州市区为例[J].地理研究,2021,40(9):2476-2493.
- [59] 童磊,郑珂,苏飞,等.浙江省人口健康脆弱性评估及影响因素分析[J].地理科学,2020,40(8):1293-1299.
- [60] 汪恒,兰培真.区间直觉模糊集的港口水域船舶航行环境风险评价[J].中国航海,2021,44(2):38-44+52.
- [61] 王韩民,郭玮,程漱兰,等.国家生态安全:概念、评价及对策[J].管理世界,2001(2):149-156.
- [62] 王宏昌,魏晶,姜萍,等.辽西大凌河流域生态安全评价[J].应用生态学报,2006(12):2426-2430.
- [63] 王培,许仕荣,唐国强,等.基于集对分析原理的城市需水量预测模型及其应用[J].资源开发与市场,2017,33(4):408-410+441.
- [64] 王甜甜,靳德武,刘基,等.动态权-集对分析模型在矿井突水水源识别中的应用[J].煤炭学报,2019,44(9):2840-2850.
- [65] 吴国庆.区域农业可持续发展的生态安全及其评价探析[J].生态经济,2001(8):22-25.
- [66] 吴开亚,何琼,孙世群.区域生态安全的主成分投影评价模型及应用[J].中国管理科学,2004(1):107-110.
- [67] 吴秦豫,张绍良,杨永均,等.基于恢复力的半干旱矿区生态系统退化风险空间评估[J].煤炭学报,2021,46(5):1587-1598.
- [68] 徐雯雯,宁晓刚,王浩,等.基于 GIS 的城镇、农业、生态空间分区与国土开发风险识别——以陕西省南泥湾景区为例[J].地域研究与开发,2021,40(3):127-132+139.

- [69]徐昕军,杨峰.基于 SPA 和云理论的城市地下病害风险评估模型[J].工程科学与技术,2018,50(3):224-232.
- [70]阳斌成,张家其,罗伟聪,等.基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009-2018 年水资源承载力综合评价[J].水土保持通报,2021,41(5):357-364.
- [71]阳斌成,张家其,罗伟聪,等.基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009-2018 年水资源承载力综合评价[J].水土保持通报,2021,41(5):357-364.
- [72]杨茂,江博,熊昊,等.基于集对理论的风电场内功率汇聚特性分析[J].太阳能学报,2017,38(2):457-463.
- [73]杨雪荻,白永平,车磊,等.甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J].生态学报,2020,40(14):4785-4793.
- [74]杨亚锋,王红瑞,赵伟静,等.水资源承载力的集对势 - 偏联系数评价模型[J].工程科学与技术,2021,53(3):99-105.
- [75]张婧,孙英兰.海岸带生态系统安全评价及指标体系研究——以胶州湾为例[J].海洋环境科学,2010,29(6):930-934.
- [76]张晓文,赵普,纪爱兵.基于直觉模糊集的世界一流学科建设成效评价[J].运筹与管理,2021,30(6):205-210.
- [77]赵克勤.基于集对分析的不确定性多属性决策模型与算法[J].智能系统学报,2010,5(1):41-50.
- [78]赵玉婷.黄河源区高寒草地生态安全评价[D].兰州大学,2021.DOI:10.27204/d.cnki.glzhu.2021.000060.
- [79]朱立祥,雒占福,王启雯,等.环境约束下的甘肃省城市土地利用效率时空差异及其演进特征[J].水土保持研究,2020,27(4):368-375.
- [80]左伟,王桥,王文杰,等.区域生态安全评价指标与标准研究[J].地理学与国土研究,2002(1):67-71.

后 记

时光易逝，不知不觉硕士生涯已经走到了尾声。在毕业论文完成之际，谨向给予我支持和帮助的指导老师、师兄师姐师弟师妹们以最真挚的谢意！

本文是在导师郭精军教授的悉心指导下，从最初论文的选题到论文的最终定稿，逐步修改完成，其研究成果与老师的大力支持密不可分。在老师的指导下，学生在这三年硕士的求学生涯过程中，学业上有了长足的进步，丰富自身的文学素养，开拓了眼界。导师勤奋求实的敬业精神、谦逊严谨的教学作风以及诲人不倦的育人风范，令学生终身难忘！向导师致以衷心的感谢和深深的敬意！

同时，在论文的完成过程中，得到了兰州财经大学统计学院众多老师的指点与帮助，在此对老师们热情关照和大力帮助表示衷心的感谢！

感谢我的父母对我伟大、无私的爱与关怀，激励我热爱生活，热爱学习、科研，我将不辜负你们的期望！

最后，特别感谢各位专家、学者在百忙之中对本文的审阅，恳请提出宝贵的意见与批评。

攻读博/硕士学位期间发表的论文和其他科研情况

一、发表的学术论文

- [1] 郑乐乐, 马小雯, 安翔, 等. 基于 DPSIR-GM(1,1)模型的甘肃省生态安全评价与预测[J]. 生态科学, 2022, 41(4): 60-69.
- [2] 郑乐乐. 甘肃省生态环境与经济高质量发展耦合协调研究[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(10): 51-57.

二、参与的项目课题

- [1] 郭精军, 甘肃省哲学社会科学规划项目(项目编号: 19TB011): 《基于隐马尔可夫模型的生态文明程度指数测评指标体系设计与测度》。
- [2] 郭精军, 甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目(项目编号: GSSYLXM-06): 《甘肃省经济高质量发展的统计测度、战略选择及实现路径》。