

分类号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

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 黄河流域生态安全评价及障碍因素研究

研究生姓名: 马小雯

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: 马小雯 签字日期: 2022.5.30

导师签名: 郭树军 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: 马小雯 签字日期: 2022.5.30

导师签名: 郭树军 签字日期: 2022.5.30

# **Research on Ecological Security Evaluation and Obstacle Factors of the Yellow River Basin**

**Candidate : Xiaowen Ma**

**Supervisor: Jingjun Guo**

## 摘 要

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,在国家经济社会发展和生态安全等方面发挥着重要作用。但是由于长期以来受自然环境条件及高强度开发的影响,流域的生态环境较脆弱,生态安全等级较低,经济发展与资源环境矛盾问题突出。2019年黄河流域生态保护和高质量发展作为国家重大战略的提出为流域沿线省域的发展提供了新方向、新机遇。因此本研究以黄河流域高质量发展为背景,综合考虑了流域各区社会经济、自然资源、生态环境等实际情况,首先基于“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)理论框架模型构建黄河流域生态安全评价指标体系,其次运用TOPSIS模糊物元法测度黄河流域沿线各省域2010-2019年生态安全状况及其演变趋势;进一步引入耦合度和耦合协调模型理论,对黄河流域整体内部系统及两两子系统间生态安全水平的耦合协调性分别从时间和空间两个维度进行系统评价;最后利用障碍度函数,用障碍指数判定影响黄河流域各省区生态安全水平提升的主要障碍因素,系统科学地揭示了黄河流域生态安全的现状及其变化成因所在。

研究结果表明:(1)2010-2019年黄河流域各省区生态环境日益改善。在时间序列上,黄河流域总体生态安全水平经历了“小幅上升—快速上升—稳定上升”的三个过程;在空间格局上,受自然、区域、历史等因素影响,沿黄河流域各省生态安全水平在空间上呈现从“中游领先”到“下游超越”的演进格局。(2)2010-2019年黄河流域生态安全整体耦合协调水平呈上升态势,耦合协调性经历了“勉强协调—初级协调—中级协调”的过渡,流域上、中、下游不同区域耦合协调能力空间差异明显;2010-2019年两两子系统间的耦合协调性均向健康有序方向协调发展,但呈现明显的区域异质性,生态安全系统的内部协同机制需要改进。(3)通过障碍度函数模型探寻黄河流域不同省区生态安全水平差异成因,发现阻碍流域各省区生态安全水平提高的因素不仅有共性因素,也有其区域特殊因素。人均水资源量是流域沿线各省区生态安全水平提升的共同障碍因素。

**关键词:** 黄河流域 生态安全 TOPSIS 模糊物元法 耦合协调度模型 障碍因子

## Abstract

The Yellow River Basin is an important ecological barrier and economic zone in China, it plays a vital role in national economic and social development and ecological security. However, due to the long-term impact of natural environmental conditions and high-intensity development, the ecological environment of the basin is more fragile, the ecological security level is lower, and the conflict between economic development and resources and environment is still prominent. The proposed ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin in 2019 as a major national strategy provides great opportunities for the development of the provinces along the basin. Therefore, this study takes the high-quality development of the Yellow River Basin as the background, and takes into account the actual situation of socio-economic, natural resources and ecological environment in each region of the basin, firstly, based on the "Driver-Pressure-State-Impact-Response "(DPSIR) theoretical framework model to construct the ecological security evaluation index system of the Yellow River Basin, followed by the TOPSIS fuzzy element method to measure the ecological security status and its evolution trend of each province along the Yellow River Basin from 2010 to 2019; Furtherly, introducing the theory of coupling degree and coupling coordination model to conduct a comprehensive and systematic evaluation of the

temporal and spatial differences in coupling and coordination between the overall internal system of the Yellow River Basin and the ecological security level of the two subsystems; Finally, using the obstacle degree function to quantitatively study the main obstacle factors that affect the improvement of the ecological security level of the Yellow River Basin, systematically and comprehensively reveal the current status and causes of the ecological security of the Yellow River Basin.

The results of the study show that (1) the ecological environment of the Yellow River Basin provinces and regions has been improving from 2010 to 2019. In terms of time series, the overall ecological safety level of the Yellow River basin has experienced three processes: "small increase - rapid increase - stable increase"; in terms of spatial pattern, due to natural, regional and historical factors, the ecological safety level of the provinces along the Yellow River basin has evolved from "leading in the middle reaches" to "surpassing in the lower reaches". In terms of spatial pattern, due to natural, regional and historical factors, the ecological safety level of provinces along the Yellow River Basin has evolved from "leading in the middle reaches" to "surpassing in the lower reaches". (2) The overall coupling and coordination level of ecological security in the Yellow River basin from 2010 to 2019 is on the rise, and the coupling and coordination has undergone the transition of "barely coordinated - primary coordination - intermediate coordination", with

obvious spatial differences in the coupling and coordination ability of different regions in the upper, middle and lower reaches of the basin; the coupling and coordination between the two subsystems from 2010 to 2019 are coordinated in a healthy and orderly direction, but show obvious regional heterogeneity, and the internal synergistic mechanism of the ecological security system needs to be improved.(3) By exploring the causes of differences in ecological security levels among different provinces in the Yellow River basin through a barrier function model, we found that there are not only common factors that impede the improvement of ecological security levels in each province in the basin, but also regional heterogeneity in the barriers to ecological security in different provinces. Water resources per capita is a common obstacle to the improvement of ecological security in all provinces and regions along the basin.

**Keywords :** Yellow River Basin; Ecological security; TOPSIS fuzzy matter-element method; Coupling and coordination model; Barrier factor

# 目 录

<b>1 引言</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 生态安全提出及理论概念 .....	2
1.2.2 生态安全的研究对象 .....	3
1.2.3 生态安全的指标体系 .....	4
1.2.4 生态安全的评价方法 .....	5
1.2.5 研究述评 .....	6
1.3 研究内容与方法 .....	6
1.3.1 研究内容 .....	6
1.3.2 研究方法 .....	8
1.4 创新点与技术路线 .....	8
1.4.1 创新点 .....	8
1.4.2 技术路线 .....	9
<b>2 理论基础与区域概况</b> .....	11
2.1 研究的理论基础 .....	11
2.1.1 可持续发展理论 .....	11
2.1.2 系统协调理论 .....	11
2.1.3 生态安全理论 .....	12
2.2 研究区域概况 .....	12
2.2.1 地理区位状况 .....	12
2.2.2 社会经济概况 .....	13
2.2.3 资源环境概况 .....	17
<b>3 黄河流域生态安全评价分析</b> .....	19

3.1 评价模型构建 .....	19
3.1.1 评价指标构建原则 .....	19
3.1.2 生态安全评价指标体系构建 .....	19
3.1.3 指标数据标准化及权重确定 .....	22
3.1.4 综合评价模型及分级标准 .....	23
3.2 黄河流域生态安全评价结果分析 .....	25
3.2.1 黄河流域生态安全时序演变分析 .....	25
3.2.2 黄河流域生态安全空间演变特征 .....	2
<b>4 黄河流域生态安全耦合协调性分析 .....</b>	<b>4</b>
4.1 耦合协调度模型构建 .....	4
4.2 黄河流域生态安全耦合协调性研究 .....	5
4.2.1 黄河流域整体生态安全耦合协调性分析 .....	6
4.2.2 黄河流域区域生态安全耦合协调性分析 .....	7
4.3 黄河流域生态安全子系统间耦合协调时空分异研究 .....	8
4.3.1 黄河流域子系统生态安全耦合协调度时序变化分析 .....	3
4.3.2 黄河流域子系统生态安全耦合协调性空间分异特征 .....	2
<b>5 黄河流域生态安全障碍因素诊断分析 .....</b>	<b>6</b>
5.1 障碍度模型构建 .....	6
5.2 黄河流域整体生态安全障碍因子诊断分析 .....	6
5.3 黄河流域区域生态安全障碍因素诊断分析 .....	9
5.3.1 黄河流域上游省份生态安全障碍因子分析 .....	9
5.3.2 黄河流域中游省份生态安全障碍因子分析 .....	10
5.3.3 黄河流域下游省份生态安全障碍因子分析 .....	11
<b>6 结论与政策建议 .....</b>	<b>12</b>
6.1 研究结论 .....	12
6.2 提升黄河流域生态安全的对策建议 .....	13
6.2.1 统筹黄河流域上游、中游、下游协同发展 .....	13
6.2.2 因地制宜合理规划黄河流域生态发展 .....	13

6.2.3 加强黄河流域环境治理投资 .....	14
6.2.4 提高公众的环保认识度与参与度 .....	14
<b>参考文献</b> .....	15
<b>后记</b> .....	20

# 1 引言

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

生态系统是人类生产生活的物质基础,生态安全是人类生存和经济可持续发展的根本保障<sup>[1]</sup>。当下,面对生态环境日益凸显的矛盾问题,作为人类生存发展基础的生态安全已然成为人类面临的一个新挑战,其相关研究也成为学术界逐渐兴起的一个新关注热点。习近平总书记在全国生态环境会议上的讲话中提到:“生态环境安全是国家安全的重要组成部分,是经济社会健康可持续发展的基础”<sup>[2]</sup>。生态安全与社会可持续发展密切相关,它已不再单纯指生物安全或生态系统安全的传统内容,而是提升至国家安全重要组成部分的高度,是经济社会稳定可持续发展的重要保障<sup>[3]</sup>。

黄河流域是“一带一路”重要区域,也是我国重要的生态功能区和经济发展区,其在国家发展经济社会和维护生态安全工程中发挥着至关重要的作用<sup>[4]</sup>。然而长期以来,由于黄河流域水旱灾害频发,流域生态环境相对脆弱、生态脆弱区面积分布广,类型繁多,总体经济发展水平相对滞后,区域间差异明显,地区发展不协调等问题突出。2019年9月国家领导人习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略,加强黄河流域生态化建设和促进全流域高质量发展是重点工作<sup>[5]</sup>。此次重大战略提出为新时期黄河流域沿线各省区开展生态保护和建设社会主义现代化市场经济带来新机遇、新方向。因此系统科学地测度黄河流域沿线省份的生态安全水平,探寻各省区生态安全水平差异成因及演变趋势,可为黄河流域精准开展生态保护工作,努力实现流域高质量发展提供参考依据。

### 1.1.2 研究意义

生态安全是区域可持续发展的根本保障,也是区域发展的基础研究内容。对区域生态安全状况进行科学合理评价不仅可以从基础理论上为区域经济社会可

持续发展提供方向，而且有助于人类在发展过程中有效减小对生态系统的破坏。因此在优化黄河流域生态保护和实现经济高质量发展的重大战略指引下，深入研究黄河流域的生态安全状况具有重要的理论意义和现实意义。

### 1.1.2.1 理论意义

目前关于生态安全的研究内容主要涉及生态安全内涵、生态安全评价指标体系构建、时间变化和空间分异特征、驱动机制与障碍因素等方面，但总的来说，我国生态安全的研究仍处于持续深入探索中。在黄河流域生态保护与高质量发展战略大背景下，深入阐明黄河流域各省区在改善生态安全状况进程中所需要重视的问题，将有助于进一步丰富生态安全评价的基础理论研究成果，继而为黄河流域的环境治理和经济高质量发展提供更科学的参考依据。

### 1.1.2.2 现实意义

黄河流域作为我国人口活动和经济发展的密集区，是国家生态安全和社会主义现代化建设的重点区域。重点关注其沿岸各省域生态安全的现实状况和动态变化过程，积极探寻制约黄河流域整体生态安全水平提升的关键因子，对于保障流域生态安全，确保生态资源永续使用，推动经济社会可持续发展具有重要意义，为实现人与自然和谐共生的生态平衡提供科学依据，就各省当前及未来面临的生态安全问题，有针对性地提出有效生态保护措施，为促进实现黄河流域高质量发展提供实际帮助。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 生态安全提出及理论概念

生态安全的提出具有深厚的社会历史背景，它最早诞生于“环境安全”的概念范畴中<sup>[6]</sup>。上世纪40年代，美国生态学家奥尔多·利奥波德率先提出生态安全雏形“土地健康”一词的人，他认为土地健康包括两大内容：分别是土地功能结构完善和土地自我修复更新<sup>[7]</sup>。后来“土地健康”这一概念也被运用于土地生态安全评价分析中，从而为流域、景观、旅游等生态安全的研究奠定了基础。到了20世纪70年代，外国学者对生态安全展开了更深入广泛的研究。1997年，Leister R. Brown 在《建设可持续发展社会》一书中“生态安全”作为一个科学

系统的概念被正式提出,指出环境退化和资源匮乏已经成为威胁一个国家整体安全的重要因素<sup>[8]</sup>。国际应用系统分析研究所(IIASA)于1989年首次明确定义了“生态安全”新概念,人们逐渐意识到生态安全的重要含义<sup>[9]</sup>。

国内对生态安全研究是在国外研究基础上开展,目前仍是一个热点内容,最初是在20世纪90年代初提出<sup>[10]</sup>。当时长江洪涝灾难给长江中下游地区带来了巨大损失,此次灾难也引起了人们对环境灾难的广泛关注和高度重视。1999年国务院在《全国生态环境建设规划》中指出要把保护生态环境、建设生态安全、实现可持续发展作为我国现代化建设的根本原则<sup>[11]</sup>。21世纪初在《全国生态保护纲要》中明确了“维护国家生态环境安全”的目标,继而出现了“生态安全”这一概念<sup>[12]</sup>。

近年来,研究人员不断研究与生态安全有关的问题,而生态安全的概念和研究范围也随着时间的推移和研究的深入不断发展,生态安全没有一个统一且被广泛认可的定义,通常分为狭义和广义两类<sup>[13]</sup>。从广义上讲,生态安全指的是一种可持续的状态,在这种状态下,人类正常生产和生活所需的各方面都能得到保障,基本没有威胁,主要包括人类自身的健康,未来可持续发展、必要的资源保证和社会发展的秩序调节等,生态安全的这一层面包含了经济、社会、环境等三大内容,构成了一个涉及多方面的复杂系统<sup>[14]</sup>。从狭义上讲,生态安全就是指周围自然生态系统的安全状况,在这种状态下,人类可以维持基本的生存需求,相较于广义的概念,狭义的生态安全范围更窄,它还指生态系统功能保持完整,并且可以和谐健康运行的状态<sup>[15]</sup>。国内生态安全研究主要有三个背景:一是与中国西部开发战略实施有关的环境保护和建设问题<sup>[16]</sup>。其次,国内生态环境持续恶化,自然灾害频发<sup>[17]</sup>,如20世纪90年代末灾难性的洪涝灾害不断发生,土地荒漠化形式日益严重,等等。第三,国外对生态安全的理论和实践研究成果对中国产生了深远影响<sup>[18]</sup>。

### 1.2.2 生态安全的研究对象

国外对生态安全的研究主要针对生态安全的定性研究,其发展过程从最初探索到深入研究,一共经历了4个阶段。第一阶段,外国学者对生态安全的研究还处于初步探索阶段,研究内容主要涉及生态安全定义和生态安全内容两个方面,

首先研究者们试图将生态安全定义概括为一个广泛适用的概念,其次是生态安全应该包括什么,即哪些方面可以被归类为生态安全领域<sup>[19]</sup>。第二阶段,在已经取得一定研究进展的基础上,国外研究人员开始进一步关注生态环境的破坏,重点研究生态系统功能破坏和生态退化等问题<sup>[20]</sup>。第三阶段,国外研究学者继续探寻生态环境变化对生态安全问题带来的具体影响以及两者之间的动态联系<sup>[21]</sup>。第四阶段,国外研究者开始更多关注人类健康与生态安全问题间的联系,在以人类安全为中心的前提下,生态安全问题会给人类带来哪些威胁,同时学者们进一步将生态安全的研究扩展到多系统、多层次、多方面<sup>[22]</sup>。

随着对生态安全含义和范围的深入研究,国内对生态安全的研究更侧重于定量研究,研究对象可以分为全局性评价和专题性评价两个方面<sup>[23]</sup>。生态安全的研究也从简单的生物评价、环境评价转向考虑经济、社会和环境等综合关系的全局评价。如张萌<sup>[24]</sup>等把生物多样性服务价值与人类生态需求等结合起来,对生态安全格局进行了深入研究。生态安全的研究对象角度多,内容丰富,主要包括区域生态安全模式的演变和某些特定区域的生态安全研究,重点涉及土地、流域、环境、森林、旅游业等方面,其中研究重点是土地生态安全。贺祥<sup>[25]</sup>通过对贵州省生态系统及其服务价值的研究分析了该地区生态安全现状,结果发现研究区生态脆弱区生态安全存在严重时空差异性。吴景全<sup>[26]</sup>等从生态安全角度出发对研究区域西北诸河流域土地利用动态变化及土地生态安全现状进行定量评价,为自然流域范围的土地利用变化及土地生态安全研究提供实例。

### 1.2.3 生态安全的指标体系

随着经济社会的快速发展,生态环境问题也日益增多,促使学者们对生态安全内容研究也不断深入,其中生态安全指标体系构建和生态安全评价方法成为学者们研究热点和关注重点。经济合作与发展组织(OECD)率先提出将生态压力、环境状态、人为响应作为一个因果循环系统的PSR概念模型是生态安全指标体系构建的雏形<sup>[27]</sup>。随着进一步深入研究,联合国可持续发展委员会(UNCSD)提出了PSR的扩展模型—DPSIR模型,该模型中增加了推动生态环境发生变化的各种驱动因素,系统并清晰地反映人类生产生活和经济发展对生态环境的影响,从而被广泛应用于生态环境的相关研究中<sup>[28]</sup>。后来,欧洲环境署(EEA)继续提

出了“驱动力—压力—状态—影响—响应”（DPSIR）模型作为对上述两种模型的扩展补充<sup>[29]</sup>。此外，学者们还不断尝试从多角度、多方面、多维度构建生态安全评价指标体系，比如 Glinskiy<sup>[30]</sup>等构建了综合经济、生态和人口三方面的合理评价指标体系，探寻影响研究区域生态安全水平的显著因素。

国内学者在构建评价指标体系方面，主要有以下两种方式：一是采用 PSR 及其扩展的概念模型构建评价指标体系，比如谢玲<sup>[31]</sup>等基于“压力（P）—状态（S）—响应（R）”概念模型，构建了我国广西壮族自治区土地生态安全评价指标体系；侯磊<sup>[32]</sup>在“驱动力（D）—压力（P）—状态（S）—影响（I）—响应（R）”模型框架下构建云南省湖泊生态安全评价指标体系，研究生态安全变化趋势与驱动机制。二是采用了结合自然、经济和社会三个角度的 EES 模型构建评价指标体系，如叶辉<sup>[33]</sup>等将 DPSIR 模型与 EES 模型相结合对北回归线（云南段）区域生态安全评价进行指标构建。国内研究对评价指标体系的选取能在一定程度上客观反映研究区域的现实状况，但是不同的研究区域存在的生态安全问题具有区域异质性，因此指标的选取与指标体系构建要从研究领域实际情况出发，才能更好地反映研究区生态实际状况。

#### 1.2.4 生态安全的评价方法

随着生态安全内涵和研究对象的丰富，国内外学者从不同角度提出了定性和定量评价方法。主要包括数学模型指数和空间技术结合的动态评价方法。数学模型法是指运用具体的评估模式和方法，用综合评价指数替代评价对象的数量特征，并以此判定评价对象的类型或排名。其主要包括模糊综合评价法、模糊物元分析法、灰色关联度模型和生态足迹法等多种研究方法。如王慧杰<sup>[34]</sup>等将层次分析（AHP）和模糊综合评价法有机结合，实现定性和定量评价相统一，对所研究区域的生态安全补偿政策进行评价分析。Mingli Bi<sup>[35]</sup>采用生态足迹法，从生态健康和生态风险两个方面评估了 2000-2015 年粤港澳大湾区的生态安全状况。其次，近年随着 3S 空间技术的发展，空间计量模型被广泛应用于生态安全评估研究中，结合运用地理信息系统、遥感数据和 GIS 技术，通过空间异质性分析生态安全空间格局变化，全面分析生态安全所涉及的多种问题。如张广创<sup>[36]</sup>等以锡尔河中游为研究区域，结合遥感数据和地理系统技术，系统准确地评估了锡尔河

中游生态敏感性及其空间分布特征。可以发现, 研究学者针对生态安全评价常用的方法包括空间计量法、生态承载力分析法和综合指数评价方法等。

### 1.2.5 研究述评

通过对生态安全相关内容的研究现状和发展趋势的分析, 发现国内外学者在生态安全的评价对象、指标构建、评价方法、驱动机制和障碍因素等方面取得了丰富的研究成果, 但仍存在一些问题需要深刻反思和积极解决。

首先, 进一步提升生态安全内涵。在生态安全研究方面, 学者们开展的相关研究工作主要集中在生物资源、自然景观、地理区域等自然科学领域, 关于经济、社会、人文等方面的研究较少, 且缺乏对生态环境、社会经济和自然资源等多方面的协同机制的关注。同时, 目前我国关于生态安全的研究区域主要针对长江流域、珠江流域及一些小河流等, 而对黄河流域的研究尚不充分。本研究以黄河水文线包围的九个省区作为研究区域, 评估黄河流域沿线各省域生态安全水平, 分析黄河流域生态安全水平的时空格局特征, 探寻区域生态安全水平差异成因、作用机理及地区生态安全提升的限制因素。

其次, 从流域地理学的角度对黄河流域生态安全的研究不充分。现有研究大多从黄河流域行政区划, 如省、市级区域来分析高质量和生态保护的耦合协调发展, 而黄河流域作为当前热点地区, 在学术界和政策管理等方面都非常重要。然而当前研究少有针对黄河流域上、中、下游之间的空间差异性展开。本研究对黄河流域开展多元化、多维度的生态安全评价研究, 丰富了生态安全理论和实践的研究内容, 为流域高质量发展提供新的指引方向。

## 1.3 研究内容与方法

### 1.3.1 研究内容

本研究以黄河流域沿线九省为研究区域, 紧扣生态安全本质, 以“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)概念模型为理论基础, 构建生态安全评价指标体系, 并引用TOPSIS模糊物元评价模型、耦合协调度模型、障碍因子诊断等方法, 定性和定量综合评价了黄河流域沿线省域生态安全水平的动态发展规律

和空间分布特点,诊断制约黄河流域生态安全水平提升的关键障碍因子,研究内容主要包括:

(1) 生态安全的基本理论和概念。运用文献综述和文献分析法,梳理国内外学者对生态安全的理论概念、研究对象、指标构建、评价方法等,提出黄河流域沿线九个省区生态安全评价方法、评价模型和评价机制,分析生态安全与社会经济系统、资源环境等的相互作用关系,探寻制约黄河流域生态安全水平提升的障碍因素。

(2) 构建黄河流域生态安全评价指标体系。在可持续发展和生态安全理论的指引下,该系统考虑到黄河流域九省区的地理位置、自然环境和社会经济状况,并以指标构建的可操作性、科学性和系统性原则,基于“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)模型构建了黄河流域沿线省区生态安全评价指标体系。

(3) 评价分析黄河流域生态安全水平。基于黄河流域沿线九省区 2010-2019 年评价指标数据,运用熵权法和 TOPSIS 模糊物元评价模型对黄河流域近年生态安全水平进行分析评价,揭示黄河流域各省区生态安全水平在时间序列和空间演化的特征,为改善流域质量,制定合理的黄河流域高质量发展政策提供决策依据。

(4) 研究沿黄河流域省区生态安全系统的耦合协调性。在对生态安全评估的基础上,进一步引入耦合度模型和耦合协调模型对系统间的协调关系进行深入研究,测度分析 2010-2019 年黄河流域各省区生态安全整体系统和“驱动力—压力—状态—影响—响应”两两子系统间的耦合协调水平,分别从时间序列变化和空间分异特征方面对其展开系统全面地分析。深入探究黄河流域沿线省区生态安全子系统之间的相互作用机制。

(5) 诊断分析黄河流域沿线省区生态安全保障因素。在黄河流域生态安全评价和耦合协调性分析的基础之上,进一步运用障碍度函数模型诊断分析制约各区域生态安全水平提升的主要影响因素,并有针对性地提出改善流域生态安全的对策,以有效提高流域各省区生态安全水平。

(6) 提升黄河流域生态安全水平的对策建议。综合黄河流域自然现状、生态安全水平、系统耦合协调性及关键性障碍因素,进一步为优化区域发展战略,提升黄河流域生态安全水平提出有效的管控举措。

### 1.3.2 研究方法

生态安全评价具有系统性和综合性,其涉及多种学科的交叉,如生态统计学、计量经济学、数学模型等。本研究综合考虑黄河流域地理位置、自然环境、社会经济等实际现状,以影响流域生态安全水平提升的复杂多要素问题为出发点,并通过文献综述分析、定性与定量研究相结合、时间序列与空间格局相结合的研究方法。主要采用以下方法:

(1) 文献归纳分析法。本研究基于国内外研究人员对黄河流域生态安全和环境保护研究的理论分析和文献归纳,获得一定的理论支撑;查阅黄河流域沿线省区统计年鉴、中国统计年鉴、黄河流域生态统计公报、黄河流域各省区政府年度工作报告及相关网站公报,为研究内容获得可靠数据支撑。

(2) TOPSIS 模糊物元评价法。在构建生态安全评价指标体系的基础上,利用模糊法解决指标间不相容的问题和 TOPSIS 充分利用原始数据的优点,提出 TOPSIS 模糊物元法测算黄河流域沿线各省域生态安全水平,从而可以客观、有效的评估流域生态安全状况。

(3) 耦合协调度模型。引用物理学中的耦合度和耦合协调模型,系统全面分析黄河流域各省区 2010-2019 年间“驱动力—压力—状态—影响—响应”系统耦合度、协调度的时间序列变化和空间分异特征,研究了黄河流域各省生态子系统的相互作用机制。

(4) 障碍度函数模型。采用障碍函数模型,对黄河流域沿线省区生态安全的主要障碍因素进行定量诊断。依据障碍度数值大小判断障碍程度大小,探究实际影响流域生态安全水平提升的制约因素,有针对性地提出流域各省改善生态环境质量的对策。

## 1.4 创新点与技术路线

### 1.4.1 创新点

本文基于已有的研究基础,对高质量发展背景下黄河流域生态安全进行了以下可能的创新:

(1) 提出了一种基于模糊物元和逼近理想解法相结合的评估模型。逼近理想解排序法 (TOPSIS) 通过相对贴近度反映多个样本的优劣性, 它可以很好地利用原始数据, 模糊物元法以解决不相容问题为核心内容, 适用于多因素综合评价, 这种方法的优点是它可以在不损失的情况下整合各种因素的所有信息。因此将两者结合, 使得不同标准层下的 TOPSIS 贴近度具有较为明显的差别, 且根据客观标准确定经典域和节域, 使最终评价结果具有客观性和科学性, 从而对研究区域生态安全水平进行有效准确的评估。

(2) 为了研究黄河流域生态安全子系统间的动态耦合关系, 通过引入耦合度和耦合协调模型, 从时间序列和空间分布等方面对黄河流域整体系统及两两子系统间的耦合协调性做出全面系统的评估, 从而客观分析黄河流域生态安全系统间作用机理, 为解决黄河流域各地区发展不协调不充分等问题提供强劲的科学理论支撑。

(3) 由于黄河流域不同区域间气候差异显著, 地形地貌不同及自然资源差异大, 除了这种先天的差异因素外, 各地区后期不同的经济发展模式又加大了地区间资源环境的差异性影响, 为了进一步探究制约黄河流域不同区域生态安全水平的关键因素, 本文引入障碍度函数模型, 对影响黄河流域整体和各省份生态安全提升的主要影响因素进行定量诊断。有针对性地提出改善流域生态安全的主要举措, 最终实现流域生态健康、协调和可持续发展。

#### 1.4.2 技术路线

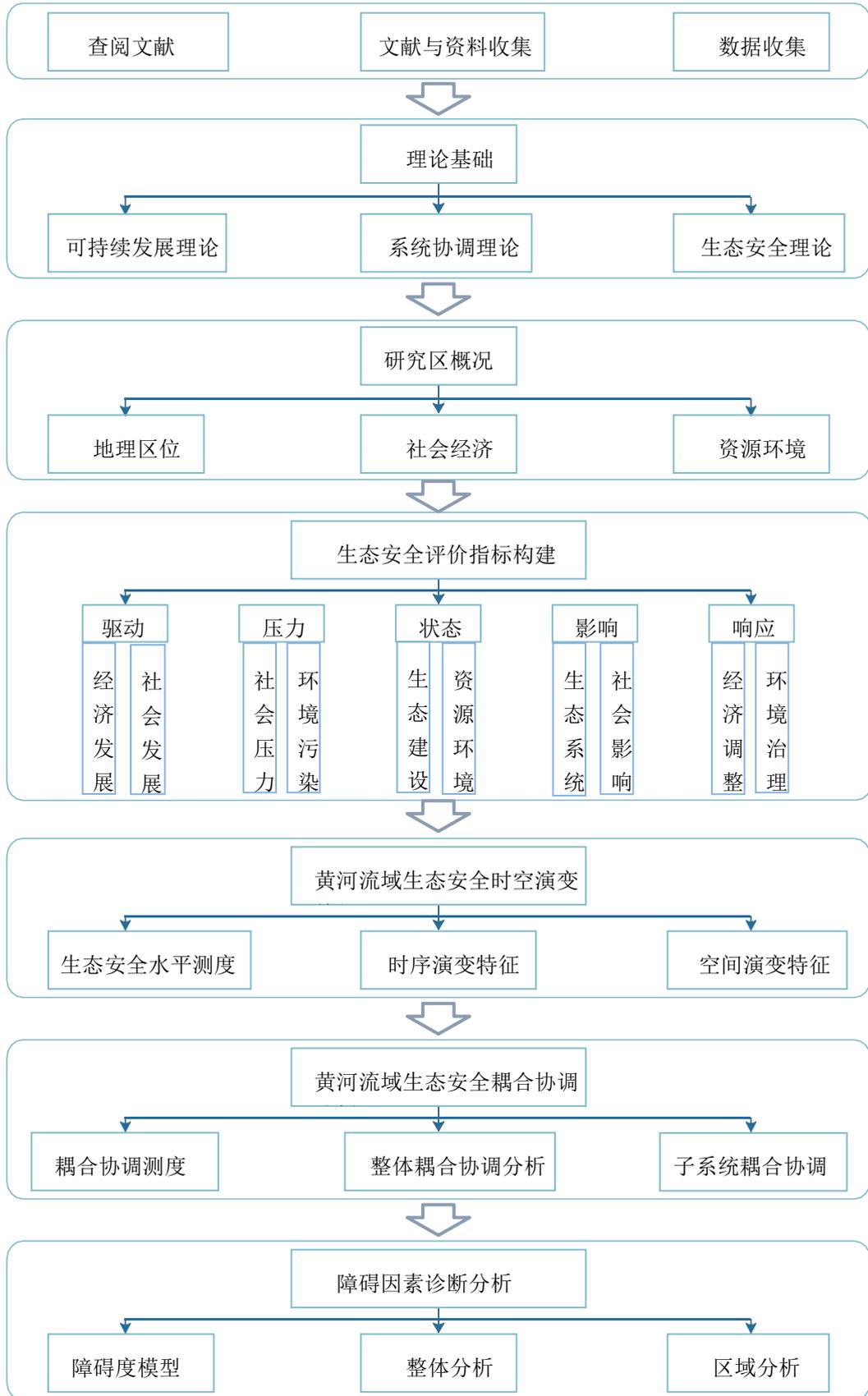


图 1.1 技术路线图

## 2 理论基础与区域概况

### 2.1 研究的理论基础

#### 2.1.1 可持续发展理论

可持续发展思想有着深刻的理论基础和实践意义，其在 1980 年《世界自然保护大纲》中被系统科学地进行阐述，并由此作为一个科学术语运用，大纲中指出，可持续发展关系社会发展、生态发展、经济发展以及自然生物发展等<sup>[37]</sup>。此次概念的提出，使世界各国对可持续发展的关注度和支持度持续上升，生态安全作为生态良好发展的重要考核指标，也逐渐成为可持续发展的要求之一。区域生态安全可持续发展是指“在刺激经济发展，改进人类生活质量，强调发展可持续性的前提下，生态系统不能超过其支持经济社会发展的承载能力<sup>[38]</sup>”。本研究采用的可持续发展理论包括两个方面：一方面是经济可持续性，另一方面是环境可持续性。即可持续发展是经济社会发展在环境承载阈值范围内不超越环境，使两者协调发展<sup>[39]</sup>。

#### 2.1.2 系统协调理论

系统协调理论强调事物之间作为一个整体的联系。在对某一特定对象的研究中，将研究对象的所有方面作为一个完整的链条进行研究，从整体角度研究所研究对象各方面和组成研究对象各要素的相互关系，继而能对其进行全面充分分析<sup>[40]</sup>。系统协调的主要思想是通过进一步认识每个子系统之间的联系和作用，以某种方式对系统进行组织和调控，以保持从无序到有序的动态平衡过程，进而改善系统的整体功能<sup>[41]</sup>。本研究的研究对象主要是生态安全，生态安全是一个由社会、经济、自然等多个子系统组成的具有一定目标的多元系统，在这一系统内部各个子系统间存在相互促进和彼此制约的协调关系，形成一种动态平衡关系。系统协调包括内部协调、外部协调及纵向协调等内容。

### 2.1.3 生态安全理论

随着自然资源的不断开发利用和生态环境的复杂变化,对生态系统安全性研究显得更加重要。从生态系统视角来看,所谓生态安全即维护生态系统自身的正常功能,并其可以自我修复,从而保障生态系统的稳定性和完整性<sup>[42]</sup>;从人类利用自然资源及人类生存的角度分析,生态安全是指能够为人类提供生活和生产的物质需求支撑,它能够维持整个区域基本物质生产和交换<sup>[43]</sup>;从国家和地区发展的角度看,生态安全具有相对性和发展性,主要涉及国家利益安全<sup>[44]</sup>。生态安全作为一个综合了区域社会经济、自然环境等相互作用的复合系统,因此能够系统地认识人与自然之间的关系、促进社会和经济可持续发展的关键在于有效维护区域生态环境安全的能力。

## 2.2 研究区域概况

### 2.2.1 地理区位状况

黄河是我国仅次于长江的第二长河,也是世界第六长河,发源于青海省巴颜喀拉山,于山东省注入渤海。其横跨四个地貌单元,包括青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原,共流经全国九大省份,包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东。黄河流域气候年际变化较大,从西到东,从北到南,温度由冷变暖。流域内降水分布集中且不均匀,主要集中在每年 5-9 月份,多年年均降水量区间为 200mm 至 1000mm,大多数地区主要分布范围为 200mm 至 650mm,甘肃、宁夏和内蒙古的中西部地区蒸发量较大,曾最高达 2500 mm。流域内汾河平原、河套灌区和下游黄河引水灌区是中国农产品产区,同时黄河流域的煤炭、石油及天然气资源丰富,是中国能源和化工产业的重要聚集区。



图 2.1 黄河流域沿线省区位置分布图

## 2.2.2 社会经济概况

### 2.2.2.1 人口总体情况

黄河流域人口自然增长率存地区差异明显。在流域沿线省份中，2010-2019年四川省和陕西省的人口自然增长率有所提升，其余省份人口自然增长率变化趋势逐步减缓，宁夏回族自治区和青海省的人口自然增长率数值最大，但上升势头也有较大幅度放缓；四川省的人口自然增长率数值最小，10年来变化幅度较小，而山东省的人口自然增长率出现了明显波动。黄河流域的人口数量分布东西部地区差异显著。黄河流域内九省份 2019 年底常住人口 4.42 亿，占全国总人口的 31.58%，常住人口密度为 118.2 人/平方公里。山东省常住人口达到 10071 万人，占九省域常住人口之最。其上游地区有 12324.91 万人，流域下游地区人口数量达到 19710.21 万人，中游地区 10145.03 万人。

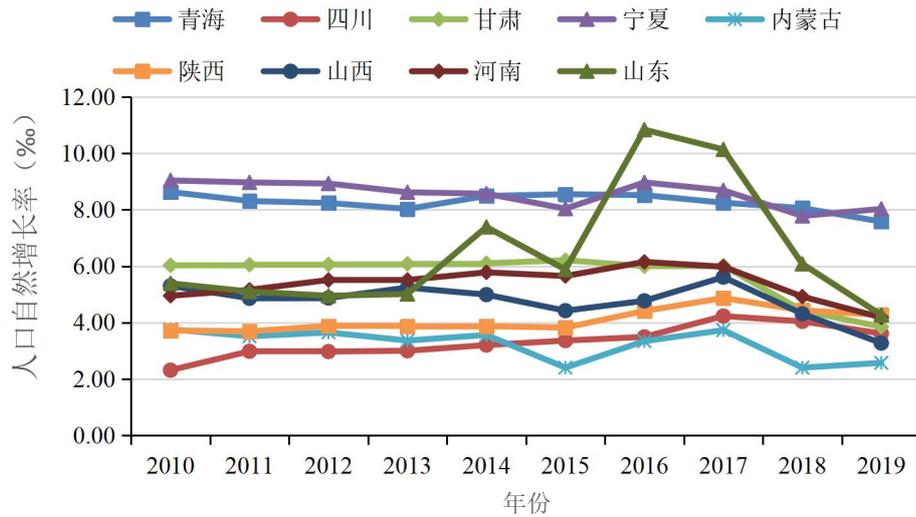


图 2.2 2010-2019 年黄河流域沿线省区人口自然增长率变化情况

### 2.2.2.2 城市化进程

城市化进程在一定程度上代表了社会经济发展趋势和人民生活水平高低。2019 年黄河流域省区城镇化率为 57.2%，相较全国水平 60.6% 低三个百分点，其中除内蒙古自治区和山东省常住人口城镇化水平超过全国平均城镇化水平，其余省份城镇化水平均较低，因此总体来看九省区域城镇化水平具有不均衡现象。由图 3.3 可知，黄河流域各省区的城镇化率从 2010—2019 年间呈稳步增长趋势，其中内蒙古自治区城镇化水平始终保持领先，从 2010 年的 55.5% 上升至 2019 年的 63.3%；甘肃省城镇化率最低，从 2010 年的 36.1% 上升至 2019 年的 48.5%，河南省是黄河流域各省区中城镇化进程发展最快的省份，十年间城镇化水平增长了 27.6%，其次是甘肃省，城镇化水平增长了 25.6%。

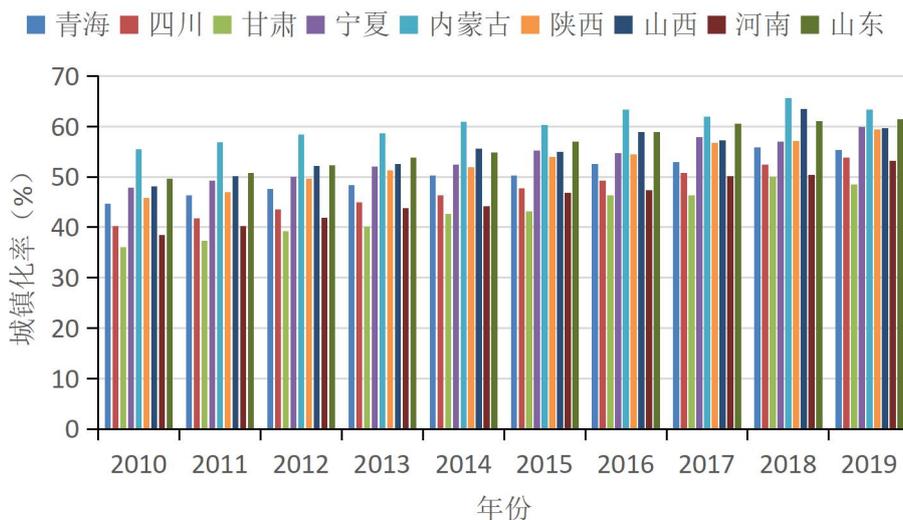


图 2.3 2010-2019 年黄河流域沿线省区城镇化水平

### 2.2.2.3 经济发展水平

黄河流域各省区间经济发展不平衡不协调，区域异质性显著。2010-2019 年黄河流域各省区人均 GDP 增长率排名由高到低依次为陕西、四川、宁夏、河南、青海、甘肃、山西、山东，其中只有内蒙古、山东两省区人均增长率水平在 100% 以下。下游河南、山东省社会经济发展水平具有领先优势，山东省人均 GDP 水平居首，河南省人均 GDP 增长速率较快。上游区域的甘肃省城镇化水平低、经济发展趋势缓慢，中游区域的内蒙古、陕西人均经济水平居于前列。根据黄河不同河段的省区分布，可以看出沿黄河九省区社会经济发展水平差异性较大，中下游地区社会经济发展较快较好，这与各省区地理位置和产业发展有关。

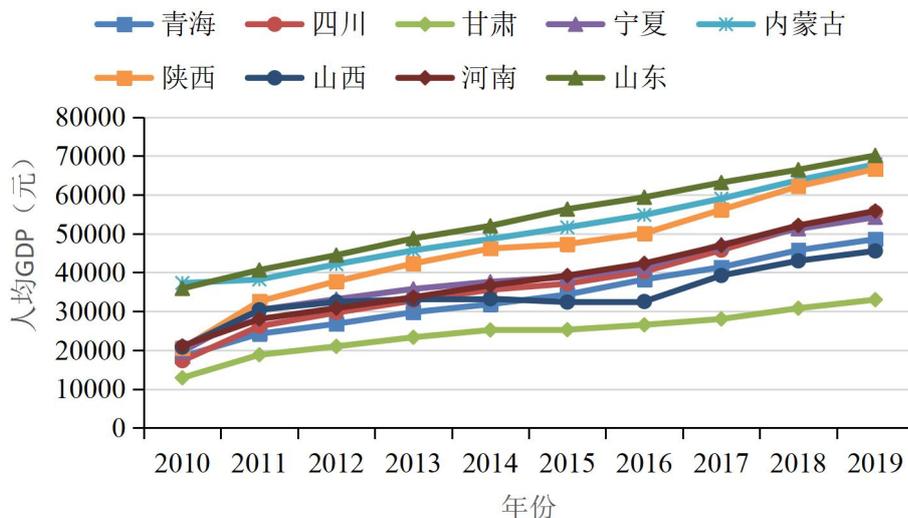


图 2.4 2010-2019 年黄河流域沿线省区人均 GDP 变化情况

### 2.2.2.4 产业结构与工业化发展

黄河流域工业化进程速度比较缓慢，产业层次比较低，且工业化发展仍面临着结构失调的现状，因此流域产业发展仍具有较鲜明的重工业特色，如图 3.5 所示。黄河流域第一产业所占比重和增长速度相对较小，产业发展重心发生了改变，虽然第二产业在 GDP 构成中处于绝对领先地位，但其增长速度逐渐放缓，第三产业已作为拉动经济增长的主要动力，一直保持较快增长态势。截止 2019 年底，黄河流域第一产业增加值 20870.21 亿元，第二产业增加值 101141.63 亿元，第三产业增加值 125395.78 亿元，其中除陕西省外的各省份产业结构发展均由呈现以第二产业为主逐渐向第三产业发展的模式，处于中下游地区的河南、山东第三产业优势较明显，中游地区陕西、山西发展状况稳定向好，下游地区第三产业经济发展实力悬殊。工业对黄河流域整体经济快速发展有重要影响，流域内内蒙古、山西、河南、山东均为全国工业大省，工业产值相对较高，山东省占据了工业增加值最大比例，其增速逐步下降。其中在第一产业经济贡献率中，农业占比较大，则表示第一产业以农为主，但其比重数值变动不大；在第二产业贡献率中，工业比重一直维持在 80% 以上，山东省在工业增加值方面优势最大；在第三产业贡献率中，四川省平均增长率最高，为 45.45%，内蒙古自治区最低，为 24.36%，但仍远高于第一、第二产业贡献率。

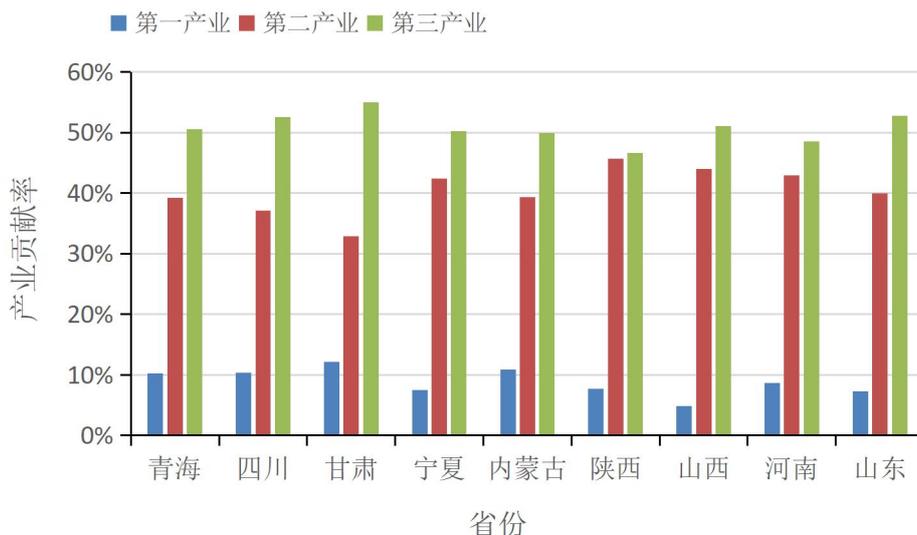


图 2.5 2019 年黄河流域沿线省区产业结构情况

### 2.2.3 资源环境概况

黄河流域自然资本存量较大，资源种类多，但地区间生态环境状况存在较大差异，自然环境承载能力同样也存在着地区间的不均衡。

#### 2.2.3.1 水资源状况

作为中国人口主要集中区和农业生产大区，黄河流域的水资源承担着我国北方最大水资源供水任务，而水资源在时间和空间上的分布不均一直是影响黄河流域生产和生活的主要问题。从时间分布来看，由于季风气候的影响，黄河地表径流主要集中在7—10月，从空间分布来看，由于地理条件不同黄河水资源空间分布极其不均匀。黄河流域位于我国干旱半干旱地区，其年平均径流量为574亿立方米，是中国北方地区主要供水来源，其年平均径流量约为我国河流径流总量的2%，相当于长江径流量的6%，流域水资源短缺且水资源开采利用强度高，使用粗放，其开发利用率已达生态警戒线40%的两倍，这些因素都将严重影响黄河流域水资源供求情况。从图3.6看出，2010-2019年间，黄河流域沿线各省区中，宁夏、河南、山东、山西人均水资源量远不及全国人均水资源量水平，均已出现慢性水资源短缺的情况。陕西、甘肃已出现水资源压力，内蒙古人均水资源量值在压力临界值附近浮动，只有青海和四川未面临水资源压力，且青海省水资源量最充足。

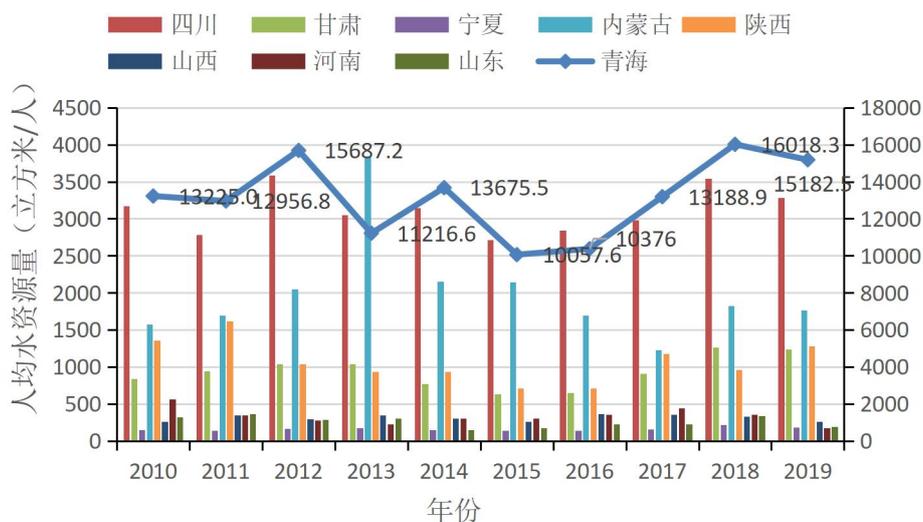


图 2.6 2010-2019 年黄河流域沿线省区人均水资源量状况

### 2.2.3.2 森林资源状况

2019 年全国的森林覆盖率为 23%，其中黄河流域九省森林总面积占全国森林面积的 30.3%，约为 7327.3 万公顷。黄河流域的森林覆盖率可分为三个不同层次：其中将森林覆盖率面积超过全国平均水平的省份划分为第一层次，分别是四川、陕西和河南省，森林覆盖率分别为 43.1%、38%和 24.1%；内蒙古、山西省、山东森林覆盖率分别为 22.1%、20.5%、17.5%，均处于第二层次；第三层次包括宁夏、甘肃和青海，森林覆盖率分别为 15.2%、11.3%、5.8%（见图 3.7）。

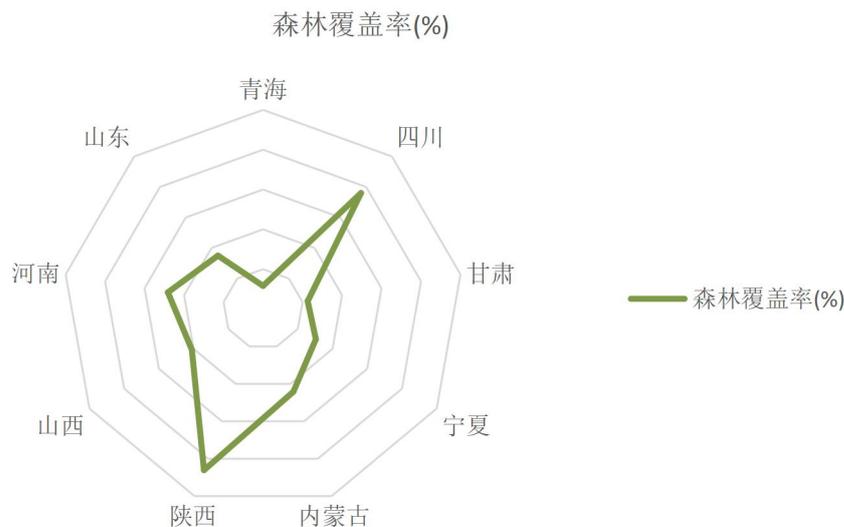


图 2.7 2019 年黄河流域各省区森林覆盖率区情况

### 2.2.3.3 水土流失状况

水土流失是黄河流域长期存在的一个影响生态安全的问题。水土流失面积比例大，分布广，虽然近年随着人们环境保护意识的提高和相关环保工作的持续推进，黄河流域水土流失治理面积不断加大，流域治理状况不断改善。2019 年黄河流域水土流失总面积为 26.42 万平方公里，占全国水土流失总面积的 9.75%，与 2018 年相比，黄河流域中度及以上水土流失面积下降 7.37%。黄河流域水土流失主要集中分布在黄土高原地区，其水土流失面积 23.57 万平方公里，占黄河流域水土流失总面积的 89.21%。黄河流域水土流失量大面广，生态环境脆弱、生态屏障功能薄弱，治理难度大的状况尚未得到根本改变，但持续向好的方向发展。

## 3 黄河流域生态安全评价分析

### 3.1 评价模型构建

#### 3.1.1 评价指标构建原则

生态安全评价体系是一个涉及多领域多角度多层次的复杂系统,科学构建评价指标是合理评价生态安全水平的前提。为了能够全面、系统、准确地评价研究区域生态安全实际水平,则首先要构建科学、合理的生态安全评价指标体系。考虑到生态系统的系统性和复杂性等特点,在选取评价指标时,应当遵循科学、独立、可行性等原则,有针对性地构建区域生态安全评价指标体系。

##### (1) 可获得性和科学性

黄河流域生态安全系统是一个在内容和区域层面上都具有系统复合性,指标体系构建应以数据的科学性和可获得性为基础,一方面要准确全面的涵盖生态安全内容,另一方面要充分代表黄河流域不同区域生态安全实际状况,有效衡量和真实反映生态安全系统结构内容和功能现状。

##### (2) 系统性和代表性

黄河流域生态安全系统研究是一个包含社会、经济、自然等多个子系统的复合生态系统,其中各子系统间相互作用,因此所构建的指标体系必须具有系统性。其次指标构建还应具有代表性,其必须依据黄河流域沿线各省域实际状况选择具有充分代表性的评价指标,使研究结果更符合实际。

##### (3) 可比性与动态性原则

在选取黄河流域生态安全评价指标时,所选指标数据可用于不同时间、不同空间的动态对比分析,以能够恰当地体现生态安全状况不断变化的时代特征和空间差异,且指标能够客观反映所选研究对象的真实情况。

#### 3.1.2 生态安全评价指标体系构建

本文在学习已有生态安全研究内容的基础上,以黄河流域高质量发展为背景,结合黄河流域各省的实际现状,基于“驱动力—压力—状态—影响—响应”

(DPSIR) 模型构建了黄河流域生态安全评价指标体系, 对相关指标进行科学合理地进行计算。基于 DPSIR 模型的黄河流域生态安全评价指标体系框架图如图 3.1 所示。

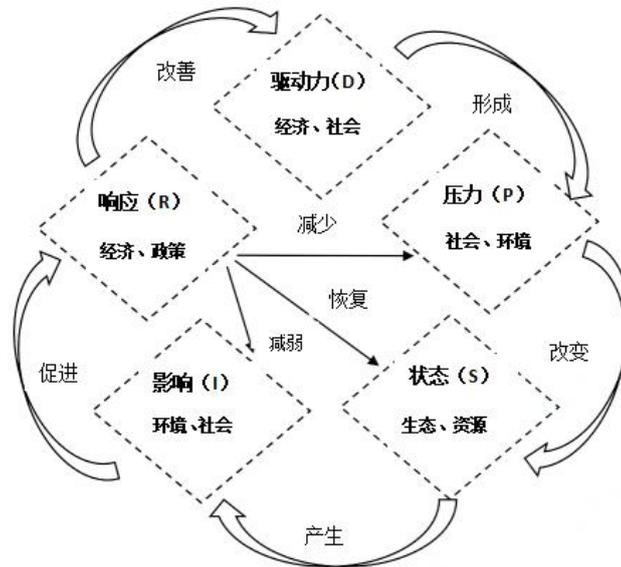


图 3.1 DPSIR 模型框架图

### (1) 驱动力 (D)

驱动力是改善资源和环境状况的动力, 同时也反映人口和社会经济特征。主要体现为区域经济社会的良好发展。有力的经济发展能促使地区政府在保护和改善生态环境方面投入更多物质资源, 同时, 经济发展能够加快产业结构优化, 从而在一定程度上缓解社会经济发展带来的压力<sup>[46]</sup>。在驱动力子系统下选择指标为人均 GDP、第三产业增加值、人均可支配收入、城镇化率。

### (2) 压力 (P)

压力反映人类生产生活过程中威胁到自然生态环境, 抑制其健康发展的各种因素, 主要包括对资源环境的索取和对生态环境造成的压力<sup>[47]</sup>。其是驱动力指标的表现形式, 作用于驱动力之后, 同时也是促使环境状态变化的因素。在压力子系统下选择指标为人口自然增长率、森林火灾受灾面积、农用塑料薄膜使用量、废水排放量。

### (3) 状态 (S)

状态反映了压力子系统作用下生态环境的现实状况和发展趋势,其从多方面展现生态环境的承载力和生态水平<sup>[48]</sup>。选择的指标是森林覆盖率、道路清扫保洁面积、人均水资源量、人均公园绿地面积为状态子系统指标。

#### (4) 影响 (I)

影响反映了社会经济发展和环境压力指数变化而引起对生态环境状态的影响,是状态变化的结果,影响指标的指数也代表了当前的生态水平,可以反映生态水平测度指数<sup>[49]</sup>。影响结果指数在一定程度上促使人们对生态环境的反思和采取行动保护生态环境。在影响子系统下选择的指标为生态环境用水比率、农林牧渔业产值比率、旅游收入、环境保护支出。

#### (5) 响应 (R)

响应是指面对生态环境所面临的压力和当前所处状态,为了减弱生态环境恶化对人类健康生存发展的影响,人类所采取各种积极政策和措施去改善生态环境<sup>[50]</sup>。不同的响应措施能带来不同的效果。本研究选择环保投资额比率、建成区绿化覆盖率、水土流失治理率、生活垃圾无害化处理率为响应子系统指标。

基于 DPSIR 模型构建黄河流域生态安全评价指标体系,分别从目标层、标准层、因素层及指标层四个方面构建 20 个指标(见表 3.1)。

表 3.1 黄河流域各省区生态安全评价指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层	序号	性质	权重
黄 河 流 域 生 态 安 全 综 合 指 数	驱动力 D	经济发展	人均 GDP	D1	正	0.0446
			第三产业增加值	D2	正	0.0684
			人均可支配收入	D3	正	0.0447
		社会发展	城镇化率	D4	正	0.0591
	压力 P	社会压力	人口自然增长率	P1	负	0.0494
			森林火灾受灾面积	P2	负	0.0385
			农用塑料薄膜使用量	P3	负	0.0375
			环境污染	废水排放量	P4	负
	状态 S	生态建设	森林覆盖率	S1	正	0.0492
			道路清扫保洁面积	S2	正	0.0517
人均水资源量			S3	正	0.0665	
资源环境			人均公园绿地面积	S4	正	0.0631

续表 3.1

目标层	准则层	因素层	指标层	序号	性质	权重
			生态环境用水比率	I1	正	0.0497
	影响 I	生态环境	农林牧渔业产值比	I2	正	0.0371
			率			
			旅游收入	I3	正	0.0668
		社会影响	环境保护支出	I4	正	0.0452
			环保投资额比率	R1	正	0.0447
	响应 R	经济调控	建成区绿化覆盖率	R2	正	0.0481
			水土流失治理率	R3	正	0.0491
		环境治理	生活垃圾无害化处	R4	正	0.0360
			理率			

### 3.1.3 指标数据标准化及权重确定

科学合理判断和计算评价指标权重,对研究目标量化结果的准确性和可靠性起着重要作用。熵权法是利用各指标所提供的信息量大小来确定指标权重,可以有效地避免人为因素的干扰。步骤如下<sup>[51]</sup>:

(1) 标准化处理。根据初始数据构建矩阵  $Q = (q_{ij})_{m \times s}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, s$ )。

标准化处理方法如下:

越大越优型:

$$r_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_{ij})_{\min}}{(q_{ij})_{\max} - (q_{ij})_{\min}} \quad (3.1)$$

越小越优型:

$$r_{ij} = \frac{(q_{ij})_{\max} - q_{ij}}{(q_{ij})_{\max} - (q_{ij})_{\min}} \quad (3.2)$$

其中  $(q_{ij})_{\max}$ 、 $(q_{ij})_{\min}$  分别为同一指标不同样本量值  $q_{ij}$  中的最大值和最小值。

(2) 熵值。计算第  $i$  项指标的第  $j$  个样本在总样本中的比重  $f_{ij}$ , 进而获取第  $i$  项指标的熵值  $H_i$ :

$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{j=1}^s (1 + r_{ij})} \quad (3.3)$$

$$H_i = -\frac{\sum_{j=1}^s f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln s} \quad (3.4)$$

(3) 熵权。结合熵值，计算各指标的熵权  $W = (\omega_i)_{1 \times m}$ ：

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_j)} \quad (3.5)$$

其中  $\omega_i$  为第  $i$  项指标的权重  $0 \leq \omega_i \leq 1$ ， $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ 。

### 3.1.4 综合评价模型及分级标准

#### 3.1.4.1 TOPSIS 模糊物元

逼近理想解排序法通过相对贴近度体现出各个样本的优劣性，其可以很好地利用原始数据<sup>[52]</sup>，物元模型能有效处理各单项指标之间不相容的问题，因此将两者结合，使得不同标准层下的 TOPSIS 贴近度存在比较明显的差别，因此能够对不同子系统下的生态安全水平进行有效、准确的评估。其步骤如下：

1) 构建复合模糊物元。如果事物  $M$  有  $n$  个特征向量  $C_1, C_2, \dots, C_n$ ，和其相应的模糊量值  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，则称  $R_n$  为  $n$  维模糊物元。 $m$  个事物的  $n$  维物元组合则构成复合物元，记为  $R_{mn}$ 。如果把  $R_{mn}$  的量值改为模糊量值，则称为复合模糊物元，用  $\hat{R}_{mn}$  表示<sup>[53]</sup>。相应的矩阵表示为：

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{m1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\hat{R}_{mn} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{21} & \cdots & V_{m1} \\ V_{12} & V_{22} & \cdots & V_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{1n} & V_{2n} & \cdots & V_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

其中  $R_{mn}$  表示  $m$  个事物的  $n$  维复合物元； $\hat{R}_{mn}$  表示  $m$  个事物的  $n$  维复合模糊物元；

$M_i$  表示第  $i$  个事物；  $X_{ij}$  表示第  $i$  个事物的第  $j$  项特征量值；  $v_{ij}$  表示第  $i$  个事物的第  $j$  项特征模糊量值，  $i=1,2,\dots,m$ ；  $j=1,2,\dots,n$  [54]。

(2) 确定从优隶属度。从优隶属度是指各项评价指标对应的模糊量值，从属于标准方案中相应模糊量值的隶属程度，根据从优隶属度确定的原则叫做从优隶属度原则[55]。由  $R_{mn}$  变成  $\hat{R}_{mn}$ ，此处根据从优隶属度原则来确定从优隶属度，计算公式如下：

正向指标：

$$v_{ij} = (X_{ij} - \min_i \{X_{ij}\}) / (\max_i \{X_{ij}\} - \min_i \{X_{ij}\}) \quad (3.8)$$

逆向指标：

$$v_{ij} = (\max_i \{X_{ij}\} - X_{ij}) / (\max_i \{X_{ij}\} - \min_i \{X_{ij}\}) \quad (3.9)$$

(3) 计算加权模糊物元矩阵。 $\hat{R}_{mn}$  乘以各项指标权重即可得到加权模糊物元矩阵[56]：

$$Z = (r_{ij})_{mn} = (W_j \cdot v_{ij})_{mn}, (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3.10)$$

(4) 确定正负理想解 [57]。正理想解  $Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, L, Z_n^+)$ ，负理想解  $Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, L, Z_n^-)$ ，其中  $Z_j^+ = \max\{Z_{1j}, Z_{2j}, L, Z_{mj}\}$  (3.11)

$$Z_j^- = \min\{Z_{1j}, Z_{2j}, L, Z_{mj}\} (j=1,2,\dots,n) \quad (3.12)$$

(5) 计算评价对象与正负理想解的欧氏距离。 $d_i^+$  越小， $d_i^-$  越大，则评价对象越优[58]。

正理想解：

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^+ - Z_{ij})^2} \quad (3.13)$$

负理想解：

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^- - Z_{ij})^2} \quad (3.14)$$

(6) 计算贴近度  $C_i$ 。评价对象与理想解的接近程度即为贴进度， $C_i$  越大，评价对象越接近理想解[59]。计算公式如下：

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (3.15)$$

### 3.1.4.2 生态安全等级划分

根据现有相关研究,生态安全水平可划分为5个级别<sup>[60]</sup>,分类标准如表3.2所示。

表 3.2 生态安全等级划分标准

ESI	生态安全等级	生态安全等级特征描述
< 0.25	危险V	生态系统结构紊乱,服务功能部分丧失,协调发展被严重阻碍
0.25~0.35	敏感IV	生态系统结构出现轻微失调,生态服务功能也开始下降,经济发展同时伴随着环境污染问题
0.35~0.5	临界安全 III	生态系统结构比较完善,生态服务功能基本正常,生态问题可保持在经济发展可承受范畴
0.5~0.75	良好II	生态系统结构较为完整,服务功能良好,经济发展与资源环境基本协调
>0.75	安全I	生态系统结构完善,服务功能较好,经济发展与资源环境协调较好

## 3.2 黄河流域生态安全评价结果分析

### 3.2.1 黄河流域生态安全时序演变分析

黄河流域流经九个省域,按行政区划可分为上、中、下游。上游包括青海、甘肃、宁夏和四川,中游包括内蒙古、陕西和山西,下游包括河南山东两省。在构建合理评价指标体系的基础上,通过熵权 TOPSIS 模糊物元模型计算得到沿黄河九省区生态安全综合指数,见表 3.3 所示。

表 3.3 2010-2019 年黄河流域省区生态安全水平综合贴进度

年份	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
2010	0.297	0.353	0.226	0.273	0.311	0.215	0.379	0.267	0.276
2011	0.314	0.329	0.245	0.265	0.314	0.310	0.339	0.266	0.296
2012	0.303	0.342	0.268	0.249	0.298	0.326	0.336	0.293	0.282
2013	0.320	0.378	0.231	0.290	0.330	0.323	0.359	0.300	0.296
2014	0.386	0.426	0.315	0.333	0.402	0.371	0.410	0.345	0.394

续表 3.3

年份	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
2015	0.465	0.523	0.418	0.464	0.458	0.501	0.430	0.465	0.473
2016	0.528	0.583	0.482	0.543	0.573	0.586	0.495	0.518	0.546
2017	0.558	0.589	0.520	0.565	0.608	0.614	0.512	0.573	0.590
2018	0.612	0.643	0.577	0.623	0.626	0.635	0.549	0.605	0.638
2019	0.633	0.678	0.590	0.668	0.659	0.670	0.569	0.636	0.651

### 3.2.1.1 黄河流域整体生态安全时序演变分析

根据表 3.3 和图 3.2 可知, 2010-2019 年沿黄河流域九省区生态环境不断改善, 各省区生态安全水平虽有波动, 但整体呈逐年上升态势, 生态安全发展经历了“小幅上升—快速上升—稳定上升”的三个过程, 安全贴近度指数由 2010 年 0.289 增长至 2019 年的 0.644, 安全等级由敏感阶段逐渐转变为良好阶段, 表明研究期间黄河流域生态系统趋于好转, 生态系统结构和功能不断改善和增强, 生态安全指数逐年上升。

**第一阶段: 2010-2013 年。**这一阶段黄河流域生态安全整体水平呈现小幅上升, 基本保持平稳态势。生态安全贴近度由 0.289 上升至 0.314, 增长了 8.6%, 安全等级处于敏感状态, 整体水平较低。改革开放以来, 随着我国社会经济迅速发展和人民生活品质的不断提高, 先污染后治理的观念根深蒂固, “井喷式”的城市化发展伴随着巨大的资源消耗, 严重的工业“三废”污染和沉重的人口压力导致资源环境高负荷。此外, 由于一些西部地区遭受严重自然灾害的破坏, 使得黄河流域整体生态退化趋势明显。自 2012 年中共十八大以来, 社会主义生态文明建设已被上升为国家战略高度。黄河沿线区域也被列入中国主要流域水污染防治和水土流失治理的国家规划中, 中央和地方政府进一步有针对性地加大生态建设和环境保护治理力度, 逐步提高沿黄河流域生态安全水平, 生态文明状况持续向好。

**第二阶段: 2014-2016 年。**这一阶段黄河流域生态安全整体水平分阶段持续增长, 增速大幅增加, 生态安全贴近度由 0.376 增长至 0.539, 增长率为 43.4%, 安全等级由敏感阶段逐渐转变为临界安全状态, 整体安全水平实现较为可观的发展态势。2016 年“十三五”规划开局之年, 黄河流域生态文明建设有了更

明确的方向, 各省区强化污染防治力度, 降低废水和废气排放总量, 增加环境污染防治投资力度等, 这一系列举措使得生态环境的保护得到了明显的可观发展趋势, 也为该流域经济发展和生态环境治理带来了新的机遇。

第三阶段: 2017-2019 年。这一阶段黄河流域整体生态安全水平呈稳定增长趋势, 生态安全贴近度由 0.570 上升至 0.644, 提升了 12.98%, 生态安全等级由临界安全状态转变为良好阶段。近年来, 黄河流域各省区生态安全状况不断改善, 与我国加大黄河流域生态保护, 推进流域高质量发展, 实现“五位一体”总布局等生态文明建设政策息息相关, 有力推动了社会经济发展和自然生态环境协同发展的良好局面, 在一定程度上改善了生态环境状况。

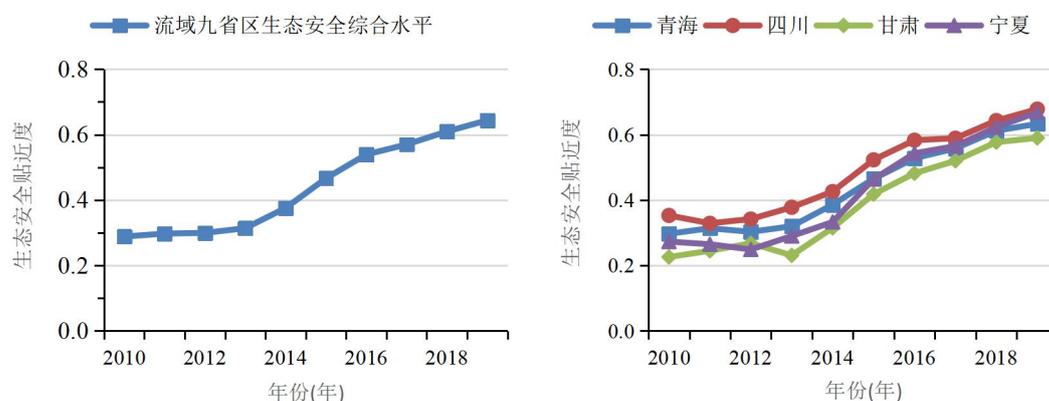
### 3.2.1.2 黄河流域区域生态安全时序演变分析

由于黄河流域横跨中国东部、中部和西部三大地区, 并根据流域地理位置分为上、中、下游, 因此不同区域的气候、地形地貌及自然资源差异存在明显先天性差异, 除此这些固有的差异外, 流域各区域后天不同的发展模式也加剧了资源和环境的异质性。为了更加明确黄河流域沿线各省区生态安全水平的动态变化和时间序列特征, 做了上、中、下游地区生态安全分布图(图 3.2)。上游地区来看, 青海、四川、甘肃、宁夏 4 省区在 2010-2019 年间生态安全水平总体呈现较集中提升趋势。其中甘肃省生态安全水平提升幅度最低, 安全等级由敏感阶段转变为临界安全阶段, 其他三省生态安全等级均经历了“敏感—临界安全—良好”三个阶段。四川省生态安全水平在研究期间处于上游区域最高水平, 生态安全形势总体较好, 这是由于四川省生态本底和自然资源的优势, 以及在进入 21 世纪后实施西部大开发政策, 四川省在经济发展过程中开始注重环境保护, 开发低碳经济, 节能减排, 调整产业结构, 使经济发展与生态环境趋于协调。甘肃省由于其本底生态脆弱, 自然资源匮乏, 流域内雨水量稀少, 植被覆盖率低, 经济发展相对滞后等原因导致生态安全的水平较低, 但随着近年来生态保护意识的觉醒, 加上国家大力推出的环境治理和环境保护措施, 该区域植被覆盖率和绿地面积持续增加, 工业废水排放和生活污染得到有效遏制, 空气质量、绿地环境以及水源净化等各项指标不断完善, 生态安全水平整体仍然向好的方向发展。

中游地区来看, 内蒙古、陕西、山西三省区 10 年间生态安全水平呈现较分散的增长趋势。其中山西省生态安全水平增长较慢, 从 2010 年 0.379 增长至 2019

年的 0.579，安全等级由敏感阶段转变为临界安全阶段，其余两省区生态安全等级均经历了“敏感—临界安全—良好”三个阶段。山西省生态环境改善趋势较缓慢是因为作为中国主要的煤炭生产基地，山西省拥有发达的煤炭开采加工产业，而煤炭开采的同时也对植被、水土治理和土壤安全构成很大威胁。为了解决山西省长期以来依靠资源消耗拉动经济增长的发展模式遗留下的问题，自“十二五”规划实施以来，山西省大力推进环境整治，不断增加造林面积、森林覆盖率等环保治理投资，在各方积极协调发展下，山西省生态环境逐渐得到改善，但生态安全水平仍低于其他各省。陕西省生态安全水平在中游地区呈现明显提升趋势，这是因为长期以来，陕西省在增加环境治理力度、减少工业污染排放量、大力发展循环经济等方面投入了大量资金和技术，这些强有力的措施不断提高陕西省生态安全整体耦合协调水平。内蒙古自治区与青海省的生态安全水平有相同变化趋势，这是由于青海省和内蒙古自治区地域辽阔，人口密度小，资源总量大，工业化水平低，区域资源消耗和污染排放强度相对较低，环境压力较低，生态安全水平比较具有优势。

下游地区来看，河南和山东两省 2010-2019 年间生态安全变化趋势显著，生态安全等级均由敏感阶段转变为良好阶段。研究之初，下游省区经济发展与生态环境的矛盾依然存在，生态安全的水平较低，然而作为黄河流域生态文明建设的主战场，山东省与河南省近年来不断完善政策机制，统筹协调生态环境与经济发展的关系，生态安全水平也逐渐展现出优势地位，2017 年以来黄河下游生态安全水平跃居向上，其更多是依托经济发展高水平，政府利用相对经济优势，按照“减量化、再利用、资源优化”的原则，加大环保投入和建设力度，加强环境治理，不断提高生态安全水平。



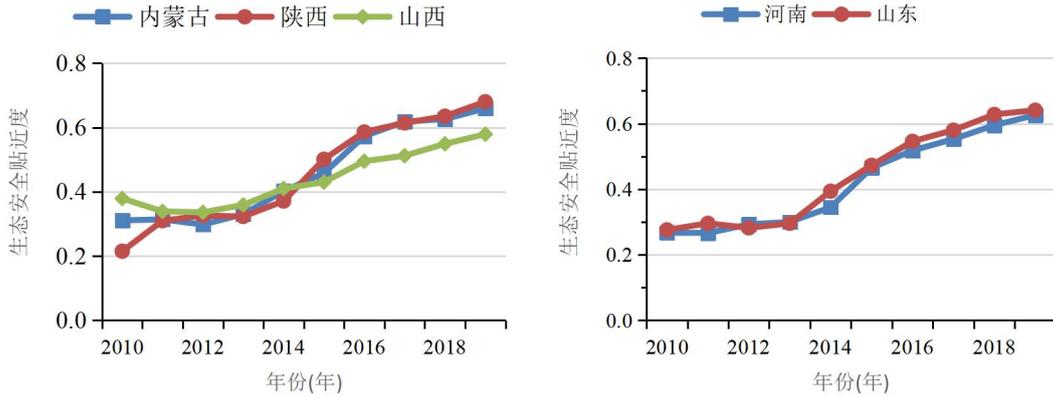


图 3.2 2010-2019 年沿黄河九省区生态安全时间变化趋势

### 3.2.2 黄河流域生态安全空间演变特征

空间格局演变分析可以有效直观地反映各省生态安全水平空间差异。选取 2010 年、2013 年、2016 年和 2019 年四个代表性年份，依据其生态安全贴近度值，分析黄河流域九省区生态安全在空间上的分布情况（图 3.3）。

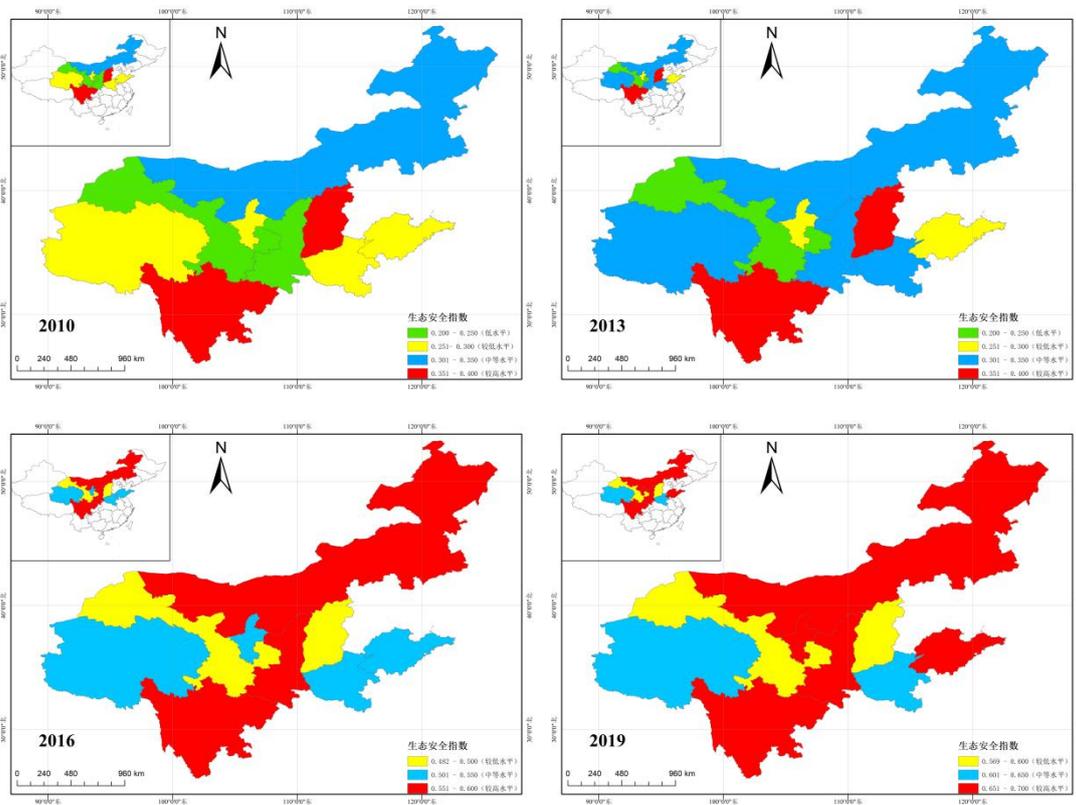


图 3.3 黄河流域沿岸各省生态安全空间分布格局

由图 3.3 可见，由于生态资源禀赋及生态建设力度的不同，沿黄河流域各省

区的生态安全水平 2010-2019 年在空间上呈现出从“中游领先”到“下游超越”的演进格局。2010-2016 年，黄河流域生态安全呈现“中游领先，上游微弱领先于下游”的特征，期间上游、中游、下游生态安全水平分别为 0.36，0.39，0.35。2017-2019 年，黄河下游地区在经济带动下生态安全水平提升较快，逐渐缩小与上、中游的差距，呈现“下游居上，黄河上游和中游并肩齐驱”的态势，期间上游、中游、下游生态安全平均水平分别为 0.60，0.60，0.62。

总体而言，黄河上游地区生态安全水平变化居中，由于其处特殊的地理位置及复杂的气候条件，其生态本底差，但随着环保政策的不断完善和环保治理力度的不断提高，以及其在人均资源多及工业污染物排放量少等方面的自然存在优势，使得研究期间生态安全状况总体较好。黄河中游不仅是中国重要的农牧业和能源生产基地，也是文化资源丰富的地区，但同时该地区也是能源生产和消费的大省，长期以来依靠能源消费拉动经济增长。尽管近年来在生态文明建设和高质量发展的宏观政策引导下，开始发展低碳经济，节能减排，调整产业结构，但经济发展和生态环境之间的矛盾依然存在，生态安全水平提升趋势较慢。黄河下游生态安全水平变化与环境库兹涅茨曲线保持一致，该曲线指出经济发展速度与环境质量之间呈倒 U 型曲线关系，在经济发展初期通常会造成生态环保质量低下，而随着经济社会的不断发展，人民群众对生态环境质量的期望值也会提高，则促使其生产环境和生活方式的环保化，这也有助于提高生态环境质量。短期内下游区域经济发展迅速，给环境保护带来较大压力，生态安全的水平相对较低，以牺牲生态环境为代价发展社会经济存在严重问题，中长期中下游区域生态环境形势较好，自 2012 年明确提出生态文明建设的重要性，山东、河南省为提升生态环境质量，加大整治力度，引进先进循环技术，利用其经济优势，以强大的经济实力推动社会绿色发展，带动生态环境质量逐步发展，2017 年生态安全水平已超越上游、中游地区。

整体来看，研究期内多数省区生态安全状况逐渐改善，生态安全水平不断提高，但其提升幅度依然较小，上游地区的甘肃和宁夏生态环境脆弱，是生态安全未来保护和提高的重点区域，需要因地制宜进行改善；而山东和河南近两年改善状况较好，但其发展和环境的矛盾依然存在，需要统筹推进耦合协调；中部地区为生态安全保护的关键区，需突破生态瓶颈，寻求进一步的协调发展和提升空间。

## 4 黄河流域生态安全耦合协调性分析

促进黄河流域沿线各省区生态环境系统、社会经济系统、人文资源系统等全面协同发展是实现黄河流域生态环境保护和经济高质量发展的必然要求。近年来随着研究区域人口—资源—环境—经济等系统间相互关联和矛盾关系不断凸显的情况下,研究黄河流域生态安全子系统间的动态耦合关系及互动机理已成为推进流域健康协调发展的重要措施。基于黄河流域各省区生态安全评价基础之上,引入耦合度和耦合协调模型,对黄河流域各区域 2010-2019 年间“驱动力—压力—状态—影响—响应”系统耦合度、协调度的时间序列变化和空间分异特征进行系统、全面地分析。

### 4.1 耦合协调度模型构建

耦合度模型具有广泛的应用背景,其主要通过耦合指数反映系统间相互作用能力,但其无法明确表示系统间正负影响<sup>[61-62]</sup>。因此本文在耦合度模型的基础上,进一步引入耦合协调度模型来分析各子系统之间的协调关系,公式如下:

$$\begin{cases} H = \sqrt{C \times T} \\ C = 5 \left[ \frac{D \cdot P \cdot S \cdot I \cdot R}{(D + P + S + I + R)^5} \right]^{\frac{1}{5}} \\ T = \beta_1 D + \beta_2 P + \beta_3 S + \beta_4 I + \beta_5 R \end{cases} \quad (4.1)$$

式中, H 为耦合协调度指数, C 表示黄河流域生态安全测度中各指标的耦合度, T 表示为驱动力、压力、状态、影响和响应五个子系统的综合协调指数,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ ,  $\beta_5$  分别代表九省区五个子系统所对应系数。在此认为五个子系统之间同等重要, 因此令取  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0.2$ 。

为了更好地判别各省区生态安全系统影响因子的耦合协调状态,本文参考已有研究成果<sup>[63]</sup>, 将耦合协调度划分为失调和协调阶段, 失调阶段划分为:

极度失调 ( $0 < H \leq 0.1$ ), 严重失调 ( $0.1 < H \leq 0.2$ ), 中度失调 ( $0.2 < H \leq 0.3$ ), 轻度失调 ( $0.3 < H \leq 0.4$ ), 濒临失调 ( $0.4 < H \leq 0.5$ ); 协调阶段划分为: 勉强协

调 ( $0.5 < H \leq 0.6$ )，初级协调 ( $0.6 < H \leq 0.7$ )，中级协调 ( $0.7 < H \leq 0.8$ )，良好协调 ( $0.8 < H \leq 0.9$ )，优质协调 ( $0.9 < H \leq 1$ )。

## 4.2 黄河流域生态安全耦合协调性研究

本研究生态安全内容主要包括五个子系统，分别为驱动力、压力、状态、影响、响应，子系统内部间的协同作用促使整个系统不断向有序方向推进，而耦合度就是反映这种协同效应程度大小的度量指标<sup>[64]</sup>。以黄河流域九省区驱动力、压力、状态、影响、响应指数为基础，分别运用耦合度模型、耦合协调度模型，计算得到2010-2019年黄河流域九省区生态安全子系统耦合协调度及流域生态安全整体耦合协调度。

表 4.1 2010-2019 年黄河流域沿线省区生态安全耦合协调度

省份	年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	耦合度	0.960	0.932	0.933	0.927	0.948	0.955	0.961	0.969	0.971	0.974
青海	协调度	0.562	0.628	0.621	0.643	0.650	0.674	0.653	0.660	0.687	0.691
	协调程度	勉强	初级								
	耦合度	0.993	0.990	0.986	0.992	0.995	0.989	0.992	0.987	0.994	0.990
四川	协调度	0.621	0.642	0.689	0.711	0.703	0.720	0.705	0.685	0.740	0.748
	协调程度	初级	初级	初级	中级	中级	中级	中级	初级	中级	中级
	耦合度	0.955	0.952	0.949	0.944	0.953	0.957	0.948	0.951	0.956	0.950
甘肃	协调度	0.510	0.526	0.575	0.588	0.601	0.610	0.622	0.651	0.668	0.684
	协调程度	勉强	勉强	勉强	勉强	初级	初级	初级	初级	初级	初级
	耦合度	0.959	0.948	0.936	0.931	0.957	0.959	0.962	0.966	0.970	0.971
宁夏	协调度	0.531	0.552	0.563	0.593	0.620	0.639	0.659	0.665	0.699	0.714
	协调程度	勉强	勉强	勉强	勉强	初级	初级	初级	初级	初级	中级
	耦合度	0.905	0.900	0.902	0.899	0.912	0.917	0.923	0.919	0.920	0.924
内蒙古	协调度	0.595	0.614	0.619	0.677	0.672	0.621	0.684	0.702	0.710	0.712
	协调程度	勉强	初级	初级	初级	初级	初级	初级	中级	中级	中级

续表 4.1

省份	年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	耦合度	0.964	0.955	0.949	0.937	0.952	0.963	0.966	0.972	0.968	0.974
陕西	协调度	0.501	0.600	0.635	0.655	0.642	0.716	0.722	0.726	0.717	0.734
	协调程度	勉强	初级	初级	初级	初级	中级	中级	中级	中级	中级
	耦合度	0.932	0.929	0.922	0.920	0.928	0.924	0.931	0.935	0.930	0.938
山西	协调度	0.640	0.666	0.664	0.691	0.688	0.618	0.636	0.644	0.657	0.677
	协调程度	初级									
	耦合度	0.933	0.931	0.928	0.919	0.926	0.927	0.929	0.931	0.934	0.942
河南	协调度	0.517	0.567	0.600	0.629	0.637	0.662	0.647	0.673	0.674	0.698
	协调程度	勉强	勉强	初级							
	耦合度	0.920	0.922	0.916	0.907	0.899	0.900	0.912	0.918	0.924	0.933
山东	协调度	0.533	0.589	0.592	0.617	0.654	0.688	0.679	0.698	0.723	0.702
	协调程度	勉强	勉强	勉强	初级	初级	初级	初级	初级	中级	中级

#### 4.2.1 黄河流域整体生态安全耦合协调性分析

由表 4.1 可知, 2010-2019 年黄河流域九省区“驱动力—压力—状态—影响—响应”子系统耦合度时序变化特征为先下降后逐步缓升的趋势, 耦合度整体水平由 2010 年 0.947 降低至 2013 年 0.931, 再从 2014 年 0.941 提升至 2019 年 0.955, 其主要原因为: “十二五”规划初期各地区生态环境仍受之前大力发展社会经济, 加快城市化建设, 工业污染严重等因素影响, 系统内部相互平衡局面仍未形成, “十三五”规划以来, 各地区加大环境污染治理力度, 生态环境与各子系统间朝有序方向发展, 系统内部整体耦合指数逐渐上升。2010-2019 年黄河流域内部耦合水平为高耦合阶段, 耦合指数为 $[0.899, 0.955]$ , 则说明五个子系统间有着强烈的相互作用和影响, 流域生态安全水平与社会经济发展、自然资源状况、生态环境保护等节奏相吻合, 其中一个子系统的修复或是破坏在很大程度上影响其他子系统的状况, 进而对生态安全产生较大影响。为研究各子系统间正向促进和逆向抑制之间的作用机制, 进一步研究分析各子系统间的协调性。

根据表 4.1 和图 4.1, 2010-2019 年黄河流域生态安全水平耦合协调性整体呈现逐步上升趋势, 耦合协调指数从 2010 年 0.557 增长至 2019 年 0.707, 增长了 26.9%, 流域整体生态安全耦合协调性经历了勉强协调到初步协调, 2019 年过渡到中级协调。整体来看, 2010-2014 年黄河流域不同区域生态安全耦合协调性差异性明显, 中游区域生态安全耦合协调水平占据领先优势, 下游区域生态安全耦合协调指数有明显上升趋势, 上游区域生态安全耦合协调指数变化趋势较稳定。造成沿黄河流域各省区生态安全耦合协调性不均衡不稳定的主要原因是社会经济发展与生态环境保护之间的矛盾突出。2015-2019 年, 黄河流域上、中、下游区域生态安全耦合协调指数逐步呈稳定齐驱趋势, 这也表明流域整体生态安全耦合协调能力逐步上升, 生态安全状况持续向好, 同时也为推进黄河流域系统协同发展迈向了新台阶。

#### 4.2.2 黄河流域区域生态安全耦合协调性分析

对上游地区来说, 2010-2019 年间上游 4 省区生态安全耦合协调能力总体增强, 协调指数总体上升。2010-2019 年 10 年间, 青海、四川、甘肃、宁夏生态安全水平耦合协调指数由 0.562, 0.621, 0.510, 0.531 增长至 0.691, 0.748, 0.684, 0.714, 系统安全水平耦合协调指数分别增长了 22%, 20.5%, 34.1%, 34.5%, 表明黄河上游 4 个省区生态安全各系统耦合协调性逐步上升, 生态系统向有序方向发展, 其中四川省和宁夏回族自治区生态安全耦合协调指数较高, 生态安全系统耦合协调发展能力强, 这与其生态本底和自然资源优势有关。

对流域中游地区来说, 2010-2019 年间中游各省份生态安全耦合协调水平也在不断提升, 协调指数呈逐年增长态势。2010-2019 年 10 年间, 内蒙古生态安全协调水平从 0.595 增长至 0.712, 陕西生态安全协调水平从 0.501 增长至 0.734, 山西生态安全协调指数由 0.640 增长至 0.677, 中游三省域生态安全系统耦合协调指数分别增长了 19.7%, 46.5%, 5.8%, 中游区域生态安全耦合协调性从勉强协调阶段上升至中级协调。陕西省生态安全耦合协调指数增长幅度最高, 生态安全水平呈明显提升态势, 这与其近年来大力发展循环经济和加大环境污染治理投资资金与技术有深刻的关系。山西省生态安全耦合协调指数增长趋势最为缓慢,

生态环境改善趋势也较缓慢,这也与其长期靠煤炭资源拉动经济增长的发展模式有关。

对流域下游地区来说,2010-2019年河南和山东两省的生态安全系统耦合协调能力不断提升,协调指数上升势头比较明显。2010-2019年河南省生态安全协调指数由0.517增长0.698,增长了35%;山东省生态安全协调指数由2010年的0.533增长至2019年的0.702,增长了31.7%。总体来看,尽管下游区域生态安全耦合协调性2019年只达到初级协调水平,但其生态系统耦合协调能力持续向上。

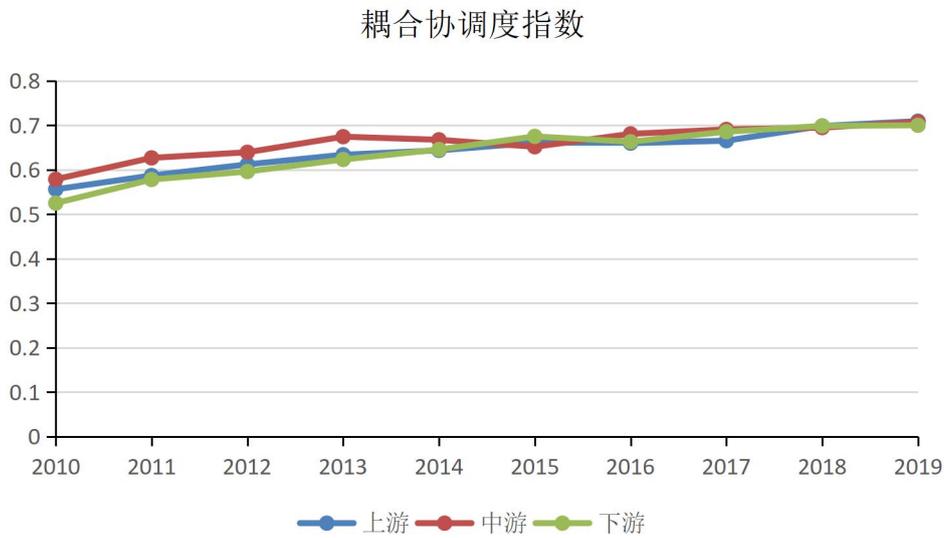


图 4.1 2010-2019 年黄河流域上、中、下游生态安全耦合协调度

### 4.3 黄河流域生态安全子系统间耦合协调时空分异研究

由于“驱动力—压力—状态—影响—响应”系统生态安全耦合协调性是基于2010-2019年黄河流域各省区整体协调程度,而不能有效反映子系统间动态耦合关系。因此,本文进一步利用耦合协调度模型计算得到黄河流域九个省区2010年、2013年、2016年、2019年“驱动力—压力”、“压力—状态”、“状态—影响”、“影响—响应”、“响应—驱动力”、“响应—压力”系统耦合协调度(如表4.2所示)。

表 4.2 2010-2019 年黄河流域九省“两两”子系统生态安全耦合协调度

年份	省份	驱动力—	压力—	状态—	影响—	响应—	响应—
		压力	状态	影响	响应	驱动力	压力
2010 年	青海	0.555	0.658	0.605	0.565	0.522	0.611
	四川	0.632	0.653	0.605	0.565	0.593	0.607
	甘肃	0.458	0.571	0.554	0.558	0.423	0.576
	宁夏	0.591	0.607	0.580	0.588	0.566	0.616
	内蒙古	0.603	0.586	0.565	0.610	0.611	0.634
	陕西	0.523	0.520	0.580	0.538	0.525	0.686
	山西	0.648	0.594	0.592	0.663	0.640	0.666
	河南	0.578	0.549	0.552	0.608	0.594	0.606
	山东	0.589	0.597	0.649	0.644	0.679	0.592
	青海	0.682	0.773	0.697	0.641	0.622	0.702
2013 年	四川	0.786	0.769	0.749	0.759	0.770	0.780
	甘肃	0.568	0.668	0.599	0.606	0.523	0.677
	宁夏	0.623	0.672	0.619	0.694	0.724	0.764
	内蒙	0.695	0.704	0.668	0.674	0.693	0.711
	陕西	0.746	0.734	0.680	0.708	0.729	0.767
	山西	0.718	0.730	0.656	0.661	0.684	0.737
	河南	0.672	0.628	0.616	0.670	0.693	0.684
	山东	0.675	0.621	0.647	0.626	0.734	0.702
	青海	0.837	0.837	0.799	0.757	0.783	0.810
	四川	0.776	0.830	0.816	0.810	0.790	0.824
2016 年	甘肃	0.665	0.803	0.750	0.745	0.630	0.797
	宁夏	0.779	0.812	0.744	0.765	0.765	0.839
	内蒙	0.843	0.782	0.790	0.877	0.846	0.777
	陕西	0.811	0.817	0.781	0.833	0.805	0.875
	山西	0.819	0.715	0.721	0.765	0.813	0.878
	河南	0.779	0.767	0.742	0.807	0.788	0.837

续表 4.2

年份	省份	驱动力— 压力	压力— 状态	状态— 影响	影响— 响应	响应— 驱动力	响应— 压力
2019 年	山东	0.808	0.797	0.839	0.818	0.847	0.779
	青海	0.811	0.796	0.746	0.694	0.729	0.733
	四川	0.863	0.888	0.752	0.769	0.868	0.808
	甘肃	0.703	0.736	0.678	0.733	0.680	0.808
	宁夏	0.846	0.768	0.721	0.760	0.853	0.815
	内蒙	0.891	0.780	0.781	0.837	0.826	0.836
	陕西	0.882	0.769	0.776	0.825	0.873	0.817
	山西	0.850	0.739	0.711	0.801	0.860	0.841
	河南	0.889	0.777	0.756	0.802	0.863	0.826
	山东	0.879	0.759	0.797	0.791	0.898	0.754

#### 4.3.1 黄河流域子系统生态安全耦合协调度时序变化分析

根据表 4.2、图 4.2 可知, 2010-2019 年黄河流域“两两”子系统间内部整体耦合协调指数范围在[0.573,0.846], 反映了“驱动力—压力”、“压力—状态”、“状态—影响”、“影响—响应”、“响应—驱动力”、“响应—压力”系统经历了勉强协调到良好协调四个阶段, 个别省区子系统耦合协调性出现了濒临失调阶段。从时间变化趋势看, 黄河流域不同区域不同子系统间耦合协调能力参差不齐, 这与黄河流域不同区域不同省域生态资源禀赋及生态建设力度不同相关。

“驱动力—压力”子系统间 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年耦合协调度分别为 0.575, 0.685, 0.791, 0.846, 经历了由勉强协调到良好协调阶段的过渡, 耦合协调性呈明显的逐年提升趋势, 也表明社会经济驱动与自然环境压力之间的矛盾逐渐向健康有序方向发展。“压力—状态”子系统间 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年耦合协调度分别为 0.593, 0.700, 0.796, 0.779, 经历了由勉强协调到中级协调阶段的过渡, 2010-2013 年, 压力与状态子系统呈现显著上升趋势, 2014-2019 年呈波动上升趋势, 但整体耦合协调性仍有所改善, 这表明自然

环境及社会压力与生态建设和资源不充分之间的矛盾在 2013 年得到明显改善，2014 年已达到中级协调状态，但后期提升速率逐渐减缓。“状态—影响”子系统与“影响—响应”子系统间耦合协调性从最初勉强协调转变为现在的中级协调阶段，可以看出，生态建设、资源状况与社会收支之间的关系一直是稳定的，生态环境影响直接关系社会经济与生态恢复的响应，且影响与响应两者长期处于正向促进的良好发展趋势。“响应—驱动力”子系统 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年耦合协调度分别为 0.573, 0.686, 0.785, 0.828, 经历了由勉强协调到良好协调阶段的发展态势，可看出黄河流域响应子系统与驱动力子系统间的耦合协调度不断提升，经济发展促进生态建设和加大环保力度的良好态势持续推进。“响应—压力”子系统间 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年耦合协调度分别为 0.622, 0.725, 0.824, 0.804, 经历了由初级协调到良好协调阶段，2010 年耦合协调度高于其他子系统耦合协调性，可见研究初期加大治理力度改善社会发展与环境污染造成的生态压力已经是各地区主要发展方向。

总体来看，2010-2019 年黄河流域生态安全系统内“两两”子系统间耦合协调性均朝平衡合理的趋势发展，但仍具有较大差别，“压力—状态”、“状态—影响”、“影响—响应”、“响应—压力”子系统在 2010-2016 年耦合协调性均逐年向好的方向推进，在 2016-2019 出现较小的波动趋势，但整体仍朝良好方向发展。“驱动力—压力”与“响应—驱动力”子系统的耦合协调性呈显著逐年提升态势，这也成为黄河流域生态安全持续向好的关键因素，同时也表明其在流域生态安全表现中占主导型作用。

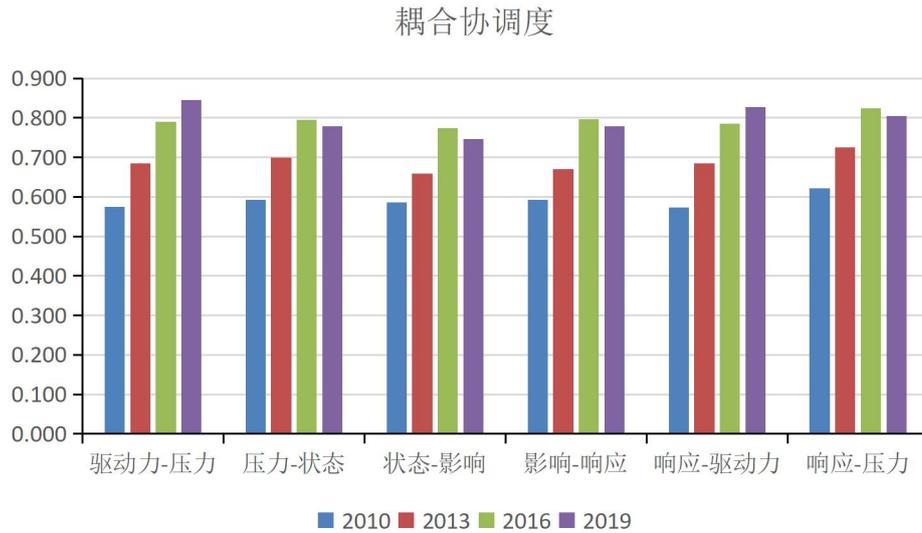


图 4.2 黄河流域子系统耦合协调性时序演化分析

### 4.3.2 黄河流域子系统生态安全耦合协调性空间分异特征

从空间维度来看，黄河流域不同省域间“驱动力—压力”、“压力—状态”、“状态—影响”、“影响—响应”、“响应—驱动力”、“响应—压力”系统间耦合协调性差异较大。

从“驱动力—压力”子系统间耦合协调性时空分布来看，省域间两子系统耦合协调能力差异较大，四川省两子系统耦合协调指数最高，为 0.764，甘肃省两子系统耦合协调指数最低，为 0.599，其余省份两子系统耦合协调水平依次为：山西（0.749）、内蒙古（0.720）、陕西（0.699）、山东（0.687）、河南（0.660）、青海（0.657）、宁夏（0.645）。九省区“驱动力—压力”耦合协调度平均水平为 0.687，上游区域耦合协调度水平普遍较低。上游地区位于西北地区，生态环境脆弱，经济发展落后，驱动力系统与压力子系统间耦合协调发展水平较低，但上游地区甘肃省、青海省子系统耦合协调水平有显著提升趋势，耦合协调度分别提高了 53.5%、46.1%，表明黄河流域上游地区各省“驱动力—压力”子系统总体在向有序方向不断进步；下游地区山东省和河南省在 2010-2019 年“驱动力—压力”子系统耦合协调度分别提升了 53.8%、49.2%，这表明即使在研究早期下游地区也存在以牺牲自然环境而发展经济的现象，但近年来通过逐渐改善形成利用经济优势加大节能减排，推动绿色发展模式。

从“压力—状态”子系统间耦合协调性时空分布来看，四川省两系统间耦合协调能力较高，甘肃省两子系统间协调能力较弱，各省份耦合协调水平分别为四川（0.785）、青海（0.766）、宁夏（0.735）、内蒙古（0.728）、陕西（0.710）、山西（0.704）、山东（0.694）、河南（0.680）、甘肃（0.645）。九省区“压力—状态”耦合协调度平均水平为0.716，其中中游、下游区域耦合协调水平低于平均水平，可见黄河流域各省压力子系统与状态子系统协调能力空间差异显著且较分散，中游、下游地区自然环境与社会压力指数大，人均公园绿地、森林覆盖率、人均水资源量等状态指数偏低，压力与状态子系统协调性较弱。

从“状态—影响”子系统间耦合协调性时空分布来看，山东省和四川省两子系统间耦合协调水平领先其余各省，耦合协调指数分别为：山东（0.733）、四川（0.731）、青海（0.707）、陕西（0.699）、内蒙古（0.686）、山西（0.674）、河南（0.669）、宁夏（0.660）、甘肃（0.645）。九省区“状态—影响”耦合协调度平均水平为0.689，上、中、下游差异显著，内蒙古、山西、河南、宁夏、甘肃五省区水平低于平均水平，其主要原因是资源与经济的短板导致状态子系统与影响子系统耦合协调能力较低，但其中河南省“状态—影响”子系统耦合协调指数增长幅度最大，提升趋势明显，这表明近年来河南省完善生态政策机制，统筹协调生态环境与经济发展工作取得可观成绩。

从“影响—响应”子系统间耦合协调性时空分布来看，内蒙古耦合协调能力最高，甘肃省耦合协调能力最低，其余省份耦合协调指数依次为：陕西（0.736）、四川（0.726）、山西（0.718）、河南（0.713）、山东（0.705）、宁夏（0.696）、青海（0.674），其中山东、宁夏、青海、甘肃四省区“影响—响应”耦合协调水平低于平均水平0.709，且提升趋势缓慢，黄河流域上游地区受社会经济与生态本底落后的影响，两系统协调能力较低。

从“响应—驱动力”子系统间耦合协调性时空分布来看，耦合协调指数由高到低依次为山东（0.789）、四川（0.755）、山西（0.740）、内蒙古（0.736）、河南（0.695）、陕西（0.688）、宁夏（0.655）、青海（0.644）、甘肃（0.564）。九省区“响应—驱动力”子系统耦合协调平均水平为0.696，上游地区耦合协调水平普遍较低，且上游区域的甘肃省生态投资与经济驱动间的耦合协调水平与其他各省区差距明显，从两子系统的耦合协调变化趋势来看，甘肃省“响应—驱动

力”子系统间耦合协调指数增长 60.7%，提升幅度最大，增长趋势最显著，可明显看到甘肃省政府近年在生态环境治理和保护方面强有力度的投入及大力推进环境整治的工作成效。

从“响应—压力”子系统间耦合协调性时空分布来看，黄河流域九省区的响应-压力子系统耦合协调指数均达到较高水平，在中级协调水平上，耦合协调指数由高到低为：陕西（0.786）、山西（0.781）、宁夏（0.759）、四川（0.755）、内蒙古（0.740）、河南（0.738）、甘肃（0.715）、青海（0.714）、山东（0.707）。九省区“响应—压力”子系统耦合协调平均水平为 0.744，黄河流域下游区域环境压力与生态响应两系统间矛盾依旧是制约下游地区生态安全的关键障碍，但两者协同发展水平逐年不断提高，生态系统向健康有序方向推进。

总体来看，黄河流域各省区生态安全水平差异性的根本原因不同，上游四川省“驱动力—压力—状态—影响—响应”子系统整体协调能力强，生态安全水平处于较高水平，生态系统持续向有序方向发展；上游青海、甘肃、宁夏及中游内蒙古主要受“驱动力—压力”、“响应—驱动力”耦合协调性较低等约束的原因，其主要受限于经济发展滞后与生态本底脆弱的影响；中游地区陕西与山西省子系统整体耦合协调指数较大且变化较为平稳，整个系统保持着和谐发展态势；下游地区河南与山东两省主要受“驱动力—压力”、“压力—状态”耦合协调性较低等限制，其主要局限于人口众多，自然资源相对贫乏，生态环境承载压力大，尤其人均水资源量远不及全国平均水平。

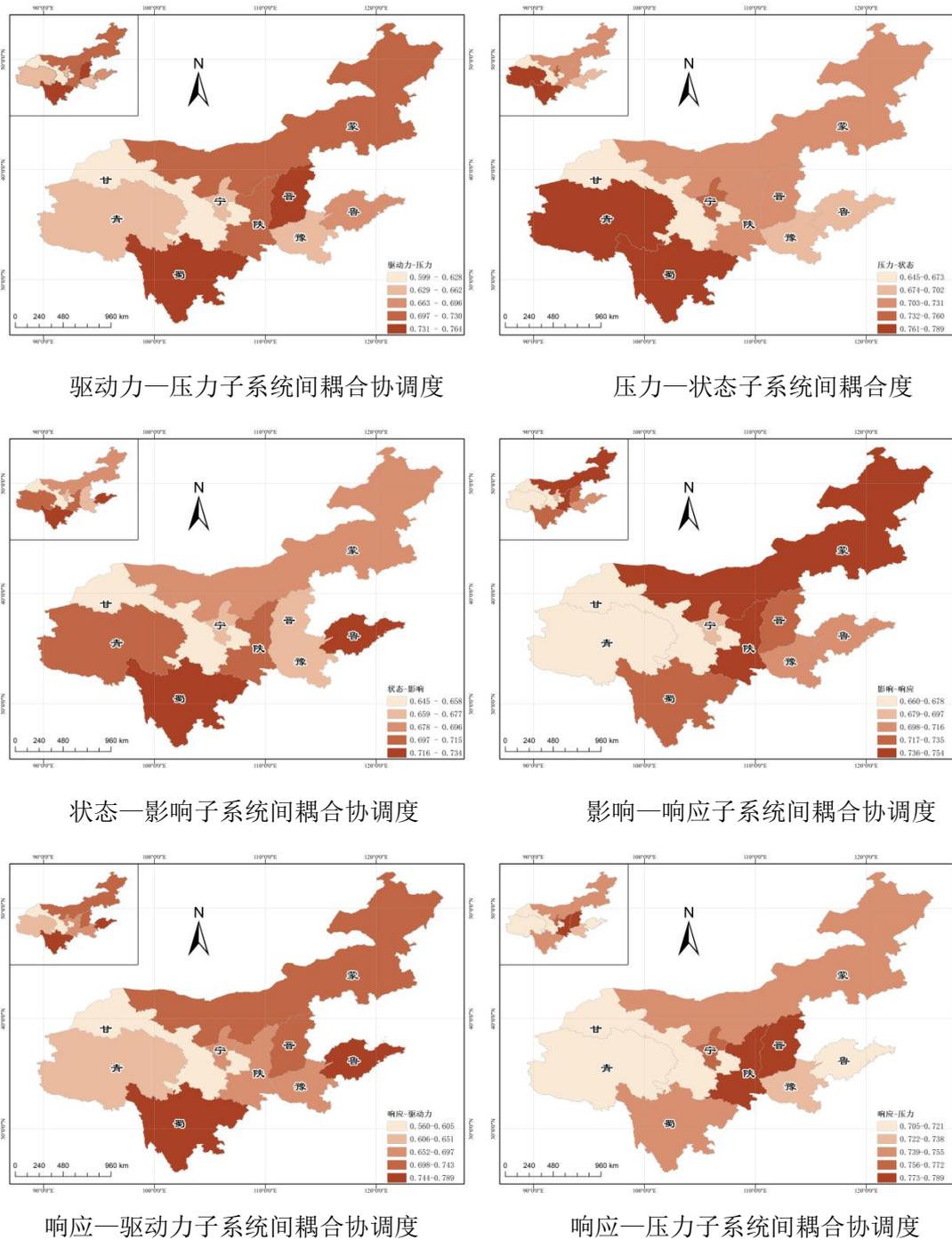


图 4.3 黄河流域子系统生态安全耦合协调性空间演化分析

## 5 黄河流域生态安全障碍因素诊断分析

障碍函数,是目前研究者适用于判断阻碍事物向前进展原因的一个重要数学模型。为深入研究阻碍沿黄河流域各省区生态安全水平提升的主要原因,本研究在黄河流域生态安全水平评估结论基础上,引入障碍度函数模型,科学判断影响黄河流域各区域生态安全提升的主要障碍因素。有针对性地多角度多方面提出提升流域生态安全水平的应对举措。

### 5.1 障碍度模型构建

障碍度模型中障碍度 ( $M_{ij}$ ) 是由  $i$  指标的因子贡献度 ( $U_j$ ) 和  $j$  年  $i$  指标的指标偏离度 ( $J_{ij}$ ) 共同决定, 依此进行排序来确定障碍因子的主次关系<sup>[65]</sup>。障碍度计算公式如下:

$$U_i = \omega_i \times \omega_r \quad (5.1)$$

$$J_{ij} = 1 - r_{ij} \quad (5.2)$$

$$M_{ij} = \frac{U_i J_{ij}}{\sum_i U_i J_{ij}} \quad (5.3)$$

其中  $\omega_r$  为  $i$  指标所属系统层  $r$  的权重, 由其各项指标的权重加和得到。

### 5.2 黄河流域整体生态安全障碍因子诊断分析

基于障碍诊断模型, 分别从标准层和指标层计算黄河沿线九省市的障碍度, 并选取 2010 年、2013 年、2016 年和 2019 年障碍度前五的指标作为九个省的生态安全主要障碍因子。

表 5.1 黄河沿岸各省区不同年份生态安全水平主要障碍因素

省份	年份					
		1	2	3	4	5
青海	2019	P1 (10.21%)	D2 (6.90%)	S2 (6.55%)	S1 (5.95%)	I3 (5.74%)
	2016	D2 (12.70%)	S1 (11.37%)	S2 (10.46%)	I3 (10.21%)	R2 (8.55%)
	2013	S2 (11.66%)	S1 (11.16%)	D2 (10.15%)	I3 (10.03%)	P1 (8.22%)
	2010	S2 (12.66%)	S1 (10.96%)	I3 (10.62%)	R3 (9.12%)	D2 (8.76%)
四川	2019	I4 (9.82%)	I1 (9.60%)	P4 (9.50%)	S3 (8.33%)	S4 (6.51%)
	2016	D1 (12.36%)	S3 (9.85%)	I1 (9.32%)	D4 (8.92%)	I4 (7.29%)
	2013	S4 (11.66%)	S3 (10.04%)	S2 (8.45%)	P2 (8.40%)	R1 (6.97%)
	2010	S2 (14.04%)	S1 (12.15%)	I3 (11.78%)	R3 (10.12%)	I1 (8.06%)
甘肃	2019	I4 (8.56%)	S3 (5.99%)	D1 (5.71%)	D2 (5.70%)	I3 (5.02%)
	2016	D1 (10.20%)	S3 (9.87%)	D4 (9.76%)	D2 (8.31%)	S2 (8.24%)
	2013	S3 (9.98%)	S4 (8.49%)	S2 (8.24%)	D1 (7.54%)	S1 (7.06%)
	2010	S3 (16.67%)	S2 (9.47%)	I3 (8.66%)	S1 (7.49%)	S4 (7.01%)
宁夏	2019	S3 (12.08%)	P1 (9.12%)	D2 (8.99%)	I1 (7.75%)	S2 (7.04%)
	2016	S3 (11.50%)	D1 (11.36%)	D2 (10.60%)	S2 (10.08%)	I3 (8.45%)
	2013	S3 (14.10%)	S2 (10.81%)	D2 (9.84%)	S1 (9.82%)	D2 (9.01%)
	2010	S3 (20.84%)	S2 (11.53%)	S1 (10.19%)	D2 (8.60%)	I3 (8.24%)
内蒙古	2019	S3 (12.92%)	S4 (11.85%)	I4 (10.76%)	D2 (9.93%)	P2 (9.06%)
	2016	S4 (14.61%)	D1 (14.49%)	S3 (13.89%)	D2 (11.58%)	S2 (10.29%)
	2013	S3 (15.78%)	S2 (15.64%)	D2 (13.14%)	S1 (10.96%)	I3 (10.74%)
	2010	S3 (22.96%)	S4 (14.58%)	S2 (11.85%)	I3 (9.44%)	D2 (8.01%)

续表 5.1

省份	年份					
		1	2	3	4	5
山西	2013	S3	S4	S2	D2	I1
		(15.26%)	(12.82%)	(11.27%)	(8.46%)	(7.04%)
	2010	S3	S4	S2	D2	I4
		(21.82%)	(15.77%)	(11.47%)	(7.29%)	(6.84%)
	2019	P3	P2	S3	P1	I3
		(19.20%)	(19.17%)	(16.51%)	(14.20%)	(11.10%)
2016	S3	D1	I3	D2	I2	
	(12.28%)	(11.87%)	(11.26%)	(9.06%)	(8.20%)	
河南	2013	S3	S4	S2	D2	S1
		(13.68%)	(11.99%)	(9.54%)	(7.89%)	(7.04%)
	2010	S3	S2	I3	S1	D2
		(21.10%)	(10.09%)	(8.18%)	(7.02%)	(6.89%)
	2019	S3	I3	S4	R3	I4
		(10.95%)	(10.68%)	(7.20%)	(6.14%)	(6.13%)
2016	S4	S3	D1	I3	D4	
	(11.41%)	(11.32%)	(10.62%)	(9.13%)	(8.82%)	
山东	2013	S4	S3	S2	P4	I3
		(12.76%)	(11.75%)	(6.81%)	(6.42%)	(6.27%)
	2010	S3	S4	I4	I3	S2
		(19.43%)	(12.82%)	(8.78%)	(7.60%)	(6.73%)
	2019	P4	P3	S3	I4	R1
		(16.07%)	(13.97%)	(11.85%)	(7.96%)	(4.71%)
2016	S3	D1	P4	I1	P1	
	(15.52%)	(13.65%)	(9.68%)	(9.39%)	(9.10%)	
2013	S3	P4	S1	P3	R3	
	(20.02%)	(13.33%)	(10.83%)	(9.97%)	(8.54%)	
2010	S3	I4	P4	S1	R3	
	(29.51%)	(13.21%)	(10.41%)	(10.38%)	(7.84%)	

从整体来看, 各省区生态安全保障因素的障碍度呈逐年递减趋势, 生态安全状况逐年改善。由上述黄河流域九省区生态安全指标因子贡献度发现影响其生态安全水平的最主要因素是资源和环境, 其中人均水资源量(S3)是出现频率最高, 障碍度最大的障碍指标。由于黄河流域水资源短缺, 时空分布不均等原因加剧了流域生态环境恶化, 严重阻碍了流域生态发展。黄河流域是我国主要的人口聚集区, 河南省、山东省、山西省和陕西省是人口众多省域, 生产和生活用水量都相对较大, 且流域水资源分布不均等种种因素导致了水资源匮乏的情况。与此同时, 山西省和河南省等黄河沿岸省域的严重水污染状况也是加剧水资源短缺的重要

原因。

### 5.3 黄河流域区域生态安全障碍因素诊断分析

通过障碍度模型测度结果可知（表 5.1），人均水资源量是流域沿线各省区生态安全水平提升的共同障碍因素，但不同省区生态安全障碍因素亦具有区域异质性，不同区域又有其特殊的障碍因素。生态基础及经济发展是上游区域生态安全的主要障碍因素，中游区域的生态安全主要障碍因素是生态资源量与生态建设力度；影响下游区域生态安全发展的因素主要有生态资源量与经济发展带来的环境压力。

#### 5.3.1 黄河流域上游省份生态安全障碍因子分析

由表 5.1 障碍度模型测度结果可知，从上游区域来看，生态基础及经济发展是生态安全的主要障碍因素，障碍指标有人均水资源量（S3）、人均 GDP（D1）、道理清扫保洁面积（S2）和森林覆盖率（S1）。

青海省作为沿黄河流域的重要发源地，虽然区域面积广，但气候环境条件比较恶劣，导致其森林覆盖率一直处于较低水平，2019 年森林覆盖率才达到 6.3%，远低于全国平均森林覆盖率水平，人口自然增长率和第三产业增加值也是近两年青海省生态安全水平提高的主要障碍；四川省生态环境用水比率一直位于黄河流域各省区末位，除与该区域自然降水量丰富有关外，还需与其生态建设、城市空间形成和城市园林绿化紧密联系起来，应合理规划利用水资源，因地制宜扩建环境水面。其次，四川省经济层面受限于气候条件和地域因素限制，农业生产方式仍以传统模式较多，农用塑料薄膜使用量远远高居不下。由于气候多样，降雨量少，植被覆盖率低，水土流失严重，西部地区甘肃省的生态环境十分脆弱。人均水资源量、人均 GDP、道理清扫保洁面积和森林覆盖率成为其生态安全水平提升的主要障碍因素。对于甘肃省来说，水资源短缺、生态环境脆弱、经济发展滞后是造成生态安全水平低下的根本原因，2019 年其人均水资源量为 1233.5 立方米/人，远不及全国人均水资源拥有量。宁夏位于中国内陆中北部，远距海洋，气候干燥，降水稀少，水资源严重短缺。2019 年宁夏地区的人均水资源量为 182.2 立方米/人，不到全国人均水资源量的 1/10。

针对黄河流域上游生态安全制约因素的现状,各省区应因地制宜推动生态环境高质量发展。青海省需要加强生态环境保护,加大经济建设力度,从而提升生态安全水平,提高生态系统功能,如加大植被覆盖面积,合理调整产业内部结构,加强城市市容管理和提高环境卫生等。四川省生态环境用水需与其生态建设、城市空间形成和城市园林绿化紧密联系起来,应合理规划利用水资源,因地制宜扩建环境水面,并推动转变四川省传统农业生产方式,以减少农业生产活动中对化肥、农药等的依赖性。针对水资源短缺的现状,加强水资源的合理使用,强化生态环境保护,合理优化产业结构和布局,因地制宜创新生态环境治理机制,改善人居环境质量将成为甘肃和宁夏未来可持续发展的重要方向。

### 5.3.2 黄河流域中游省份生态安全保障因子分析

由表 5.1 障碍度模型测度结果可知,从中游区域来看,生态资源量与生态建设力度是影响生态安全的主要障碍因素。障碍指标主要有人均水资源量(S3)、人均公园绿地面积(S4)、生态环境用水比率(I1)、道路清扫保洁面积(S2)。

人均水资源量和森林覆盖率是制约内蒙古生态安全水平发展的最主要障碍因素。干旱、少雨和水资源分布不均加剧了内蒙古水资源短缺的现状,粗放式的农业生产方式也消耗着大量水资源,2019 年内蒙古和陕西省的人均水资源量分别为 1765.5 立方米/人和 1279.8 立方米/人,均低于全国人均水资源量水平。另外,人均公园绿地面积和生态环境用水量也是制约陕西省生态安全水平提升的主要障碍,生态环境用水率一直处于较低水平,市容环境卫生和环境绿化也未达到城市居民绿色健康生活水平的标准。山西省生态安全的主要障碍因素与陕西省基本一致,除此之外,人均 GDP 指标也是制约山西省生态安全水平发展的主要因素,经济水平主要受限于农业现代化水平较低。

针对黄河流域中游生态安全制约因素的现状,加大节约用水力度,增强节约用水意识,提高水资源的循环利用率,优化水资源配置,积极推行“三北防护林、退耕还林、退牧还草”等生态环境保护政策才是对严重缺水的中游地区提高生态安全水平的根本措施。此外,提高生态用水比率,加强城市市容管理和环境绿化是陕西省维持生态环境稳定和安全的的重要举措,山西省要通过提高农业现代化水平拉动经济发展,充分运用科学技术和互联网时代。

### 5.3.3 黄河流域下游省份生态安全障碍因子分析

由表 5.1 障碍度模型测度结果可知,影响下游区域生态安全发展的因素主要有生态资源量与经济发展带来的环境压力。人均水资源量(S3)、人均公园绿地面积(S4)、森林覆盖率(S1)和人均 GDP(D1)是影响河南省生态安全提升的主要障碍因素。河南省作为我国人口大省,水情较复杂。因此要采取多种措施齐下提高水资源利用率,规划合理的供水模式,用水方式也应有效环保。其次要完善城市公园、湿地等公共服务区域建设,整体改善城市生态景观和植被覆盖状况。

人均水资源量(S3)、废水排放量(P4)、农用塑料薄膜使用量(P3)和森林覆盖率(S1)是影响山东省生态安全水平提升的主要障碍因素,因为人口众多,人均水资源量、生态景观和植被覆盖率等远不及全国平均水平。对于山东这个经济大省来说,人民往往最初为了追求经济利益,而忽视了工业生产和人类生产生活等对生态环境所造成的污染,从而严重威胁生态安全。为提升生态安全水平,山东省需积极推动实施黄河流域生态保护和高质量发展战略政策,建立严格的自然资源管理体系,实施退耕还林,退耕还湿,尤其在大力发展经济的同时需更加重视森林资源的保护与管理。

## 6 结论与政策建议

### 6.1 研究结论

结合黄河流域沿线 9 省份 2010-2019 年的指标数据, 基于熵-TOPSIS 模糊物元模型对各省域的生态安全水平进行评估, 引入耦合度和耦合协调模型, 对黄河流域“驱动力—压力—状态—影响—响应”系统及两两子系统承载力之间耦合协调性进行系统分析, 最后利用障碍模型分析影响流域不同地区生态安全水平提高的主要障碍因素, 提出了提升黄河流域各省区生态安全水平提升的对策建议。结论如下:

(1) 从时间序列演变的角度来看, 2010-2019 年黄河流域整体生态安全水平经历了“小幅上升—快速上升—稳定上升”的三个过程, 安全贴近度指数由 2010 年 0.289 增长至 2019 年的 0.644, 安全等级由敏感阶段逐渐转变为良好阶段。分区域来看, 黄河流域上游、中游、下游各区域生态安全在时间序列上也呈现逐年上升趋势, 黄河上游生态安全水平呈现集中上升趋势, 其中四川省生态安全水平较高, 中游地区山西省生态安全水平增长缓慢, 下游区域生态安全变化趋势显著。

(2) 从空间格局演变的角度看, 黄河流域沿线各省区的生态安全水平 2010-2019 年在空间上呈现出从“中游领先”到“下游超越”的演进格局。2010-2016 年, 黄河流域生态安全呈现“中游领先, 上游微弱领先于下游”的特征。上游地区的甘肃省和宁夏生态环境脆弱, 是生态安全未来保护和提高的重点区域, 需要因地制宜进行改善; 而山东和河南近两年改善状况较好, 但其发展和环境的矛盾依然存在, 需要统筹推进耦合协调; 中部地区为生态安全保护的关键区, 需突破生态瓶颈, 寻求进一步的协调发展和提升空间。

(3) 黄河流域生态安全整体处于高耦合、初协调水平状态, 区域异质性显著, 不同省域子系统间耦合协调性差异显著, 仍需不断完善各省域生态安全体系内部相互作用机制。2010-2019 年黄河流域生态安全水平耦合协调性整体呈逐步上升趋势, 耦合协调能力逐步提高, 生态安全状况继续向好的方向发展, 但不同省区间生态安全耦合协调性依然不平衡不充分。黄河流域“两两”子系统间耦合协调性指数变化也说明系统均在向好的方向发展, 系统间协同能力不断增强, 但

区域间空间异质依旧显著。

(4) 从障碍度分析结果来看, 黄河流域各区域各省区生态安全水平提高存在共性障碍因素-人均水资源量, 但不同省区也不尽相同, 又有其独特的障碍因素。从上游区域来看, 生态基础及经济发展是生态安全的主要障碍因素; 中游地区来看生态资源量与生态建设力度是影响生态安全的主要障碍因素, 影响下游区域生态安全发展的因素主要是生态资源量与经济发展带来的环境压力。

## 6.2 提升黄河流域生态安全的对策建议

基于以上研究, 新时期面对黄河流域生态安全存在的问题, 我们认识到流域沿岸各省域生态环境状况存在系统性、复杂性和不稳定性, 其与人口规模、流域位置和社会经济等子系统状态存在密切联系。因此加强对黄河流域地区生态安全评价研究, 明确影响生态安全水平提升的主要障碍因素, 是协调发展黄河流域生态安全经济发展和环境保护的重要保障。

### 6.2.1 统筹黄河流域上游、中游、下游协同发展

为了缩小黄河流域各区域生态安全发展差距, 实现流域共同进步, 则需要建立黄河流域生态保护和高质量发展的跨区域、跨省域的联动合作和统筹治理机制, 着力解决上游、中游和下游各省区生态安全发展普遍性障碍因素。如面对水资源短缺的共性障碍因素, 各省必须统筹合理分配水资源, 尽量减少水污染, 科学合理利用水资源。另外, 黄河流域各省域要在驱动力发展、生态环境压力、资源利用状态、社会进步影响和环境保护响应等多方面开展合作, 推动省域间、区域间的社会经济、生态环境及人类发展等系统间的耦合协调能力提升。

### 6.2.2 因地制宜合理规划黄河流域生态发展

由于黄河流域各区域地形气候条件、自然资源状况、生态环境本底、经济发展模式等都不尽相同, 各区域、各省域应因地制宜, 扬长避短, 有力推动生态环境高质量发展。内蒙古自治区和青海省疆域辽阔, 人口密度较低, 区域资源消耗和污染物排放强度也相对较低, 两省则应高度重视保护现有的生态资源和自然环

境，并科学合理规划区域资源的开采使用；对于一些分布有我国重要煤矿基地的省份，如内蒙古自治区、山西省和河南省等，这些省区应加强对矿产开采资质的审查管理，杜绝私开乱采，因为在煤炭开采中难免造成植被破坏、水土流失和土壤污染等问题；河南省、山东省和陕西省三个省区面临人口压力大，资源消耗量大和污染物排放强度高问题，则这些省区需要重视建立健全生态环境保护的长效机制，加大污染综合治理力度和环境保护财政投入，促进经济发展模式转型等。

### 6.2.3 加强黄河流域环境治理投资

加强环境保护和加大资金投入是各区域保障生态安全的有力措施。充足的财政投入、准确的政府宏观调控、有效的环境治理和生态建设都是区域高质量发展的基础条件。针对中国西部生态脆弱地区，重点工作是恢复山区生态环境，提升生态系统功能，增加森林覆盖率，加强水源涵养和流域综合治理；对于华中人口密集区，要精准实施高质量的黄河流域生态保护政策，在生产过程中利用科学技术节能减排，优化水资源配置，减轻人类活动对资源和环境的压力，倡导低碳生活方式，提倡绿色出行，加强城市绿化建设和管理，全面提升城市生态景观和植被覆盖率，提高公众健康绿色生活质量。

### 6.2.4 提高公众的环保认识度与参与度

良好的生态环境需要公众共同维护。首先让公众深刻理解“黄河流域生态保护和高质量发展”是一项需要大家共同践行的政策理念，同时也要明白可持续发展的真正含义，认识到自身生产生活活动对流域高质量发展提升的重要影响。其次要加强公众对生态环境保护的责任意识，通过电视、广告、自媒体、互联网等多种平台推动黄河流域高质量发展的政策宣传，使居民对黄河流域生态保护抱有一种责任感和紧迫感。最后通过多种渠道和活动让公众参与到黄河流域大保护队伍中，获得保护环境，人人有责的集体参与感！

## 参考文献

- [1] 曲格平.关注生态安全之一:生态环境问题已经成为国家安全的热门话题[J].环境保护,2002,5:3-5.
- [2] 习近平.决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利—在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[J].前线,2017,11:4-28.
- [3] 黄青,任志远.论生态承载力与生态安全[J].干旱区资源与环境,2004,18(2):11-175.
- [4] 宁朝山,李绍东.黄河流域生态保护与经济发展协同度动态评价[J].人民黄河,2020,42(12):1-6.
- [5] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].求是,2019,20:1-5.
- [6] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
- [7] 李姣,张灿明,罗佳.洞庭湖生态经济区生态功能区划研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(06):97-103.
- [8] Brown L R.建设一个持续发展的社会[M].祝友三,译.北京:科学技术文献出版社,1984:78-80.
- [9] IIASA.Ecology,politics and society[J].Report Geography,1998,125(2):1-10.
- [10] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等.生态安全研究进展[J].生态学报,2005,25(4):861-868.
- [11] 国务院.全国生态环境建设规划[R].环境工作通讯,1999,3:1-16.
- [12] 国务院.全国生态环境保护纲要[R].全国生态农业县建设工作通讯(总第 132 期),2000,12:1-27.
- [13] Costanza R,Norton B G,Haskell B D.Ecosystem health:new goals for environmental management.[J]. Ecosystem Health New Goals for Environmental Management,1992,10:1-18.
- [14] 庞雅颂,王琳.区域生态安全评价方法综述[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):340-344.
- [15] 吴柏海,余琦殷,林浩然.生态安全的基本概念和理论体系[J].林业经

- 济,2016,38(07):19-26.
- [16]赵柯,李伟芳,毛菁旭,等.基于 PSR 模型的耕地生态安全评价及时空格局演变[J].生态科学,2019,38(01).
- [17]曲格平.关注生态安全之二:影响中国生态安全的若干问题[J].环境保护,2002,7:3-6.
- [18]刘正刚,张姝.基于生态安全法益保护的环境刑法优化研究—评《环境刑法的理论与实践》[J].环境工程,2021,39(04):211.
- [19]李明慧,周启刚,孟浩斌,等.基于最小累积阻力模型的三峡库区重庆段生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2021,30(08):1916-1926.
- [20]Homer-Dixon T F.Environmental scarcities and violent conflict:Evidence from cases[J].International Security,1994,19(1):5-40.
- [21]吴慧娟.开启人与自然互利共生模式—评《生态文明和生态安全—人与自然共生演化理论》[J].世界林业研究,2021,34(05):130-131.
- [22]应凌霄,孔令桥,肖焱,等.生态安全及其评价方法研究进展与展望[J/OL].生态学报,2022,5:1-14.
- [23]刘胜峰,闫文德.漓江流域土地生态安全时空分异及其影响因素[J].中南林业科技大学学报,2021,41(11):136-151.
- [24]张萌,刘吉平,赵丹丹.吉林省西部生态安全格局构建[J].干旱区地理,2021,44(06):1676-1685.
- [25]贺祥.生态系统服务供给安全阈值视域下喀斯特地区生态安全演变[J].地理科学,2021,41(11):2021-2030.
- [26]吴景全,吴铭婉,臧传富.西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J].干旱区地理,2021,44(05):1471-1482.
- [27]胡原,曾维忠.基于 PSR 模型的深度贫困县脱贫进程评价—以四川省为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(12):2867-2878.
- [28]Stevenson M.,Lee H.Indicators of sustainability as a tool in agricultural development:partitioning scientific and participatory processes [J].International Journal of Sustainable Development and World Ecology,2001,8:57-65.
- [29]Kijak R,and Moy D.A decision support framework for sustainable waste management[J].Journal of Industrial Ecology,2004,8(3):33-50.

- [30] Glinskiy V V, Serga L K, Khvan M S. Environmental safety of the region: New approach to assessment[J]. Procedia CIRP, 2015, 26: 30-34.
- [31] 谢玲, 严土强, 高一薄. 基于 PSR 模型的广西石漠化地区土地生态安全动态评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(06): 315-321.
- [32] 侯磊, 卢江蓉, 梁启斌, 等. 基于 DPSIR 模型的云南省湖泊生态安全评价[J/OL]. 农业资源与环境学报: 1-12.
- [33] 叶辉, 王金亮, 赵娟娟. 基于 DPSIR-EES 模型的北回归线(云南段)生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(03): 291-298.
- [34] 王慧杰, 毕粉粉, 董战峰. 基于 AHP—模糊综合评价法的新安江流域生态补偿政策绩效评估[J]. 生态学报, 2020, 40(20).
- [35] Bi M L, Xie G D, Yao C Y. Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 116(C).
- [36] 张广创, 王杰, 刘东伟, 等. 基于 GIS 的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(02): 506-513.
- [37] 张朝枝, 杨继荣. 基于可持续发展理论的旅游高质量发展分析框架[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2022, 56(01): 43-50.
- [38] 王涛. 中国省域生态安全评价及影响因素分析[D]. 河南大学, 2020.
- [39] 卢勤. 新时代下中国生态文明建设的理论与实践研究—评《生态环境保护与可持续发展》[J]. 世界林业研究, 2021, 34(06): 121.
- [40] 杨鹏. 长江经济带土地生态安全时空演化特征及其驱动因素[D]. 湖北大学, 2020.
- [41] 韩雅琴. “一带一路”背景下东南亚地区生态安全评价研究[D]. 中国地质大学(北京), 2020.
- [42] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.
- [43] 谢煜, 张智光, 杨铭慧. 我国林业生态安全评价、预测与预警研究综述[J]. 世界林业研究, 2021, 34(03): 1-7.
- [44] 彭少麟, 郝艳茹, 陆宏芳, 等. 生态安全的涵义与尺度[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(6): 27-31.

- [45]王敏,冯相昭,杜晓林,等.黄河流域空气质量时空分布及影响因素分析[J].环境保护,2019,47(24):56-61.
- [46]霍子文,王佳.基于 PSR 模型的北京市西北生态涵养区生态健康评价研究[J].中国土地科学,2020,34(09):105-112.
- [47]吕添贵,孔安妮,汪立.基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断[J].水土保持研究,2021,28(02):343-350.
- [48]叶辉,王金亮,赵娟娟.基于 DPSIR-EES 模型的北回归线(云南段)生态安全评价[J].水土保持研究,2021,28(03):291-298.
- [49] Xiao Q L.Measurement and comparison of urban haze governance level and efficiency based on the DPSIR model:A case study of 31 cities in north China[J]. Journal of resources and ecology, 2020,11(6) :549-561.
- [50]Du Y P,Wang W J,Lu Q,et al.A DPSIR-TODIM model security evaluation of China's rare earth resources.[J].International journal of environmental research and public health,2020,17(19):7179-7179.
- [51]李子君,王硕,马良.基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J].土壤通报,2021,52(02):425-433.
- [52]陈艳萍,郁娇娇.基于毕达哥拉斯 TOPSIS 法的区域生态破坏度评价—以黄河流域上游为例[J].软科学,2018,32(11):54-58.
- [53]徐少癸,左逸帆,章牧.基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究[J].地理科学,2021,41(01):33-43.
- [54]张宁,蔡金锭.基于模糊物元—逼近理想点法的油纸绝缘状态评估[J].电工技术学报,2018,33(22):5381-5389.
- [55]马冬梅,陈大春.基于欧式贴近度的模糊物元模型在水资源脆弱性评价中的应用[J].南水北调与水利科技,2015,13(05):1003-1007.
- [56]Chen J H,Zhang F W,Chen Y,et al.Factor and trend analysis of total loss marine casualty using a fuzzy matter element method[J].International Journal of Disaster Risk Reduction,2017,24(1).
- [57]邹秀清,谢美辉,肖泽干,等.基于熵权-TOPSIS 法的乡村发展评价及障碍因子诊断[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):197-206.
- [58]王鸣涛,叶春明.基于熵权 TOPSIS 的区域工业绿色制造水平评价研究[J].科技

- 管理研究,2020,40(17).
- [59]苟廷佳,陆威文.基于组合赋权 TOPSIS 模型的生态文明建设评价—以青海省为例[J].统计与决策,2020,36(24).
- [60]胡悦,马静,李雪燕,等.京津冀地区生态安全评价及障碍因子诊断[J].环境污染与防治,2021,43(02):206-210+236.
- [61]水庆象,范波峰.基于 FAHP-Entropy 的耦合定权法的高速公路路线方案优选模型[J].数学的实践与认识,2018,48(04):121-128.
- [62]唐家凯.沿黄河九省区水资源承载力评价与障碍因素研究[D].兰州大学,2021.
- [63]熊建新,王文辉,贺赛花,等.洞庭湖区旅游城镇化系统耦合协调性时空格局及影响因素[J].地理科学,2020,40(09):1532-1542.
- [64]张焱文,王枫.2000-2018 年广东省土地生态安全与经济发展耦合协调分析[J].水土保持研究,2021,28(01):242-249.
- [65]吴晨阳,王婉莹.国家中心城市基础设施承载力评价及障碍因素诊断[J].水土保持通报,2020,40(03):260-267+273.

## 后记

时光飞逝，研究生三年生活即将结束，论文收笔的一刻，在兰财这座学府中的困顿、迷茫、努力、收获、温暖等历历在目，有遗憾、有感恩、有憧憬……

读研第一年全国遭遇新冠疫情的冲击，如今即将毕业，病毒还未完全清除，纵然山河无恙，不敌人间盛情。感谢替我们负重前行的最美逆行者，感谢强大的祖国为广大学子提供坚实后盾，祈愿祖国历经坎坷之后山河无恙，人间皆安！

天涯海角有尽处，师恩绵绵无绝期。首先我要衷心感谢我的导师郭精军老师，老师严谨的治学态度、认真负责的敬业精神和温暖亲和的人格魅力，都潜移默化地感染着我们。每一次的论文完成都离不开导师一遍又一遍的内容修改和细节纠错，从老师身上看到学到了严谨科学的学术思维和认真负责的态度，这些将是我未来人生的最大收获。很幸运在研究生期间遇见良师，不负努力，不负遇见。

感谢我的父母和家人在漫长的人生旅途中给予我安慰和庇护，感谢他们坚定不移的支持和信任，让我更加坚定地走自己选择的道路。祝父母身体健康，哥哥事业有成，生活幸福！感谢学习路上的每一位朋友，感谢师门这个温暖的大家庭，感谢同门小伙伴们的学术指导和生活关怀，感谢同窗在我前进路上的热情陪伴，尤其还要特别感谢与我相识二十年的发小小姐妹，感谢一路以来的包容和相伴，为我的生活增添欢声笑语，陪我熬过艰难的时刻，成为我生命中最重要朋友。愿有前程可奔赴，亦有岁月可回首！

一路走来，要感谢生命中出现的很多人，愿每一位平安喜乐，勇敢顺遂！兰州财经大学，祝好！