

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.015

引用格式:郭婧,魏珍,周华坤,等.基于改进灰色模型的青海省生态安全演进预测及障碍度分析[J].草地学报,2026,34(8):2909—2920

GUO Jing, WEI Zhen, ZHOU Hua-kun, et al. Prediction of Ecological Security Evolution and Obstacle Degree Analysis in Qinghai Province Based on an Improved Grey Model[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):2909—2920

## 基于改进灰色模型的青海省生态安全演进预测 及障碍度分析

郭婧<sup>1</sup>, 魏珍<sup>2</sup>, 周华坤<sup>3</sup>, 李宏林<sup>4\*</sup>

(1. 青海省社会科学院生态文明研究所, 青海 西宁 810000; 2. 青海省社会科学院经济研究所, 青海 西宁 810000;  
3. 中国科学院西北高原生物研究所/青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 青海大学/省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为探究青海省生态安全演进规律,本文基于PSR模型构建评价体系,结合障碍度分析与残差修正GM(1,1)-Verhulst方法,识别制约因素并开展短期预测,发现2005—2023年青海省生态安全综合指数由0.54提升至0.66,等级由“临界安全(Ⅲ)”跨越至“较安全(Ⅳ)”;形成“响应强化-状态改善-综合提升”演进路径;空间格局呈“东高西稳”的分异特征,东部地区率先进入“非常安全(V)”等级;障碍机制由早期“压力主导”逐步转向“状态-响应双约束型”,生态系统结构质量与环境治理能力成为关键制约因素;短期预测显示,2028年生态安全指数预计接近0.73,稳定维持在“较安全(Ⅳ)”高位区间。未来需从强化响应转向提升生态系统韧性,实施差异化分区策略,支撑国家生态安全屏障建设。

**关键词:**生态安全;改进灰色模型;演进预测;障碍度

中图分类号:S812.5

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2909-12

## Prediction of Ecological Security Evolution and Obstacle Degree Analysis in Qinghai Province Based on an Improved Grey Model

GUO Jing<sup>1</sup>, WEI Zhen<sup>2</sup>, ZHOU Hua-kun<sup>3</sup>, LI Hong-lin<sup>4\*</sup>

(1. Research Department of Ecological Civilization, Qinghai Academy of Social Sciences, Xining, Qinghai Province 810000, China; 2. Research Department of Economics, Qinghai Academy of Social Sciences, Xining, Qinghai Province 810000, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science; Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in Qinghai Province, Xining, Qinghai Province 810008, China; 4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

**Abstract:** To investigate the evolution pattern of ecological security in Qinghai Province, in this study we constructed an evaluation system based on the PSR (Pressure-State-Response) framework, integrated obstacle degree analysis with residual-corrected GM(1,1)-Verhulst modeling to identify constraining factors and conduct short-term forecasting. The results revealed that the comprehensive ecological security index in Qinghai Province increased from 0.54 to 0.66 during 2005-2023, with the security level upgrading from “Critical Security (Grade III)” to “Relatively Secure (Grade IV)”. The evolution followed a trajectory of “response strengthening-state improvement-comprehensive enhancement”. Spatial distribution exhibited an “east-high west-stable” differentiation pattern, with eastern regions achieving the “Very Secure (Grade V)” level ahead of others. The obstacle mechanism transitioned from early “pressure-dominated” to “state-response dual-constraint” type, indicating that ecosystem structural quality and environmental governance capacity have become

收稿日期:2025-12-26;修回日期:2026-03-29

基金项目:国家黄河流域生态保护和高质量发展联合研究中心项目(2022-YRUC-01-0102);青海省科技厅基础研究面上项目(2025-ZJ-990M)资助

作者简介:郭婧(1989-),女,汉族,青海西宁人,博士,副研究员,主要从事生态经济、环境生态学研究, E-mail:352097314@qq.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail:honglinli@qhu.edu.cn

critical limiting factors. Short-term prediction suggested that the ecological security index would approach 0.73 by 2028, stably maintaining a high-level “Relatively Secure (Grade IV)” status. Future efforts should shift from response enhancement to ecosystem resilience improvement, implementing differentiated zoning strategies to support national ecological security barrier construction.

**Key words:** Ecological security; Improved grey model; Evolution prediction; Obstacle degree

青海位于青藏高原东北部,是我国高寒草地生态系统最为典型和集中的分布区之一,也是长江、黄河和澜沧江的重要发源地,对气候变化及人类活动干扰高度敏感。其生态安全状态不仅影响区域生态功能稳定性,也对下游流域生态安全格局产生重要影响。生态安全是指生态系统结构与功能保持相对稳定,并能够持续提供生态服务、抵御外界干扰的综合状态<sup>[1]</sup>。随着资源开发强度加大、城镇化扩张及全球气候变化叠加影响,青藏高原地区草地退化、水源涵养功能波动、生物多样性下降等问题逐渐加剧<sup>[2]</sup>。在此背景下,开展区域生态安全动态评价与趋势预测,对于破解生态环境瓶颈、服务“十五五”生态保护战略、助推“双碳”目标落地具有重要意义。

生态安全概念最早由 Lester<sup>[3]</sup>于1981年提出,被界定为生物在生存发展过程中,自身内部与外部环境相互协调、实现可持续发展的一种状态。广义上的生态安全,指人类的生活质量、健康水平、基本权利、生活保障、必要资源供给、社会秩序稳定及环境适应能力等均不受威胁的状态,具体涵盖自然生态安全、经济生态安全与社会生态安全三个维度<sup>[4]</sup>。由此,学者们针对生态安全展开了多元化研究,区域生态安全的早期研究,多侧重于自然及半自然生态系统的完整性与健康状况<sup>[5]</sup>。此后,越来越多学者将研究焦点转向人与自然的相互作用,研究内容也逐步拓展为对自然、社会、经济复合生态系统的综合评价<sup>[6]</sup>。

近年来,生态安全评价的理论内涵与方法体系已从单一要素向复合系统、从静态评估向动态推演的深刻变革。在概念界定上,生态安全不仅是自然生态系统维持自身结构与功能稳定的状态,更是“自然-经济-社会”复合系统在多重胁迫下对人类生存与可持续发展的支撑能力<sup>[7-8]</sup>。在定量评价方面,基于PSR、DPSIR等概念模型的指标体系已成为主流框架<sup>[9-10]</sup>;研究者广泛耦合熵权法、TOPSIS模型及灰色预测等方法,对流域、城市群及高寒草地等典型脆弱区进行了多尺度实证<sup>[11-14]</sup>。此外,针对动

态趋势预测研究,李文龙等<sup>[15-17]</sup>尝试将PSR/DPSIR模型与GM(1,1)灰色预测模型耦合,实现了不同区域生态安全的动态推演。然而,现有研究仍存在显著局限:一是指标体系构建多侧重于资源环境本底与胁迫压力,相对忽视区域“可持续发展潜力”及社会经济系统的“主动响应效能”;二是针对青藏高原腹地等高寒脆弱区的长时序研究依然匮乏,多数成果仍停留在单期或短期序列的综合指数测算;三是障碍因子分析多作为静态结果解释,尚未与动态预测深度融合,难以揭示关键制约因子的时序演变特征。

鉴于此,本文聚焦高寒脆弱区生态安全“状态演化—趋势预测—障碍响应”的非线性耦合机制这一关键科学问题。构建了兼顾“保护”与“发展”的可持续发展多维度生态安全评价体系。研究在优化PSR指标体系的基础上,进一步构建残差修正GM(1,1)-Verhulst组合预测模型,不仅弥补了单一模型在长序列预测中的偏差,更实现了对生态安全演变趋势的模拟。同时,通过构建“评价—预测—障碍诊断”动态分析框架,揭示了长时序下青海生态安全的演变规律与驱动机制。研究结果可为青藏高原生态系统保护与生态安全调控提供决策参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青海(31°39′~39°19′N, 89°35′~103°04′E),位于中国西部、青藏高原东北部,是全球气候变化的敏感区域,也是中国重要的国家生态安全屏障(图1)。截至2024年末,常住人口达593万人,常住人口城镇化率提升至63.90%;该年度青海生产总值达到3950.79亿元,三次产业结构由上一年度的10.1:42.5:47.4调整为9.1:42.1:48.8。青海各地区年平均气温处于-5.1℃~9.0℃区间,相对温暖的东部地区年平均气温在6℃~9℃之间,平均年降水量为17~745 mm。

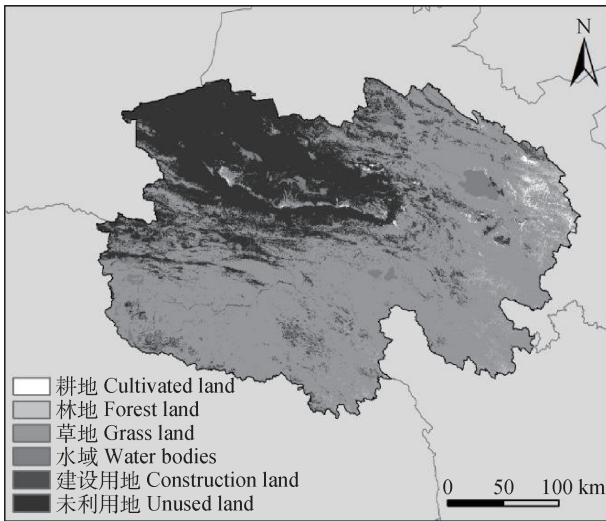


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

## 1.2 数据来源

本文的基础数据主要来源于2006—2024年《青海省统计年鉴》《青海省生态环境状况公报》和各市州(西宁市、海东市、果洛州、玉树州、海西州、海南州、黄南州、海北州)的市(县)统计年鉴和统计公报等资料。

## 1.3 研究方法

**1.3.1 指标体系构建** 本文遵循科学性、全面性与可行性原则,结合青海高寒生态脆弱区特征构建评价指标体系。基于文献<sup>[18-21]</sup>梳理形成初选指标池;鉴于长时序微观数据(如矿山破坏、放牧强度)获取受限,侧重选取统计年鉴中连续性较好的宏观指标作为代理变量。结合地域特征修正,剔除湿润区适用指标,增补“年日照时数”“退化草地恢复率”等本底指标;针对放牧压力与草地面积数据统计波动大或缺失的问题,采用“人均耕地”与“人口密度”综合表征生存资源压力,其背后隐含了对草地资源的依赖压力。为捕捉绿色转型的长期驱动力,纳入“科技和教育支出”指标。利用SPSS 26.0进行Pearson相关性分析(阈值 $|r| > 0.85$ ),剔除与“人口密度”(P1)高度共线的“总人口”等指标,选取工业排放指标作为工业化压力的代理变量,以反映宏观资源开发强度。保留表征空间承载与集约特征的指标,最终构建包含3个准则层、6个因素层、30个具体指标的青海省生态安全评价指标体系(表1)。

**1.3.2 指标权重的确定** 本文采用熵值法客观确定各指标权重。该方法基于信息熵原理,通过计算指标数据的离散程度(差异系数)来赋权,差异越大

的指标赋予越高权重,从而避免主观因素干扰<sup>[22-23]</sup>。计算过程中,针对标准化后可能出现的零值,统一以0.0001替代以确保对数运算的有效性。

**1.3.3 灰色关联法** 灰色关联法是基于邓聚龙<sup>[24]</sup>提出的灰色系统理论而衍生的一种系统分析的现代统计方法,本研究运用灰色关联度模型测算目标层的主要关联因子。具体步骤如下:

(1)参考序列:以生态安全分级标准作为比较序列,选取标准化后的最大向量作为最优参考序列。

(2)计算关联系数:本研究 $\rho$ 取值为0.5,以平衡分辨力与稳定性。

(3)计算加权关联度:计算各比较序列与参考序列的关联系数,并结合熵值法确定的权重,加权计算得到各因子的灰色关联度,以此识别影响生态安全的关键驱动因子。

**1.3.4 生态安全分级评价标准** 鉴于青海省高寒生态系统的特殊性,本研究参考青藏高原相关实证研究共识<sup>[9, 18-20, 25-26]</sup>,采用等间距法初步划分等级;并咨询本地高校、科研院所5位专家,涵盖草地生态、高原气象及环境规划领域等。专家组一致认为采用等间距五级划分法能清晰反映生态安全的梯度变化,无需进行非均匀阈值调整(表2)。

**1.3.5 障碍度模型构建** 鉴于指标权重仅反映数据量特征,难以严谨识别生态安全的主要阻碍因子,故引入障碍度函数。该函数通过三个核心维度构建:因子贡献度 $A_{ij}$ 、指标偏离度 $B_{ij}$ 及单项障碍度 $Q_{ij}$ 。先计算研究时段内各年度单项指标的障碍度,再经加权求和取平均值得到指标总障碍度,以此量化各指标对青海生态环境的影响程度。其中,障碍度越小,表明指标对生态环境水平的阻碍作用越弱;障碍度越大,阻碍作用则越强。计算公式如下<sup>[10, 16, 27]</sup>:

$$A_{ij} = \alpha_j \times \omega_{ij} \quad (1)$$

$$B_{ij} = 1 - Y_{ij} \quad (2)$$

$$Q_{ij} = \frac{A_{ij} \times B_{ij}}{\sum_{j=1}^m A_{ij} \times B_{ij}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\alpha_j$ 为PSR模型中第 $j$ 个指标所在子系统的权重(如压力、状态、响应子系统),反映该子系统在整体评价体系中的相对重要性; $\omega_{ij}$ 为第 $i$ 年、第 $j$ 项指标在其所属子系统内的局部权重,体现该指标在子系统内部的相对影响力; $Y_{ij}$ 为经过标准化处理

表 1 青海生态安全评价指标体系及权重值  
Table 1 Qinghai ecological security evaluation index system and weights

| 目标层 Goal Layer                                          | 准则层 Criterion Layer                    | 因素层 Factor Layer                                           | 指标层 Indicator Layer                                                                          | 序号 Serial number | 指标熵权 Entropy weight |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| 生态安全指标体系<br>Ecological security<br>indicator system (A) | 压力指标<br>Pressure<br>Indicators<br>(B1) | 人口承载压力                                                     | 人口密度 Population density/(人·km <sup>-2</sup> )                                                | P1               | 0.034               |
|                                                         |                                        | Population carrying pressure                               | 人均生产总值 GDP per capita/(10 <sup>4</sup> 元·人 <sup>-1</sup> )                                   | P2               | 0.034               |
|                                                         |                                        | 经济社会发展压力<br>Pressure of economic and<br>social development | 人口自然增长率 Natural population growth rate/‰                                                     | P3               | 0.035               |
|                                                         |                                        |                                                            | 第三产业比重 Proportion of tertiary industry/%                                                     | P4               | 0.033               |
|                                                         |                                        |                                                            | 人均可支配收入 Per capita disposable income/元                                                       | P5               | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 经济密度 Economic density/(10 <sup>4</sup> 元·km <sup>-2</sup> )                                  | P6               | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 公路网密度 Road network density/[km·(100 km <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]                        | P7               | 0.029               |
|                                                         |                                        | 资源环境压力<br>Resource and environmental<br>pressure           | 化肥(折纯)使用量 Fertilizer Application (Pure Nutrient)/(万 t)*                                      | P8               | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 农药使用量 Pesticide Usage/t*                                                                     | P9               | 0.033               |
|                                                         |                                        |                                                            | 工业二氧化硫排放量 Industrial SO <sub>2</sub> Emissions/(万 t)*                                        | P10              | 0.032               |
|                                                         |                                        |                                                            | 烟(粉)尘排放量 Smoke and Dust Emissions/(t·年 <sup>-1</sup> )*                                      | P11              | 0.033               |
|                                                         |                                        |                                                            | 氮氧化物排放量 Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> ) Emissions/(万 t·年 <sup>-1</sup> )*                 | P12              | 0.033               |
|                                                         | 状态指标<br>State<br>indicators<br>(B2)    | 资源利用状态<br>Status of resource<br>utilization                | 年均降水量 Annual average precipitation/mm                                                        | S13              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 年平均气温 Annual average temperature/℃                                                           | S14              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 年日照时数 Annual sunshine duration/h                                                             | S15              | 0.032               |
|                                                         |                                        |                                                            | 森林覆盖率 Forest coverage rate/%                                                                 | S16              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 人均林地面积 Per Capita forest land area/(hm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )                       | S17              | 0.032               |
|                                                         |                                        |                                                            | 人均耕地面积 Per Capita cultivated land area/(hm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )                   | S18              | 0.033               |
|                                                         |                                        |                                                            | 人均水资源量 Per Capita Water Resources/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> )                         | S19              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 人均公园绿地面积 Per Capita park green space area/(m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )                 | S20              | 0.035               |
|                                                         | 响应指标<br>Response<br>indicators<br>(B3) | 资源利用响应<br>Response to resource<br>utilization              | 有效灌溉面积 Effective irrigated area/(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )                           | R21              | 0.032               |
|                                                         |                                        |                                                            | 当年造林面积 Annual afforestation area/hm <sup>2</sup>                                             | R22              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 退化草地恢复率 Restoration rate of degraded grassland/%                                             | R23              | 0.033               |
|                                                         |                                        | 环境修复响应<br>Response to environmental<br>restoration         | 科技支出占 GDP 比重 Proportion of science and technology expenditure to GDP/%                       | R24              | 0.035               |
|                                                         |                                        |                                                            | 教育支出占 GDP 比重 Proportion of education expenditure to GDP/%                                    | R25              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 环保支出占 GDP 比重 Proportion of environmental protection expenditure to GDP/%                     | R26              | 0.035               |
|                                                         |                                        |                                                            | 污水处理率 Sewage treatment rate/%                                                                | R27              | 0.033               |
|                                                         |                                        |                                                            | 生活垃圾无害化处理率 Harmless treatment rate of domestic waste/%                                       | R28              | 0.034               |
|                                                         |                                        |                                                            | 化学需氧量排放总量 Total COD emissions/t*                                                             | R29              | 0.035               |
|                                                         |                                        |                                                            | 累计水土流失治理面积 Cumulative area of soil and water conservation/(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> ) | R30              | 0.032               |

注: \*为负向指标

Note: \* indicates negative indicators

表 2 生态安全分级评价标准  
Table 2 Ecological Security Grading Standards

| 生态安全指数取值范围 Range of ecological security index | 等级 Level | 安全状态 Security status     |
|-----------------------------------------------|----------|--------------------------|
| [0.00, 0.20)                                  | I        | 不安全 Insecure             |
| [0.20, 0.40)                                  | II       | 较不安全 Relatively insecure |
| [0.40, 0.60)                                  | III      | 临界安全 Critically secure   |
| [0.60, 0.80)                                  | IV       | 较安全 Relatively secure    |
| [0.80, 1)                                     | V        | 非常安全 Very secure         |

后的第  $i$  年第  $j$  项指标的实际观测值  $m$  为评价体系中指标总数;  $Q_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  项指标对生态安全的单项障碍度, 其值越大, 说明该指标对该年份生态安全的制约作用越强。

**1.3.6 残差修正 GM(1, 1)-Verhulst 组合预测模型** 本文构建了一种基于残差修正的组合预测模型, 该模型首先利用 GM(1, 1) 捕捉序列的主要趋

势, 识别其预测残差; 随后引入 Verhulst 模型对残差序列中的非线性饱和和特征进行二次拟合与修正, 最终形成组合预测值<sup>[28-29]</sup>。

基础 GM(1, 1) 模型构建:

(1) 数据列序生成

设原始序列为:  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 为消除数据波动影响, 对其进行一次累加生成(1-AGO), 得到新序列  $X^{(1)}$ :

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k x^{(0)}(i) = x^{(1)}(k-1) + x^{(0)}(k), \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

其中,  $x^{(1)}(k)$  为累加后的数据值, 该序列具有明显的指数增长规律。

(2) 建立灰微分方程

基于累加序列  $X^{(1)}$ , 构建一阶线性微分方程(即 GM(1,1) 模型的白化方程):

$$\frac{dx^{(1)}}{dx} + ax^{(1)} = b \quad (5)$$

式中:  $t$  为时间变量;  $a$  为发展系数, 反映系统的发展态势( $a$  的符号决定序列是增长还是衰减);  $b$  为灰色作用量, 反映数据变化的关系。

参数  $a$  和  $b$  通过最小二乘法求解, 利用背景值  $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$  构建数据矩阵估算得出。

(3) 时间响应函数与预测值还原

求解上述微分方程, 得到时间响应函数:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

为获得原始序列的预测值  $\hat{x}^{(0)}(k+1)$ , 需对  $\hat{x}^{(1)}$  进行一次累减还原(IAGO):

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (7)$$

残差序列提取与非负化处理

计算原始序列与初步预测值的绝对残差序列  $E^{(0)}$ :

$$e^{(0)}(k) = e^{(0)}(k) - \hat{x}_{GM}^{(0)}(k), \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

若残差序列存在明显趋势性波动(非白噪声), 则启动修正机制。鉴于 Verhulst 模型要求数据非负, 若  $e^{(0)}(k)$  含负值, 进行平移变换:

$$e^{(0)}(k) = e^{(0)}(k) + C \quad (9)$$

其中,  $C = |\min(e^{(0)}(k))| + \delta$  ( $\delta$  取 0.1), 以保证序列整体大于零。

Verhulst 非线性残差修正:

针对平移后的残差序列  $E^{(0)}$ , 引入灰色 Verhulst 模型以模拟生态系统的饱和机制。其灰微分方程包含二次非线性项:

$$e^{(0)}(k) = a_e z_e^{(1)}(k) = b_e [z_e^{(1)}(k)]^2 \quad (10)$$

其中,  $z_e^{(1)}(k)$  为残差累加序列的紧邻均值,  $a_e$  为发展系数,  $b_e$  为内生控制系数(反映饱和强度)。利用最小二乘法求解参数向量  $\hat{u}_e = [a_e, b_e]^T$ , 得到 Verhulst 模型的时间响应函数:

$$\hat{e}^{(1)}(k+1) = \frac{a_e/b_e}{1 + (\frac{a_e}{b_e e^{(1)}(1)} - 1)e^{a_e k}} \quad (11)$$

经累减还原并扣除平移常数  $C$ , 得到最终的残差修正值  $\hat{e}^{(0)}(k)$ 。

组合预测输出:

将 GM(1,1) 的趋势项与 Verhulst 的残差修正项线性叠加, 得到最终的高精度预测值:

$$\hat{x}_{\text{final}}^{(0)}(k) = \hat{x}_{\text{GM}}^{(0)}(k) + \hat{e}^{(0)}(k) \quad (12)$$

该组合策略有效弥补了传统 GM(1,1) 在长序列预测中易出现的指数发散缺陷, 通过引入非线性饱和机制, 显著提升了模拟精度。

模型精度检验与参数分析:

采用后验差比值  $C$  和小误差概率  $P$  对模型精度进行检验。依据精度等级标准(表 3), 本研究设定模型需达到“合格”及以上等级( $P \geq 0.70$  且  $C \leq 0.65$ )方可用于趋势预测; 若初始精度未达标, 则通过残差修正或数据重构优化模型, 直至满足要求。

表 3 模型精度检验等级

| 精度检验等级<br>Accuracy level | $P$                  | $C$                  |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| 好 Excellent              | $P \geq 0.95$        | $C \leq 0.35$        |
| 较好 Good                  | $0.80 \leq P < 0.95$ | $0.35 < C \leq 0.50$ |
| 合格 Qualified             | $0.70 \leq P < 0.80$ | $0.50 < C \leq 0.65$ |
| 不合格 Unqualified          | $P < 0.70$           | $0.65 < C$           |

## 2 结果与分析

### 2.1 青海生态安全水平动态变化分析

基于 PSR 模型测算 2005—2023 年青海省生态安全指数(图 2)。结果表明, 生态安全综合指数总体呈阶段性上升态势, 由 2005 年的 0.54 提升至 2023 年的 0.66, 增幅 20.68%, 演变过程可划分为“波动调整-持续提升-高位稳定”3 个阶段。2005—2009 年综合指数在 0.51~0.55 之间波动, 处于“临界安全(III)”等级; 2010—2016 年持续上升, 2016 年达阶段峰值(0.60); 2017—2023 年稳定在 0.57 以上, 2022—2023 年进一步升至 0.64 和 0.66, 表明青海生态安全整体进入相对稳定提升阶段。

从各子系统来看, 压力子系统( $B_1$ )指数在 0.55~0.70 之间波动, 总体呈“先升后降、再趋稳定”特征。2005—2015 年由 0.62 升至 0.70, 达到峰值; 2016 年后略有回落, 2023 年为 0.61, 与 2005 年基本持平, 说明经济社会发展对生态系统的压力总体得到一定调

控,但结构性压力仍然存在。状态子系统( $B_2$ )指数整体波动幅度较小,2005—2023年在0.20~0.33之间变化,2018年达峰值(0.33),之后小幅回落至2023年的0.26。表明生态本底状况虽有阶段性改善,但受气候波动及资源环境约束影响,稳定性仍有待增强。响应子系统( $B_3$ )指数提升最为明显,由2005年的0.43增至2023年的0.75,增幅达73.54%。尤其2017年以来持续快速上升,2022—2023年保持在0.71以上,

反映出生态保护投入、生态工程建设及环境治理力度持续加大。总体来看,青海省生态安全综合水平的提升主要源于响应能力的显著增强,进而对生态状态改善形成支撑效应,推动全省生态安全从“临界安全(III)”迈向“较安全(IV)”转变;而压力水平总体保持相对稳定,是制约生态安全进一步提升的关键因素。研究期内生态安全格局表现为“响应驱动-状态改善-综合提升”的演进路径。

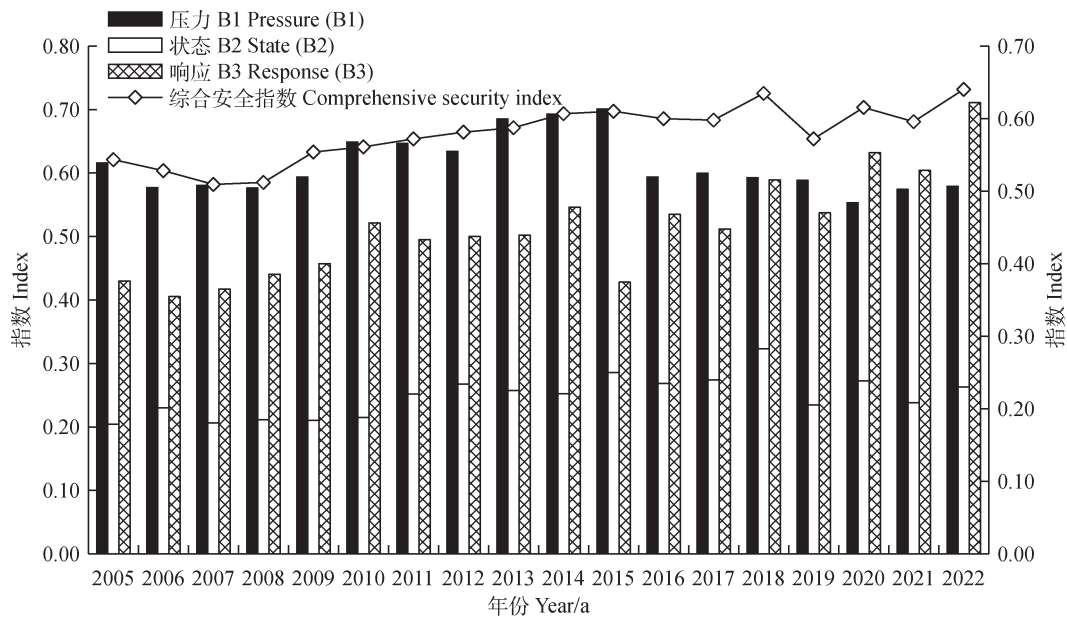


图2 2005—2023年青海生态安全变化趋势

Fig. 2 Trends in ecological security in Qinghai Province (2005-2023)

## 2.2 生态安全障碍因子诊断

基于障碍度模型对2005—2023年生态安全准则层进行诊断分析(图3,表4)。结果表明,研究期内压力层(P)始终是生态安全的主要障碍来源,其年均障碍度最高,达39.87%;其次是响应层(R)和状态层(S),年均障碍度分别为33.60%和26.52%。从时序演变特征来看,各准则层障碍度呈现显著的阶段性变化:压力层(P)障碍度总体呈下降趋势,由2005年的59.44%大幅降至2013年的26.72%,表明人类活动对生态环境的直接胁迫作用明显减弱;2014年后在31.94%~36.91%区间内波动回升,2023年为34.82%,说明随着经济社会发展,资源环境压力仍保持一定强度。状态层(S)障碍度整体呈波动上升态势,由2005年的23.68%上升至2023年的30.62%,并在2018年达到峰值32.90%。这表明生态本底条件的改善速度滞后于压力缓解速度,逐渐成为限制生态安全水平提升的关键因素。响应层(R)障碍度增长最为显著,由

2005年的16.88%攀升至2013年的46.83%,随后虽有所回落,但2023年仍维持在34.55%的较高水平。尤其在2011—2015年间,响应层障碍度一度超过压力层成为首要制约因子,反映出该时期生态治理与修复措施的投入力度或成效尚不足以完全抵消累积的生态压力。

青海生态安全障碍因子演变呈现4个阶段性特征(表4)。第1阶段(资源环境压力凸显期):2005—2008年,障碍因子集中于压力层(P)与状态层(S),如2005年的人口自然增长率、年平均气温和化肥施用量障碍度均超过13%,反映传统增长模式下资源环境压力持续累积。第2阶段(转型调整期):2009—2012年,响应层(R)指标开始凸显,环保支出占GDP比重(12.43%)、科技支出占比(11.86%)及退化草地恢复率(8.63%)成为主要障碍,整体障碍度由24%降至约10%;表明青海省在发展转型方面取得了一定成效,但系统稳定性尚未形成,年度间障碍因子波动较大。第3阶段(协调瓶颈期):2013—

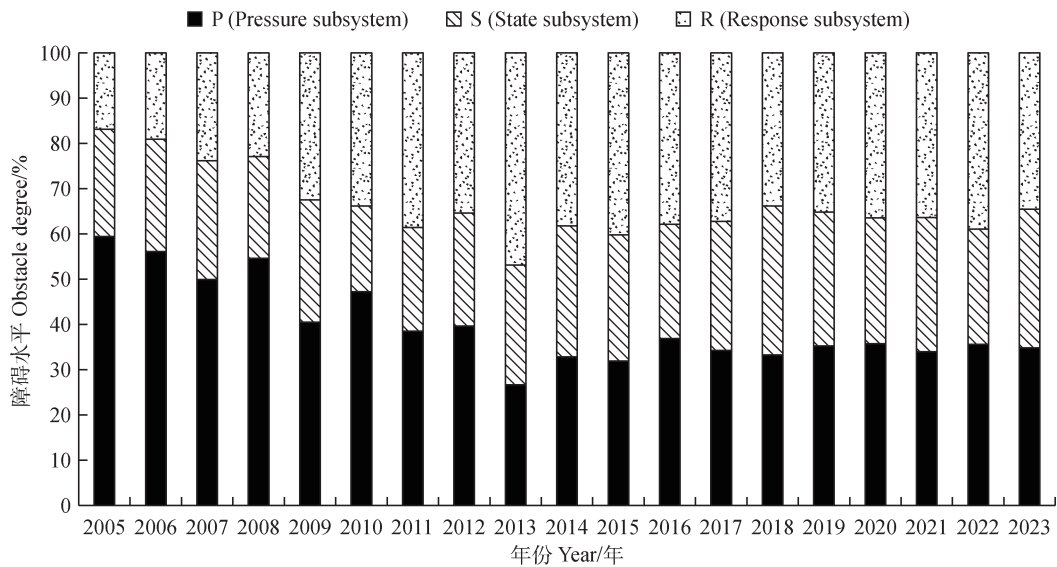


图 3 生态安全准则层障碍水平比例

Fig. 3 Proportions of obstacle degree for ecological security criterion layers

表 4 单项指标障碍度测算结果

Table 4 Obstacle degree results for individual indicators

| 年份<br>Year/a | 主要障碍因子障碍度排序 Ranking of major obstacle factors by obstacle degree |                  |                  |                  |                  |                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|              | 1                                                                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                |
| 2005         | $P_3$ (24.18)                                                    | $P_9$ (15.46)    | $P_{11}$ (14.07) | $S_{14}$ (13.52) | $P_{10}$ (12.07) | $P_8$ (11.66)    |
| 2006         | $P_3$ (18.07)                                                    | $P_9$ (15.31)    | $P_{11}$ (13.61) | $S_{13}$ (13.21) | $S_{14}$ (12.30) | $P_8$ (11.30)    |
| 2007         | $P_9$ (15.02)                                                    | $P_3$ (14.67)    | $S_{14}$ (13.93) | $S_{13}$ (13.63) | $P_{11}$ (13.00) | $P_{12}$ (11.38) |
| 2008         | $P_3$ (18.07)                                                    | $S_{14}$ (13.93) | $P_9$ (12.54)    | $P_{11}$ (12.34) | $P_{10}$ (10.98) | $P_{12}$ (10.61) |
| 2009         | $S_{14}$ (14.75)                                                 | $R_{26}$ (12.43) | $P_{10}$ (10.69) | $P_9$ (10.04)    | $P_{12}$ (9.85)  | $R_{25}$ (9.31)  |
| 2010         | $P_{10}$ (10.37)                                                 | $P_{12}$ (9.03)  | $R_{30}$ (8.63)  | $S_{15}$ (7.66)  | $P_1$ (7.10)     | $P_{11}$ (6.79)  |
| 2011         | $R_{24}$ (11.86)                                                 | $P_{10}$ (10.03) | $R_{30}$ (8.64)  | $P_{12}$ (8.16)  | $R_{23}$ (8.03)  | $S_{15}$ (7.62)  |
| 2012         | $R_{25}$ (9.58)                                                  | $P_{10}$ (9.47)  | $S_{19}$ (8.77)  | $R_{30}$ (8.66)  | $P_{12}$ (7.63)  | $P_7$ (6.73)     |
| 2013         | $S_{19}$ (9.17)                                                  | $R_{30}$ (8.66)  | $R_{25}$ (8.61)  | $R_{24}$ (8.01)  | $S_{15}$ (7.28)  | $P_7$ (6.74)     |
| 2014         | $R_{23}$ (8.85)                                                  | $S_{15}$ (7.28)  | $P_4$ (7.15)     | $R_{28}$ (7.02)  | $P_7$ (6.73)     | $R_{21}$ (6.63)  |
| 2015         | $R_{23}$ (8.17)                                                  | $R_{28}$ (7.73)  | $S_{19}$ (7.67)  | $P_4$ (7.64)     | $P_1$ (7.25)     | $P_7$ (6.84)     |
| 2016         | $P_4$ (9.26)                                                     | $R_{23}$ (8.17)  | $R_{28}$ (7.19)  | $P_5$ (7.00)     | $R_{21}$ (6.97)  | $P_7$ (6.84)     |
| 2017         | $R_{28}$ (7.72)                                                  | $S_{19}$ (7.58)  | $P_5$ (7.52)     | $R_{23}$ (7.36)  | $R_{21}$ (7.14)  | $R_{27}$ (6.94)  |
| 2018         | $S_{19}$ (8.86)                                                  | $S_{20}$ (8.45)  | $P_5$ (7.86)     | $P_6$ (7.72)     | $P_2$ (7.68)     | $R_{21}$ (7.32)  |
| 2019         | $R_{22}$ (9.06)                                                  | $S_{16}$ (8.65)  | $P_2$ (8.58)     | $P_6$ (8.56)     | $S_{20}$ (8.43)  | $P_5$ (8.28)     |
| 2020         | $R_{25}$ (9.58)                                                  | $R_{22}$ (9.35)  | $P_6$ (9.12)     | $P_{16}$ (9.04)  | $P_4$ (8.81)     | $P_2$ (8.78)     |
| 2021         | $S_{16}$ (12.19)                                                 | $R_{22}$ (9.87)  | $P_6$ (9.64)     | $P_2$ (9.53)     | $P_5$ (8.97)     | $P_4$ (8.62)     |
| 2022         | $S_{16}$ (12.19)                                                 | $R_{22}$ (11.31) | $P_2$ (10.04)    | $P_6$ (10.03)    | $R_{28}$ (9.95)  | $P_5$ (9.32)     |
| 2023         | $S_{20}$ (13.23)                                                 | $R_{28}$ (13.01) | $S_{16}$ (12.19) | $P_2$ (10.39)    | $P_6$ (10.26)    | $P_5$ (9.73)     |

注:表中括号内为障碍度(%)

Note: Figures in parentheses denote obstacle degree (%)

2018年,状态层主导障碍格局,人均水资源量、年日照时数等自然禀赋类指标持续居前,叠加生活污水处理率等基础设施短板,表明生态系统本底的刚性约束逐渐成为制约安全水平提升的核心因素。第4阶段(高质量发展挑战期):2019—2023年,高质量发展挑战期(2019 - 2023年):植被覆盖率、人均公园绿地面积等状态层指标连续多年位列障碍度首

位,障碍度回升至12%以上,反映生态系统本底改善难度加大与城镇化带来的复合压力。

雷达图显示(图4),2005年,图形呈“状态-压力双主导”的非对称结构,状态层(48.28%)与压力层(40.28%)构成外缘,响应层(11.44%)显著内凹。2008—2011年,随着压力层边界持续内缩、响应层快速外扩,图形轮廓由“偏态分布”向“均衡化”过

渡。2014 年,状态层障碍度跃升至峰值(56.04%),形成显著的“单极外凸”形态。2017—2023 年演变为以状态层为外缘(>51%)、压力与响应层紧密嵌套(21%~24%)的稳定“同心圆”格局,表明子系统间作用机制逐步协调。未来应聚焦高寒草地生态系统韧性提升与差异化治理,应对状态层长期高位锁定的挑战。

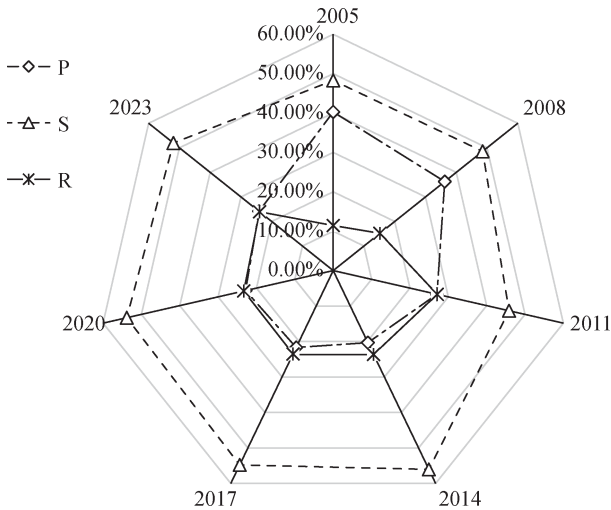


图 4 子系统障碍度变化雷达图

Fig. 4 Radar chart of changes in subsystem obstacle degree

### 2.3 生态安全预测分析

本文为克服单一 GM(1,1)模型在长序列预测中的累积误差,引入适用于 S 型饱和和增长的 Verhulst 模

型与残差修正 GM(1,1)模型。通过多模型精度对比与优选,实现对 2024—2028 年青海生态安全状况的短期预测(表 5)。残差修正 GM(1,1)模型的精度等级提升至“好”(P≥0.95,C≤0.35),Verhulst 模型达到“较好”等级。这表明经过优化后的模型能更准确地反映青海省生态安全的内在演化机制,有效消除了基础模型因数据波动带来的预测偏差。

考虑到 Verhulst 模型在长周期预测中更能体现生态系统的饱和特性,而残差修正模型在短中期更具灵敏度,本文取两者的加权平均值作为最终预测值(图 5)。2024—2028 年,青海省生态安全指数呈持续稳步上升态势,预计从 2023 年的 0.66 增长至 2028 年的 0.73,5 年间年均增长率约为 2.1%,表明青海省生态安全状况将稳定维持在“较安全(IV)”水平。虽然等级名称未直接改变,但指数增长显著优化,2026—2028 年,指数突破 0.70~0.73,无限接近 0.8 的“非常安全(V)”阈值,说明生态系统正经历高质量的累积过程。Verhulst 模型的 S 型曲线特征也提示,随着指数逼近 0.8,未来提升难度将逐渐增大,需要更强的政策干预才能突破等级界线。综上所述,通过多模型优化验证,未来 3 年青海省生态安全将稳固维持“较安全(IV)”水平,并呈现向“非常安全(V)”加速靠拢的良性发展趋势。该结论修正了单一模型的预测偏差,客观揭示了青海省生态文明建设的阶段成效与发展潜力。

表 5 不同预测模型的精度检验结果对比

Table 5 Comparison of accuracy test results for different prediction models

| 模型类型 Model type                         | 后验差比值 C                    | 小误差概率 P                      | 精度等级 Accuracy level |
|-----------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|
|                                         | Posterior variance ratio C | Probability of small error P |                     |
| 基础 GM(1,1) Basic GM(1,1)                | 0.58                       | 0.71                         | 合格 Qualified        |
| Verhulst 模型 Verhulst model              | 0.42                       | 0.84                         | 较好 Relatively good  |
| 残差修正 GM(1,1) Residual-Corrected GM(1,1) | 0.28                       | 0.95                         | 好 Good              |

### 2.4 生态安全空间分异特征

青海生态安全空间格局变化如图 6 所示,5 个阶段各市(州)生态安全空间格局整体呈“东部快速优化、西部稳步提升”的分布特征,改善进程在区域间存在明显差异。以西宁市、海东市为核心的东部地区生态安全水平提升速度与幅度明显高于西部地区(以海西州为主),快速转变为以“非常安全(V)”等级为主的区域。2005 年该区域多为“较不安全(II)”,经过近 20 年的生态治理,特别是 2020 年以后,以海东市为中心的周围地区迅速跃升为“非常安全(V)”,西宁市及周边海北州、黄南州也稳定在“较安全(IV)”以上水平。这表明东部人口密集与经济活跃区通过高效的生态修复工程,实现了生态环

境质量的跨越式提升。以海西州为核心的西部地区,生态安全等级在研究期内虽有一定改善,但空间格局变化相对滞后。该区域大部分地区长期维持在“临界安全(III)”,未形成大范围的“非常安全(V)”区域。这主要受柴达木盆地干旱缺水的自然本底条件及区域内资源开发活动的影响,导致生态恢复难度较大、周期较长。青南高原的玉树州与果洛州地处三江源核心区,生态本底优良。相较于西部其他地区,该区域生态安全等级提升更为快速,自 2015 年起已稳定过渡至“较安全(IV)”水平。尽管目前尚未像东部部分地区达到大面积“非常安全(V)”,但其整体向高等级演进的态势明显,有力印证了国家公园建设及生态保护工程的显著成效。

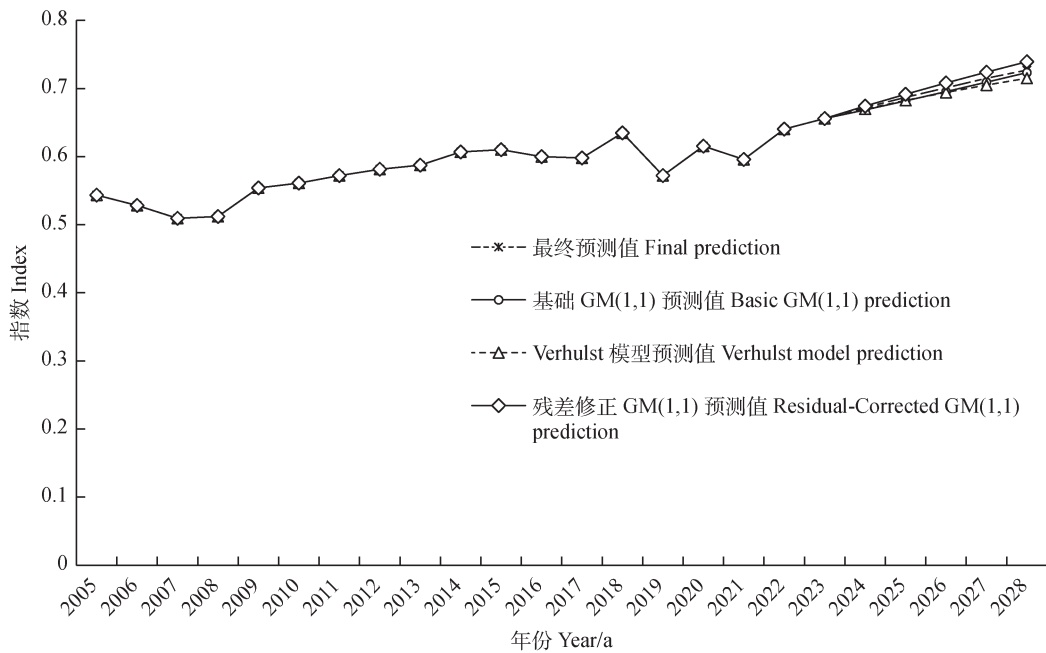


图 5 生态安全综合指数预测趋势

Fig. 5 Predicted trend of the ecological security composite index

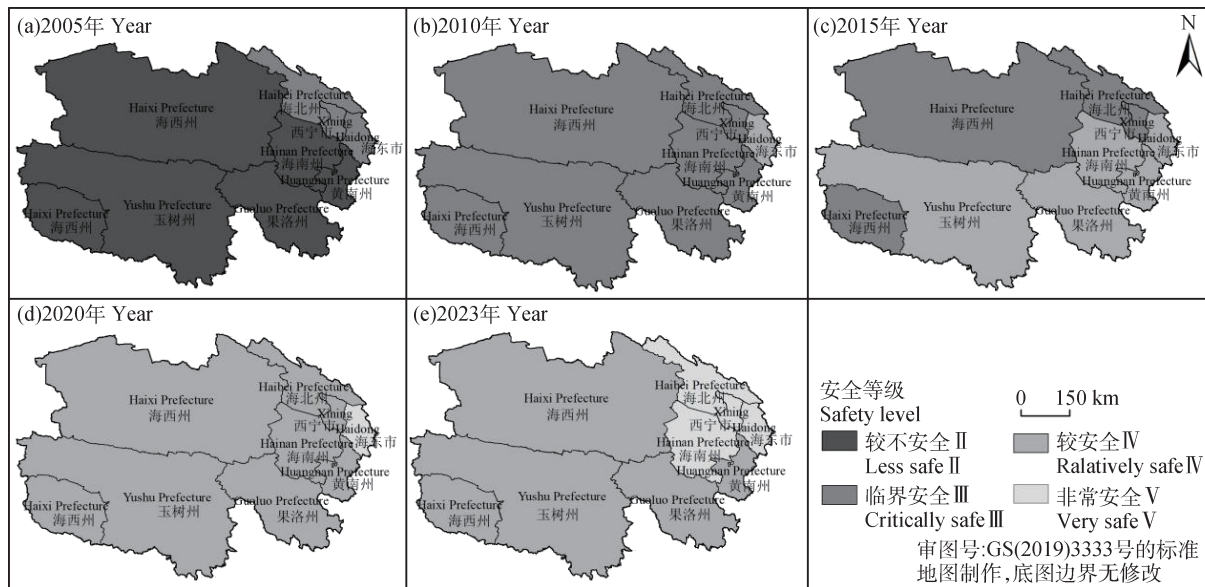


图 6 青海生态安全空间格局变化特征

Fig. 6 Spatial pattern evolution of ecological security in Qinghai

### 3 讨论

本文基于PSR模型构建青海省生态安全评价体系,并结合障碍度分析与残差修正GM(1,1)-Verhulst模型,对2005—2023年生态安全演变特征及短期趋势进行了系统分析。研究结果不仅揭示了青海省生态安全演进的客观规律,更深刻地反映了青海打造生态文明高地背景下,生态系统修复的巨大潜力。

与部分学者仅聚焦单一维度的研究不同<sup>[12,30-31]</sup>,本研究构建了“评价-预测-障碍诊断”动态分析框架,揭示了长时序下青海生态安全的演变规律与驱动机制。结果显示,研究期内青海省生态安全综合指数由2005年的0.54稳步提升至2023年的0.66,增幅达20.68%。该结果与西北地区生态安全持续改善的研究结论基本一致,但在空间格局与子系统贡献结构方面与贾海发等<sup>[32]</sup>存在一定差异。这种差异可能源于指标体系构建、权重确定方

式及评价切入角度不同。

近 20 年来青海省生态安全指数持续提升,响应子系统指数增幅明显(由 0.43 提升至 0.75),成为综合指数增长的主导动力。不同于部分研究认为生态安全改善主要依赖压力缓解或响应作用有限<sup>[33-35]</sup>,本研究呈现出“响应增强-状态优化-综合提升”的结构性演进路径。从 PSR 模型反馈机制看,响应不仅对压力起缓冲作用,更通过制度调节与资源优化配置重塑生态系统状态,降低系统对外部扰动的敏感度,提高生态韧性。这表明,在生态本底脆弱且战略地位重要的区域,生态安全演进已由“压力约束型改善”逐步转向“结构优化型提升”,体现出响应主导的调节阶段特征。

研究期间东部地区生态安全等级提升幅度较大,“非常安全”区域逐渐扩展,这与区域地形条件、人口集聚程度及产业结构优化密切相关。西宁市、海东市在经济发展相对较快的背景下,生态安全水平同步提升,体现出经济增长与生态治理协同推进的阶段性成效。相比之下,西部地区自然环境严酷、生态系统恢复周期较长,生态安全等级提升相对缓慢,但整体保持稳定向好趋势。这表明自然禀赋差异是形成空间分异的重要基础因素,同时也说明高寒脆弱区生态修复具有明显滞后性和长期性。因此,不同区域应在既有生态基础上实施差异化管控策略,东部地区应在巩固高等级安全水平基础上提升生态质量,中西部地区则需在稳定“较安全”成果的同时强化生态修复投入,防止生态退化反弹。

青海省生态安全制约机制经历了从“压力主导”向“状态-响应双约束”的深刻转变。早期人口增长、化肥农药施用等压力类因子是首要障碍,表明发展模式粗放,人与自然关系紧张;随着退牧还草、生态移民等政策的实施,压力障碍显著下降。目前,人均公园绿地面积、植被覆盖率等状态类因子,以及生活污水处理率等响应类短板跃升为核心障碍,标志着生态治理进入了新阶段。未来的生态政策不能仅满足于减少污染和资源消耗,必须更加注重提升生态系统自身的韧性与稳定性。针对压力类障碍,应精准调控资源开发强度,通过产业结构绿色转型(如发展生态旅游、清洁能源)降低资源消耗强度;针对状态类障碍,采用“分区治理+科技赋能”(如退化草地补播、水源涵养林建设),并建立“状态-响应”动态监测预警体系;针对响应类障碍,应优先保障核心因子的治理资金,通过“生态补

偿+碳交易”等市场化手段拓宽资金来源,探索“生态银行”模式,将碎片化生态资产整合打包,吸引金融资本投资。

此外,障碍因子的演变揭示了驱动生态安全改善的内在机制。障碍因子从单一的经济指标演变为复杂的系统协调类指标,意味着问题更具综合性。虽然响应指数总体较高,但状态指数近年来出现波动,这可能暗示治理措施的边际效应正在递减。未来需构建科学的生态投入效益评估体系,确保资金投入能够精准转化为生态系统健康水平的实质性提升。尽管本文构建的残差修正 GM(1,1)-Verhulst 组合模型有效提升了青海省生态安全短期趋势模拟的精度,但仍存在一定局限性。一是预测时域受限,灰色模型属于小样本外推方法,在长周期(10—20 年)尺度上,青海高寒生态系统易受极端气候、政策突变等外部随机因子非线性干扰,导致误差随时间呈指数级累积与发散;二是驱动机制解析尚显单一,未完全量化气候变化与社会经济多维因子的动态交互。未来应引入系统动力学或多模型耦合框架,纳入更多情景变量,拓展中长期演变模拟深度,并结合多源数据揭示生态安全响应阈值,以支撑区域长效管控。

## 4 结论

本研究基于 PSR 模型与 GM(1,1)-Verhulst 组合预测方法,揭示了青海省生态安全演变的内在规律,发现(1)青海省生态安全状态由“临界安全(Ⅲ)”等级跨越至“较安全(Ⅳ)”等级。响应子系统指数远超压力与状态子系统,主导形成“响应强化-状态改善-/综合提升”的演进路径。(2)障碍因子由研究初期的压力主导,逐步转向状态与响应双约束,反映出治理重心已从污染控制转向功能提升与结构优化转变。(3)未来青海生态安全等级提升需通过主动构建空间异质性与精准响应体系,实现从时间依赖型恢复向空间设计型修复的根本性转变。

## 参考文献

- [1] 刘建伟,侯捷. 生态安全问题研究:焦点与展望[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版),2022,32(3):79-86  
LIU J W, HOU J. Research on ecological security: focus and prospect[J]. Journal of Xidian University (Social Sciences Edition), 2022, 32(3): 79-86
- [2] 张贝尔,蒋旭东,孙京禄,等. 安徽省区域生态安全动态评价与预警分析[J]. 中国农学通报,2018,34(27):142-151  
ZHANG B E, JIANG X D, SUN J L, et al. Regional ecological

- security in Anhui: dynamic assessment and early warning[J]. Chinese Agricultural science bulletin, 2018, 34(27): 142-151
- [3] LESTER R B. Building a Sustainable Society [M]. New York: W. W. Norton & Company, 1981: 361-369
- [4] 万正芬, 刘晓晖, 卢少勇, 等. 基于DPSIR模型的长三角地区生态安全评估[J]. 环境影响评价, 2019, 41(5): 22-27, 42  
WAN Z F, LIU X H, LU S Y, et al. Ecological security assessment in Yangtze River Delta Region on DPSIR model [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(5): 22-27, 42
- [5] GENELETTI D, BEINAT E, CHUNG C F, et al. Accounting for uncertainty factors in biodiversity impact assessment: lessons from a case study [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003, 23(4): 471-487
- [6] 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  
PANG Y S, WANG L. A review of regional ecological security evaluation [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S1): 340-344
- [7] 赵飞, 孔维娜, 李捷. 中国农业生态安全研究进展[J]. 山西农业科学, 2007, 35(7): 24-26  
ZHAO F, KONG W N, LI J. The research on agricultural ecological security in China [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2007, 35(7): 24-26
- [8] 胡秀芳, 赵军, 钱鹏, 等. 草原生态安全理论与评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 93-97  
HU X F, ZHAO J, QIAN P, et al. A study on theory and evaluation of grassland ecological security [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(4): 93-97
- [9] 李小玲, 刘逸瑞, 王成, 等. PSR模型在青海省生态安全评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(2): 757-766  
LI X L, LIU Y R, WANG C, et al. Application of the PSR Model in assessing ecological security in Qinghai Province [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(2): 757-766
- [10] 严志强, 唐惠婷, 董凯. 基于DPSIR模型的广西土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2025, 42(3): 40-48  
YAN Z Q, TANG H T, DONG K. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors of Guangxi based on the DPSIR model [J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2025, 42(3): 40-48
- [11] JOGO W, HASSAN R. Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: the case of the Limpopo wetland in southern Africa [J]. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1569-1579
- [12] 蒋贵彦, 运迎霞, 任利剑, 等. 基于改进TOPSIS模型的西部河谷型城市生态安全时空分异及障碍因子诊断[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 342-351  
JIANG G Y, YUN Y X, REN L J, et al. Spatial-temporal discrimination and the related obstacle factor diagnosis for the valley cities urban eco-security in China west based on the improved TOPSIS method [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 342-351
- [13] 刘洋豪, 谢保鹏, 陈英, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的陇中陇东黄土高原土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 130-140  
LIU Y H, XIE B P, CHEN Y, et al. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province based on PSR-TOPSIS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 130-140
- [14] 单姝瑶, 徐浩杰, 杨磊, 等. 祁连山国家公园生态承载力年际变化特征及其影响因素分析[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2191-2198  
SHAN S Y, XU H J, YANG L, et al. Inter-annual variation of ecological carrying capacity and its controlling factors in Qilian Mountain National Park [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 2191-2198
- [15] 李文龙, 魏巍, 宋瑜, 等. 基于能值生态足迹与灰色预测模型的西藏可持续性评价[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 702-710  
LI W L, WEI W, SONG Y, et al. Sustainable development of Tibet based on emergy ecological footprint model [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 702-710
- [16] 周超凡, 王毅勇, 黄榕, 等. 基于PSR-TOPSIS法的宝鸡市大气环境生态安全评价预测及其障碍因子诊断研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(11): 171-176  
ZHOU C F, WANG Y Y, HUANG R, et al. Evaluation and prediction of atmospheric environmental ecological security and diagnosis of obstacle factors in Baoji City based on PSR-TOPSIS method [J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(11): 171-176
- [17] 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  
ZHENG L L, MA X W, AN X, et al. Evaluation and prediction of ecological security in Gansu Province based on DPSIR-GM (1,1) model [J]. Ecological Science, 2022, 41(4): 60-69
- [18] 菅宁红, 陈雅如, 姜雪梅. 青藏高原生态安全评价与提升路径[J]. 林业资源管理, 2022(6): 7-13  
JIAN N H, CHEN Y R, JIANG X M. Evaluation and the improving paths of ecological security of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Forest Resources Management, 2022(6): 7-13
- [19] 乔鹏. 青藏高原极西北部生态安全特征评价分析[D]. 临汾: 山西师范大学, 2022: 8-13  
QIAO P. Evaluation and analysis of ecological security characteristics in the northwest of Tibetan plateau [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2022: 8-13
- [20] 郭玮, 胡西武. 基于“省公顷”生态足迹模型的青海省生态安全评价[J]. 青海科技, 2022, 29(2): 18-24  
GUO W, HU X W. Ecological security assessment of Qinghai Province based on “provincial hectares” ecological footprint model [J]. Qinghai Science and Technology, 2022, 29(2): 18-24
- [21] 程丽, 方江平, 李超逸, 等. 基于能值生态足迹模型的西藏自治区生态安全评价及预测[J]. 高原农业, 2020, 4(5): 523-530  
CHENG L, FANG J P, LI C Y, et al. Evaluation of sustainable development in Tibet based on emergy ecological footprint theory [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2020, 4(5): 523-530
- [22] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J].

- Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423
- [23] MON D L, CHENG C H, LIN J C. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 62(2):127-134
- [24] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(7):1-5  
DENG J L. Overview of grey system[J]. World Science, 1983(7):1-5
- [25] 李中锋, 高婕, 钟毅. 西藏草地生态安全评价研究——基于生态系统服务价值改进的生态足迹模型[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(4):9-19  
LI Z F, GAO J, ZHONG Y. Assessment on grassland ecological security in Tibet based on ecological footprint model improved by ecosystem services value[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(4):9-19
- [26] 马年圣, 支晓娟, 宋雨婷. 基于PSR和GM(1,1)模型的西藏耕地生态安全评价与预测[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11):81-86  
MA N S, ZHI X J, SONG Y T. Evaluation and prediction of the cultivated land ecological security in Tibet based on PSR and GM (1, 1) model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11):81-86
- [27] 杨志, 李才文, 任正龔, 等. 基于熵权TOPSIS模型的宁夏土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4):796-805, 766  
YANG Z, LI C W, REN Z Y, et al. Evaluation of land use performance in Ningxia, China based on entropy-weight TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4):796-805, 766
- [28] 刘思峰, 邓聚龙. GM(1,1)模型的适用范围[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(5):121-124  
LIU S F, DENG J L. The range suitable for GM(1, 1)[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(5):121-124
- [29] 张炳彩. 基于残差修正GM(1,1)模型的银川市空气质量预测分析[J]. 绿色科技, 2019, 21(12):118-122  
ZHANG B C. Prediction and analysis of air quality in Yinchuan City based on residual modified GM(1, 1) model[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019, 21(12):118-122
- [30] 李志英, 薛梦柯, 王绍邦, 等. 基于PSR-PLUS模型的昆明市土地生态安全预警研究[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(4):871-881  
LI Z Y, XUE M K, WANG S B, et al. Early warning of land ecological security in Kunming City based on PSR-PLUS model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(4):871-881
- [31] 吴艳霞, 魏志斌, 王爱琼. 基于DPSIR模型的黄河流域生态安全评价及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6):322-331  
WU Y X, WEI Z B, WANG A Q. Ecological safety evaluation and influencing factors of Yellow River Basin based on DPSIR model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):322-331
- [32] 贾海发, 杜鹏阳. 基于DPSIR-TOPSIS和障碍度模型的青海省生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 农业现代化研究, 2024, 45(2):296-305  
JIA H F, DU P Y. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis in Qinghai Province based on DPSIR-TOPSIS and obstacle degree models[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(2):296-305
- [33] 冉启英, 李宁. 基于压力-状态-响应模型的生态安全评价——以新疆为例[J]. 生态经济, 2015, 31(7):114-117  
RAN Q Y, LI N. Ecological security assessment based on PSR model: a case study of Xinjiang uigur autonomous region[J]. Ecological Economy, 2015, 31(7):114-117
- [34] 周庆婷, 何刚, 杨静雯, 等. 基于PSR模型的土地生态安全评价——以淮北市为例[J]. 安徽理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(6):21-26  
ZHOU Q T, HE G, YANG J W, et al. Land ecological security evaluation based on PSR model—taking Huaibei City as an example[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Social Science), 2019, 21(6):21-26
- [35] 胡玲燕, 邓义, 陈哲, 等. 基于PSR模型的长江经济带生态安全评价研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(2):58-64  
HU L Y, DENG Y, CHEN Z, et al. Research on ecological safety evaluation of Yangtze River economic zone based on PSR model [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2018, 37(2):58-64

(责任编辑 彭露茜)