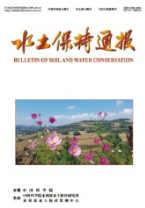

水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：　基于 PSR 模型黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测
作者：　罗鹏，谈存峰，齐婷婷
DOI：　10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.001
收稿日期：　2023-11-16
网络首发日期：　2024-05-30
引用格式：　罗鹏，谈存峰，齐婷婷．基于 PSR 模型黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测[J/OL]．水土保持通报. https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.001

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.001　网络首发时间：2024-05-30 12:34:54
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.x.20240528.1057.002

基于 PSR 模型黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测

罗 鹏[1]，谈存峰[1]，齐婷婷[2]

（1.甘肃农业大学 财经学院，甘肃 兰州 730070；2.宁夏理工学院 文学与艺术学院，宁夏 石嘴山 753000）

摘　要：［目的］开展黄河流域甘肃段生态系统健康水平评价研究，为该流域生态保护与高质量发展提供理论参考与决策依据。［方法］基于 2011—2021 年面板数据，采用 PSR 模型构建黄河流域甘肃段生态系统健康评价指标体系，运用熵值法、综合指数法和 GM—ARIMA 预测模型，对该流域生态系统健康水平进行综合评价和预测。［结果］①2011—2021 年，各市/州生态系统健康综合指数整体呈现上升趋势。具体来看，甘南州黄河重要水源补给生态功能区生态系统健康等级为“劣等”；临夏州生态系统健康等级由“劣等”向“差等”转变。在黄土高原区，兰州市生态系统健康等级由“中等”提升至“良好”，而天水市、定西市和平凉市生态系统健康等级从“劣等”转变为“差等”；白银市和庆阳市的生态系统健康等级仍处于“劣等”。在风沙综合防治区，武威市的生态系统健康等级为“劣等”；②2022—2031 年，生态环境综合指数预测结果呈上升趋势，但生态系统健康等级没有发生明显变化。［结论］黄河流域甘肃段生态系统健康水平整体不高，当前的生态保护和环境改善措施尚未完全解决该地区生态环境面临的挑战，未来需要进一步加强监管和管理，提高该地区生态系统的健康水平。

关键词：黄河流域甘肃段；生态系统健康；PSR 模型；评价预测

文献标识码：A　**文章编号：**1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**X171.1，X826

文献参数：罗鹏，谈存峰，齐婷婷.基于 PSR 模型黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测[J].水土保持通报，2024，44(3)：-. Luo Peng，Tan Cunfeng，Qi Tingting. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River Basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)：-.

Evaluation and Prediction of Ecosystem Health in Gansu Section of Yellow River Basin Based on PSR Model

Luo Peng[1]，Tan Cunfeng[1]，Qi Tingting[2]

(1. *College of Finance and Economic of Gansu Agriculture University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730070，*China*；2. *College of Literature and Art*，*Ningxia Institute of Science and Technology*，*Shizuishan*，*Ningxia* 753000，*China*)

Abstract：[Objective] The health level of ecosystems in the Gansu section of the Yellow River basin was evaluated，in order to provide a theoretical reference and decision-making basis for the ecological protection and high-quality development of the river basin. [Method] Based on panel data from 2011 to 2021，the PSR model was used to build an ecosystem health evaluation index system in the Gansu section of the Yellow River Basin. The entropy method，comprehensive index method，and GM-ARIMA prediction model were used to comprehensively evaluate and predict the health level of ecosystems in the river basin. [Results] ① From 2011 to 2021，the comprehensive index of urban and state ecosystems showed an upward trend. In the important water supply ecological functional area of the Gannan Yellow River，the health level of the Gannan ecosystem was “inferior”，and the health level of the Linxia ecosystem had changed from “inferior” to “poor”. In the Loess Plateau，the health level of the Lanzhou ecosystem had changed from “medium” to

收稿日期：2023-11-16　**修回日期：**2024-01-27

资助项目：甘肃省人文社会科学项目“黄河甘肃段生态环境与区域经济协同发展研究”(22ZZ82)；甘肃省高等学校创新基金“泾河流域甘肃段乡村人居环境治理成效、影响因素与提升路径研究”(04123009)。

第一作者：罗鹏(1997—)，男(汉族)，甘肃省张掖市人，硕士研究生，研究方向为生态经济等。Email：luopeng@gsau.edu.cn。

通信作者：谈存峰(1978—)，男(汉族)，甘肃省兰州市人，硕士，教授，主要从事生态经济等方面的研究。Email：364600588@qq.com。

"good", and the health level of the Tianshui, Dingxi, and Pingliang ecosystems had changed from "inferior" to "poor". The health level of Baiyin and Qingyang ecosystems was "inferior". In the sandstorm comprehensive preventions and control area, the health level of the Wuwei ecosystem was "inferior". ②The comprehensive ecological environmental index from 2022 to 2031 is predicted to increase, but the ecosystem health level will not change significantly. [Conclusion] The overall health level of ecosystems in the Gansu section of the Yellow River Basin is not high. Current ecological protection and environmental improvement measures have not fully solved the challenges faced by the ecological environment in the region. In the future, it will be necessary to further strengthen supervision and management to improve the health level of ecosystems in the region.

Keywords: Gansu section of Yellow River basin; ecosystem health; pressure-state-response modle; evaluation and prediction

黄河流域甘肃段地处黄河上游,是中国重要水源涵养区、北方防沙带建设区和重要生态安全屏障。在黄河流域生态保护和高质量发展国家重大战略推动下,甘肃省启动实施了一大批生态建设和环境治理项目,黄河流域甘肃段生态环境状况显著改善。然而,由于自然环境条件严酷、资源环境承载能力弱、水资源短缺且分布不均和社会经济发展不充分等问题突出,该流域生态系统健康面临巨大压力。客观评价该流域生态系统健康水平,不仅有利于全面准确认识生态系统健康状况,而且可为生态管理与决策提供科学依据,对推进区域生态保护与高质量发展具有积极现实意义。

生态系统健康是反映生态系统结构、功能等特征的综合性概念,用来评价生态系统活力、组织和弹性。学者 Karr J. R.[1]从"生态系统完整性"界定生态系统健康。Schaeffer D. J.[2]认为生态系统没有疾病即健康的,并提出了评价的原则和方法。Rapport D. J.[3]对生态系统健康进行了首次深入的论述,强调了健康的生态系统应具有稳定性和可持续性,在时间尺度上能够维持其组织结构,在空间上能够实现自我调节和对胁迫的恢复。Costanza R.[4]认为健康的生态系统稳定而且可持续,具有活力,能维持其组织且保持自我运作能力,对外界压力有一定弹性,并得到了广泛的认可。生态系统健康评价主要有物种指示法和指标体系法[5]。物种指示法常用于湖泊、流域、海洋等水生生态系统的健康评价中[6-7],但该方法受研究者经验的影响,如选取的物种不能准确反映生态系统健康状况[8-9]。指标体系法解决了物种指示法无法包含社会经济、人类健康等多层面的综合性生态系统健康评价的问题。"压力—状态—响应"模型(pressure-state-response modle, PSR 模型)最初由 Tony Friend 和 David Rapport 提出,是目前应用最广泛的指标体系框架,综合考虑了环境压力、系统现状与系统响应间的内在关系[10-12]。PSR 模型经过调整,得到"驱动力—压力—状态—影响—响应"模型(driving force-pressure-state-impact-response modle, DPSIR 模型)[13]、VOR 模型(vigour-organization-resilience model)[14]和 DSR 模型(driving-state-response modle)[15]等。自回归积分滑动平均模型(autoregressive integrated moving average ,ARIMA 模型)[16]、GM[17]和 BP 神经网络[18]等预测模型相继被广泛应用,但各种模型都有各自的优缺点和适用情况。

目前,国内对于黄河流域生态系统健康评价和生态系统健康预测,多以全流域和单一预测模型为主,针对黄河流域甘肃段生态系统健康评价和组合预测却鲜少研究。鉴于此,本文基于 PSR 模型构建黄河流域甘肃段生态系统健康评价指标体系,采用熵值法、综合指数法综合赋权,评价 2011—2021 年生态系统健康状况,并采用 GM-ARIMA 预测模型,对未来生态系统健康变化趋势进行预测和分析,根据生态系统健康评价和预测结果提出保护及防治措施,为黄河流域甘肃段生态系统健康保护提供理论参考。

1 材料与研究设计

1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段作为中国重要的水资源和生态环境保护区,是甘肃省经济发展的重要支柱。黄河在甘肃境内行程蜿蜒曲折,全程流经 913 km,横跨甘肃省 9 个市(州),总面积达 1.46×10^5 km^2,占全省总面积 32%。黄河上游生态屏障以甘南黄河重要水源补给生态功能区为主体,包括甘南和临夏,其生态特点包括生物多样性、关键水源地和脆弱的生态环境,治理重点主要包括水资源管理、生态保护与恢复、生态补偿与激励等方面。兰州市、白银市、平凉市、天水市、定西市和庆阳市位于黄土高原区,其生态特点主要包括土壤肥沃但容易侵蚀、植被稀疏、水资源匮乏、水土流失严重和生态脆弱性高等,治理重点主要包括水土保持、水资源管理、植被恢复、土地利用规划和生态保护与修复等。武威市位于风沙综合防治区,其生

态特点包括沙漠化倾向、气候干旱、风沙侵袭和生态脆弱性高等,治理重点主要包括沙漠化治理、水资源管理、风沙治理、植被恢复和土地管理规划等。截止2021 年,该研究区(见图 1)常住人口为 1.96×10^{7} 人,地区生产总值7.70×10^{11}元,水土流失面积为 6.91×10^{4} km^2,废污水排放总量为 5.24×10^{8} t,用水量为 5.35×10^{9} m^3。

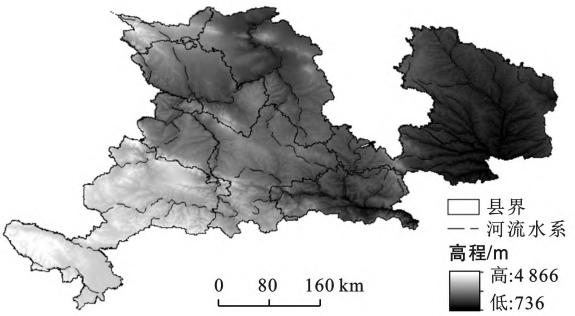

图 1　研究区地形图

Fig.1　Topographic map of research area

1.2　数据来源

本文数据来源于 2012—2022 年《甘肃发展年鉴》《甘肃农村年鉴》《甘肃水资源公报》和《甘肃水土保持公报》。其中,固定资产投资总额、第一产业固定资产投资额、第二产业固定资产投资额和第三产业固定资产投资额等指标个别年份存在数据缺失。为确保数据的完整性和准确性,本文采用前后两年的平均值进行填补。

1.3　研究方法

1.3.1　*极差标准化*　考虑到原始数据各指标量纲和单位不同,为消除不同量纲对数据分析的影响、使正负指标均转化为正向指标且作用方向一致[19],本文采用极差标准化法处理原始数据。

$$x_{ij}'=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)}\quad(\text{正相关})\tag{1}$$

$$x_{ij}'=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)}\quad(\text{负相关})\tag{2}$$

式中:x_{ij}'是标准化后的指标值;x_{ij} 为指标的原始数据。

1.3.2　*综合指数法*　为了减少人为主观判断的干扰,提高决策的客观性和科学性[20],本文采用熵值法确定评价指标权重。

熵值计算(e_j)。设有 m 个评价对象,每个评价对象有 n 个评价指标,样本值为 x_{ij},其中 $i=(1,2\cdots m)$,$j=(1,2\cdots n)$,第 j 个指标的熵值(e_j)计算公式为:

$$e_j=-k\sum_{j=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij}\tag{3}$$

$$k=\frac{1}{\ln m},p_{ij}=\frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}'},\tag{4}$$

假定当 $p_{ij}=0$ 时,$p_{ij}\ln p_{ij}=0$

式中:k 为常数;m 为评价年数;p_{ij} 为第 i 年第 j 项指标所占比例。

权重(w_j)计算。在指标的信息熵确定之后,第 j 个指标的权重(w_j)的计算公式为:

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}e_j}\tag{5}$$

其中:$w_j\in[0,1]$,且$\sum_{j=1}^{m}w_j=1$。

综合指数法可以将多个指标综合考虑,形成一个综合的评价体系,能够全面、系统地反映被评价对象的状况。因此,本文采用综合指数法对黄河流域甘肃段生态系统健康指数进行测算并进行综合评价。综合指数(E)的计算公式为:

$$E=\sum_{j=1}^{a}x_{ij}'*w_j\tag{6}$$

1.3.3　*GM-ARIMA 组合模型*　GM 模型适用于小样本、非线性和非平稳特征的时间序列预测,ARIMA 模型考虑了时间序列中的趋势和季节性变化[21]。GM-ARIMA 是一种组合预测模型,结合了 GM 和 ARIMA 模型各自的优点,克服了单一模型的缺点,从而提高预测结果的准确性。

(1) GM 模型。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=[x^{(0)}(1)-\frac{u}{a}]e^{0}+\frac{u}{a},\quad k=0,1\cdots n-1\tag{7}$$

式中:$\hat{x}^{(1)}(k+1)$为所得预加值,将其还原即可得到灰色预测值;a 为数列发展灰数,用来控制系统发展态势;u 为内生控制灰数,用来反映资料的变化关系。

(2) ARIMA 模型。

$$y_t=\theta_0+\varphi_1 y_{t-1}+\cdots+\varphi_p y_{t-p}+\varepsilon_t-\theta_1\varepsilon_{t-1}-\theta_2\varepsilon_{t-2}-\cdots-\theta_q\varepsilon_{t-q}\tag{8}$$

式中:y_t 和ε_t 分别为 t 时刻的实际值和随机误差;ε_t 需符合正态分布;$\varphi_t=(t=1,2\cdots p)$,$\theta_t=(j=1,2\cdots q)$为模型参数;$p$ 和 q 为模型阶数。

(3) GM-ARIMA 组合模型。

$$Y=\sum_{i=1}^{2}w_i y_i\tag{9}$$

式中:w_i 为 GM 或 ARIMA 模型的权重;y_i 为 GM 或 ARIMA 模型拟合预测结果;Y 为 GM-ARIMA 组合模型的拟合预测结果。

1.4　指标体系构建

综合考虑流域生态系统的自然、社会和经济子系

统之间的相互依存和制约关系，本文采用 pressure-state-response 模型（压力—状态—响应）构建黄河流域甘肃段生态系统健康指标体系[22-23]。压力指标用于衡量人类活动对生态系统的压力程度，状态指标用于评估生态环境的当前状态，响应指标用于衡量外界对生态环境问题所采用活动的有效性和成效，指标体系见表 1。

（1）压力指标 P。工业活动是黄河流域甘肃段的重要经济活动之一，但对生态环境健康影响较大，工业活动通常会产生大量的工业废水和污染物，对水体和大气造成污染。农业是重要的生计来源，然而过度的农业活动会对生态环境产生负面影响，化肥和农药的过量使用会导致土壤和水体的污染，破坏土壤的生物多样性和生态功能。与此同时，居民的生活方式对生态环境也有重要影响，生活废水、污水和垃圾的大量排放对水资源和土地资源的污染尤为严重，在一定程度上生态系统受到损害。

（2）状态指标 S。水质与水资源是生态系统中不可或缺的组成部分，对生态系统的健康状况和生态服务功能具有重要影响，水体的污染和水资源的过度利用都会对生态系统造成不利影响。空气质量的好坏也关系到人们的生活质量和健康状况。

（3）响应指标 R。人类对现有环境状态做出积极响应活动，通过采取各种措施减少污染、保护自然资源、恢复生态系统和实现可持续发展，以此来减轻负面影响、增强可持续性、改善生态健康水平。

表 1 PSR 框架下生态系统健康指标体系及指标权重

Table 1 Ecosystem health indicator system and index weight under pressure-state-response framework

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标属性	指标层权重
黄河流域甘肃段生态系统健康评价	压力（P）	0.200 7	人口密度（P_1）/（人/km^2）	－	0.046 0
			单位面积化肥施用率（P_2）/%	－	0.028 8
			单位面积塑料薄膜使用率（P_3）/%	－	0.004 3
			工业废水排放率（P_4）/%	－	0.021 3
			生活污水排放率（P_5）/%	－	0.073 6
			单位 GDP 工业二氧化硫排放量（P_6）/（t·元$^{-1}$）	－	0.007 3
			单位 GDP 工业氮氧化物排放量（P_7）/（t·元$^{-1}$）	－	0.011 1
			单位 GDP 工业烟（粉）尘排放量（P_8）/（t·元$^{-1}$）	－	0.008 3
	状态（S）	0.124 7	人均公园绿地面积（S_1）/（m^2·人$^{-1}$）	＋	0.058 4
			建成区绿化覆盖率（S_2）/%	＋	0.039 0
			单位 GDP 用水量（S_3）/（m^3·元$^{-1}$）	－	0.004 7
			空气质量达到二级以上天数占全年比重（S_4）/%	＋	0.022 6
	响应（R）	0.674 6	单位设施废水处理能力（R_1）/（10^8 t·套$^{-1}$）	＋	0.093 6
			城市污水处理厂日处理能力（R_2）/（10^4 m^3·d^{-1}）	＋	0.291 6
			生活垃圾日清运量（R_3）/（10^4 t·d^{-1}）	＋	0.215 0
			工业固体废物综合利用率（R_4）/%	＋	0.027 6
			水土流失综合治理率（R_5）/%	＋	0.046 8

注："＋"为正向指标，"－"为负向指标，数值大小代表对生态环境的贡献程度。

2 结果与分析

2.1 生态系统健康指数评价分析

计算得到 2011—2021 年黄河流域甘肃段生态系统健康指数，从压力指数、状态指数、响应指数和综合指数对 9 个市（州）的指数变化进行分析。

2.1.1 压力指数 从表 2 可知，2011—2013 年，各市/州的压力指数呈现波动变化趋势，2014—2015 年，各市/州的压力指数普遍呈上升趋势，表明人类活动对生态系统健康的影响程度增加。武威市压力指数上升幅度最大，由 2014 年的 0.106 9 上升至 2015 年的0.136 5，达到最大值。2011—2015 年，工业废水排放率年均增长 32.55%，单位面积化肥施用率年均增长率为 8.88%，对水体和土壤造成一定程度的污染。2016—2018 年，甘南州压力指数呈现先上升后下降的趋势，而庆阳市、白银市和天水市呈现先下降后上升的趋势，兰州市、临夏州、平凉市、定西市和武威市压力指数呈下降趋势。兰州市下降趋势较明显，由 2016 年的 0.102 4 下降至 2018 年的 0.087 2，2016—2018 年工业废水排放率、单位 GDP 工业二氧化硫排放量和单位 GDP 工业氮氧化物排放量年均下降 31.49%，3.68% 和 6.72%。2019—2021 年，甘南州和兰州市压力指数呈下降趋势，甘南州人口密度、单位面积化肥施用率、单位 GDP 工业氮氧化物排放量和单位 GDP 工业

烟(粉)尘排放量年均下降 2.92%,8.72%,6.62%和 2.58%。在此期间,甘南地区在人口增长控制、化肥使用、工业废水排放以及二氧化硫、氮氧化物和烟尘的工业排放方面取得了显著的成效。兰州市单位面积化肥施用率、单位面积塑料薄膜使用率、工业废水排放率、单位 GDP 工业二氧化硫排放量和单位 GDP 工业氮氧化物排放量年均下降 7.72%,9.48%,48.02%,18.56%和 24.19%。可见,兰州市在减少化肥、塑料薄膜使用以及控制工业废水、二氧化硫和氮氧化物排放方面成效显著,为环境保护和可持续发展做出了很大贡献。庆阳市、临夏州、白银市、平凉市、天水市、定西市和武威市呈现先下降后上升的趋势。

表 2　2011—2021 年黄河流域甘肃段各市/州压力指数

Table 2　Pressure index of each city/state in Gansu section of Yellow River basin from 2011 to 2021

年份	甘南	临夏	兰州	白银	天水	定西	庆阳	平凉	武威
2011	0.127 4	0.108 8	0.087 2	0.119 1	0.093 0	0.104 8	0.119 2	0.107 8	0.104 1
2012	0.127 7	0.097 1	0.091 8	0.116 3	0.090 8	0.106 3	0.116 3	0.104 7	0.107 5
2013	0.127 2	0.097 2	0.101 6	0.139 7	0.091 6	0.106 2	0.116 4	0.100 9	0.108 8
2014	0.126 9	0.099 1	0.092 2	0.113 7	0.091 9	0.104 6	0.116 9	0.096 9	0.106 9
2015	0.143 0	0.125 0	0.120 8	0.143 2	0.110 0	0.121 8	0.143 3	0.109 6	0.136 5
2016	0.131 9	0.108 5	0.102 4	0.129 1	0.109 2	0.123 2	0.133 5	0.109 9	0.113 3
2017	0.137 8	0.107 2	0.097 2	0.128 8	0.107 4	0.119 7	0.129 2	0.105 3	0.111 6
2018	0.126 3	0.104 7	0.087 2	0.161 5	0.136 8	0.118 1	0.130 1	0.104 9	0.104 0
2019	0.143 8	0.111 4	0.101 9	0.133 3	0.113 4	0.125 7	0.135 1	0.109 8	0.115 2
2020	0.130 0	0.091 1	0.081 2	0.117 7	0.094 6	0.106 4	0.113 0	0.100 4	0.099 5
2021	0.127 7	0.114 2	0.079 5	0.124 0	0.095 6	0.107 6	0.113 9	0.101 1	0.102 8

2.1.2　状态指数　从表 3 可知,2011—2019 年,临夏状态指数较其它市州偏低,临夏建成区绿化覆盖率从 15.95%下降到 11.98%,表明城市建设中绿化覆盖不足。单位 GDP 用水量波动较大,2011 年为 2.84×10^{-2} m^3/元,2021 年为 8.88×10^{-2} m^3/元,单位经济产值所需用水量显著增加。2011—2018 年,甘南州状态指数总体高于临夏并呈上升趋势,2015 年达到最低值 0.031 3,但随后出现了明显的上升。甘南州人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率和单位 GDP 用水量年均增长率分别为 5.71%,5.07%和 4.11%,而临夏州人均公园绿地面积年均增长 5.07%,建成区绿化覆盖率和单位 GDP 用水量年均下降 4.01%和 8.06%。兰州市状态指数变化趋势呈现“N”形,2011—2013 年呈上升趋势,人均公园绿地面积从 8.70 m^2/人增加到10.46 m^2/人,建成区绿化覆盖率从 25.08%增加到 34.52%,表明城市绿化水平有所提升。2013—2015 年有所下降,建成区绿化覆盖率下降到 25.80%,2015—2021 年呈现上升趋势,且 2019 年建成区绿化覆盖率达到最大为 34.35%。白银市和天水市的状态指数整体呈上升趋势,该地区加强环境监管、推动生态补偿机制、开展生态修复工作等措施,提高了生态系统健康水平。定西状态指数 2014 年达到最低值 0.057 7,随后呈上升趋势,该地区采取植树造林、水土保持工程、退耕还林等措施,改善该地区的生态系统健康状况。庆阳状态指数变化趋势不稳定,但总体呈上升趋势,当地政府加大对环境保护政策的实施力度,加强对环境违法行为的监管和处罚力度,改善生态环境。平凉市状态指数 2011—2012 年呈上升趋势,2012—2015 年下降,而随后再次上升,表明该地区在生态环境治理和环境保护工作上取得了成效。武威市状态指数变化趋势呈倒“W”形,2011—2013 年呈上升趋势,2013—2015 年下降,2015—2017 年再次上升,2017—2018 年下降,2018—2021 年再次上升,该地区在生态修复工程等方面取得一定成效,改善了生态系统健康状态。

2.1.3　响应指数　从表 4 可知,甘南响应指数变化趋势波动较大,表明该地生态环境保护和改善取得了一定成效。临夏州响应指数整体上呈上升趋势,且 2018 年达到最大值。该地区单位设施废水处理能力为 2.98×10^{10} t/套,城市污水处理厂日处理能力为 5.50×10^{4} m^3/d,生活垃圾日清运量为 460.00 t/d。兰州响应指数 2011—2012 年呈上升趋势,且 2012 年达到最大值;2012—2016 年呈下降趋势,2019—2021 年呈现“V”形变化。2011—2021 年,兰州市污水处理厂日处理能力、工业固体废物综合利用率和水土流失综合治理率年均增长 4.16%,0.54%和 1.43%,通过增加废水治理设施数量、提高工业固体废物综合利用率和加强水土流失治理改善了生态环境。白银市响应指数整体上呈上升趋势,该地区加大了对环保工作的政策支持力度,增加了废水治理设施数量,提升了城

市污水处理厂的日处理能力，同时加强了生活垃圾日清运量的管理力度。天水市响应指数在 2011—2020 年基本保持在相对稳定的水平，且 2021 年达到最大值。在此期间，城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾日清运量、工业固体废物综合利用率和水土流失综合治理率年均增长 5.24%，1.75%，1.60%和 0.17%，在城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾日清运量以及工业固体废物综合利用率等方面得到了提升和改善。定西市响应指数 2011—2017 年呈波动趋势，且 2018 年达到最大值，2018—2021 年呈“下降—上升—下降”的变化趋势，该地区在废水治理、污水处理、垃圾处理、固废利用和水土流失治理方面采取的措施取得了显著的成效。庆阳市响应指数 2011—2015 年的变化趋势不明显，2015—2017 年下降，2017—2021 年再次上升，表明庆阳市在环境保护方面，采取更有效的措施来处理废水、污水、垃圾和固体废物。平凉市响应指数 2011—2012 年呈上升趋势，2012—2013 年下降，2013—2016 年呈上升趋势，2015—2016 年再次下降，2016—2018 年再次上升，2018 年达到最大值，2018—2019 年再次下降，2019—2021 年再次上升，表明平凉市在不同时间段内的环境治理和生态保护工作取得了一定的成效。

表 3 2011—2021 年黄河流域甘肃段各市/州状态指数

Table 3 Status Index of of each city/state in Gansu section of Yellow River basin from 2011 to 2021

年份	甘南	临夏	兰州	白银	天水	定西	庆阳	平凉	武威
2011	0.032 1	0.032 3	0.045 2	0.042 0	0.067 1	0.067 6	0.053 1	0.067 8	0.020 9
2012	0.032 1	0.029 0	0.055 1	0.058 9	0.064 8	0.070 2	0.060 2	0.071 6	0.075 2
2013	0.031 8	0.028 6	0.069 0	0.067 8	0.066 5	0.069 8	0.061 2	0.071 5	0.075 0
2014	0.036 5	0.029 8	0.067 4	0.068 2	0.067 8	0.057 7	0.066 5	0.067 2	0.073 4
2015	0.031 3	0.030 5	0.048 6	0.064 4	0.070 1	0.076 0	0.057 8	0.061 5	0.068 4
2016	0.036 0	0.033 9	0.059 0	0.066 3	0.072 0	0.078 9	0.063 0	0.067 3	0.074 1
2017	0.045 7	0.031 5	0.064 2	0.070 2	0.078 4	0.083 7	0.061 2	0.083 8	0.103 0
2018	0.045 3	0.035 6	0.067 7	0.073 4	0.075 8	0.083 3	0.078 2	0.086 9	0.065 9
2019	0.101 9	0.059 1	0.077 1	0.076 1	0.080 5	0.088 5	0.075 2	0.088 2	0.074 8
2020	0.103 4	0.089 0	0.078 4	0.081 2	0.087 8	0.094 7	0.082 3	0.090 2	0.075 1
2021	0.102 8	0.105 4	0.086 4	0.083 0	0.095 9	0.104 1	0.095 6	0.105 2	0.076 2

表 4 2011—2021 年黄河流域甘肃段各市/州响应指数

Table 4 Response Index of of each city/state in Gansu section of Yellow River basin from 2011 to 2021

年份	甘南	临夏	兰州	白银	天水	定西	庆阳	平凉	武威
2011	0.016 4	0.076 7	0.453 3	0.071 6	0.139 2	0.079 2	0.084 6	0.095 7	0.083 5
2012	0.011 2	0.078 0	0.540 4	0.076 8	0.146 4	0.090 0	0.088 3	0.099 9	0.090 9
2013	0.012 8	0.073 7	0.539 6	0.081 9	0.134 8	0.080 8	0.083 6	0.087 4	0.096 6
2014	0.025 8	0.071 3	0.501 1	0.091 6	0.136 8	0.078 3	0.084 5	0.091 4	0.099 7
2015	0.018 8	0.093 0	0.502 0	0.102 0	0.142 1	0.091 1	0.088 1	0.106 7	0.081 1
2016	0.029 3	0.093 8	0.479 3	0.094 2	0.134 8	0.098 6	0.077 1	0.117 9	0.078 3
2017	0.037 3	0.095 3	0.489 9	0.102 0	0.135 1	0.079 1	0.072 4	0.105 7	0.105 5
2018	0.025 0	0.134 8	0.504 9	0.097 4	0.140 1	0.156 9	0.085 0	0.185 2	0.110 9
2019	0.028 5	0.115 3	0.528 5	0.094 2	0.133 2	0.097 6	0.088 5	0.126 1	0.097 6
2020	0.031 1	0.123 1	0.467 1	0.103 7	0.135 9	0.111 1	0.090 9	0.125 7	0.105 3
2021	0.027 3	0.128 6	0.525 1	0.108 6	0.180 0	0.101 5	0.091 1	0.128 5	0.103 4

2.1.4 生态系统健康综合指数 本文根据黄河流域甘肃段生态系统健康特点，结合研究区近几年生态系统健康的实际情况，按照每段间隔依次增加 0.15，将生态系统健康评价标准分为 5 级，详见表 5。

从表 5，6 可知，2011—2021 年，甘南州黄河重要水源补给生态功能区生态系统健康等级低，甘南州生态系统健康综合指数在 0.17～0.27 之间，质量等级为“劣等”，该地区可能受高海拔山区的自然条件限制，对生态系统健康造成不利影响。首先，人口密度年均增长率仅为 0.04%，相对较少的人口和有限的经济资源，可能制约了该地区在生态保护和可持续发展方面的投入。

表 5　生态系统健康综合指数(E)分级评价标准

Table 5　Graded evaluation criteria of ecosystem health comprehensive index (E)

等级	综合指数值(E)	解释说明
劣等	$0 \leqslant E < 0.35$	环境污染严重,发展落后,系统结构混乱,服务功能完全丧失。
差等	$0.35 \leqslant E < 0.5$	环境污染较严重,发展相对落后,系统结构较混乱,服务功能退化且不健全。
中等	$0.5 \leqslant E < 0.7$	环境受到破坏,发展一般,系统结构有变化,服务功能退化但可基本操作。
良好	$0.7 \leqslant E < 0.85$	环境污染程度较小,发展较好,系统结构较完善,服务功能良好。
优等	$0.85 \leqslant E < 1$	环境几乎无污染,发展良好,系统结构完善,服务功能优秀。

其次,生活污水排放率年均增长 0.12%。由于城市化进程加速和人均生活水平提升,居民的生活方式的改变也间接导致生活污水增加。与此同时,单位面积塑料薄膜使用率年均增长 14.78%,可能与农业生产方式的调整和农业包装物使用的增加等因素相关。最后,工业固体综合利用率年均减少 5.11%,表明工业部门对固体废弃物的综合利用效率呈下降趋势。临夏州生态系统健康综合指数在 0.20～0.35 之间,质量等级由“劣等”向“差等”转变,工业废水的治理、绿化覆盖率的提升,生活污水处理水平的提升以及工业污染物排放的减少,在一定程度上改善了生态环境。黄土高原区生态系统健康等级,1 个市/州由“中等”向“良好”转变,3 个市/州由“劣等”向“差等”转变,3 个市/州处于“劣等”。兰州市综合指数从 0.59 上升至 0.71,质量等级由“中等”向“良好”转变,兰州市在多个关键环境指标方面呈现出显著的改善趋势。具体而言,单位面积化肥施用率、单位面积塑料薄膜使用率年均下降 1.15%和 25.84%,表明农业生产中对化肥和塑料薄膜的使用逐渐减少,减轻了对土壤和水体的环境影响。工业废水排放率年均下降 8.08%,表明工业生产废水得到了有效管理和治理。单位 GDP 工业排放量方面,二氧化硫、氮氧化物和烟(粉)尘排放量年均分别下降 24.69%,22.77%和 10.80%,表明在工业发展过程中生态环境状况得到了改善。人均公园绿地面积年均增长 7.29%,建成区绿化覆盖率年均增长2.46%,表明城市绿化水平显著提高,为改善城市居民的生活环境作出了重要贡献。空气质量达到二级以上的天数占全年比重年均增长 2.05%,表明空气质量有所改善。城市污水处理厂日处理能力年均增长4.16%,表明污水处理能力的不断提升。工业固体废物综合利用率年均增长 0.54%,水土流失综合治理率年均增长 1.43%,说明废物资源的有效利用和水土保持工作逐渐取得成效。白银市综合指数在 0.23～0.33 之间,质量等级为“劣等”,该地区面临工业排放、农业污染和水资源开发等压力。天水市综合指数在 0.29～0.37 之间,质量等级由“劣等”向“差等”转变,由于工业排放、农业活动和城市化进程加速可能导致大气污染、水污染和土地退化等问题。定西市综合指数在 0.24～0.36 之间,质量等级由“劣等”向“差等”转变,该地区生态系统健康基本状态相对较差,包括水质恶化和土壤退化等。庆阳市综合指数在 0.26～0.30 之间,质量等级为“劣等”,该地区在环境保护和生态建设方面还存在一些问题,生态系统健康基本状态相对较差。平凉综合指数在 0.26～0.38 之间,质量等级由“劣等”向“差等”转变,该地在减少污染源和加强水资源管理方面得到了改善。风沙综合防治区生态系统健康等级低,武威综合指数在 0.21～0.32 之间,质量等级为“劣等”。

表 6　2011—2021 年黄河流域甘肃段各市/州生态系统健康综合指数

Table 6　Comprehensive ecosystem health index of each city/state in Gansu section of the Yellow River basin from 2011 to 2021

项目	甘南	临夏	兰州	白银	天水	定西	庆阳	平凉	武威
2011	0.18	0.22	0.59	0.23	0.30	0.25	0.26	0.27	0.21
2012	0.17	0.20	0.69	0.25	0.30	0.27	0.26	0.28	0.27
2013	0.17	0.20	0.71	0.29	0.29	0.26	0.26	0.26	0.28
2014	0.19	0.20	0.66	0.27	0.30	0.24	0.27	0.26	0.28
2015	0.19	0.25	0.67	0.31	0.32	0.29	0.29	0.28	0.29
2016	0.20	0.24	0.64	0.29	0.32	0.30	0.27	0.29	0.27
2017	0.22	0.23	0.65	0.30	0.32	0.28	0.26	0.29	0.32
2018	0.20	0.28	0.66	0.33	0.35	0.36	0.29	0.38	0.28
2019	0.27	0.29	0.71	0.30	0.33	0.31	0.30	0.32	0.29
2020	0.26	0.30	0.63	0.30	0.32	0.31	0.29	0.32	0.28
2021	0.26	0.35	0.69	0.32	0.37	0.31	0.30	0.33	0.28

2.2 GM-AMIRA 模型预测

从表 7 可知，2022—2031 年，黄河流域甘肃段生态系统健康综合指数预测结果呈现增长趋势，但生态系统健康等级未发生明显的变化。可能有以下原因：①生态系统健康变化具有复杂性和滞后效应，改善生态环境是一个长期而复杂的过程，短期内的努力难以有显著的质量变化。生态系统的恢复和修复需要时间，而经济发展和人类活动对环境造成的损害并不会立即消失。②黄河流域甘肃段生态环境脆弱，受到人口增加、经济发展压力大以及资源利用不合理等因素的影响，生态系统健康改善步伐缓慢。人口增长和经济发展给生态系统带来了压力，而资源利用不合理进一步加剧了生态质量问题。③生态环境保护意识的提升和生态文明建设的推进也需要时间来形成良好的效果。尽管近年来，政府加大了环境保护和治理力度，但要形成真正的环保效果需要全社会形成一种普遍的环保理念和责任意识，并将其转化为实际行动。④环境治理和保护需要多方合作，涉及政府、企业和公众的参与。政府在政策和法规上的引导作用至关重要，企业应承担起环境责任并采取可持续的发展策略，而公众应增强环保意识并积极参与环保行动。通过长期持续的努力、综合性的措施和各方共同参与，才能改善和提升黄河流域甘肃段生态系统健康。

表 7 2022—2031 年黄河流域甘肃段各市/州生态系统健康综合指数预测

Table 7 Forecast for comprehensive ecosystem health index of each city/state in Gansu section of the Yellow River basin from 2022 to 2031

州/市	模型	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年	2031 年
甘南	GM(1,1)	0.28	0.29	0.30	0.31	0.33	0.34	0.35	0.37	0.38	0.39
	ARIMA	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	GM-ARIMA	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.28
临夏	GM(1,1)	0.34	0.36	0.38	0.39	0.41	0.43	0.45	0.47	0.48	0.50
	ARIMA	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29
	GM-ARIMA	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36
兰州	GM(1,1)	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64
	ARIMA	0.66	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
	GM-ARIMA	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
白银	GM(1,1)	0.33	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39
	ARIMA	0.31	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	GM-ARIMA	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32
天水	GM(1,1)	0.36	0.37	0.38	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.42	0.43
	ARIMA	0.36	0.34	0.38	0.39	0.36	0.38	0.40	0.38	0.39	0.42
	GM-ARIMA	0.36	0.35	0.38	0.38	0.37	0.39	0.40	0.39	0.40	0.42
定西	GM(1,1)	0.34	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.38	0.39	0.40	0.41
	ARIMA	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	GM-ARIMA	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33
庆阳	GM(1,1)	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.33	0.34	0.34	0.35
	ARIMA	0.30	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	GM-ARIMA	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
平凉	GM(1,1)	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44
	ARIMA	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	GM-ARIMA	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.35
武威	GM(1,1)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30
	ARIMA	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	GM-ARIMA	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28

注：GM(1,1)模型结果权重为 35.23%，ARIMA 模型结果权重为 64.77%。

3 结 论

本文基于 2011—2021 年黄河流域甘肃段 9 个州/市面板数据，采用 PSR 模型构建黄河流域甘肃段生态系统健康指标体系，运用熵值法、综合指数法和 GM-AMIRA 预测模型，对该流域生态系统健康状况

进行评价和预测,得出以下结论。

(1) 2011—2015 年,黄河流域甘肃段生态系统健康压力指数增加,其中武威市压力指数最大,该地区主要受工业废水排放和化肥施用率增加的影响。2016—2021 年,甘南州和兰州市压力指数呈下降趋势,主要在人口控制、废水排放和化肥使用方面有显著的改善。

(2) 2011—2019 年,临夏状态指数相对较低,主要体现在城市建设绿化覆盖不足。2011—2018 年,甘南州状态指数总体上升,在绿地面积、建成区绿化覆盖率等方面得到改善。

(3) 2011—2021 年,甘南州、兰州市和白银市采取了有效的生态环境保护和改善措施,响应指数呈上升趋势。

(4) 2011—2021 年,各市/州生态系统健康综合指数整体呈现上升趋势。具体来看,甘南黄河重要水源补给生态功能区生态系统健康等级为“劣等”;临夏州生态系统健康等级由“劣等”向“差等”转变。在黄土高原区,兰州市生态系统健康等级由“中等”提升至“良好”,而天水市、定西市和平凉市生态系统健康等级从“劣等”转变为“差等”;白银市和庆阳市的生态系统健康等级仍处于“劣等”。在风沙综合防治区,武威市的生态系统健康等级为“劣等”。

(5) 2022—2031 年,黄河流域甘肃段生态系统健康综合指数预测结果呈现增长趋势,但生态系统健康等级未发生明显变化。

4　对策建议

(1) 加快工业污水治理与城市绿化提升。建立严格的法规和标准,明确工业企业和农业生产者在废水处理和化肥使用方面的责任。监管机构加强对废水排放和化肥施用过程的实时监测,确保符合严格的环保标准。实施绿色农业措施,减少对水体和土壤的污染,推动农业实践向有机农业、精准施肥等环保型方式转变。同时,增加城市绿化资金和基础设施建设的投入,建设更多的绿化项目和公共绿地,提高城市植被覆盖率,从而改善环境质量。

(2) 加强环境监管与生态修复。加强环境监管体系建设,确保环境政策的全面实施和执行。加大对企业和单位的监督力度,建立健全环境排污监测与处理机制,加大处罚力度威慑和纠正环境违法行为。投入更多资源和资金,持续推进生态修复工程。加大植树造林的力度,在退耕还林还草和城市建设中增加绿化覆盖面积。同时,加强水土保持工程,修复受损的土地和水域,提高生态系统的稳定性和抗灾能力。

(3) 提升公众参与意识。开展定期的环保主题宣传活动,包括普及环保知识、培训环保技能以及组织环保行动等,吸引更多社区居民积极参与,提高公众对生态环保的认知和参与度。在推动公众参与的过程中,倡导社区互助和合作,建立各项环保项目的具体执行方案,激发社区居民的环保热情,确保环保计划的顺利实施。此外,鼓励社区居民主动参与环保行动,并为那些积极参与的个人和群体提供荣誉和奖励,进一步激励和肯定他们的贡献。

(4) 建立协同合作与监测评估模式。确立跨部门协同合作的机制,明确各部门的职责和协作方式。建立跨部门联防联控的工作机构或委员会,确保各部门在生态系统健康管理中发挥各自的优势。在机制建设的同时,建立生态系统监测网络,涵盖陆地、水域、空气等多个方面的监测点。为实现生态系统的实时监测和数据采集,采用先进的监测技术和设备,深入了解生态系统的动态变化,为科学决策提供精准数据支持。

参考文献(References)

[1] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, et al. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. [J]. Illinois Natural History Survey, 1986 (Special Publication 5):1-28.

[2] Schaeffer D J, Herricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health [J]. Environmental Management, 1988,12(4):445-455.

[3] Rapport D J, Whitford W G. How ecosystems respond to stress [J]. BioScience, 1999,49(3):193-203.

[4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387:253-260.

[5] 周静,万荣荣.湿地生态系统健康评价方法研究进展[J].生态科学,2018,37(6):209-216.
Zhou Jing, Wan Rongrong. Advancesin methods of wetland ecosystem health evaluation [J]. EcologicalScience, 2018,37(6):209-216.

[6] Fellows C S, Clapcott J E, Udy J W, et al. Benthic metabolism as an indicator of stream ecosystem health [J]. Hydrobiologia, 2006,572(1):71-87.

[7] Newman S H, Chmura A, Converse K, et al. Aquatic bird disease and mortality as an indicator of changing ecosystem health [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007,352:299-309.

[8] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of Earth's ecosystems [J]. Science, 1997,277(5325):494-499.

[9] Boulton A J. An Overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis [J]. Freshwater Biology, 1999,41(2):469-479.

[10] 麦少芝,徐颂军,潘颖君.PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J].热带地理,2005,25(4): 317-321.
Mai Shaozhi, Xu Songjun, Pan Yingjun. Application of the PSR model to the evaluation of wetland ecosystem health [J]. Tropical Geography, 2005,25(4):317-321.

[11] Whitall David, Bricker Suzanne, Ferreira Joao. Assessment of eu-trophication in estuaries: Pressure-state-response and nitrogen source apportionment [J]. Environmental Management, 2007,40(4):678-690.

[12] 李雪宁,徐先英,郑桂恒,等.石羊河下游人工梭梭林健康评价体系构建及应用研究[J].干旱区研究,2022,39(3):872-882.
Li Xuening, Xu Xianying, Zheng Guiheng, et al. A health evaluation of a Haloxylon ammodendron plantation in the Shiyang River lower reaches [J]. Arid Zone Research, 2022,39(3):872-882.

[13] Datzberger Simone. Why education is not helping the poor: Findings from Uganda [J]. World Development, 2018,110:124-139.

[14] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[15] Zhang Feng, Zhang Jiquan, Wu Rina, et al. Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016,30(4):1235-1247.

[16] 李政,何伟,潘洪义,等.基于熵权 TOPSIS 法与 ARIMA 模型的四川省耕地生态安全动态预测预警[J].水土保持研究,2018,25(3):217-223.
Li Zheng, He Wei, Pan Hongyi, et al. Dynamic prediction and early warning of cultivated land ecological security in Sichuan Province based on improved TOPSIS method and ARIMA model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(3):217-223.

[17] 王晓君,吴敬学,蒋和平.中国农村生态环境质量动态评价及未来发展趋势预测[J].自然资源学报,2017,32(5):864-876.
Wang Xiaojun, Wu Jingxue, Jiang Heping. Dynamic assessment and trend prediction of rural eco-environmental quality in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(5):864-876.

[18] 路春燕,卫海燕,白俊燕.基于 BP 神经网络的城市化发展生态环境压力响应研究:以延安市为例[J].干旱区资源与环境,2012,26(4):61-66.
Lu Chunyan, Wei Haiyan, Bai Junyan. Response research of eco-environment stress and urbanization based on BP artificial neural network-Yan'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(4):61-66.

[19] 王富喜.山东半岛城市群人口—土地城镇化质量测度与协调发展研究[J].地理科学,2020,40 (8):1345-1354.
Wang Fuxi. Study on the quality measurement and coordinated development of population-land urbanization in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(8):1345-1354.

[20] 徐丽婷,姚士谋,陈爽,等.高质量发展下的生态城市评价:以长江三角洲城市群为例[J].地理科学,2019,39(8):1228-1237.
Xu Liting, Yao Shimou, Chen Shuang et al. Evaluation of eco-city under the concept of high-quality development: A case study of the Yangtze River delta urban agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019,39(8):1228-1237.

[21] 李志超,刘升.基于 ARIMA 模型、灰色模型和回归模型的预测比较[J].统计与决策,2019,35(23):38-41.
Li Zhichao, Liu Sheng. Prediction Comparison Based on ARIMA model, grey model and regression model [J]. Statistics & Decision, 2019,35(23):38-41.

[22] 魏竞超,李自涵,董媛媛.基于压力—状态—响应(PSR)模型的黄河流域环境安全评价体系法治化研究[J].中国环境监测,2023,39(1):19-28.
Wei Jingchao, Li Zihan, Dong Yuanyuan. Legalization of environmental safety assessment system in the Yellow River basin based on pressure-state-response (PSR) model [J]. Environmental Monitoring in China, 2023,39(1):19-28.

[23] 胡醒木子.内蒙古沿黄地区经济发展—生态环境—水资源耦合协调研究[J].地域研究与开发,2023,42 (6):165-171.
HU Xingmuzi. Coupling coordination of economic development, ecological environment and water resources: A case study of the Yellow River region in Inner Mongolia [J]. Areal Research And Development, 2023,42 (6):165-171.