

基于 BP 神经网络的工业生态安全动态评价及障碍因子诊断

赵杨秋, 何刚, 王莹莹, 阮君, 张朋

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 对安徽省工业生态安全进行评价和预测, 为安徽省工业生态安全可持续发展提供科学依据。[方法] 基于压力、状态、响应框架和生态、环境、经济、社会框架构建工业生态安全评价指标体系, 采用聚类工具进行安全等级划分, 结合熵权法和综合指数法评价 2009—2018 年安徽省工业生态安全水平, 运用 BP 神经网络模型对 2019—2025 年工业生态安全水平进行科学预测。[结果] ①从总体上看, 2009—2018 年安徽省工业生态安全评价指数呈波动上升趋势, 安全等级由“临界安全”上升为“较安全”; ②从各子系统来看, 2009—2018 年压力子系统的评价指数呈上升态势, 状态和响应子系统的评价指数呈先下降后上升态势; ③BP 神经网络预测结果显示: 2019—2025 年安徽省工业生态安全态势总体呈波动上升状态, 处于“临界安全”向“较安全”转变态势; ④影响安徽省工业生态安全的主要障碍因素包括第二产业从业人员比例、第二产业占 GDP 的比例、污水集中处理率、森林覆盖率和人口密度, 是今后调控的方向。[结论] 研究期间安徽省工业生态安全波动明显, 但总体上呈上升趋势, 工业生态安全得到明显的改善。

关键词: PSR-EEES 模型; BP 神经网络模型; 生态安全评价; 障碍因子; 安徽省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)03-0127-10

中图分类号: F205, X826

文献参数: 赵杨秋, 何刚, 王莹莹, 等. 基于 BP 神经网络的工业生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 127-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.018; Zhao Yangqiu, He Gang, Wang Yingying, et al. Dynamic assessment and obstacle factor diagnosis of industrial ecological safety based on BP neural network [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 127-136.

Dynamic Assessment and Obstacle Factor Diagnosis of Industrial Ecological Safety Based on BP Neural Network

Zhao Yangqiu, He Gang, Wang Yingying, Ruan Jun, Zhang Peng

(College of Economic and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] The industrial ecological safety of Anhui Province was evaluated and predicted, in order to provide a scientific basis for the sustainable development of industrial ecological safety in Anhui Province. [Methods] Pressure, state, response framework and ecological, environmental, economic, and social framework were used to establish the industrial ecological safety evaluation index system. Clustering tools were used to classify safety levels, and combined the entropy weight method and the comprehensive index method to evaluate the industrial ecological safety level in Anhui Province from 2009 to 2018. A BP neural network model was employed to scientifically predict the industrial ecological safety level in Anhui Province from 2019 to 2025. [Results] ① From an overall perspective, the industrial ecological safety evaluation index of Anhui Province from 2009 to 2018 showed a fluctuating upward trend, and the safety level rose from “critical safety” to “safer”. ② From the perspective of each subsystem, the evaluation index of the pressure

收稿日期: 2021-01-15

修回日期: 2021-03-12

资助项目: 安徽省哲学社会科学规划项目“淮河生态经济带产业转型升级与生态环境的耦合协调发展研究”(AHSKY2019D026); 安徽理工大学研究生创新资助项目“淮河生态经济带经济发展与生态环境的共生性研究”(2020CX2089), “淮河生态经济带新型城镇化对生态环境质量影响研究”(2019CX2075)

第一作者: 赵杨秋(1995—), 女(汉族), 江苏省南通市海门区人, 硕士研究生, 主要研究方向为工业工程。Email: yzqjiayou@126.com。

通讯作者: 何刚(1966—), 男(汉族), 安徽省合肥市庐江县人, 博士, 研究员, 主要从事区域生态安全、生态风险研究。Email: hgang0111@163.com。

subsystem showed an upward trend from 2009 to 2018, and the evaluation indexes of the state and response subsystems first declined and then increased. ③ The overall situation of industrial ecological state in Anhui Province from 2019 to 2025 fluctuated and rose, and the safety level rose from “critical safety” to “safer”. ④ The main obstacles affecting the industrial ecological safety of Anhui Province included the ratio of employees in the secondary industry, the ratio of the secondary industry to GDP, and the ratio of centralized sewage treatment, forest coverage, and population density, which providing direction for future regulation. [Conclusion] The industrial ecological state in Anhui Province fluctuated noticeably during the study period, but showed an overall upward trend, and the industrial ecological state was significantly improved.

Keywords: PSR-EEES model; BP neural network model; ecological safety evaluation; obstacle factor; Anhui Province

生态安全是一个十分复杂的问题且是影响区域可持续发展的关键问题。2020 年两会期间,习近平同志进一步强调“经济发展不能以破坏生态为代价,生态本身就是经济,保护生态就是发展生产力”,因此对生态安全进行评价研究十分重要,有利于提高生态安全水平和促进工业经济绿色发展。生态安全是对维护和保障生态环境系统和社会经济系统之间协调、稳定、健康和可持续发展关系的探讨^[1]。生态安全评价是根据研究对象和研究目的,对特定时空范围内生态安全状况的定性和定量描述^[2],促进和维护生态系统的稳定。

国外生态安全评价主要从生态风险评价和预报^[3]、环境冲突评价^[4-5]、自然灾害评价等^[6]方面进行研究,研究模型主要有 PSR (press-state-response)^[7]、系统动力学模型^[8]、变权模型等^[9],已经具备全面的评价体系和系统的研究方法。国内生态安全评价研究内容重点在评价方法^[10]和评价系统构建^[11]两方面,研究维度由土地^[12]延伸到工业、旅游^[13]、公路路域环境、农田^[14]、水环境^[15]、湿地^[16]、景观等^[17]方面。21 世纪初期,中国才开始对工业这个维度的生态安全进行研究,研究领域包括工业生态安全评价、工业生态安全预警、工业生态脆弱性等^[18]。生态安全评价方法主要有正态云模型、综合指数法、TOPSIS 法 (technique for order preference by similarity to ideal solution) 和云物元模型等。在预测方法上,又以灰色理论^[19]、情景分析^[20]、RBF 神经网络 (radial basis function neural network)^[21]、可拓分析^[22]、BP 神经网络 (back-propagation neural network) 等^[23]预测方法为主,余文波等^[24]对土地进行评价和调控,采用灰色预测模型对湖南省未来 6 a 的生态安全值进行预测;周彬等^[25]通过灰色系统 GM(1,1) 模型和 RBF 神经网络模型对普陀山岛旅游生态安全发展趋势进行预测,并将两种预测结果进行比较选优;高家骥等^[26]

研究南四湖湖泊湿地生态环境状态,运用 BP 神经网络模型对未来 10 a 警度发展进行预测。以上研究内容主要偏向于单方面因素的研究,片面性较强,缺乏综合性交叉及定量实证研究,又因为关于工业生态安全方面的研究起步较晚研究时间较短,因而提出两方面的不足:①生态安全等级的分类多以平均分类法进行划分,因而等级的判断精准度不够;②对于生态安全评价预测方面的研究不够,没有考虑到预测精度问题及未来区域发展对生态安全的作用影响。

BP 神经网络是 20 世纪 80 年代 Rumelhart 和 McClelland 提出的一种以误差为依据进行多次反向传播训练的多层前馈网络^[27],通过逼近非线性连续函数时改变神经元个数的方法提高模型的准确度,且具有高度自学和自适应能力。因此,本研究基于 PSR-EEES 模型构建工业生态安全评价指标体系并测算安徽省工业生态安全水平,借助 BP 神经网络算法对安徽省工业生态安全进行预测,旨在通过该算法预测出后续几年安徽省工业生态安全水平,从工业维度提高区域安徽省生态安全水平,为促进安徽省区域可持续发展提供依据。

1 指标体系构建及数据来源

1.1 研究区概况

安徽省位于中国长江下游,淮河中游,处于 114°54′—119°37′ E, 29°41′—34°38′ N。安徽省的第一产业和第二产业一直以来较为兴盛,2019 年安徽省生产总值为 3.71×10^{12} 元,其中工业增加值为 1.15×10^{12} 元,比例为 30.86%,展现了庞大的工业规模,为全省社会经济的发展及生态建设提供了重要的物质基础。但由于工业化、城市化高速推进,工业生产过程中三废的产生量急剧增加,未经处理的化学物质投放速度超过了生态系统的自我修复速度,加之无计划开采生态资源及生产生活中的大量流费,资源破

坏生态污染问题蔓延甚至呈扩大趋势,全省工业生态安全面临沉重压力,虽环保力度在不断加大,但形势仍不容乐观。

1.2 指标体系构建

工业生态安全评价指标体系是一个融合自然、环境、经济、社会等多方面的复合系统,从自然生态环境安全角度开展研究,同时对经济生态环境、社会生态环境安全领域也有涉及,具有综合复杂性和动态变化性的特点,其指标的选择要结合工业生态安全的特点,除了能反映工业生态状况的实际情况,也应该考虑到人类相关活动对工业生态安全的潜在影响和其他重要因素。最初在 1979 年由加拿大统计学家 David J. Rapport 和 Tony Friend 提出、后由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)进一步完善的 PSR 模型从压力、状态、响应 3 方面反映了生态环境系统与社会经济系统之间的相互作用关系,有助于系统性的对工业生态安全指标的选取进行指导^[28]。

本研究基于 PSR 模型,加入自然、环境、经济和社会 4 个指标因素,组合形成 PSR-EEES 模型(press-state-response—ecology-environment-economy-society),强调压力、状态、响应 3 方面均具有生态、环境、经济和社会 4 方面的影响因素,有利于从动态的角度更好的诠释工业生态安全的演变过程(图 1)。

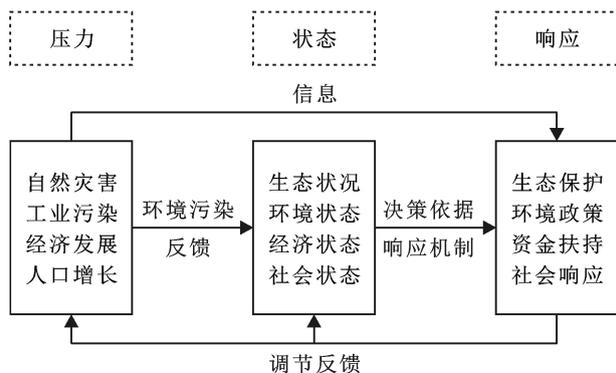


图 1 PSR-EEES 模型运行机制

基于 PSR-EEES 模型的工业生态安全评价的运行机制中,压力表征人类的经济和社会活动对环境的作用,是造成工业生态安全恶化的原因,选取单位 GDP 能耗、生态环境补水率、GDP 增长率、人口密度等指标从生态压力、环境压力、经济压力和社会压力 4 方面进行构建;状态表征在压力的影响下,工业生态安全的状态和变化的情况,选取森林覆盖率、水土协调度、人均工业产值、失业率等指标从生态状况、环境状态、经济状态和社会状态 4 方面进行构建;响应

表征面临压力和状态情况下,为了规避生态风险,促进工业生态的可持续性发展采取的补救措施,选取自然保护区面积比例、工业固体废弃物综合利用率、工业污染投资额、每万人大学生数等指标从生态、环境、经济和社会响应 4 方面进行构建。结合工业生态安全内涵,参考相关学者研究成果^[29],本研究构建系统性的安徽省工业生态安全评价指标体系(表 1)。

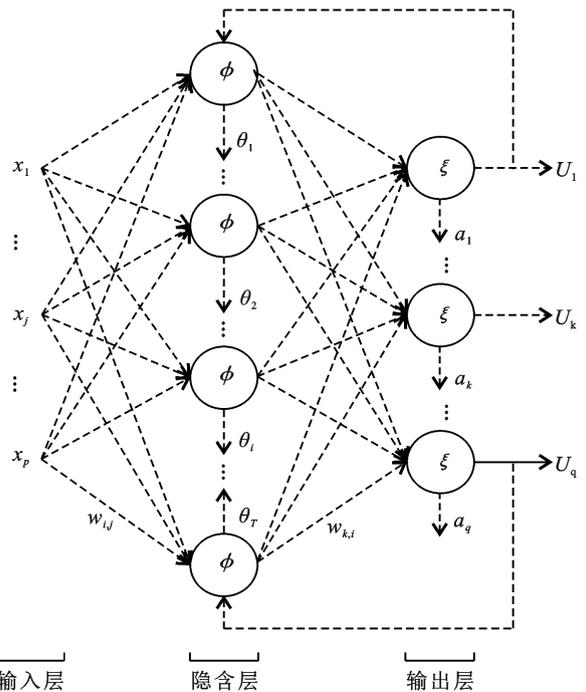
1.3 数据来源

数据来源参考《中国统计年鉴(2010—2019 年)》《安徽统计年鉴(2010—2019 年)》《安徽省环境状况公报(2009—2018 年)》《安徽省环境质量报告书(2009—2018 年)》及《安徽省国民经济和社会发展十三五规划》等,其中生产总值相关数据均平减为 2008 年不变价。

2 研究设计及等级判别

2.1 BP 神经网络预测方法

2.1.1 BP 神经网络结构 BP 神经网络运行原理为:通过无数次正向与反向数据样本传播,修正神经网络之间的权值和阈值使得输出样本和最终输出样本之间的误差处于预定范围,则最终输出样本是十分精确的,图 2 为其正、反向传播修正学习的算法结构。



注: ϕ, ξ 为激活函数; x_j 为输入层节点 j 的输入值; θ_i 为隐含层节点的阈值; a_k 为输出层的阈值; w_{ij}, w_{ki} 分别为输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的权值。 $j=1, 2, \dots, p; i=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, q$ 。

图 2 3 层 BP 神经网络结构

2.1.2 BP 神经网络学习 BP 神经网络正向学习过程为原始样本从输入层 p 开始,途径隐含层 T ,最后传到输出层 q ,3 层 BP 神经网络 p - T - q 数学模型为:

$$U_i = \varphi \left(\sum_{j=1}^p w_{ij} x_j + \theta_i \right) \quad (1)$$

$(j=1, 2, \dots, p; i=1, 2, \dots, T)$

$$U_k = \xi \left[\sum_{i=1}^T w_{ki} \varphi \left(\sum_{j=1}^p w_{ij} x_j + \theta_i \right) + a_k \right] \quad (2)$$

$(j=1, 2, \dots, p; i=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, q)$

式中: U_i, U_k 分别为隐含层和输出层的输出模型; φ, ξ 为激活函数; w_{ij}, w_{ki} 分别为输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的权值; θ_i 为隐含层节点的阈值; a_k

为输出层的阈值; x_j 为输入层节点 j 的输入值。

误差反向传播通过调整各层神经元节点之间的权值和阈值使之达到预期的误差范围, e_k 为网络预测误差; η 为学习速率, 则输出层和隐含层修正的权值和阈值为:

$$w'_{ij} = w_{ij} + \eta U_i (1 - U_i) x_j \sum_{k=1}^q w_{ki} e_k \quad (3)$$

$$w'_{ki} = w_{ki} + \eta U_i e_k \quad (4)$$

$$\theta'_i = \theta_i + \eta U_i (1 - U_i) \sum_{k=1}^q w_{ki} e_k \quad (5)$$

$$a'_k = a_k + e_k \quad (6)$$

式中: w'_{ij}, w'_{ki} 为修正误差后的权重, θ'_i, a'_k 为修正误差后的阈值。

表 1 安徽省工业生态安全评价指标体系

目标	系统	因素	指标	计算方法	属性	权重
安徽省工业生态安全科学评价指标体系	压力 P	生态压力	人均水资源量 P_1 (m ³ /人)	水资源总量/总人口	正	0.043 5
			单位 GDP 能耗 P_2 (t 标准煤)	直接获取	负	0.024 6
		环境压力	万元工业增加值废水排放量 P_3 /(t·10 ⁻⁴ 元)	工业废水排放量/工业增加值	负	0.018 3
			万元工业增加值废气排放量 P_4 /(t·10 ⁻⁴ 元)	工业废气排放量/工业增加值	负	0.019 9
			生态环境补水率 P_5 /%	生态环境补水量/总用水量×100%	正	0.025 9
		经济压力	GDP 增长率 P_6 /%	增长量/基期水平×100%	正	0.035 1
			人均生产总值 P_7 (元/人)	地区生产总值/总人口	正	0.029 8
			TS 值 P_8 /%	第三产业生产总值/第二产业生产总值×100%	正	0.057 6
			社会压力	人口密度 P_9 /(人·km ⁻²)	常住人口/总面积	负
	人口自然增长率 P_{10} /%	人口出生率-人口死亡率		负	0.015 3	
	城镇化率 P_{11} /%	城镇人口/总人口×100%		负	0.033 3	
	状态 S	生态状态	森林覆盖率 S_1 /%	森林面积/总面积×100%	正	0.018 0
			水产品产量 S_2 /t	直接获取	负	0.036 4
		环境状态	水土协调度 S_3 /%	地区水资源量/地区耕地规模	正	0.065 5
			区域环境噪声平均值 S_4 /dB(A)	直接获取	负	0.023 8
		经济状态	第二产业比重 S_5 /%	直接获取	负	0.048 1
			人均工业产值 S_6 (元/人)	工业生产总产值/常住人口	负	0.042 5
			工业用水重复利用率 S_7 /%	工业重复利用量/工业总用水量×100%	正	0.051 7
社会状态		城镇登记失业率 S_8 /%	直接获取	负	0.031 9	
		人均粮食产量 S_9 (t/人)	粮食产量/常住人口	负	0.017 0	
响应 R	生态响应	建成区绿化覆盖率 R_1 /%	直接获取	正	0.027 4	
		自然保护区面积比例 R_2 /%	自然保护区面积/总面积×100%	正	0.048 8	
		城市人均公园绿地面积 R_3 (m ² /人)	城市公园绿地面积/城镇人口	正	0.026 3	
	环境响应	工业固体废弃物综合利用率 R_4 /%	直接获取	正	0.028 8	
		污水集中处理率 R_5 /%	污水集中处理量/污水集中排放量×100%	正	0.019 5	
	经济响应	工业污染治理投资额占比 R_6 /%	工业污染治理投资额/地区生产总值×100%	正	0.041 8	
		工业企业 R & D 经费支出占比 R_7 /%	工业企业 R & D 经费内部支出/地区生产总值×100%	正	0.030 6	
	社会响应	机耕程度 R_8 /%	机耕面积/耕地规模×100%	正	0.030 9	
		第二产业就业人员比例 R_9 /%	直接获取	负	0.062 8	
		每万人大学生数 R_{10} /人	大学生人数/常住人口	正	0.019 6	

2.1.3 模型学习结束检验 为验证模型学习效果,以便更准确地预测工业生态安全发展态势,通过比较输出结果,若没有达到预期期望,则将误差原路返回以

修正网络参数降低误差,看输出结果是否达到要求的标准,若没有符合要求,继续进行循环训练,直到符合要求为止。

2.2 生态安全评估方法

2.2.1 数据标准化 为消除数据单位不同带来的误差,对数据进行处理:

正向指标处理:

$$y_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (7)$$

逆向指标处理:

$$y_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (8)$$

式中: x_{ij} 为数据初始值; y_{ij} 为数据标准化值。

2.2.2 指标权重 为避免主观因素的影响,本研究运用熵权法对指标权重 w_j 进行测算,公式为:

$$e_j = -K \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (K = \frac{1}{\ln n}, f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}) \quad (9)$$

当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (10)$$

式中: e_j 为第 j 项指标熵值; K 为常数; n 为样本个数。

2.2.3 评价指数 参照相关研究^[30-31],采用综合指数法测算出 3 个子系统的评价指数,并得出安徽省总评价指数,具体公式为:

$$ESWI_p = \sum_{j=1}^m w_j y_{ij} \quad (11)$$

$$ESWI = \sum_{p=1}^3 ESWI_p$$

式中: $ESWI_p$ ($p=1,2,3$)为各子系统的评价指数; $ESWI$ 为工业生态安全总评价指数。

2.2.4 等级确定 聚类分析能将抽象对象按照相似类分成若干组,本研究基于聚类分析工具中的系统聚类法对 2009—2018 年安徽省工业生态安全评价水平进行分类^[32],划分出表 2 的安全、较安全、临界安全、较不安全、不安全 5 个工业生态安全评价等级,对应的指示灯分别为绿(V)、蓝(IV)、黄(III)、橙(II)、红(I)。

表 2 安徽省工业生态安全评价等级划分

安全等级	指示灯	综合评价	子系统		
			压力	状态	响应
不安全	红(I)	[0.000 0,0.370 0)	[0.000 0,0.100 0)	[0.000 0,0.097 9)	[0.000 0,0.124 8)
较不安全	橙(II)	[0.370 0,0.395 8)	[0.100 0,0.160 7)	[0.097 9,0.115 2)	[0.124 8,0.136 2)
临界安全	黄(III)	[0.395 8,0.502 7)	[0.160 7,0.181 4)	[0.115 2,0.139 2)	[0.136 2,0.202 0)
较安全	蓝(IV)	[0.502 7,0.569 1)	[0.181 4,0.210 9)	[0.139 2,1.192 3)	[0.202 0,0.214 0)
安全	绿(V)	[0.569 1,1.000 0]	[0.210 9,1.000 0]	[0.192 3,1.000 0]	[0.214 0,1.000 0]

2.3 障碍因子诊断

通过障碍度模型对障碍度进行分析,找出影响安徽省工业生态安全水平的主要障碍因子,计算方法参见范胜龙^[33]研究。

$$H_j = \frac{R_j T_j}{\sum_{j=1}^m R_j T_j} \times 100\% \quad (12)$$

$$(H_p = \sum H_j, T_j = 1 - y_{ij})$$

式中: H_j, H_p 分别为各指标及和子系统的障碍度; R_j 为因子贡献度,用权重 w_j 表示; T_j 为指标偏离度。

3 结果与分析

3.1 预测结果

为预测安徽省工业生态安全 3 个子系统 2019—2025 年评价指数,采用 BP 神经网络算法实现,具体操作为:首先,基于 2009—2018 年子系统的实际数据,建立时间序列预测模型,选择 4 a 作为一个周期,依次建立 2009—2012,2010—2013,2011—2014 年等 7 个周期进行迭代滚动预测。其次,以一组周期的前 3 a 数据作为一组样本输入值,预测下一年数据作为

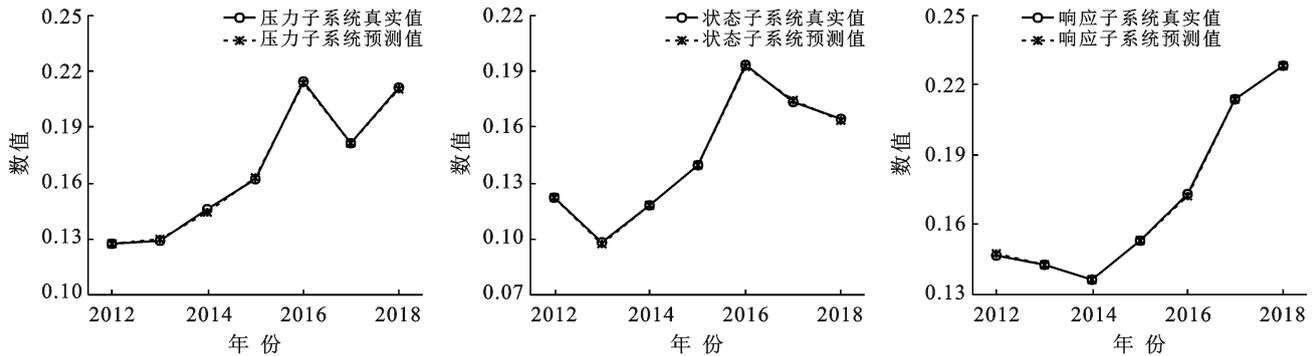
样本输出值,2012—2018 年共构成 7 组评价指数样本输出值。最后,对于 3 层网络神经元的确定,输入层的神经元数为 3,输出层的神经元数为 1;BP 神经网络的特点就是隐含层神经元的个数不唯一,参照李旭军^[34]的研究,确定隐含层的最佳神经元个数为 7。在此基础上,运用 MatlabR 2018b 应用软件编写程序,构造 BP 神经网络模型进行学习,学习情况见图 3,学习结束检验见表 3。由图 3 的各子系统学习情况可知,模型的输入值与期望值相差不大;结合表 3 可知压力子系统、状态子系统和响应子系统相对误差和绝对误差均较小,平均相对误差分别为 0.286 8%,0.295 0%,0.267 4%,平均绝对误差分别为 0.045 7%,0.046 2%,0.041 5%,模型精度很高,说明模型学习训练情况很好,可用其进行预测,最终预测结果详见图 4,并根据式(11)计算出安徽省工业生态安全 2019—2025 年综合评价指数。

3.2 压力—状态—响应三大系统趋势分析

3.2.1 安徽省工业生态安全压力子系统趋势分析 基于上述综合指数法测算到安徽省工业生态安全子

系统的评价指数(图 4,表 4)。2009—2018 年安徽省工业生态安全压力评价指数表现为波动上升趋势,由 2009 年的 0.119 9 逐步增加至 2018 年的 0.210 9,安全等级总体上沿着“较不安全”—“临界安全”—“安全”方向演变,指示灯由“橙色”—“黄色”演变至“绿色”。2009—2012 年安徽省工业生态安全水平处于波动下降期,2013—2018 年工业生态安全评价指数转而大幅度上升,平均增长率为 8.49%,生态环境补水率、人均 GDP、人口密度、城镇化率等指标的生态安全评价指数呈现不同程度的优化态势,说明对于缓解安徽省工业生态安全压力具有一定促进作用。从具体指标

的生态安全评价指数来看,生态环境补水率从 2013 年的 0.009 7 增加到 2018 年的 0.025 9,表明安徽省通过相关措施在生态平衡和生态系统恢复方面取得一定成效。人均 GDP 以年平均增长速率为 11.92% 的速度从 2013 年的 0.015 2 提高到 2018 年的 0.029 8,表明提高人民生活水平对降低工业生态安全压力具有一定的制约作用。人口密度从 2013 年的 0.020 4 降低到 2017 年的 0.004 8,城镇化率由 0.018 1 减少到 0.003 2,可见社会经济活动一定程度上有利于环境向好,因此合理推进城镇化,适度发展经济,节约利用水资源能够缓解生态压力。



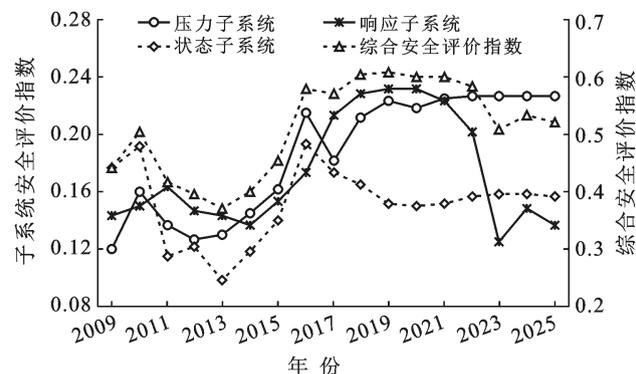
注:图中结果为 MatlabR2018b 软件运行代码所得。

图 3 2012—2018 年安徽省工业生态安全评价各子系 BP 神经网络学习检验

表 3 2012—2018 年安徽省工业生态安全评价 BP 神经网络运行误差情况

%

年份	压力子系统		状态子系统		响应子系统	
	相对误差	绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差	绝对误差
2012	0.327 2	0.041 6	0.078 1	0.009 5	0.764 2	0.111 9
2013	0.139 1	0.018 0	0.240 4	-0.023 5	0.449 6	-0.064 2
2014	0.605 0	-0.088 1	0.157 7	0.018 6	0.029 9	0.004 1
2015	0.444 4	0.072 2	0.196 2	0.027 3	0.169 3	0.025 8
2016	0.250 9	-0.053 9	0.353 4	-0.068 3	0.327 7	-0.056 6
2017	0.156 1	0.028 3	0.611 9	0.106 3	0.124 5	-0.026 6
2018	0.084 8	-0.017 9	0.427 3	-0.070 2	0.006 6	0.001 5
均值	0.286 8	0.045 7	0.295 0	0.046 2	0.267 4	0.041 5



注:2009—2018 年为测算所得结果,2019—2025 年为预测结果,下同。

图 4 安徽省工业生态安全评价指数及发展趋势

3.2.2 安徽省工业生态安全状态子系统趋势分析

2009—2018 年状态子系统处于波动状态,2009—2010 年工业生态安全状态极好,然而在 2011 年评价指数急速下降到 0.115 2,形势不容乐观,随后呈现不稳定的上升态势,安全等级演变为“安全”—“临界安全”—“较安全”,指示灯由“绿色”—“黄色”演变至“蓝色”(图 4,表 4)。2011 年正处于安徽省“十二五”规划的开启年,“861”行动计划也持续深入实施,这是 2011 年状态子系统评价指数降低的原因。随后几年,由于水资源浪费、农业面源污染、人为破坏、工业污染等一系列因素的综合影响,安徽省状态子系统的

工业生态安全水平呈现不稳定状态,出现了一系列问题。安徽省水资源总量每年波动幅度极大,致使水土协调能力进一步下降,可见安徽省自然资源及环境对工业生态安全的影响程度很大。2017 年安徽省人民政府办公厅印发的《安徽省“十三五”环境保护规划的通知》指出水环境质量形势严峻,明确实施最严格的水环境控制单元管理,着力加强水资源的污染防治工作。此外,经济发展对安徽省工业生态安全水平的影响同样不容忽视,如不合理利用土地资源致使土地结构破坏、工业生产过程产生的污染物造成水体污染、土壤被化学物污染进而遭到破坏和生产产生的工业噪声对动植物产生危害,因此需多方面协同推进和重点把握同时进行以此改善状态子系统带来的影响。

表 4 安徽省工业生态安全级别

年份	评价等级			
	压力系统	状态系统	响应系统	综合安全
2009	II	IV	III	III
2010	III	V	III	IV
2011	II	III	III	III
2012	II	III	III	III
2013	II	II	III	II
2014	II	III	III	III
2015	III	IV	III	III
2016	V	V	III	V
2017	IV	IV	V	V
2018	V	IV	V	V
2019	V	IV	V	V
2020	V	IV	V	V
2021	V	IV	V	V
2022	V	IV	IV	V
2023	V	IV	II	IV
2024	V	IV	III	IV
2025	V	IV	III	IV

3.2.3 安徽省工业生态安全响应子系统趋势分析

2009—2018 年安徽省工业生态安全评价指数主要呈稳定上升趋势,上升幅度较快,安全等级由“临界安全”演变为“安全”,指示灯由“黄色”变为“绿色”。由表 4 和图 4 可知,2009—2016 年这一阶段,安徽省工业生态安全水平基本处于“临界安全”状态,2009 年响应子系统安全评价指数为 0.142 8,到 2016 提高到 0.172 8,期间年平均增长率达到 2.407 7%,处于向好发展态势。随后 2016—2018 年,响应子系统安全评价指数增长幅度明显,由 0.172 8 提高到 0.228 5,期间增速为 9.762 7%,与上一阶段相比,年平均增长速率增加近 3 倍。其中,建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积、工业污染治理投资额、工业企业科学研究与试验发展经费支出、第二产业从业人员比例等指标的评价指数呈不同幅度的上升趋势,表明这些指标对

安徽省工业生态安全响应子系统具有一定程度的促进作用。为了改善工业生态安全水平,缓解生态破坏等一系列问题,安徽省积极出台了《安徽省大气污染防治条例》《安徽省生态保护红线》等一系列政策规定,采取“控制污染严重产业的布局,建设工业垃圾处置工程,创新污染防治管理机制,建设湿地恢复工程,限制水产养殖规模”等一系列措施,有效提高了工业生态安全水平,全省污染物处理能力、治理投资力度明显加强,污染治理效果明显好转;全省绿化覆盖率明显增加,有效调节生态质量水平;全省高水平就业人员、设备投入明显增多,为生态安全提供技术支持。

3.2.4 安徽省工业生态安全水平演变及趋势分析

根据图 4 和表 4 可知,2009—2018 年安徽省工业生态较为安全,安全等级由“临界安全”转为“安全”,指示灯由“黄色”变为“绿色”,表明这期间安徽省工业生态安全总体水平正逐渐提高,日渐向好发展。2009—2015 年安全等级较低,工业生态安全受到威胁,同年响应子系统的安全等级与全省总体水平相似,表明响应子系统对全省总体生态安全水平起着至关重要的作用。随后几年,工业生态安全评价指数上升,安全等级基本处于“安全”状态,表明这期间安徽省工业生态安全水平较高。安徽省在发展社会经济的同时,注重对工业生态安全的保护力度,针对淮河和巢湖等重点流域出台了一系列生态修复政策,节能技术产品装备和工业行业清洁生产技术改造等高效节能环保工程相继投入使用,植树造林和林业保护项目也有序开展,使得工业生态安全水平得到不断提高,安全等级上升为“安全”,评价指数上升 0.149 3,幅度有限;但是空气质量下降、工业“三废”污染、自然资源退化、生态植被破坏、重点流域污染等问题仍十分明显,工业生态安全形势仍不容乐观,说明这几年安徽省为保护生态安全出台的一系列政策和执行的措施并没有起到显著的效果。

3.3 BP 神经网络评价预测结果与分析

基于 PSR 三大子系统 2009—2018 年评价数据预测出 2019—2025 年各子系统评价指数并测算安徽省工业生态安全评价指数(图 4,表 4)。就压力系统而言,未来几年,是安徽省城镇化与工业化提速发展的重要阶段,同时国家明确提出解决污染防治重要任务,全省迅速做出反应,加强生态环境保护,出台各项环境政策、对工业企业防污提出要求。由表 4 可知,2019—2025 年压力系统评价指数持续波动上升,处于“安全”状态,指示灯为“绿色”,与预期相符。就状态系统来看,2019—2025 年,在压力系统的作用下,尤其是在生态环境的恢复和合理推进城镇化进程中,

安徽省工业生态安全状态系统的生态安全形势一片大好,处于“较安全”状态,指示灯为“蓝色”,表明状态系统对提高安徽省工业生态安全水平具有积极意义。对于响应系统,根据预测结果可知,2019—2021年安全评价指数平稳上升,2022—2025年出现下降趋势,安全等级由“安全”演变为“临界安全”,指示灯由“绿色”转变为“黄色”。随着安徽省“十四五”规划的到来,一系列环保举措的进一步实施及对工业企业进行政策布局,各类污染治理力度将进一步加大。安徽省主导产业是第二产业,随着工业经济深入发展不可避免地占领大面积生态用地、运用大量生态资源,工业生态安全质量仍然有恶化的风险。总体来看,按此发展态势,2019—2025年,若不出现大的变故,安徽省工业生态安全水平将继续保持稳定发展状态,在平稳中略有下降,不会出现极为严重的生态问题,但由于响应系统评价指数有逐步下降趋势,对安徽省总体的工业生态安全水平形成负面影响,因而总体评价指数一直保持在 0.55 左右,处于刚从“较安全”过渡到“安全”的状态,与到达完全“安全”状态差距较大,因此,未来几年全省仍应把生态保护放在工作的第一位,继续采取措施加大环境改善力度。

3.4 工业生态安全关键障碍因子分析

基于障碍度模型并借助 2009—2018 年标准化处理后的指标值与指标对应的权重计算出各指标障碍度,障碍度大小能够判断该指标在安徽省工业生态安全水平中起到的作用程度,若指标障碍度越大,则对安徽工业生态安全制约程度越大。因此对安徽省工业生态安全指标障碍度进行分析可探知其工业生态安全水平高低的主要原因(图 5)。

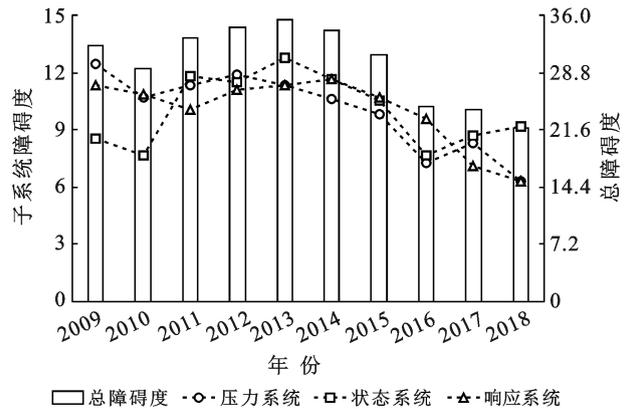


图 5 安徽省工业生态安全的障碍系统分析

从各子系统看,图 5 中通过障碍度模型得到的三大系统的障碍度总体上呈现下降态势,状态系统各指标障碍度总体上高于压力系统和响应系统,从 2009 年的第三障碍系统上升为 2018 年的第一障碍系统,因此状态系统是影响安徽省工业生态安全水平的关键障碍系统。响应系统各年的障碍度占比范围在 28%~40% 之间,状态系统的障碍度占比范围在 25%~43% 之间,二者是造成安徽省工业生态安全水平波动的根本原因,应该成为今后提高工业生态安全的首要关注对象。压力系统的障碍度相对较小,且每年的障碍度基本保持下降趋势,表明安徽省对于缓解工业生态安全中压力指标的工作已经在有条不紊的进行中,对工业生态安全的总体发展趋势不会造成太大的影响。

选取障碍度最大的前 5 个指标分析安徽省工业生态安全主要障碍因子(表 5)。

表 5 安徽省工业生态安全主要障碍因子

年份	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5
2009	S_1 (36.633 7)	R_5 (31.571 2)	R_{10} (32.961 9)	P_3 (29.176 6)	R_1 (23.245 6)
2010	R_5 (23.642 6)	R_{10} (22.493 0)	P_5 (20.314 0)	R_1 (19.736 8)	P_3 (19.251 1)
2011	P_4 (24.187 8)	R_4 (19.117 7)	S_5 (17.365 6)	S_8 (16.946 0)	R_5 (16.106 2)
2012	R_7 (19.041 3)	S_5 (18.074 1)	R_1 (16.228 1)	P_8 (16.100 6)	S_1 (15.841 6)
2013	S_5 (16.781 3)	R_2 (15.892 9)	S_1 (15.841 6)	R_7 (15.857 1)	P_1 (15.163 9)
2014	R_2 (17.800 1)	S_3 (15.108 6)	S_5 (14.872 8)	P_6 (14.396 1)	R_9 (14.367 1)
2015	P_6 (17.085 6)	R_9 (15.757 4)	S_2 (15.738 5)	R_2 (15.257 2)	S_9 (14.805 0)
2016	S_2 (17.526 2)	R_9 (16.684 3)	P_9 (15.874 1)	P_{11} (15.629 0)	R_4 (13.467 1)
2017	P_{10} (32.743 4)	P_9 (19.792 8)	P_{11} (17.999 4)	R_9 (17.469 9)	S_3 (14.961 7)
2018	S_9 (26.197 8)	P_9 (23.349 1)	S_4 (23.076 9)	P_{11} (19.895 7)	R_9 (17.646 5)

注:表中符号为工业生态安全评价指标,具体含义见表 1。

按具体指标来看,障碍度排名前五名的指标出现频率从多到少分别为:第二产业从业人员比例(R_9)、第二产业占 GDP 的比例(S_4)、污水集中处理率(R_5)、森林覆盖率(S_1)、人口密度(P_9)。是改善安徽

省工业生态安全水平的首要调节对象。第二产业就业人员比例为社会响应指标,是 2014—2018 年影响工业生态安全水平的障碍因素,近年来安徽省第二产业就业人数仍在持续上升,表明工业企业就业人数需

求空间在扩大,其吸纳劳动力的能力仍不可小觑,加强安徽省新型工业化进程是一项亟待实施的任务;第二产业占GDP的比例为经济状态指标,是2011—2014年安徽工业生态安全障碍因子之一,作为一个长期靠工业拉动经济发展的大省,工业污染排放程度仍然左右着全省生态环境水平;污水集中处理率为环境响应指标,在2009—2011年严重阻碍安徽工业生态安全提高,表明重视污染物处理是有效改变安徽省工业生态安全的方法;森林覆盖率为生态响应指标,随着快速工业化时期的到来,经济发展的同时伴随着对环境质量保护力度的加强,森林覆盖率一定程度上代表着人民生态观念的提高程度,对生态环境的重视程度;人口密度为社会压力指标,是2016—2018年产生的障碍因子,人口多意味着资源需求增加,打破了生态的平衡,对生态产生巨大的压力。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究通过构建PSR-EEES模型评价安徽省工业生态安全水平,运用综合指数法测算工业生态安全评价指数,依据聚类分析工具确定工业生态安全等级,以2009—2018年数据为基础,通过BP神经网络算法测算2019—2025年工业生态安全评价指数,最后,依据障碍度模型识别影响安徽省工业生态安全的主要障碍因素,得出如下结论与建议:

(1) 2009—2018年安徽省工业生态安全水平总体呈波动上升态势,安全等级由2009年的“临界安全”恶化为2013年的“较不安全”,后又缓解为2018年的“安全”状态,指示灯转变趋势为“黄色”—“橙色”—“绿色”。就各子系统而言,压力子系统评价指数处于稳定上升态势,后期一直处于“安全”状态;状态子系统和响应子系统评价等级都呈现先下降后上升态势,从而影响了安徽省工业生态安全水平提高。

(2) 本研究通过构建PSR模型,又创新性的采用EEES模型深入各个角度从生态、环境、经济和社会多方面分别探析子系统的评价趋势,体现了生态安全与生态环境和社会经济之间相互能动关系,使得指标体系的系统性和层次性更加清晰,有利于系统全面的研究安徽省工业生态安全的评价状况。

(3) BP神经网络较其他预测方法而言,模型预测精确度很高。本研究创新性的运用此算法对安徽省工业生态安全未来几年的工业生态安全水平发展趋势进行预测,研究结果表明BP神经网络的准确性高、误差小,未来7a安徽省工业生态安全状况良好,说明BP神经网络是生态安全评价预测的有效方法之一。

(4) 通过研究结果可知,状态子系统和响应子系统是影响安徽省工业生态安全的主要原因,第二产业从业人员比例、第二产业占GDP的比例、污水集中处理率、森林覆盖率、人口密度为首要调节对象。全省需重视对自然资源的合理利用,节约水资源、合理开发建设用地,加速推进新型城镇化和新型工业化的步伐,同时增强工业企业对于生态环境保护观念,进而持续改善工业生态安全水平。

4.2 讨论

目前工业是对生态环境产生压力最大的行业之一,提高区域工业生态安全水平已成为促进社会经济绿色发展的重中之重。根据安徽及周边省份相关数据可知,山东省、江苏省和浙江省作为经济发达的沿海地区,工业废水排放量较高,位居安徽周边省份前3名,安徽省是除江西省外工业废水排放量最低的省,说明安徽省水资源污染控制力度在不断加强;但近两年安徽省工业废气排放量下降速度有所减缓,成为除江苏省和山东省外工业废气排放量最高的地区,表明安徽省大气污染比较严重,大气质量没有得到高关注,后续应该加强对于大气环境的治理力度。这几年安徽省加快重点城镇规划和建设步伐,大力推进皖北地区经济加快发展,加快工业化和市场化进程;此外,全省经济总量扩张呈加速态势,工业一直是促进安徽省经济增长的中坚力量,生态安全政策不到位,工业企业污染物的排放会大大增加环境的恶化速度。因此,安徽省出台了一系列生态安全政策《生态全省建设实施纲要》《安徽省划定并严守生态保护红线实施方案》等,在强力推动绿色发展、重视生态保护、提高生态自我修复能力的背景下,全省环境质量总体保持平稳,生态环境状况良好,但第二产业从业人员比例、第二产业占GDP的比例、污水集中处理率、森林覆盖率、人口密度及工业废气排放量等因素仍然是提高安徽省工业生态安全的阻力,后续需要进一步研究如何改进。

[参 考 文 献]

- [1] 崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于DPSIR模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1):302-319.
- [2] 杨兆青,陆兆华,刘丹,等.煤炭资源型城市生态安全评价:以锡林浩特市为例[J].生态学报,2021,41(1):280-289.
- [3] Pan Zhong, Liu Qianlong, Jiang Ronggen. Microplastic pollution and ecological risk assessment in an estuarine environment: The Dongshan Bay of China [J]. Chemosphere, 2021,262.

- [4] Timothy M. Lenton. What early warning systems are there for environmental shocks? [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27: 60-75.
- [5] Joern Birkmann, Denis Chang Seng, Neysa Setiadi. Enhancing early warning in the light of migration and environmental shocks [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27: 76-88.
- [6] Hans J P Marvin, Gijs A Kleter, Maryvon Y Noordam, et al. Proactive systems for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point [J]. *Food Control*, 2013, 34(2): 444-456.
- [7] Bai Xiaorui, Tang Jingchun. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 881-887.
- [8] Lu Shasha, Qin Fan, Chen Ni, et al. Spatiotemporal differences in forest ecological security warning values in Beijing: Using an integrated evaluation index system and system dynamics model [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 549-558.
- [9] Zhou Bin, Zhong Linsheng, Chen Tian, et al. Ecological security early-warning in Zhoushan Islands based on variable weight model [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1854-1862.
- [10] Ke Xiaoling, Amal Mougharbel, Guo Haixiang, et al. Early warning simulation of urban ecological security in the Yangtze River Economic Belt: A case study of Chongqing, Wuhan, and Shanghai [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2020, 63(10): 1811-1833.
- [11] 郭中伟. 建设国家生态安全预警系统与维护体系: 面对严重的生态危机的对策[J]. *科技导报*, 2001, (1): 54-56.
- [12] 陈英, 孔喆, 路正, 等. 基于 RBF 神经网络模型的土地生态安全预警: 以甘肃省张掖市为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 264-270.
- [13] 徐美, 刘春腊, 李丹, 等. 基于改进 TOPSIS-灰色 GM(1,1) 模型的张家界市旅游生态安全动态预警[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3731-3739.
- [14] 赵艳萍. 农田生态安全预警研究[D]. 安徽 合肥: 安徽农业大学, 2007.
- [15] 何焰, 由文辉. 水环境生态安全预警评价与分析: 以上海市为例[J]. *安全与环境工程*, 2004, 11(4): 1-4.
- [16] 田欣. 星海湖湿地生态安全评估与预警研究[D]. 宁夏银川: 宁夏大学, 2018.
- [17] Li Yangfan, Sun Xiang, Zhu Xiaodong, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China [J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [18] 彭新沙, 田大伦. 国内工业生态安全研究述评[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7538-7550.
- [19] Lu Shinli. Integrating heuristic time series with modified grey forecasting for renewable energy in Taiwan [J]. *Renewable Energy*, 2019, 133: 1436-1444.
- [20] 熊建华, 唐将伟. 基于情景分析法的城市土地生态安全预警研究: 以深圳为例[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1215-1219.
- [21] 吴艳霞, 邓楠. 基于 RBF 神经网络模型的资源型城市生态安全预警: 以榆林市为例[J]. *生态经济*, 2019, 35(5): 111-118.
- [22] 潘真真, 苏维词, 王建伟. 基于可拓-马尔科夫模型的贵州省生态安全预警[J]. *山地学报*, 2016, 34(5): 580-590.
- [23] 苏学能, 刘天琪, 曹鸿谦, 等. 基于 Hadoop 架构的多重分布式 BP 神经网络的短期负荷预测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 4966-4973, 5216.
- [24] 余文波, 蔡海生, 张莹, 等. 湖北省土地生态安全预警评价及调控[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 189-196.
- [25] 周彬, 虞虎, 钟林生, 等. 普陀山岛旅游生态安全发展趋势预测[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7792-7803.
- [26] 高家骥, 李雪铭, 张峰, 等. 南四湖湖泊湿地生态环境预警研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1219-1226.
- [27] 马世五, 谢德体, 张孝成, 等. 三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变: 以重庆市万州区为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8227-8240.
- [28] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 等. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8232-8244.
- [29] 周燕妃. 江苏省工业化与生态环境耦合协调度评价研究[D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [30] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. *地理学报*, 2006, 61(6): 645-653.
- [31] 杨嘉怡, 曾旗. 基于组合模型的煤炭城市生态安全预警研究: 以焦作市为例[J]. *地域研究与开发*, 2018, 37(3): 113-119.
- [32] 赵李明. 基于遗传算法和 BP 神经网络的广州市空气质量预测与时空分布研究[D]. 江西 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [33] 范胜龙, 杨玉珍, 陈训争, 等. 基于 PSR 和无偏 GM(1,1) 模型的福建省耕地生态安全评价与预测[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(9): 19-27.
- [34] 李旭军. BP 神经网络在经济预测中的应用[D]. 湖北 武汉: 华中师范大学, 2008.