

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.06

基于 TQR - EGM 模型的水资源生态 安全评价及动态预警

何刚^{1,2}, 赵疏航², 杜宇²

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南, 232001;

2. 安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南, 232001)

摘要: 水资源的生态安全有利于人类的生存和经济社会的可持续发展。以安徽省为例, 构建以 TQR (威胁 - 质量 - 调控) 为概念模型的水资源生态安全综合评价指标体系, 借助熵权法赋权并计算 2013 - 2018 年生态安全指数来评价水资源生态安全水平, 并利用障碍度模型和灰色预测模型进行障碍因素诊断和安全动态预警。研究结果表明: 安徽省水资源生态安全水平呈稳步上升趋势, 从较不安全上升至比较安全; 质量子系统对安徽省水资源生态安全的影响最大, 主要障碍因素是饮用水源水质达标率和人均污水排放量; 安徽省水资源生态安全警情由“重警”到“轻警”, 并在未来 5 年内保持在“无警”。

关键词: 水资源生态安全; 威胁 - 质量 - 调控 (TQR) 模型; 障碍度模型; 动态预警; 灰色预测; 熵权法; 水生态安全评价

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0036-07

Evaluation and dynamic warning of ecological security of water resources based on TQR - EGM model

HE Gang^{1,2}, ZHAO Shuhang², DU Yu²

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines,

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Economics and

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

Abstract: The ecological security of water resources contributes to the wellbeing of human lives and sustainable development of the social economy. Taking Anhui Province as an example, a comprehensive evaluation index system for the ecological security of water resources was constructed with TQR (threat-quality-regulation) as the conceptual model, and the entropy weight method was used to weight and calculate the ecological security indexes from 2013 to 2018, in order to evaluate the ecological security level of this area. Then, the obstacle degree model and gray prediction model were adopted for the obstacle factor diagnosis and safety dynamic warning. The research results show that the ecological security level of Anhui Province's water resources is steadily increasing, from "unsafe" to "quasi-safe". The quality subsystem has the greatest impact on the ecological security of Anhui Province's water resources and the main obstacle factors are the water quality compliance rate of drinking water source and sewage discharge per capita. The ecological security situation of Anhui Province's water resources has changed from "critical" to "slight" and will remain "no warning" for the next five years.

Key words: ecological security of water resources; TQR (threat-quality-regulation) model; obstacle degree model; dynamic early warning; grey prediction; entropy weight method; evaluation of water ecological security

收稿日期: 2020-06-06; 修回日期: 2020-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51574010); 安徽省社会科学创新发展研究课题攻关研究项目 (2019CX110); 安徽省哲学社会科学规划项目 (AHSKY2019D026); 安徽省高校人文社会科学研究重点项目 (SK2019A0099)

作者简介: 何刚 (1966-), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 博士后指导教师, 研究方向为水资源生态安全评价与预警。

通讯作者: 赵疏航 (1996-), 男, 安徽铜陵人, 博士研究生, 研究方向为水资源安全管理。

$$\text{正向指标: } x_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{逆向指标: } x_{ij} = \frac{\max\{a_{ij}\} - a_{ij}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

(2) 计算第 j 项指标的熵值 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \ln \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \right) \quad (e_j \in [0, 1]) \quad (3)$$

(3) 计算第 j 项指标的权重 w_j 。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (4)$$

2.3.2 水资源生态安全指数及安全等级划分 单一指标并不能反映各子系统和总系统的水资源生态安全状况,要综合各指标进行评价。各系统水资源生态安全指数 s ^[12-13] 的计算模型如下:

$$s = \sum_{j=1}^n (x_{ij} \cdot w_j) \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为指标标准化后的值; w_j 为指标权重。

参考相关评价标准^[13-15],并结合安徽省的实情,将水资源生态安全等级和预警标准(警度)划分5个等级,如表1所示。

表1 生态安全指数安全等级及安全预警标准

安全指数	安全等级	预警状态
$0 \leq s < 0.2$	极不安全	巨警
$0.2 \leq s < 0.4$	较不安全	重警
$0.4 \leq s < 0.6$	临界安全	中警
$0.6 \leq s < 0.8$	比较安全	轻警
$0.8 \leq s \leq 1.0$	非常安全	无警

2.3.3 障碍度模型 为了保障水资源合理规划与开发,制定和调整综合治理政策,运用障碍度模型^[14,16]分析与诊断影响水资源生态安全的主要障碍因素。具体公式如下:

$$o = \frac{S_{ij} w_j}{\sum_{j=1}^n (S_{ij} w_j)} \times 100\% \quad (6)$$

$$S_{ij} = 1 - x_{ij} \quad (7)$$

式中: o 为障碍度,%,表示评价指标的影响程度; S_{ij} 为指标偏度,表示指标与最优值的差值。

2.3.4 灰色预测 灰色预测(灰色理论系统预测)

是通过因素间变化的相异度,将原数据变换成有规律的数列,并建立微分方程模型,用来预测发展趋势。其中最常用的是 GM(1,1) 模型^[15,17],包含均值 GM(1,1) 模型(EGM)、原始差分 GM(1,1) 模型(ODGM)、均值差分 GM(1,1) 模型(EDGM)和离散 GM(1,1) 模型(DGM)4种基本形式,本文选用最常见的 EGM 模型,其计算步骤如下:

(1) 得出时间响应函数。

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

$$(t = 1, 2, \dots, n)$$

(2) 确定预测值,预测函数为:

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t)$$

$$= (1 - e^a)(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-at} \quad (9)$$

$$(t = 1, 2, \dots, n)$$

(3) 精度检验。为了验证模型的可靠性,需要检验模型精度。本研究以平均绝对误差进行模型精度评价,利用公式(10)计算初始值与预测值的平均绝对误差。

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{x^{(0)}(t) - \hat{x}^{(0)}(t)}{x^{(0)}(t)} \right| \times 100\% \quad (10)$$

模型精度通常被划分为精确、良好、合格和不合格4个等级^[18-20],其等级划分标准如表2所示。

表2 模型预测精度等级划分标准

精度等级	平均绝对误差 MAD
精确	$MAD \leq 1\%$
良好	$1\% < MAD \leq 7\%$
合格	$7\% < MAD \leq 15\%$
不合格	$MAD > 15\%$

3 结果与分析

3.1 构建评价指标体系

借鉴前人的科研成果^[2-9],结合评价指标的可获取性、有代表性和可操作性的原则,从威胁、质量和调控3个子系统中选取20个指标构建水资源生态安全综合评价指标体系,并确定各评价指标的权重,详见表3。

3.2 水资源生态安全评价与分析

2013-2018年安徽省生态安全指数与安全等级评价结果如表4所示。以下分别从纵向和横向对评价结果进行分析。

表 3 水资源生态安全综合评价指标体系

准则层	指标层	计算方法	指标单位	指标属性	指标代码	权重
威胁系统	单位 GDP 废水排放量	废水排放总量/生产总值	t/10 ⁴ 元	逆向	C ₁₁	0.064
	人均用水量	用水总量/常住人口	m ³	逆向	C ₁₂	0.036
	工业万元产值需水量	工业用水量/第二产业 GDP	t/10 ⁴ 元	逆向	C ₁₃	0.043
	水土资源匹配系数	用水总量/土地面积		正向	C ₁₄	0.032
	人均污水排放量	生活污水排放量/常住人口	10 ⁴ t	逆向	C ₁₅	0.039
	地下水开采量比例	地下水开采能力/水资源综合生产能力	%	逆向	C ₁₆	0.033
质量系统	人均 GDP	安徽生产总值/常住人口	元	正向	C ₂₁	0.058
	人均水资源量	水资源总量/常住人口	m ³	正向	C ₂₂	0.050
	城镇化率	市镇人口/年底总人口	%	正向	C ₂₃	0.049
	人口自然增长率	出生率 - 死亡率	%	逆向	C ₂₄	0.031
	地均降水量	年降水量/土地面积	m ³ /m ²	正向	C ₂₅	0.039
	饮用水源水质达标率	统计数据	%	正向	C ₂₆	0.049
	第三产业贡献率	统计数据	%	正向	C ₂₇	0.059
	人均有效灌溉面积	有效灌溉面积/常住人口	m ²	正向	C ₂₈	0.043
	环保投资比例	节能环保支出/财政总支出	%	正向	C ₃₁	0.075
	建成区绿地覆盖率	统计数据	%	正向	C ₃₂	0.037
调控系统	城市污水处理率	统计数据	%	正向	C ₃₃	0.073
	生态环境补水比例	生态环境补水/用水总量	%	正向	C ₃₄	0.042
	污水管道比例	污水管道/城市排水管道	%	正向	C ₃₅	0.116
	生活垃圾无害化处理率	统计数据	%	正向	C ₃₆	0.033

表 4 2013 - 2018 年安徽省生态安全指数与安全等级

项目	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
威胁指数	0.102	0.119	0.118	0.135	0.155	0.174
质量指数	0.088	0.095	0.182	0.280	0.198	0.243
调控指数	0.024	0.084	0.095	0.161	0.247	0.374
综合指数	0.214	0.298	0.395	0.576	0.600	0.791
安全等级	较不安全	较不安全	较不安全	临界安全	比较安全	比较安全

3.2.1 水资源生态安全纵向评价分析 由表 4 可见,2013 - 2018 年安徽省生态安全综合指数呈稳步上升态势,2013 - 2015 年生态安全综合指数为 0.214 ~ 0.395,安全等级处于较不安全水平,原因是该时段水资源供需矛盾突出,经济模式为消耗资源、牺牲环境为主的粗放型经济,人均 GDP 虽实现逐年缓慢增长,但工业废水排放量和城市污水排放量不断增加,这些污染物排放于河流和土地中,给安徽省水资源生态安全造成巨大的压力,再加上人口日益增长导致用水总量增大,过度开采地下水,易造成地质灾害。2016 年综合指数涨幅最大,相比 2015 年

增长 45.82%,达到临界安全水平,显然安徽省长期受到“先污染后治理”粗放型经济的不良影响,虽然水资源利用效率有所提高,且改进了节水和排污技术,但人类对于水资源造成的破坏存量还有待进一步治理。2017 - 2018 年综合指数由 0.600 提高到 0.791,均处于比较安全水平,该期间环保投资总额、生态环境补水总量、城市污水处理率和生活垃圾无害化处理率等均首创新高,有向非常安全水平发展的良好态势,这得益于长江经济带、长三角城市群和淮河生态经济带的协同发展以及加强流域综合治理和城市合作联动的实施。

3.2.2 水资源生态安全横向评价分析 水资源生态安全综合指数可细分为威胁、质量和调控3大指数。由表4可知,2013-2018年威胁指数呈波动上升趋势,其中2015年略有下降,但是降幅很小。但随着粗放型经济转型升级和节能减排技术的提升,威胁指数呈良性发展的态势;2013-2016年质量指数平均每年增长43.82%,呈快速上涨趋势,虽然2017年有所下降,但2018年又有好转,整体发展向好。研究时段内质量系统中的人均GDP、城镇化率、人均水资源量和地均降水量等指标整体保持增长,这与安徽省在新常态背景下,加快产业转型升级有着密切关系;2013-2018年实施了建成区绿化和污水管道增加等调控措施,调控指数从0.024增大到0.374,年均增长率达81.06%,这说明安徽省政府落实“一二三四五”发展规划,配合水利部加快水环境优美乡村建设,打造水生态文明城市取得了显著的成效。

3.3 障碍因素判别

根据公式(6)、(7)计算2013-2018年安徽省水资源生态安全各评价指标和各子系统的障碍度,从而对障碍因素进行判别。

3.3.1 指标层障碍度 表5为2013和2018年安徽省水资源生态安全按照各评价指标障碍度大小排列为前7名的障碍因素。

表5 2013和2018年安徽省水资源生态安全主要障碍因素

指标 排序	2013年		2018年	
	障碍因素	障碍度/%	障碍因素	障碍度/%
1	C_{35}	14.295	C_{26}	20.246
2	C_{33}	9.181	C_{15}	18.782
3	C_{11}	8.157	C_{22}	16.015
4	C_{21}	7.337	C_{27}	12.562
5	C_{31}	7.090	C_{25}	9.578
6	C_{27}	6.917	C_{14}	7.086
7	C_{22}	6.398	C_{16}	7.068

由表5可知,2013年制约水资源生态安全的障碍因素主要聚集于调控子系统,包含污水管道比例和城市污水处理率等,其次是质量子系统。而到2018年,障碍因素主要集中在质量子系统,其次是威胁子系统,分别为饮用水源水质达标率、人均污水排放量、人均水资源量、第三产业贡献率、地均降水

量、水土资源匹配系数和地下水开采量比例。从障碍度变化趋势看,污水管道比例、城市污水处理率、人均GDP和环保投资比例上升幅度较大,单位GDP废水排放量下降幅度较大,这些障碍因素对安徽省水资源生态安全的影响逐渐变小;饮用水源水质达标率、第三产业贡献率、人均水资源量和地均降水量整体上升幅度较小,人均污水排放量逐渐增大,但水土资源匹配系数不增反减,这些障碍因素对安徽省水资源生态安全的制约能力越来越强。虽然水土资源匹配系数权重较小,但障碍度排名却很靠前,表明虽然政府逐年加大环保投资力度,加强固废危废污染防治联防联控,但由于缺乏有效的管制与治理,水土资源匹配系数依然较低,影响了水资源生态安全的提升。因此,安徽省在建立水生态文明城市的同时,应健全区域环境治理联动机制,整合各项障碍因素进行协同发展。

3.3.2 子系统障碍度 图2为2013-2018年安徽省水资源生态安全各子系统障碍度。

由图2可以看出,2013-2018年各子系统障碍度变化趋势存在明显差异。质量子系统和威胁子系统呈波动上升趋势,前者波幅较大,后者呈不明显的“W”型,变化幅度较为平缓;调控子系统障碍度则呈先增大后减小的趋势,于2018年降至0.6%。从整体上看,2016年以前,调控子系统障碍度占主导作用;2016年以后,威胁子系统和质量子系统障碍度占据主导作用,并且质量子系统障碍度影响更大。在经济新常态背景下,政府应当加强水体水质管控,加大对水资源的综合开发治理,从系统论维度推进水资源生态安全的良性发展。

3.4 生态安全动态预警

借助GSTA V7.0软件,运用EGM模型预测2019-2023年安徽省水资源生态安全警情的演变趋势,预测模型如公式(11)所示。为了检验预测模型的精度,首先对2013-2018年安徽省生态安全综合指数原始值与预测值的拟合趋势进行比较,如图3所示。

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 0.260e^{0.222t} \quad (11)$$

由图3可见,模型预测值与原始值较为吻合。经计算,预测模型平均绝对误差为5.92%,模型精度检验为良好,可达94.08%。

根据预测可得到2019-2023年安徽省水资源生态安全各子系统指数及综合指数,结合表1的安全预警标准,将预测结果列于表6。

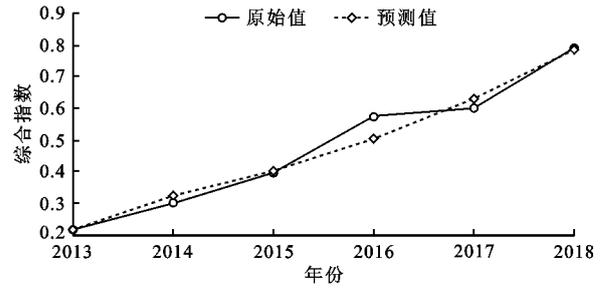
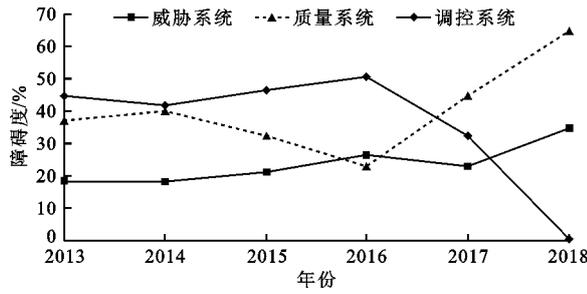


图 2 2013 - 2018 年安徽省水资源生态安全各子系统障碍度

图 3 2013 - 2018 年安徽省生态安全综合指数拟合趋势

表 6 2019 - 2023 年安徽省水资源生态安全警情预测

年份	威胁系统		质量系统		调控系统		综合系统	
	安全指数	警度	安全指数	警度	安全指数	警度	安全指数	警度
2019	0.191	巨警	0.297	重警	0.530	中警	0.984	无警
2020	0.213	重警	0.340	重警	0.799	轻警	1.229	无警
2021	0.237	重警	0.390	重警	1.206	无警	1.535	无警
2022	0.264	重警	0.447	中警	1.819	无警	1.917	无警
2023	0.294	重警	0.512	中警	2.744	无警	2.394	无警

从表 6 中各子系统来看,威胁子系统在 2019 年警情为“巨警”,2020 - 2023 年均保持在“重警”级别;质量子系统在 2019 - 2021 年警情为“重警”,2021 年以后均为“中警”;调控子系统在 2019 年警情为“中警”,2020 年已达到“轻警”,之后均为“无警”。结合表 4 和表 6 可以看出,2013 - 2015 年安徽省水资源生态安全综合指数警情为“重警”,2016 年减轻为“中警”,2017 - 2018 年警情为“轻警”,2018 年以后已达优质水平,均为“无警”。随着生态文明理念的增强和生态城市建设的推进,安徽省水资源生态安全会不断好转,但由于不可抗力因素的影响(比如自然灾害、政府行为等),依然面临着不可预测的挑战。

4 讨 论

由上述实证分析可知,提高区域生态安全水平的关键在于如何协调好各子系统之间的联系,与参考文献[21]得出的结论一致,但参考文献[21]只评价了水资源安全水平,未对区域水资源生态安全进行预测和障碍因素诊断。本文得出的人均水资源量、第三产业贡献率等已经成为制约水资源生态安全水平发展的新障碍因素等结论与文献[19]的结论一致,证明各省市存在的水资源生态安全问题存在共性。文献[12]、[13]、[15]运用生态安全指数对森林、土地等进行评价并得出相应结论,同理也可

以适用于水资源的评价。本文基于 TQR(威胁 - 质量 - 调控)概念构建模型,将生态安全指数与灰色预测模型相结合进行评价和预测,并利用障碍度模型进行障碍因素诊断,得出的研究结果可以相对客观地反映安徽省水资源生态安全水平以及安全警情演变趋势。

5 结 论

(1)2013 - 2018 年安徽省水资源生态安全综合指数呈稳步上升态势。2013 - 2015 年生态安全等级处于较不安全水平;2016 年生态安全综合指数涨幅最大,达到临界安全水平;2017 - 2018 年生态安全等级持续提高至比较安全水平,有向非常安全水平发展的良好态势。制约水资源生态安全的主要障碍因素是饮用水源水质达标率、人均污水排放量等。

(2)2013 - 2016 年,调控子系统障碍度占主导作用;2016 - 2018 年,威胁子系统和质量子系统障碍度占据主导作用,并且质量子系统障碍度影响更大。2013 - 2015 年安徽省水资源生态安全警情为“重警”,2016 年减轻为“中警”,2017 - 2018 年警情为“轻警”,2019 - 2023 年生态安全警情预测均为“无警”。

(3)在经济新常态背景下,安徽省政府应加大水资源综合开发治理,严禁排放未经处理的工业废水和生活污水,减少对地下水的开采量,从而减轻对

环境污染的压力;加强研发节能减排等绿色科学技术,提高农田的灌溉效率,保持生态环境补水,进而优化水土资源匹配系数。安徽省应紧紧抓住长江经济带、长三角城市群和淮河生态经济带协同发展的机遇,设置跨流域跨区域生态补偿机制。同时健全区域环境治理联动机制,加强流域综合治理和城市合作联动,提升生态环境共保联治能力。不断推进绿色新型城镇化建设,配合水利部加快推动水环境美丽乡村建设,打造水生态文明城市,从而提升安徽省水资源生态安全水平。

参考文献:

- [1] 中国政府网. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL]. (2012-02-15) [2020-12-31]. http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm.
- [2] 许东阳,任永泰,王如意,等. 基于 PSO-PPE 模型的黑龙江省水资源生态安全探析[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4):109-114.
- [3] 徐玉霞. 宝鸡市 12 区县水资源生态安全基尼系数分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 175-179.
- [4] 张凤太,苏维词. 基于组合权重法的岩溶地区地下水水资源生态安全动态演化研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(12):53-58.
- [5] 龚巧灵,官冬杰. 基于 BP 神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6):292-299.
- [6] 李鹏飞,杨广,李小龙,等. 玛纳斯河流域水资源-生态-经济复合系统的安全评价[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(1):95-101.
- [7] COUTURE R M, MOE S J, LIN Yan, et al. Simulating water quality and ecological status of Lake Vansjø, Norway, under land-use and climate change by linking process-oriented models with a Bayesian network[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621:713-724.
- [8] 代稳,张美竹,秦趣,等. 基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 228-233.
- [9] 高媛媛,王红瑞,许新宜,等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2):204-214.
- [10] 中国商务部网站. 六省概况-安徽省[EB/OL]. http://expocentralchina.mofcom.gov.cn/1800000608_10000076_8.html.
- [11] 郑晓云,杜娟,苏义坤. 基于改进熵权法的城市可持续发展评价——以哈尔滨市为例[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4):65-71.
- [12] 王金龙,杨伶,李亚云,等. 中国县域森林生态安全指数——基于 5 省 15 个试点县的经验数据[J]. 生态学报, 2016, 36(20):6636-6645.
- [13] 朱莲莲,谢永宏,宋冰冰,等. 基于 DPSIR 模型的湖南省生态安全评价及安全格局分析[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(6):1084-1090.
- [14] 吴一凡,雷国平,路昌,等. 基于改进 TOPSIS 模型的大庆市城市土地利用绩效评价及障碍度诊断[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4):85-90.
- [15] 向文,涂建军,李琪,等. 基于灰色预测模型的长江经济带城市土地生态安全预警[J]. 生态科学, 2018, 37(2):78-88.
- [16] 谷缙,任建兰,于庆,等. 山东省生态文明建设评价及影响因素——基于投影寻踪和障碍度模型[J]. 华东经济管理, 2018, 32(8):19-26.
- [17] 刘思峰,曾波,刘解放,等. GM(1,1) 模型的几种基本形式及其适用范围研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3):501-508.
- [18] 章恒全,何薇. 基于主成分回归与灰色神经网络模型的水资源承载力需水量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1):103-108.
- [19] 吴光娴. 湖北省水资源承载力评价与预测研究[D]. 武汉:中南财经政法大学, 2019.
- [20] 符传君,马超,许栋. 基于灰色理论和神经网络的海口市水资源需求预测[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5):96-98+101.
- [21] 曹琦,陈兴鹏,师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1591-1599.