

# 江西省水资源可持续利用水平及其障碍因素

杜海娇, 邓群钊, 龙映辉, 张志强

[南昌大学(南昌)公共政策与管理学院, 江西 南昌 330000]

**摘要:** [目的] 评估江西省水资源可持续利用水平, 分析其主要障碍因素, 为该区域水资源治理政策优化提供理论参考。[方法] 以 DPSIR 模型为框架, 构建包括 29 项二级指标的江西省水资源可持续利用评价指标体系, 运用熵权-TOPSIS 评估江西省水资源可持续利用水平变化趋势, 并利用障碍度诊断法识别阻碍水资源可持续利用的主要障碍因子。[结果] 江西省 2011—2020 年水资源可持续利用水平, 除 2013 和 2018 年外, 呈逐年上升趋势, 2015 年后水资源可持续利用平均水平(0.375 8)较 2015 年前(0.340 8)提高约 10.15%。主要障碍因子包括废水治理设施处理能力、水资源总量、地表水调蓄能力、废水治理设施数、人均 GDP 等。[结论] 较低经济发展与科学技术水平所导致的治理投入不足与治理效率低下问题, 依然阻碍着江西省水资源可持续利用。建议水资源治理政策应从坚持“一河一策”, 注重创新技术, 升级产业结构, 建立政策共同体等方面进行优化。

**关键词:** 水资源可持续利用; DPSIR 模型; 综合评价; 熵权-TOPSIS 法; 障碍度模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)06-0200-09

**中图分类号:** TV213.9, C93

**文献参数:** 杜海娇, 邓群钊, 龙映辉, 等. 江西省水资源可持续利用水平及其障碍因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 200-208. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.025; Du Haijiao, Deng Qunzhao, Long Yinghui, et al. Sustainable utilization and obstacle factors of water resource in Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 200-208.

## Sustainable Utilization and Obstacle Factors of Water Resource in Jiangxi Province

Du Haijiao, Deng Qunzhao, Long Yinghui, Zhang Zhiqiang

[School of Public Policy and Management, Nanchang University (Nanchang), Nanchang, Jiangxi 330000, China]

**Abstract:** [Objective] The sustainable water resource utilization in Jiangxi Province were evaluated and its main obstacles were analyzed in order to provide theoretical references for optimizing water resource governance policy. [Methods] The DPSIR model was used as a framework to construct a sustainable water resource utilization evaluation index system (including 29 secondary indicators) for Jiangxi Province. The trend of changes in the level of sustainable water resources utilization in Jiangxi Province was evaluated using the entropy-weight TOPSIS method, and the main obstacle factors hindering the sustainable water resources utilization were identified using the obstacle degree diagnosis method. [Results] The sustainable water resource utilization level in Jiangxi Province from 2011 to 2020 (except for 2013 and 2018) increased with increasing years. The average sustainable water resource utilization level after 2015 (0.375 8) was 10.15% greater than before 2015 (0.340 8). The main obstacle factors included the treatment capacity of wastewater treatment facilities, total water resources, surface water storage capacity, number of wastewater treatment facilities, and per capita GDP. [Conclusion] Insufficient investment in governance and low management efficiency due to low economic development and science and technology level continue to hinder the sustainable use of water resources in Jiangxi Province. It is suggested that water resource governance policies

收稿日期: 2023-02-26

修回日期: 2023-06-06

资助项目: 江西省青马工程项目“基于系统重构的河长制治理机理及其长效机制研究”(23ZXQM98); 水体污染控制与治理科技重大专项“太湖流域浙江片‘五水共治’长效管理机制创新与水环境治理技术集成推广应用”(2018ZX07208-009)

第一作者: 杜海娇(1997—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士研究生, 研究方向为河长制治理系统评价。Email: 1847005916@qq.com。

通信作者: 邓群钊(1963—), 男(汉族), 江西省余干县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事社会—生态系统治理方面的研究。Email: dengqz@ncu.edu.cn。

should be optimized by adhering to the measures defined in “one policy for one river”, focusing on innovative technology, upgrading industrial structure, and establishing policy communities.

**Keywords: sustainable water resource utilization; DPSIR model; comprehensive evaluation; entropy weight-TOPSIS; obstacle degree diagnosis method**

1997年,联合国可持续发展委员会将中国列入13个贫水国家之一,中国人均水资源量仅为 $2\ 058\text{ m}^3$ ,不足世界水平的 $1/4$ <sup>[1]</sup>。近些年,受气候变化、经济粗放发展等自然及社会因素的影响,江西省水资源短缺、水源污染严重、水生态环境恶化等问题尤为突出<sup>[2]</sup>,水资源供需矛盾持续恶化,成为阻碍江西可持续发展的瓶颈。为有效解决江西省水资源困境,江西省政府陆续推行了《河湖长制》<sup>[3]</sup>《排污权交易制度》<sup>[4]</sup>《最严格的水资源管理制度》<sup>[5]</sup>《水污染防治行动计划》等<sup>[6]</sup>一系列水资源治理政策,对水资源的水量、水质、利用效率等方面实行最严格的管控,从制度层面助推了水资源的可持续利用。不过,这些水资源治理政策是否真正提升了江西水资源可持续利用水平仍需进一步证实。

水资源可持续利用是指既满足人类社会系统人民生活、生产及经济发展正常需求,同时维持水资源系统良性循环,实现社会系统与水资源系统协调发展的一种水资源合理利用方式<sup>[7-8]</sup>。水资源可持续利用水平是反映区域社会系统与水资源系统协调发展水平、水资源状态(水质、水量、时空变化)、开发利用程度、水资源治理工程状态、水资源治理政策实施效果的综合指标<sup>[9]</sup>。纵观国内外研究,有关水资源可持续利用的研究众多。初期,主流观点认为当水资源的开发不超过其生态承载力,便可实现水资源的可持续利用<sup>[8]</sup>,如孟丽红等<sup>[10]</sup>,便选取了降水量、灌溉率、水资源开发利用程度、生活用水定额、人均供水量、生态环境用水率等指标对江西省水资源可持续利用进行了评估。后来,学者们意识到,水资源可持续利用应是一个动态系统问题。当水资源系统受到外界压力和驱动力影响时,系统的状态便会发生改变,做出相应的响应<sup>[11]</sup>。实际上,水资源的可持续利用是水资源系统驱动力、压力、状态、影响、响应(DPSIS模型)共同作用的结果。如国外学者Mukand等<sup>[12]</sup>就在DPSIS模型的基础上,从水的可用性、水的生产力、相关灾害、流域健康、水治理5个方面,构建了水资源的可持续利用的评价指标体系;国内学者韩美等<sup>[7]</sup>也以DPSIS模型为框架,构建了包括21项指标的黄河三角洲可持续利用评价指标体系。截至目前,学术界对于水资源可持续利用内涵的理解基本达成一致。不过,由于各地水资源禀赋状态与开发利用状态各具地区特点,研究者更愿意结合当地自然状态重新构建水

资源可持续利用评价指标体系。而现有关于江西省水资源可持续利用评价的研究依然建立在水资源承载力思想上,缺乏水资源系统面对外界压力时的动态响应过程的系统性思考。为此,本文以江西省各地级市为研究对象,首先,基于DPSIS框架构建出江西省水资源可持续利用评价指标体系;然后,应用熵权-TOPSIS法计算水资源可持续利用水平;最后,利用障碍度模型法对水资源可持续利用的主要障碍因子进行识别。以期对江西省水资源的可持续利用提升以及水资源治理政策优化提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

江西省内有大小河流共2 400多条,主要包括赣江、抚河、信河、饶河、修河5大河系和中国第一大淡水湖鄱阳湖,多年平均水资源总量约为 $1.79 \times 10^{11}\text{ m}^3$ ,人均水资源量约为 $3\ 620\text{ m}^3$ 。水资源自然条件虽优于国内其他部分省份,但水资源系统依然存在降水量时空分布不均、水资源开发利用率低、水资源供需矛盾等问题。为有效缓解江西省水资源问题,江西省政府做出诸多努力,2011年推出了《实施最严格水资源管理制度》,2012年印发了《江西省排污权有偿使用和交易试点工作方案的通知》,2015年发布了《江西省实施“河长制”工作方案的通知》<sup>[13]</sup>。目前江西拥有覆盖范围最广,规格最高,体系最完备,专项行动最有力度的河长制工作机制<sup>[14]</sup>,还曾受到中央河长办重点表扬。为此,本文将研究区域划分至江西省,以江西省内11个地级市为研究对象,各指标数据主要来源于2011—2020年江西省各地级市水资源公报、统计年鉴、生态环境状况公报以及中国知网、维普、万方等数据库。

### 1.2 水资源可持续利用评价指标体系

1.2.1 一级评价指标 欧洲环境署(EEA)将驱动力—压力—状态—影响—响应模型(DPSIR)定义为描述社会与环境之间相互作用、因果关系的框架模型<sup>[15]</sup>,能够清晰描述环境问题的因果链、量化定性信息、提升问题分析的可操作性<sup>[16]</sup>。如图1所示,气候、社会、人口、经济发展变化作为长期驱动力(D)作用于水资源系统,系统产生压力(P),引起水资源系统状态(S)发生变化,对系统内水资源、水资源环境造成影响(I),这些影响会促使人类社会做出相应响

应(R),这些响应又分别作用于系统的驱动力、压力、状态。基于 DPSIR 模型框架,本文以系统所受到的驱动力、压力、状态、影响、响应作为水资源可持续利用的一级评价指标。

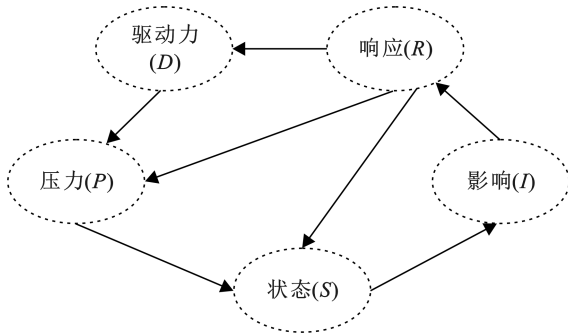


图 1 驱动力—压力—状态—影响—响应模型 (DPSIR) 模型框架

Fig.1 Framework of DPSIR model

1.2.2 二级评价指标 遵循指标选取科学性、全面性、可操作性、数据可获得性的原则。首先,根据江西省农业种植面积大,经济发展水平略低的地区特点<sup>[14]</sup>,确定人均 GDP、城镇化率、农业用水量比例、万元 GDP 用水量、农田灌溉水有效利用系数为必选二级指标。然后,统计已有水资源可持续利用评价指标体系<sup>[10-11,13-15]</sup>的评价指标,选用其中频率超过 2 次的指标,构成包括 31 项二级指标的初级水资源可持续利用评价指标体系。最后,邀请两位水利专家对初建指标进行科学评定,决定删除总 GDP 和总人口数量 2 项指标,最终构建出包括 29 项二级指标的评价指标体系(表 1)。具体二级指标选取过程为:①驱动力是引起系统变动的自然、社会、经济等方面的外界因素,一般短期内不受人为控制的影响,而影响水资源可持续利用的驱动力来源于水资源系统外界的自然条件和社会经济活动<sup>[10]</sup>。从自然与社会条件两方面驱动作用的考虑,以降水量( $D_1$ )来表征自然条件的驱动力,以人口密度( $D_2$ )、等三产业 GDP 比例( $D_3$ )、人均 GDP( $D_4$ )、城镇化率( $D_5$ ) 4 个指标来表征人类社会经济活动的驱动力;②压力是系统受外界驱动力对系统自身所产生的压力。一般水资源系统所承受压力来自水量与水质两方面<sup>[17]</sup>。农业、工业、生活的等社会活动的过量用水,将直接影响水资源系统的水资源总量。因此,选取农业用水量比例( $P_1$ )、工业用水量比例( $P_2$ )、城镇公共用水量比例( $P_3$ )、居民生活用水量比例( $P_4$ )、人工生态环境补水量所占比例( $P_5$ ),来表征水资源系统水量所承受的压力。工业废水和生活污水的超额排放会降低水资源质量,因此,选取工业废水排放量( $P_6$ )、生活污水排放量

( $P_7$ ),来表征水资源系统水质所承受的压力;③状态是指系统受压力影响后的系统自身属性状态及与系统交互状态的变化<sup>[11]</sup>。本文重点关注的是人类社会与水资源之间的交互过程。因此,只选取水资源总量( $S_1$ )单一指标来表征系统自身属性状态,另外选取水资源开发利用率( $S_2$ )、耗水率( $S_3$ )、以地表水调蓄能力( $S_4$ )、万元 GDP 用水量( $S_5$ )、万元工业增加值用水量( $S_6$ )等多个指标来表征人类社会系统与水资源系统的交互状态;④系统自身属性状态的改变,既会影响系统内部的自循环,也会影响该系统与其他系统的交互过程。因此,分别以断面水质 I—III 类所比例( $I_1$ )和以产水模数( $I_3$ )来表征水资源系统自身受影响程度,以人均水资源量( $I_2$ )表征水资源系统与人类社会系统交互过程受影响程度;⑤响应是指人类社会面对驱动力、压力、状态改变的影响时所采取的响应措施<sup>[13,15]</sup>。河长制采用了多种响应措施,包括建成区绿化面积的扩大、农田灌溉水有效面积的增加、产业结构的升级、污水处理设施的投资等。因此,选取建成区绿化覆盖率( $R_1$ )、农田灌溉水有效利用系数( $R_2$ )、第三产业占 GDP 比重增加值( $R_3$ )、废水治理设施数( $R_4$ )、废水治理设施处理能力( $R_5$ )、污水处理率( $R_6$ )、排污中 COD 消减率( $R_7$ )、排污中氮磷消减率( $R_8$ )进行表征。

### 1.3 研究过程及方法

1.3.1 数据预处理 为消除变量量纲和变异范围影响,采用极值标准化的方法对原始数据进行正向处理〔公式(1)–(2)],选用 Cronbach's Alpha 法对所构建的评价指标体系进行信度分析,分析结果显示信度系数为 0.931,大于 0.900,数据可信度较好,通过 Hotelling 的  $T_2$  检验,指标间平均得分相等性成立。所构建的评价指标体系,项目间平均得分相等性较好,能够客观反映江西省水资源可持续利用水平。

$$r_{\lambda ij} = \frac{x_{\lambda ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$r_{\lambda ij} = \frac{x_{\max} - x_{\lambda ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $x_{\lambda ij}$  是  $\lambda$  年评价对象  $j$  的二级指标  $i$  的原始数值; $r_{\lambda ij}$  为标准化后的值。 $x_{\min}$  是在评价年份内,全部评价对象的二级指标  $i$  的最小值; $x_{\max}$  是最大值。

1.3.2 指标权重确定 常用的评价指标权重确定方法包括 AHP 层次分析法、PCA 主成分分析法、熵权法等。为保证评价结果的客观性,选用熵权法<sup>[17-18]</sup>,通过评价指标数据的信息熵大小来确定评价指标客观权重,具体步骤如下(指标权重结果详见表 2):

表 1 江西省水资源可持续利用评价指标体系

Table 1 Assessment index system for sustainable use of water resources in Jiangxi Province

一级指标	二级指标	计算方法	选取意义	类型
D 驱动力	D <sub>1</sub> 降水量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	—	气候条件对水资源系统的驱动	正
	D <sub>2</sub> 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	人口总数/区域面积	人口聚集程度对水资系统的驱动	负
	D <sub>3</sub> 第三产业 GDP 比例/%	第三产业 GDP/总 GDP	产业结构对水资源系统的驱动	正
	D <sub>4</sub> 人均 GDP/万元	地区生产总值/总人口	经济发展状况对水资源系统的驱动	正
	D <sub>5</sub> 城镇化率/%	城镇人口总数/总人口数	区域发展对水资源系统的驱动	负
P 压力	P <sub>1</sub> 农业用水量比例/%	农业用水量/总用水量	农业发展对水资源量的压力	负
	P <sub>2</sub> 工业用水量比例/%	工业用水量/总用水量	工业发展对水资源量的压力	负
	P <sub>3</sub> 城镇公共用水量比例/%	城镇公共用水量/总用水量	区域发展对水资源量的压力	负
	P <sub>4</sub> 居民生活用水量比例/%	居民生活用水量/总用水量	生活需求对水资源量的压力	负
	P <sub>5</sub> 人工生态环境补水量比例/%	人工生态环境补水量/总用水量	支持水资源系统的能力	正
	P <sub>6</sub> 工业废水排放量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	—	工业发展对水资源质量的压力	负
	P <sub>7</sub> 生活污水排放量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	—	人类生活对水资源质量的压力	负
S 状态	S <sub>1</sub> 水资源总量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	—	水资源总量状态	正
	S <sub>2</sub> 水资源开发利用率/%	总用水量/水资源总量	水资源开发利用状态	负
	S <sub>3</sub> 耗水率/%	总耗水量/总用水量	人类社会耗水状态	负
	S <sub>4</sub> 地表水调蓄能力/%	(调水量+蓄水量)/总供水量	人类调节水资源系统状态	正
	S <sub>5</sub> 万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>	—	用水的经济效益状况	负
	S <sub>6</sub> 万元工业增加值用水量/m <sup>3</sup>	—	工业用水的效益状况	负
I 影响	I <sub>1</sub> 断面水质 I—III 类占比/%	I—III 类地表水量/总地表水量	状态变化对水资源系统的影响	正
	I <sub>2</sub> 人均水资源量/(m <sup>3</sup> /人)	水资源总量/区域总人口	状态变化对人类社会的影响	正
	I <sub>3</sub> 产水模数/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	水资源总量/区域总面积	状态变化对水资源系统的影响	正
R 响应	R <sub>1</sub> 建成区绿化覆盖率/%	建成区绿化面积/区域总面积	面对水土流失的响应	正
	R <sub>2</sub> 农田灌溉水有效利用系数/%	有效灌溉面积/耕地面积	面对农业用水压力的响应	正
	R <sub>3</sub> 第三产业占 GDP 比重增加值/%	第三产业 GDP 比例同比增长值	面对市场结构驱动响应	正
	R <sub>4</sub> 废水治理设施数/套	—	治理水污染的响应	正
	R <sub>5</sub> 废水治理设施处理能力/(10 <sup>4</sup> t·d <sup>-1</sup> )	—	治理水污染的响应	正
	R <sub>6</sub> 污水处理率/%	污水处理量/污水排放总量	实际响应效果	正

(1) 计算单项指标熵值。

$$e_i = -\frac{1}{\ln h} \times \sum_{\lambda=1}^h \sum_{j=1}^m (f_{\lambda ij} \ln f_{\lambda ij}) \quad (3)$$

$$f_{\lambda ij} = \frac{r_{\lambda ij}}{\sum_{\lambda=1}^h \sum_{j=1}^m r_{\lambda ij}} \quad (4)$$

式中:  $h$  是评价年份  $\lambda$  的最大值 ( $h=10$ );  $m$  是评价对象  $j$  的个数 ( $m=11$ );  $f_{\lambda ij}$  为标准化  $r_{\lambda ij}$  占有年份

的全部评价对象的标准化  $r_{\lambda ij}$  之和的比值。 $e_i$  为二级指标  $i$  的熵值。

(2) 计算单项指标权重。

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (5)$$

式中:  $n$  是二级指标  $i$  的最大值 ( $n=29$ );  $\omega_i$  二级指标  $i$  的权重。

表 2 江西省水资源可持续利用评价指标权重

Table 2 Weights for sustainable use of water resources in Jiangxi Province

一级指标 (权重)	D 驱动力 (0.248)	P 压力 (0.147)	S 状态 (0.193)	I 影响 (0.090)	R 响应 (0.318)
二级指标 (权重)	D <sub>1</sub> 降水量(0.366)	P <sub>1</sub> 农业用水量比例(0.286)	S <sub>1</sub> 水资源总量(0.431)	I <sub>1</sub> 断面水质 I—III 类占比(0.138)	R <sub>1</sub> 建成区绿化覆盖率(0.081)
	D <sub>2</sub> 人口密度(0.062)	P <sub>2</sub> 工业用水量比例(0.154)	S <sub>2</sub> 水资源开发利用率(0.044)	I <sub>2</sub> 人均水资源量(0.446)	R <sub>2</sub> 农田灌溉水有效利用系数(0.106)
	D <sub>3</sub> 第三产业 GDP 比例(0.144)	P <sub>3</sub> 城镇公共用水量比例(0.202)	S <sub>3</sub> 耗水率(0.154)	I <sub>3</sub> 产水模数(0.415)	R <sub>3</sub> 第三产业占 GDP 比重增加值(0.045)
	D <sub>4</sub> 人均 GDP(0.239)	P <sub>4</sub> 居民生活用水量比例(0.153)	S <sub>4</sub> 地表水调蓄能力(0.222)		R <sub>4</sub> 废水治理设施数(0.22)
	D <sub>5</sub> 城镇化率(0.189)	P <sub>5</sub> 人工生态环境补水量比例(0.049)	S <sub>5</sub> 万元 GDP 用水量(0.068)		R <sub>5</sub> 废水治理设施处理能力(0.27)
		P <sub>6</sub> 工业废水排放量(0.028)	S <sub>6</sub> 万元工业增加值用水量(0.081)		R <sub>6</sub> 污水处理率(0.062)
		P <sub>7</sub> 生活污水排放量(0.129)			R <sub>7</sub> 排污中 COD 消减率(0.114)
				R <sub>8</sub> 排污中氮磷消减率(0.103)	

1.3.3 评价方法选择 水资源可持续利用水平的评估问题可以被理解成一个系统决策问题。TOPSIS 法是系统工程中常用的决策技术,主要适用于解决多目标有限方案的决策问题,通过距离最优理想解左右来确定评价价值。本文运用 TOPSIS 法计算各项指标贴近正理想解的程度来表征水资源可持续利用水平的变化趋势<sup>[19]</sup>。具体步骤为:

(1) 计算  $\lambda$  年各评价对象的二级指标的正负理想解。

$$Y_{\lambda}^{+} = \left\{ \max_{(1 \leq j \leq m, 1 \leq \lambda \leq h)} r_{\lambda ij} \mid i=1, 2, \dots, n \right\} \\ = \{y_{\lambda 1}^{+}, y_{\lambda 2}^{+}, \dots, y_{\lambda n}^{+}\} \quad (6)$$

$$Y_{\lambda}^{-} = \left\{ \min_{(1 \leq j \leq m, 1 \leq \lambda \leq h)} r_{\lambda ij} \mid i=1, 2, \dots, n \right\} \\ = \{y_{\lambda 1}^{-}, y_{\lambda 2}^{-}, \dots, y_{\lambda n}^{-}\} \quad (7)$$

式中:  $y_{\lambda i}^{+}/y_{\lambda i}^{-}$  是二级指标  $i$  的正/负理想解;  $Y_{\lambda}^{+}/Y_{\lambda}^{-}$  是全部二级指标正/负理解的集合。

(2) 计算  $\lambda$  年各评价对象的二级指标值与正/负理想解距离。

$$D_{\lambda j}^{+} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i (y_{\lambda i}^{+} - r_{\lambda ij})^2} \quad (8)$$

表 3 水资源可持续利用评价标准

Table 3 Assessment criteria for sustainable use of water resources

贴近度	0.00~0.20	0.20~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	0.80~1.00
评价标准	E	D	C	B	A
可持续程度	不可持续	可持续困难	基本可持续	可持续	基本未开发

注: 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 包括在前一项内。

1.3.5 主要障碍因子识别 为了厘清影响江西省水资源可持续利用的主要障碍因素,明确水资源治理政策下一步调整的要点,选用障碍度诊断法<sup>[21]</sup>,来识别目前阻碍江西省水资源可持续利用水平的主要障碍因子。具体步骤为:

(1) 计算  $\lambda$  年,  $j$  评价对象的标准化二级指标的偏离度。

$$I_{\lambda ij} = 1 - r_{\lambda ij} \quad (11)$$

式中:  $I_{\lambda ij}$  是年份  $\lambda$  评价对象  $j$  的二级指标  $i$  的标准化值与 1 的偏离大小。

(2) 计算  $\lambda$  年,  $j$  评价对象二级指标对总目标的障碍度。

$$O_{\lambda ij} = \frac{I_{\lambda ij} \times \omega_i}{\sum_{i=1}^n (I_{\lambda ij} \times \omega_i)} \quad (12)$$

式中:  $O_{\lambda ij}$  是年份  $\lambda$  评价对象  $j$  的二级指标  $i$  对总目标的障碍度。

(3) 计算  $\lambda$  年,  $j$  评价对象一级指标对总目标的障碍度。

$$D_{\lambda j}^{-} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i (y_{\lambda i}^{-} - r_{\lambda ij})^2} \quad (9)$$

式中:  $D_{\lambda j}^{+}/D_{\lambda j}^{-}$  是全部二级指标标准化值与其正/负理想解的距离之和。

(3) 计算  $\lambda$  年贴近度。

$$T_{\lambda j} = \frac{D_{\lambda j}^{-}}{D_{\lambda j}^{+} + D_{\lambda j}^{-}} \quad (10)$$

式中:  $T_{\lambda j}$  是评价对象  $j$ , 在年份  $\lambda$  时, 与最优理想距离的贴近度。

1.3.4 评价等级划分 依据水资源发展规划、国际及国家认可的相关标准,以及已有水资源可持续利用水平划分标准<sup>[20]</sup>,将贴近度划分为 5 个等级标准(表 3)。A 级为几乎未受人类活动干扰,水资源基本未开发;B 级为受人类活动干扰较小,水资源尚可支持可持续利用;C 级为水资源已受到人类活动一定的干扰,水资源只能支持基本可持续利用;D 级为水资源已受到人类活动严重干扰,水资源难以维持可持续利用;E 级为水资源系统陷入崩溃状态,水资源无法可持续利用。

$$U_{\lambda I} = \sum_{i \in I} O_{\lambda ij} \quad (13)$$

式中:  $U_{\lambda I}$  是年份  $\lambda$  评价对象  $j$  的一级指标  $I$  对总目标的障碍度。

## 2 结果与分析

### 2.1 评价结果

评价结果变化趋势如图 2—3 和表 4 所示。经比较本文 2011—2017 年江西省水资源可持续利用水平变化趋势,与文献<sup>[22]</sup>中同年份区间的江西省水资源综合利用效率变化趋势相吻合,说明本文评估结果具有一定可信性。下面将从江西省省域与市域两个层面的水资源可持续利用水平描述和分析。

2.1.1 江西省省域水资源可持续利用水平 江西省省域水资源可持续利用水平评估结果如图 2 所示。除 2013 和 2018 年出现下降趋势外,其他年份江西省水资源可持续利用综合得分地区均值呈逐年上升趋势,由 2011 年的 0.300 上升到 2020 年的 0.398,整体省域层面水资源可持续利用情况正向逐步向好的趋势发展,将要突破水资源可持续困难的困境。

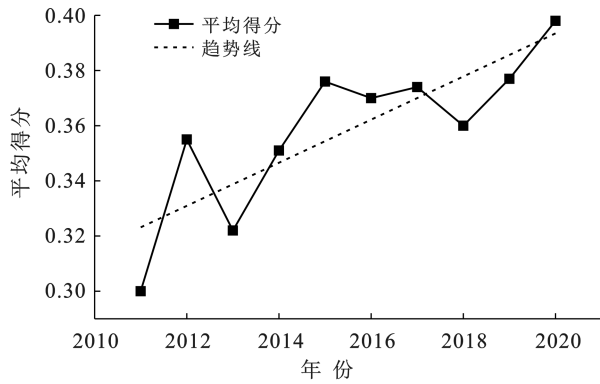


图2 江西省水资源可持续利用各地区平均综合得分趋势  
Fig.2 Trend of average composite score of sustainable water resources utilization in Jiangxi Province

对比 2011—2020 年江西省水资源可持续利用水平综合得分所覆盖雷达图(图 3)可知,2015 年是明显分界线,2015 年前后所覆盖面积存在明显差异,2015 年后所覆盖面积明显大于 2015 年之前。2011—2015 年平均综合得分为 0.340 8,2016—2020 年平均综合得分为 0.375 8,提高约 10.15%。2011—2015 年是江西省不断推行完善各项水资源治理政策的时间,2015 年更是在全省范围内建立了最高规格的河长制工作机制,有助于切实提升江西省水资源可持续利用水平。从具体一级指标得分情况来看(表 4),水资源治理政策对各项一级指标表现出了不同的治理效果,其中驱动力指标降低约 3.43%,状态指标提升约 9.77%,影响指标降低约 9.77%,响应指标提升约 16.2%,而外界压力指标却增加了 4.48%。这可能与近些年农业、工业、居民生活水资源开发速度以及污水和废水排放速度都加快相关。水资源系统所承受外界压力在逐年增加,各项水资源治理政策虽然能够提高水资源可持续利用整体水平,但还未能有效缓解水资源系统所受外界压力。

2.1.2 江西省市域水资源可持续利用水平 以 2015 年为分界线比较江西省各地级市水资源可持续利用水平变化情况(表 4),按水资源可持续利用综合得分提升率大小进行排序:鹰潭市>南昌市>赣州市>宜春市>九江市>景德镇市>抚州市>吉安市>上饶市>萍乡市>新余市。其中鹰潭市提升率最高,约 21.33%,新余市是提升率最低,约 2.25%,两者相差约 20%,地区间相差较大。按一级指标提升情况来看,鹰潭市是响应指标提升效果最佳,新余市则是影响指标提升最佳,地区间也存在较大差异。可见,即使在同一省域内河长制等水资源治理政策,对不同地级市也表现出了异质性的治理效果。目前中国采取水资源治理政策是典型的环境分权制度<sup>[23]</sup>,由中央将

环境权力下放到地方政府,地方政府制定具体治理方案<sup>[24]</sup>。目前,水资源治理的权力已经下放至乡镇一级,各层级政府会依据地方特点,制定相应的行动方案,市一级也不例外。各地级市有不同的治理目标与重点,执行不同的水资源治理行动方案,自然就会具有不同的治理效果。

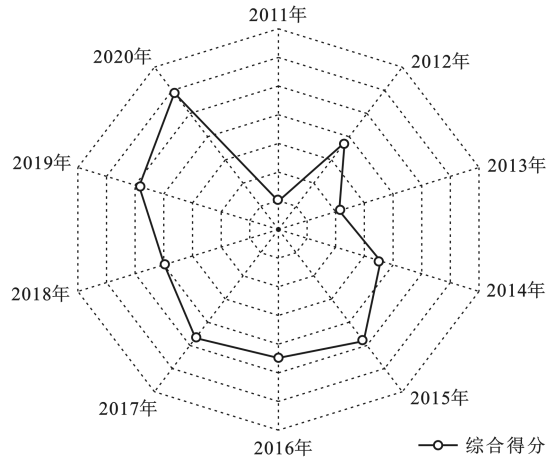


图3 江西省水资源可持续利用各地区平均综合得分雷达图  
Fig.3 Radar chart of average composite score of sustainable water resources utilization in Jiangxi Province

## 2.2 障碍因子识别结果

从评价结果可以看出,2020 年,已有 6 个市可达到 C 等级,水资源满足基本可持续。不过,依然还有 5 个市属于 D 等级,水资源可持续利用困难,距离水资源可持续目标依然存在一定距离。因此,有必要对阻碍各市水资源可持续利用的障碍因素进行识别。

2.2.1 一级指标障碍度分析 江西省水资源可持续利用一级指标障碍度如表 5 所示。各地区平均驱动力、压力、状态、影响、响应指标障碍度比较稳定,年间变动不大。响应指标障碍度一直处于最高位置,江西省虽然已采取一定的水资源治理的响应措施,但响应力度依然欠缺。这也许就是江西省 2015 年后水资源系统所受外界压力不降反增的核心原因,响应力度的欠缺导致了现有水资源治理政策不能有效缓解系统所受外界压力。

2.2.2 主要障碍度因子分析 参照已有标准<sup>[25]</sup>,本文将各地级市二级指标障碍度排名前 5 项作为主要障碍因子。当前江西省主要障碍因子包括降水量(18.18%)、第三产业 GDP 比例(0.91%)、人均 GDP(12.91%)、城镇化率(3.27%)、农业用水量比例(0.36%)、水资源总量(18.73%)、水资源开发利用(0.36%)、地表水调蓄能力(7.45%)、万元 GDP 用水量(0.18%)、万元工业增加值用水量(0.18%)、人均水资源量(0.36%)、产水模数(0.18%)、废水治理设施数(17.27%)、废水治理设施处理能力(19.64%)共

14 项,其中废水治理设施处理能力、水资源总量、地表水调蓄能力、废水治理设施数、人均 GDP 出现频率最高(降雨量出现频率也较高,不过降雨量并不受人为控制的影响,此处不做考虑)。与相邻的福建省相比,江西废水治理设施处理能力明显低于福建〔江西省为  $47.33 \text{ t}/(10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{d})$ ,福建省为  $96.96 \text{ t}/(10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{d})$ ]。江西省自身科学技术发展水平略低,导致废水治理设施处理能力成为主要障碍因子。江西省是农业大省,人均 GDP 略低,经济水平略低于其他省份,政府等相

关部门可用资金有限,导致废水治理设施投入不足,水库等蓄水调水工程建设规模有限,造成了废水治理设施数、地表水调蓄能力、人均 GDP 成为主要障碍因子;近些年江西省多旱少雨,降雨量减少,农业、工业、居民生活生产又进一步造成了水资源污染,形成水质性缺水,加剧了水资源短缺。同时江西省响应力度欠缺,废水治理设施处理能力有限、废水治理设施数投入不足,导致水资源短缺问题并未得到有效缓解,致使水资源总量成为主要障碍因子。

表 4 江西省 2015 年前后水资源可持续利用变化情况

Table 4 Changes in sustainable water resources use in Jiangxi Province before and after 2015

地区	综合得分 提升率/%	驱动力 提升率/%	压力 提升率/%	状态 提升率/%	影响 提升率/%	响应 提升率/%	2015 年 前排名	2015 年 后排名	2020 年可持续 利用等级
鹰潭市	21.33	17.38	-7.05	1.36	2.69	52.83	11	9	D
南昌市	19.70	11.36	-3.85	6.31	-2.42	35.52	9	6	C
赣州市	14.46	2.81	-3.13	11.99	33.58	41.16	1	1	C
宜春市	13.68	-1.80	6.17	16.83	15.93	24.64	5	2	C
九江市	9.56	17.03	-3.51	13.70	11.10	6.42	7	8	C
景德镇市	8.61	1.60	-9.36	-0.34	14.08	13.66	10	11	D
抚州市	7.37	-9.49	-2.84	5.58	16.46	25.98	6	7	D
吉安市	6.99	2.69	1.95	15.98	26.37	4.06	4	4	D
上饶市	6.98	-0.77	-10.88	11.94	18.36	17.41	3	3	C
萍乡市	3.25	-0.73	-7.85	6.74	55.59	-9.94	8	10	D
新余市	2.25	0.75	-8.05	1.21	8.75	-7.20	2	5	C
江西省	10.15	3.43	-4.48	9.77	17.57	16.02			

注:经极值化处理,所有指标都转化为正向。驱动力提升率为某值时,即系统所受驱动力下降了某值;压力提升率为某值时,即系统所受外界压力下降了某值;影响提升率某值时,即系统受负面影响下降了某值。

表 5 江西省水资源可持续利用一级指标障碍度地区均值

Table 5 Regional average values of barriers to sustainable use of water resources in Jiangxi Province

指标	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
驱动力(D)	24.52	24.62	25.10	25.58	24.72	24.93	25.28	25.39	25.39	25.06
压力(P)	7.49	9.17	8.57	9.23	9.05	9.89	9.15	9.81	10.15	10.12
状态(S)	20.91	19.60	20.35	20.69	20.93	19.07	19.49	19.22	19.94	22.42
影响(I)	10.17	6.13	9.36	5.83	7.37	6.98	8.67	8.86	7.03	8.33
响应(R)	36.62	40.52	36.62	38.62	37.93	39.12	37.41	36.73	37.48	34.05

将 14 项主要障碍因子在各地级市的分布情况进行重新统计,结果详见表 6。

由于各地级市因自身的地理位置、技术水平、人文风俗差异,不同地级市水资源可持续利用所面临的主要障碍因子也存在较大差异。除上述废水治理设施处理能力、水资源总量、地表水调蓄能力、废水治理设施数、人均 GDP 外,各地级市还面临着各自的障碍因素。

例如,赣州市还受到第三产业 GDP 比例、农业用水量比例、产水规模等因素的阻碍,吉安市与上饶市则还受到城镇化率的阻碍。

### 3 政策建议

#### 3.1 坚持“一河一策”

综合以上可知,即使在同一省域范围内,各项水资源治理政策对不同地级市的水资源可持续利用水平具有异质性的提升效果。造成这种异质性的原因,与各地不同的水资源可持续可利用的障碍因素相关。针对各地水资源可持续水平受主要障碍因子的地区异质性考虑,各市级政府应立足于自身水资源系统的状态,结合当地人文特征,制定因地制宜的水资源治理政策,坚持“一河一策”,切忌“一刀切”。

表 6 江西省各地级市水资源可持续利用主要障碍因子及所占比例

Table 6 Main obstacles to sustainable water resources utilization and their proportion in each prefecture-level city in Jiangxi Province

地区	鹰潭市	南昌市	赣州市	宜春市	九江市	景德镇市
主要障碍因子及所占比例	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(2\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,
	$D_4(6\%)$ ,	$S_1(20\%)$ ,	$D_3(4\%)$ ,	$D_4(20\%)$ ,	$D_3(2\%)$ ,	$D_3(4\%)$ ,
	$S_1(20\%)$ ,	$S_4(18\%)$ ,	$D_4(20\%)$ ,	$D_5(12\%)$ ,	$D_4(12\%)$ ,	$D_4(14\%)$ ,
	$S_4(16\%)$ ,	$I_2(2\%)$ ,	$P_1(2\%)$ ,	$S_1(20\%)$ ,	$S_1(20\%)$ ,	$S_1(20\%)$ ,
	$R_4(18\%)$ ,	$R_4(20\%)$ ,	$S_1(12\%)$ ,	$S_4(6\%)$ ,	$S_4(4\%)$ ,	$S_4(2\%)$ ,
	$R_5(20\%)$	$R_5(20\%)$	$S_4(8\%)$ ,	$R_4(2\%)$ ,	$S_6(2\%)$ ,	$R_4(20\%)$ ,
			$I_3(2\%)$ ,	$R_5(20\%)$	$R_4(20\%)$ ,	$R_5(20\%)$
			$R_4(14\%)$ ,		$R_5(20\%)$	
			$R_5(20\%)$			
地区	抚州市	吉安市	上饶市	萍乡市	新余市	
主要障碍因子及所占比例	$D_4(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	$D_1(20\%)$ ,	
	$P_1(2\%)$ ,	$D_4(20\%)$ ,	$D_4(20\%)$ ,	$D_4(10\%)$ ,	$S_1(20\%)$ ,	
	$S_1(18\%)$ ,	$D_5(4\%)$ ,	$D_5(2\%)$ ,	$S_1(18\%)$ ,	$S_4(16\%)$ ,	
	$S_4(2\%)$ ,	$S_1(18\%)$ ,	$S_1(18\%)$ ,	$S_4(14\%)$ ,	$S_5(2\%)$ ,	
	$R_4(18\%)$ ,	$S_4(18\%)$ ,	$R_4(20\%)$ ,	$R_4(20\%)$ ,	$I_2(2\%)$ ,	
	$R_5(20\%)$	$R_5(20\%)$	$R_5(16\%)$	$R_4(20\%)$ ,		
				$R_5(20\%)$		

注:下划线数据为各地级市不同的主要障碍因子。

### 3.2 注重创新技术,提升治水能力

废水治理处理能力、水资源总量是阻碍江西省水资源可持续利用水平的主要障碍因素,这与傅春等<sup>[25]</sup>人的研究结论相一致。江西省目前科学技术发展水平(2021年江西专利授权数为6741,全国各省(市)平均授权数为18638)<sup>[26]</sup>依然落后于全国平均水平。水利工程应用的水利技术较为陈旧,废水处理设施的处理能力有限,导致河长制等水资源治理政策较难发挥治理效果。因此,应重视发展创新技术,鼓励全民参加科技创新活动,提升创新意识。通过提高科学技术水平,激发现有废水处理设施发挥出潜在的治理效果<sup>[5]</sup>。通过引入高新水利技术,充分发挥水库等大型水利工程的蓄水与调水能力<sup>[27]</sup>,提升工业、农业、生活取水效率,科学控制水资源总量。

### 3.3 产业结构升级,提升经济发展水平

由于江西经济发展水平较低,治理资金投入不足,水库规模有限,导致人均GDP、废水处理设施数、地表水调蓄能力也是排名靠前的主要障碍因子。针对江西省目前人均GDP较低的现状而言,提升经济水平,增加治理投资是必由之路。不过,环境库兹涅斯曲线<sup>[28]</sup>指出环境破坏与经济水平之间呈倒U形曲线关系,即随经济发展提高,环境质量先破坏后好转。只有当主要经济活动从高能耗高污染的工业转向低污染高产出的服务业、信息业时,环境破坏和经济发展倒U拐点才会提前出现<sup>[29]</sup>。因此,在提升经济发展水平,增加治理投资时,应通过科学调整产业结构,来带动经济高质量发展,适当扩大低污染的第三产业,减少高污染的第二产业。搭配政府管制和市场机

制等政策工具,借助排污许可证或排污权交易制度等方式,来促进产业结构的转型升级。

### 3.4 建立政策共同体

废水治理设施数、废水治理处理能力、人均GDP值、地表水调蓄能力、水资源总量等障碍因子不仅与河长制相关,还与国家科技创新政策、城乡融合发展政策、精准扶贫政策等国家治理现代化政策密切相关。国家治理体系和治理能力现代化是一项超大规模的社会系统工程<sup>[30]</sup>,水资源治理政策作为国家治理现代化治理体系的一部分,自然也应具备全局意识。应与其他相关政策建立起紧密联系,形成政策共同体,共同完成现代化治理目标。例如,与国家科技创新政策联合起来,支持提升科学技术水平,引入创新水利技术。与城乡融合发展政策联结起来,形成城乡互助模式,合理分配农业、工业、居民生活用水量定额。与精准扶贫政策联系起来,为贫困户提供治水等公益岗位,保持河道、河内、河周边环境洁净等。

## 4 结论

(1) 评估结果表明,江西省2011—2020年水资源可持续利用水平,除2013和2018年外,呈逐年上升趋势。2015年后水资源可持续利用平均水平(0.3758)较2015年前(0.3408)提高约10.15%,除压力指标外,其他一级指标均提升。分地区看来,2015年前后不同地区水资源可持续利用水平变化呈异质性的特点,鹰潭市提升约21.33%,新余市提升约2.25%,鹰潭市是响应指标提升效果最佳,新余市则是影响指标提升率最高。



(2) 障碍因素识别结果表明,响应指标是阻碍江西省水资源可持续利用最高的一级指标,历年波动较小。废水治理设施处理能力、水资源总量、地表水调蓄能力、废水治理设施数、人均 GDP 是阻碍江西省水资源可持续利用的主要障碍因子。因各地自身状态不同,水资源可持续利用主要障碍因子不同,导致各地水资源治理政策各异,对水资源的治理效果也有所不同。建议从坚持“一河一策”,注重创新技、产业结构升级和政策共同体等方面优化水资源治理政策体系。

### [参 考 文 献]

- [1] 南昌市水利局.为什么我国被列为世界上 13 个贫水国之一?[EB/OL].南昌:南昌市水利局,(2017-03-23)[2022-10-1],<http://water.nc.gov.cn/ncswj/kxyd/201703/f7ea47b2e3de4ec09f2e921e353c3796.shtml>.
- [2] 严登华,王浩,周梦,等.全球治水模式思辨与发展展望[J].水资源保护,2020,36(3):1-7.
- [3] 中共中央办公厅,国务院办公厅.关于全面推行河长制的意见[EB/OL].北京:新华社,(2016-12-11)[2022-10-1],[http://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content\\_5156731.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5156731.htm).
- [4] 财政部,国家发展改革委,环境保护部.关于印发《排污权出让收入管理暂行办法》的通知[EB/OL].北京:新华社,(2015-7-23)[2022-10-1],[http://www.gov.cn/zhengce/2016-05/25/content\\_5076588.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2016-05/25/content_5076588.htm).
- [5] 国务院.国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL].北京:新华社,(2012-01-12)[2022-10-1],[http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-02/15/content\\_2311.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-02/15/content_2311.htm).
- [6] 国务院.国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL].北京:新华社,(2015-04-16)[2022-10-1],[http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm).
- [7] 韩美,杜焕,张翠,等.黄河三角洲水资源可持续利用评价与预测[J].中国人口·资源与环境,2015,25(7):154-160.
- [8] 翁异静,邓群钊,杜磊,等.基于系统仿真的提升赣江流域水生态承载力的方案设计[J].环境科学学报,2015,35(10):3353-3366.
- [9] 宋松柏,蔡焕杰,徐良芳.水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[J].水科学进展,2003,14(5):647-652.
- [10] 孟丽红,陈亚宁,胥志彪,等.江西省水资源可持续利用评价研究[J].水土保持通报,2013,33(6):166-170.
- [11] 贾守东,郑从奇,庄会波,等.基于 DPSIR 模型的沂河水资源可持续利用评价[J].水文,2022,42(3):61-66.
- [12] Mukand S B, Kaushal C, Victor R S, et al. A disaggregated assessment of national water security: An application to the river basins in Thailand [J], Journal of environmental management, 2022,321(11):115974.
- [13] 江西省委办公厅,江西省政府办公厅.江西省实施“河长制”工作方案[EB/OL].北京:中华人民共和国水利部,(2015-11-30)[2022-11-17][http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2014\\_ztbd/shggxspm/dfdt/201512/t20151218\\_728231.html](http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2014_ztbd/shggxspm/dfdt/201512/t20151218_728231.html).
- [14] 姚毅臣,黄翊,谢颂华.江西省河长制湖长制工作实践与成效[J].中国水利,2018,856(22):32-35,31.
- [15] European Environment Agency. DPSIR-European Environment Agency (EEA) [EB/OL]. European: EEA,(2022-08-01)[2022-10-1]<https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/dpsir>.
- [16] 田士政,武文,董杰,等.基于 DPSIR 模型的青岛市海洋资源可持续利用评价研究[J].海洋湖沼通报,2022,44(3):149-157.
- [17] 章穗,张梅,迟国泰.基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J].管理学报,2010,7(1):34-42.
- [18] 彭迪云,王玉洁,陶艳萍.中国地区基本公共服务均等化的测度与对策建议[J].南昌大学学报(人文社会科学版),2021,52(4):51-61.
- [19] 雷勋平,邱广华.基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J].环境科学学报,2016,36(1):314-323.
- [20] 刘毅,贾若祥,侯晓丽.中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J].环境科学,2005,30(1):42-46.
- [21] 雷勋平,Robin Qiu,刘勇.基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2016,32(13):243-253.
- [22] 罗勇,王乐志,傅春,等.基于主客观耦合的区域水资源综合利用效率评价[J].人民长江,2019,50(12):80-84.
- [23] 李强,王琰.环境分权、环保约谈与环境污染[J].统计研究,2020,37(6):66-78.
- [24] Oates W E. The political economic of environmental policy [J]. Public Choice, 2003, 115(3/4):369-396.
- [25] 傅春,李雅蓉.江西省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].人民长江,2019,50(8):109-114.
- [26] 国家知识产权局.2021 知识产权统计年报[EB/OL].北京:国家知识产权局,(2021-12-30)[2022-11-17]<https://www.cnipa.gov.cn/tjxx/jianbao/year2021/b/b2.html>.
- [27] 刘璐,张文强,胡飞超,等.基于群决策和层次分析法的长江中游地区农村污水处理技术评价及优选[J].环境科学,2023,44(2):1191-1200.
- [28] 胡聃,许开鹏,杨建新,等.经济发展对环境质量的影响:环境库兹涅茨曲线国内外研究进展[J].生态学报,2004,25(6):1259-1266.
- [29] Markus P. Technical Progress, structural change, and the environmental Kuznets curve [J]. Ecological Economics, 2002,42(3):381-389.
- [30] 张树华,王阳亮.制度、体制与机制:对国家治理体系的系统分析[J].管理世界,2022,38(1):107-118.