

长江中游地区水资源生态足迹时空分布及可持续利用

王江婷, 赖苹, 周小琛

(重庆师范大学 经济与管理学院, 重庆 401331)

摘要: [目的] 探究长江中游地区水资源生态足迹时空变化及可持续利用, 为长江中游地区及其他省市、城市群或流域地区的水资源可持续利用提供决策参考。[方法] 选取长江中游地区覆盖的湖北、湖南和江西3省作为研究对象, 以2011—2021年作为研究时段, 运用水资源生态足迹模型对3省的生态足迹等相关指标进行时空分析, 并基于PSR模型框架构建长江中游地区水资源可持续利用评价指标体系。[结果] ①3省的人均水资源生态足迹和生态承载力总体都呈上升趋势, 且生态承载力都高于生态足迹, 全部实现生态盈余。江西省的人均水资源生态盈余最高, 介于3.186~7.966之间; 湖北省的人均水资源生态盈余最低, 介于0.304~2.603之间。②3省各用水账户的生态足迹所占比例最大的是生产用水, 生活用水次之; 生态环境用水占比虽然最小, 但是上升幅度最大, 其中湖北省的人均生态环境用水足迹上升最明显。③万元GDP水资源生态足迹呈现明显下降趋势, 其中江西省最高, 湖北省最低, 三者之间的差距呈逐年缩小态势。④3省水资源可持续利用的压力指数、状态指数和响应指数整体呈现下降、上升和上升的趋势; 综合评价指数都处于波动中上升的趋势, 但上升幅度不大, 指数值总体都不高。[结论] 3省需要继续加大对生产用水和生活用水合理使用的管理, 进一步鼓励生态环境用水的使用, 同时加大对实现水资源可持续利用措施的推进, 以此提高水资源的可持续利用水平。

关键词: 水资源生态足迹; 时空分析; 可持续利用; PSR模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0129-11

中图分类号: TV213.4

文献参数: 王江婷, 赖苹, 周小琛. 长江中游地区水资源生态足迹时空分布及可持续利用[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 129-139. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.014; Wang Jangting, Lai Ping, Zhou Xiaochen. Spatiotemporal distribution and sustainable utilization of water resources ecological footprint in middle reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 129-139.

Spatiotemporal Distribution and Sustainable Utilization of Water Resources Ecological Footprint in Middle Reaches of Yangtze River

Wang Jangting, Lai Ping, Zhou Xiaochen

(School of Economics and Management, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal changes and sustainable utilization of water resources ecological footprint were explored in the middle reaches of the Yangtze River to provide decision-making references for the sustainable utilization of water resources in this region and in other provinces, metropolitan areas, and river basins. [Methods] This study selected the Hubei, Hunan, and Jiangxi provinces in the middle reaches of the Yangtze River from 2011 to 2021 as the research subjects. Employing the water resource ecological footprint model, a spatiotemporal analysis was conducted on the ecological footprint and related indicators of the three provinces. Based on the pressure-state-response model framework, an evaluation index system for sustainable water resource utilization in the middle reaches of the Yangtze River region was developed. [Results] ① The per-capita water resource ecological footprint and ecological carrying capacity of the three

收稿日期: 2023-11-07

修回日期: 2024-08-29

资助项目: 国家社会科学基金项目“长江上游地区生态资源资本化价值核算与实现路径研究”(22BJY083); 重庆市社会科学规划项目“推动建立长江上游地区水生态产品价值核算及价值实现机制研究”(2021NDYB085); 高等教育科学研究规划课题“将生态文明价值实现机制融入《环境与自然资源经济学》课程教学的路径研究”(23STWM0408)

第一作者: 王江婷(1999—), 女(汉族), 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为水资源可持续利用。Email: 1029662900@qq.com。

通信作者: 赖苹(1981—), 女(汉族), 重庆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水资源管理方面的研究。Email: lpcaroline2003@126.com。

provinces showed an overall increasing trend, with the ecological carrying capacity exceeding the ecological footprint, resulting in an overall ecological surplus. Jiangxi Province had the highest per-capita ecological surplus of water resources, ranging from 3.186 to 7.966, whereas Hubei Province had the lowest, ranging from 0.304 to 2.603. ② The ecological footprint of each water account in the three provinces was predominantly industrial followed by domestic. Although ecological environmental water had the smallest share, it showed the most significant increase, particularly in Hubei Province. ③ The ecological footprint of water resources per ten thousand GDP exhibited a significant downward trend, with Jiangxi Province having the highest value and Hubei Province having the lowest, and the gap between the two gradually narrowed each year. ④ The pressure, state, and response indices for sustainable water resource utilization in the three provinces generally exhibited declining, rising, and increasing trends, respectively. The comprehensive evaluation indices exhibited a fluctuating upward trend; however, the rate of increase was modest and the overall index values remained relatively low. [Conclusion] Continued efforts are required to enhance the rational use of water for industrial and domestic purposes, promote the utilization of ecological and environmental water, and develop advanced measures to achieve sustainable water resource utilization. These findings can serve as a decision-making reference for water resource sustainability in the middle reaches of the Yangtze River and other provinces, city clusters, or basin areas.

Keywords: water resources ecological footprint; spatiotemporal analysis; sustainable utilization; pressure-state-response (PSR) model

长江中游地区位于中国中南部、长江流域中段,地跨湖北、湖南和江西 3 省,承东启西、连南接北,是推动长江经济带发展、促进中部地区崛起、巩固“两横三纵”城镇化战略格局的重点区域。区域共有 38 个地级行政区,总面积为 $5.65 \times 10^5 \text{ km}^2$,人口众多,经济活跃。2023 年 3 省总人口约为 1.69×10^8 人,约占全国总人口的 12%;3 省 GDP 总值约为 1.38×10^{13} ,约占全国 GDP 总量的 11%。区域地形地貌复杂,以丘陵山地为主;四季分明,属亚热带季风气候;河流水系纵横,水资源丰富。在推动新型工业化和新型城镇化高质量融合发展进程中,长江中游地区作为长江流域协调发展的重要依托和东中西部地区共同发展的重要传导,面临着持续增大的用水压力和总体偏低的水资源集约节约利用水平。2022 年 3 省的水资源公报显示:湖北省水资源总量为 $7.14 \times 10^{10} \text{ m}^3$,总供水量和总用水量为 $3.53 \times 10^{10} \text{ m}^3$,总用水消耗量为 $1.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$,耗水率为 41.9%;湖南省水资源总量为 $1.68 \times 10^{11} \text{ m}^3$,总供水量和总用水量为 $3.30 \times 10^{10} \text{ m}^3$,总用水消耗量 $1.61 \times 10^{10} \text{ m}^3$,耗水率为 48.6%;江西省水资源总量为 $1.56 \times 10^{11} \text{ m}^3$,总供水量和总用水量为 $2.70 \times 10^{10} \text{ m}^3$,总用水消耗量为 $1.30 \times 10^{10} \text{ m}^3$,耗水率为 48.0%。可见,长江中游地区虽拥有丰富的水资源,但水资源消耗十分严重,必须采取科学合理的措施加强长江中游地区的水资源管理,提高水资源综合使用效率,实现水资源的可持续利用。

生态足迹被认为是评价资源可持续利用的一种有

效方法。1992 年加拿大生态经济学家 Rees W. E.^[1]首次提出“生态足迹”概念,1999 年中国徐中民等^[2]第一次将其运用在分析甘肃省的生态足迹状况。生态足迹方法是指能够维持区域内人类活动的自然资源消费量和废弃物的吸纳量所需要的生物生产土地总面积。将一区域的生态足迹与生态承载力进行比较,可以衡量区域自然资源的可持续利用状况^[3]。水资源生态足迹是生态足迹的一个重要分支,是将水资源消耗折算成水域面积进行计算^[4],目前已经成为衡量水资源可持续利用水平的重要指标。学者们运用水资源生态足迹方法主要从以下三个方面展开研究:第一,从各省市^[5-10]、城市群^[11-15]、江河地区^[16-18]等区域层面围绕水资源生态足迹进行时空变化分析。第二,运用预测模型对水资源生态足迹的发展趋势进行预测^[4,19-23]。第三,基于水资源生态足迹构建水资源可持续利用评价指标体系^[24]。从研究区域看,目前聚焦长江中游地区水资源生态足迹的文献较少,仅以陈义忠等^[12]和张婉玲等^[14]的文章为代表。两篇文章都选择将长江中游三大城市群作为研究对象,其中陈义忠等^[12]运用足迹家族模型评估长江中游城市群水—碳—生态足迹的变化及平衡性,张婉玲等^[14]通过分析长江中游城市群水资源生态足迹时空变化特征探究其驱动因素。从研究方法上看,目前研究主要是对生态足迹进行时空分析和趋势预测,鲜有文章基于生态足迹指标构建水资源可持续利用评价指标体系,仅有李逢港等^[24]构建了四川省的水资源可持续利用评价指标体系。PSR 是在指标体系构建方面应

用最广的模型框架。1979 年该模型由加拿大统计学家 Rapport 和 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)进行发展推广^[25]。PSR 模型框架是基于压力(pressure)—状态(state)—响应(response)的逻辑,将三方面内容统一到同一框架,全面地分析研究对象所面临的压力、所处的状态和所采取的响应措施,有效提高综合评价的准确性和合理性。目前 PSR 模型框架被广泛运用于生态安全^[26-27]、环境污染防治^[28-29]、土地利用^[30-31]等方面,尚缺少在水资源可持续利用评价领域的应用。

综合以上分析,本研究选取位于长江中游地区的湖北、湖南和江西 3 省作为研究对象,对 3 省的水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余等指标进行测度和时空分析,并基于生态足迹等指标构建以压力—状态—响应为模型框架的长江中游地区水资源可持续利用综合评价指标体系,最后通过比较分析 3 省在水资源可持续利用方面的压力指数、状态指数、响应指数和综合评价指数,找到三地区在水资源利用方面的问题和地区差异,以期为长江中游地区乃至其他省

市、城市群或江河地区的水资源可持续发展管理提供科学决策依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

长江中游河段上起湖北省宜昌市,下至江西省九江市湖口县,全长 955 km,流域面积 $6.80 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。长江中游地区(如图 1 所示),介于东经 $108^\circ 21' - 118^\circ 28'$,北纬 $24^\circ 29' - 33^\circ 20'$ 之间,覆盖湖北、湖南和江西 3 省,其中湖北省现辖 12 个地级市,1 个自治州;湖南省现辖 13 个地级市,1 个自治州;江西省现辖 11 个地级市。长江中游地区地理位置优越,资源禀赋丰富,在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的战略地位。区域河湖众多,水资源总量比较丰富,但仍存在水资源开发利用不合理、水资源管理方式粗放以及水资源污染等问题,严重制约了地区社会经济的向前发展。本文聚焦长江中游地区水资源的可持续利用,选取长江中游 3 省及所辖的 38 个地级市作为研究区域。

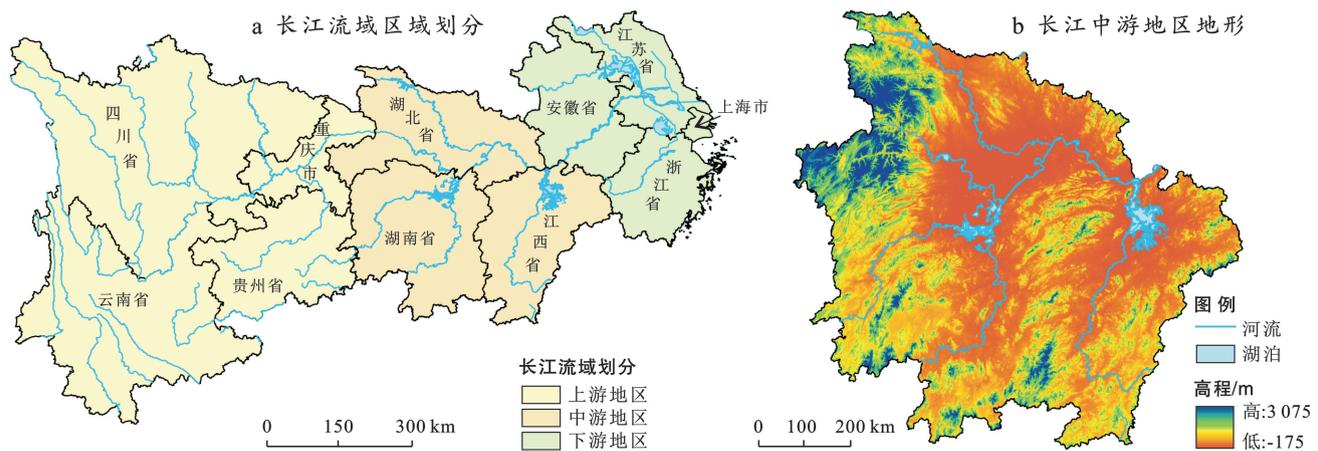


图 1 长江中游地区位置及地形图

Fig.1 Location and topographic map of middle reaches of Yangtze River

1.2 数据来源

本研究使用的数据主要来自湖北、湖南和江西 3 省的省级数据,其中万元 GDP 水资源生态足迹指标的数据来自 3 省的省级数据和地市级数据。水资源总量、总用水量、万元 GDP 用水量、人均用水量、地下水资源量、地表水资源量和万元 GDP 水耗等数据来自 2011—2021 年《湖北省水资源公报》《湖南省水资源公报》《江西省水资源公报》;人口总量、人口密度、GDP 等数据来自 2011—2021 年《湖北省统计年鉴》《湖南省统计年鉴》《江西省统计年鉴》;污水年排放量、治理设施、治理废水投资额、工业用水重复利用率、再生水利用量、污水处理总量等数据来自《中国环境统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 水资源生态足迹

水资源生态足迹是将区域内消耗的水资源量转换为对应账户的水资源用地面积^[22]。根据用水类型的不同,可以将水资源生态足迹划分为生产用水生态足迹、生活用水生态足迹和生态环境用水生态足迹 3 个二级账户。计算公式分别为:

$$EF_w = N \times ef_w = \gamma_w \times (W/P_w) \quad (1)$$

$$EF_{pw} = \gamma_w \times (W_p/P_w) \quad (2)$$

$$EF_{dw} = \gamma_w \times (W_d/P_w) \quad (3)$$

$$EF_{ew} = \gamma_w \times (W_e/P_w) \quad (4)$$

式中: EF_w 表示水资源生态足迹(hm^2); EF_{pw} 为生产

用水生态足迹 (hm^2); EF_{dw} 为生活用水生态足迹 (hm^2); EF_{ew} 为生态环境用水生态足迹 (hm^2); ef_{w} 表示人均水资源生态足迹 ($\text{hm}^2/\text{人}$); N 表示区域人口总量; γ_{w} 表示水资源全球均衡因子, 取值为 $5.19^{[3]}$; W 表示水资源消耗总量 (m^3), 其中 W_{p} 为生产用水量; W_{d} 为生活用水量; W_{e} 为生态环境用水量; P_{w} 表示水资源全球平均生产能力 (m^3/hm^2), 取值为 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2^{[3]}$ 。

万元 GDP 水资源生态足迹 (EF_{GDP}) 是用水资源生态足迹与万元 GDP 的比值来表示。比值越小, 表明水资源利用效率越高, 反之越低^[9]。

$$EF_{\text{GDP}} = EF_{\text{w}} / \text{GDP} \quad (5)$$

式中: EF_{GDP} 表示万元 GDP 的水资源生态足迹 ($\text{hm}^2/10^4$ 元)。

水资源生态承载力 (EC_{w}) 是指水资源能够维持该区域人口增长和经济可持续发展的能力。为了维护区域水资源生态环境, 需要预留 60% 的水资源量用于维持生态环境的可持续发展, 因此模型需乘系数 0.4。计算公式为^[3]:

$$EC_{\text{w}} = N \times ec_{\text{w}} = 0.4 \times \varphi \times \gamma_{\text{w}} \times (Q/P_{\text{w}}) \quad (6)$$

式中: EC_{w} 表示水资源生态承载力 (hm^2); ec_{w} 表示人均水资源生态承载力 ($\text{hm}^2/\text{人}$); φ 表示区域水资源产量因子, 其中湖北省取值 1.68, 湖南省取值 2.45, 江西省取值 $2.71^{[3]}$; Q 表示水资源总量 (m^3)。

水资源生态盈余(或生态赤字) (ED_{w}) 是水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值, 可以用来衡量

一个地区水资源的供需平衡状况。当 $ED_{\text{w}} > 0$ 时, 表示水资源生态盈余; 当 $ED_{\text{w}} = 0$ 时, 表示水资源生态平衡; 当 $ED_{\text{w}} < 0$ 时, 表示水资源生态赤字。计算公式为:

$$ED_{\text{w}} = EC_{\text{w}} - EF_{\text{w}} \quad (7)$$

2.2 基于 PSR 模型框架的水资源可持续利用评价指标体系

本文基于 PSR 模型框架构建水资源可持续利用评价指标体系(见表 1)。它包括目标层、准则层和指标层 3 个部分。目标层是实现水资源的可持续利用。准则层包括压力、状态和响应 3 个部分, 其中压力指标表示导致水资源供给不足的因素, 状态指标表示在压力状态下水资源发生的变化, 响应指标表示应对水资源变化的具体措施。指标层是准则层涵盖的具体指标内容, 考虑到指标选择的科学性、代表性和可操作性等原则, 最终选取 13 个具体指标。在构建的指标体系中, 将万元 GDP 水资源生态足迹和水资源生态盈余等生态足迹相关指标纳入指标体系, 以求更全面评价水资源的可持续利用水平。

本文采用主观赋权法和客观赋权法相结合的方式对指标权重进行赋值, 其中主观赋权法采用的是层次分析法, 客观赋权法采用的是熵值法。根据两种方法计算的权重取均值算出指标层权重, 然后据此求出准则层权重。将标准化处理后的指标值与对应权重相乘求和即可算出压力指数、状态指数、响应指数和综合评价指数。

表 1 水资源可持续利用评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for sustainable utilization of water resources

目标层	准则层	指标层	指标说明和数据来源	指标属性
水资源可持续利用	压力	人口密度/(人· km^{-2})	数据来源于各省统计年鉴	负向
		万元 GDP 用水量/($\text{m}^3 \cdot 10^{-4}$ 元 $^{-1}$)	数据来源于各省水资源公报	负向
		人均用水量($\text{m}^3/\text{人}$)	数据来源于各省水资源公报	负向
		万元 GDP 水资源生态足迹/($\text{hm}^2 \cdot 10^{-4}$ 元 $^{-1}$)	水资源生态足迹/GDP, 数据来源于各省统计年鉴和水资源公报	负向
		污水年排放量/ 10^8 t	数据来源于《中国环境统计年鉴》	负向
	状态	地下水资源量/ 10^8 m^3	数据来源于各省水资源公报	正向
		地表水资源量/ 10^8 m^3	数据来源于各省水资源公报	正向
		水资源生态盈余/ hm^2	水资源生态承载力-水资源生态足迹, 数据来源于各省统计年鉴和水资源公报	正向
	响应	万元 GDP 水耗/($\text{m}^3 \cdot 10^{-4}$ 元 $^{-1}$)	总用水量/GDP, 数据来源于各省统计年鉴和水资源公报	负向
		治理设施/套	数据来源于《中国环境统计年鉴》	正向
		治理废水投资额/(10^4 元)	数据来源于《中国环境统计年鉴》	正向
		工业用水重复利用率/%	数据来源于《中国环境统计年鉴》	正向
		污水再生利用率/%	再生水利用量/污水处理总量, 数据来源于《中国环境统计年鉴》	正向

3 研究结果与分析

3.1 长江中游地区水资源生态足迹时空分析

3.1.1 水资源生态足迹、生态承载力与生态盈余

2011—2021 年长江中游地区水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余见表 2。①湖北省的人均水资源生态足迹总体呈现上升趋势, 最低值出现在 2016 年, 为 $0.792\ \text{hm}^2/\text{人}$, 最高值出现在 2021 年, 为 $0.953\ \text{hm}^2/\text{人}$ 。

②人均水资源生态承载力在波动中上升,2020 年承载力最高,为 3.393 hm²/人。湖南省的人均水资源生态足迹呈波浪式变动,最低值出现在 2020 年,为 0.759 hm²/人,最高值出现在 2013 年,为 0.825 hm²/人;人均水资源生态承载力整体呈现上升趋势,2016 年承载力最高,为 5.371 hm²/人,最近两年略有下降。江西省的人均水资源生态足迹处于先下降后上升的态势,最低值出现在 2016 年,为 0.886 hm²/人,最高值出现在 2011 年,为 0.971 hm²/人;人均水资源生态承载力波动幅度较大,最高值和最低值之间相差了 4.695 hm²/人,2016 年承载力最高,为 8.851 hm²/人。

③由于 2011—2021 年 3 省的人均水资源生态承载力都高于生态足迹,所以 3 省全部实现生态盈余。江西省的生态盈余情况最好,最高值出现在 2016 年,达到 7.966 hm²/人;最低值出现在 2011 年,为 3.186 hm²/人;2021 年的生态盈余为 4.718 hm²/人;

整体较其他两省波动幅度较大,最高值与最低值之间相差 4.78 hm²/人。江西省的人口是长江中游 3 省中最少的,用水量相对较少,同时该省积极推进数字孪生水利和灌溉试验站建设,取得较好成效。湖南省的生态盈余介于中间水平,总体趋势较为稳定;最高值出现在 2016 年,为 4.568 hm²/人;最低值出现在 2011 年,为 1.954 hm²/人;2021 年的生态盈余为 3.577 hm²/人。湖北省每年的人均水资源生态盈余都低于其他两省,但波动幅度较小,总体情况较稳定;最高值出现在 2020 年,为 2.603 hm²/人;最低值出现在 2019 年,为 0.304 hm²/人;2021 年的生态盈余为 1.305 hm²/人。湖北省在 3 省中人均 GDP 最高,工业产值最高,用水量也最多。较其他两省的地理位置而言,湖北省位于偏北方,降水量要少于江西省和湖南省,这些都成为影响湖北省水资源生态盈余偏低的原因。

表 2 2011—2021 年长江中游地区 3 省水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余
Table 2 Ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological surplus of water resources in middle reaches of Yangtze River from 2011 to 2021

年份	湖北省			湖南省			江西省		
	人均水资源生态足迹	人均水资源生态承载力	人均水资源生态盈余	人均水资源生态足迹	人均水资源生态承载力	人均水资源生态盈余	人均水资源生态足迹	人均水资源生态承载力	人均水资源生态盈余
2011	0.851	1.461	0.607	0.820	2.774	1.954	0.971	4.156	3.186
2012	0.856	1.564	0.706	0.821	4.889	4.067	0.892	8.706	7.814
2013	0.826	1.514	0.680	0.825	3.883	3.058	0.970	5.700	4.730
2014	0.819	1.746	0.925	0.818	4.409	3.591	0.946	6.526	5.580
2015	0.851	1.928	1.075	0.808	4.700	3.892	0.892	7.995	7.102
2016	0.792	2.827	2.033	0.803	5.371	4.568	0.886	8.851	7.966
2017	0.813	2.349	1.535	0.790	4.670	3.880	0.890	6.574	5.684
2018	0.829	1.609	0.778	0.810	3.278	2.469	0.894	4.562	3.668
2019	0.845	1.150	0.304	0.797	5.119	4.322	0.899	8.140	7.241
2020	0.802	3.393	2.603	0.759	5.165	4.406	0.893	6.683	5.789
2021	0.953	2.265	1.305	0.803	4.380	3.577	0.912	5.631	4.718

3.1.2 各用水账户生态足迹 2011—2021 年长江中游地区各用水账户生态足迹见表 3。湖北省的人均生产用水足迹在湖北省人均水资源生态足迹中占比最大,处于峰值时占到整体用水的 85%,其次是人均生活用水足迹,占比最低的是人均生态环境用水足迹;3 个用水账户的人均生态足迹一直处于上升趋势,其中人均生态环境用水足迹上升幅度最大,从 2011 年的 0.001 攀升到 2021 年的 0.060,其次是人均生活用水足迹,人均生产用水足迹涨幅最小。湖南省各用水账户的用水足迹波动幅度不大,除了人均生态环境用水足迹处于明显的上升趋势外,其他两类用水账户都呈现波浪式变动。江西省的人均生活用水足迹变化不大,人均生产用水足迹整体下降了 7.9%,人

均生态环境用水足迹则是小幅度上升。总体来看,3 省的生产用水足迹占比都位居各省生态足迹账户之首。仅就 2021 年来看,湖北省占比最大,其次是江西省,湖南省最小。生产用水与经济发展密不可分,湖北省在当年的经济增长快于其他两省,所以生产用水足迹相对较大。生活用水账户占比是湖南省排第一,江西省次之,湖北省最小,这主要是因为湖南省在 3 省中人口最多,所以生活用水稳居前列。生态环境用水账户显示湖北省占比最大,湖南省次之,江西省最小,平均值分别为 1.05%,0.98%,0.92%。这一方面与当年的降水变化和新冠疫情有关,另一方面也说明湖北省相较于其他两省在践行“生态优先、绿色发展”方面做得更好,生态环境用水账户才会有大幅提升。

表 3 2011—2021 年长江中游地区各省用水账户生态足迹
Table 3 Ecological footprint of water accounts of each province in middle reaches of Yangtze River from 2011 to 2021

hm²/人

年份	湖北省			湖南省			江西省		
	人均生产用水足迹	人均生活用水足迹	人均生态环境用水足迹	人均生产用水足迹	人均生活用水足迹	人均生态环境用水足迹	人均生产用水足迹	人均生活用水足迹	人均生态环境用水足迹
2011	0.782	0.068	0.001	0.700	0.114	0.007	0.858	0.105	0.008
2012	0.781	0.074	0.001	0.719	0.109	0.006	0.792	0.096	0.008
2013	0.751	0.074	0.001	0.726	0.100	0.007	0.871	0.099	0.008
2014	0.743	0.075	0.002	0.720	0.105	0.007	0.848	0.101	0.008
2015	0.774	0.075	0.002	0.713	0.105	0.007	0.795	0.103	0.008
2016	0.708	0.081	0.003	0.709	0.109	0.007	0.789	0.105	0.008
2017	0.728	0.081	0.003	0.697	0.111	0.007	0.794	0.106	0.008
2018	0.744	0.082	0.004	0.717	0.114	0.009	0.803	0.106	0.009
2019	0.759	0.081	0.005	0.703	0.116	0.004	0.812	0.107	0.009
2020	0.678	0.091	0.034	0.631	0.110	0.017	0.776	0.105	0.012
2021	0.807	0.087	0.060	0.654	0.121	0.030	0.790	0.105	0.017

3.1.3 万元 GDP 水资源生态足迹 2011—2021 年长江中游地区万元 GDP 水资源生态足迹见图 2。从整体看,3 省各年的万元 GDP 水资源生态足迹始终为正,但逐年下降,表明水资源利用效率在不断提高。江西省的万元 GDP 水资源生态足迹最高,湖北省的万元 GDP 水资源生态足迹最低,但是三者之间的差距呈逐年缩小态势。江西省的万元 GDP 水资源生态足迹偏高的主要原因是江西省的 GDP 总量和人均 GDP 均为 3 省中最低,整体社会经济发展水平较低,低耗水量的第三产业所占比例较小。湖北省的 GDP 总量和人均 GDP 都在 3 省中处于绝对领先地位,第三产业的发展也较好,因此湖北省的万元 GDP 水资源生态足迹较低。

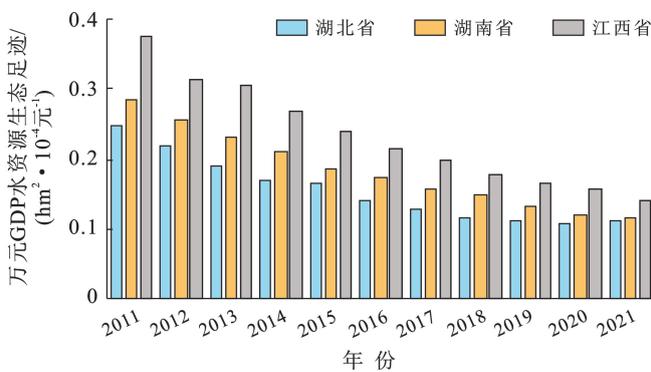


图 2 2011—2021 年长江中游地区万元 GDP 水资源生态足迹
Fig.2 Water resources ecological footprint per 10 000 yuan GDP in middle reaches of Yangtze River from 2011 to 2021

选取 2016 年和 2021 年分别计算 3 省下辖各地级市的万元 GDP 水资源生态足迹。利用 ArcGIS 软件,将万元 GDP 水资源生态足迹按高低划分为五类(用颜色深浅区分高低),绘制出 3 省空间差异演化分布图(图 3—5)。湖北省省会武汉市的万元 GDP 水资源生态足迹始终最高,其作为国家中心城市,经济

发展水平较高,资源消耗量较大。江汉平原地区的各城市万元 GDP 水资源生态足迹整体较高,这些地区普遍发展水产养殖业,属于典型的高耗水行业。两大省域副中心城市襄阳市、宜昌市以及鄂西山区的万元 GDP 水资源生态足迹相对较低,这些地区的高耗水产业相对较少,水资源比较丰富。两大工业城市十堰和鄂州呈现低—高的态势,十堰市较低,鄂州市较高。十堰市的工业布局是以东风汽车为核心的汽车制造及相关配套为主,汽车行业属于耗水量较低的工业;鄂州市的工业布局是以武汉钢铁集团为代表的钢铁行业为主,钢铁行业属于典型的高耗水重工业,因此两大城市的万元 GDP 水资源生态足迹呈现相反的表现。湖南省各地市的万元 GDP 水资源生态足迹均出现了下降,表明各地在发展经济的同时也注重水资源的合理利用。湖南省万元 GDP 水资源生态足迹最低的是张家界市,张家界市旅游资源丰富,第三产业在 GDP 中比例高;其次是长沙市,长沙市作为湖南省的省会城市,城市能级高,GDP 位居湖南省首位,其中的第三产业比例较高。湖南省万元 GDP 水资源生态足迹最高的是益阳市和湘西州,上述两地的经济发展程度较低。江西省各地市的万元 GDP 水资源生态足迹从整体上看处于中间高两边低的态势,其中,赣州市的万元 GDP 水资源生态足迹降幅最大,这与赣南副中心城市在协调经济发展与水资源合理利用方面取得了显著成绩密不可分。萍乡、新余、景德镇的万元 GDP 水资源生态足迹降幅很小,说明这 3 个城市还需在发展经济的同时加强水资源的合理利用。江西省万元 GDP 水资源生态足迹最低是南昌市,最高是宜春市。南昌市与长沙市情况类似,作为省会城市拥有较高的城市能级和 GDP,同时水资源利用情况总体较好;宜春市需要进一步优化水资源利用效率。

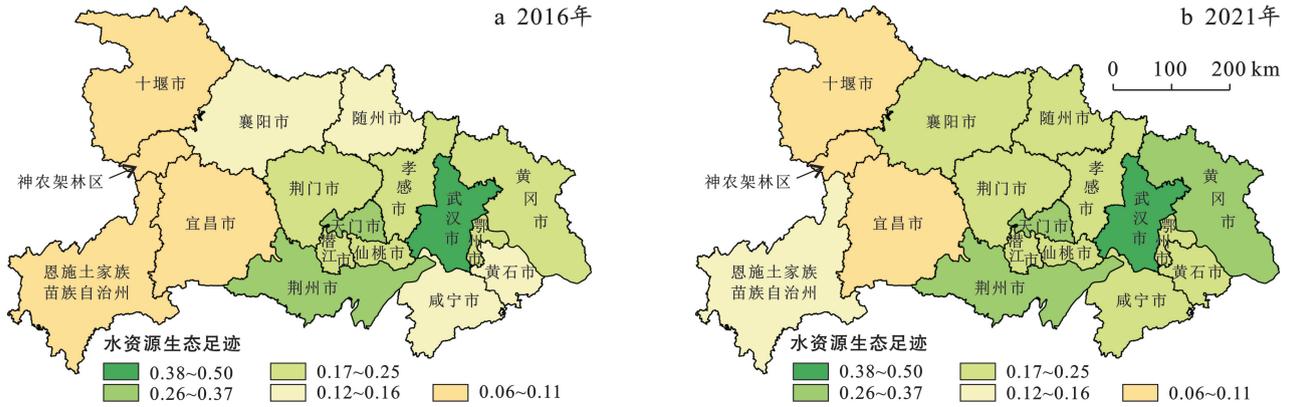


图 3 2016 与 2021 年湖北省万元 GDP 水资源生态足迹分布

Fig.3 Distribution of water resources ecological footprint per 10 000 yuan GDP in Hubei Province in 2016 and 2021

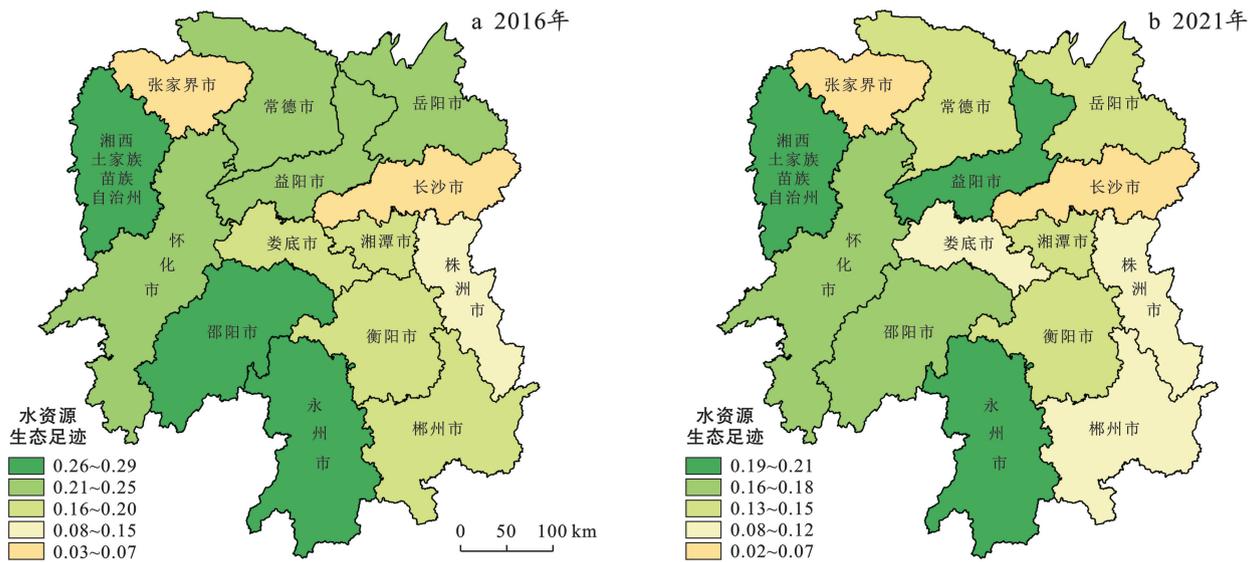


图 4 2016 与 2021 年湖南省万元 GDP 水资源生态足迹分布

Fig.4 Distribution of water resources ecological footprint per 10 000 yuan GDP in Hunan Province in 2016 and 2021

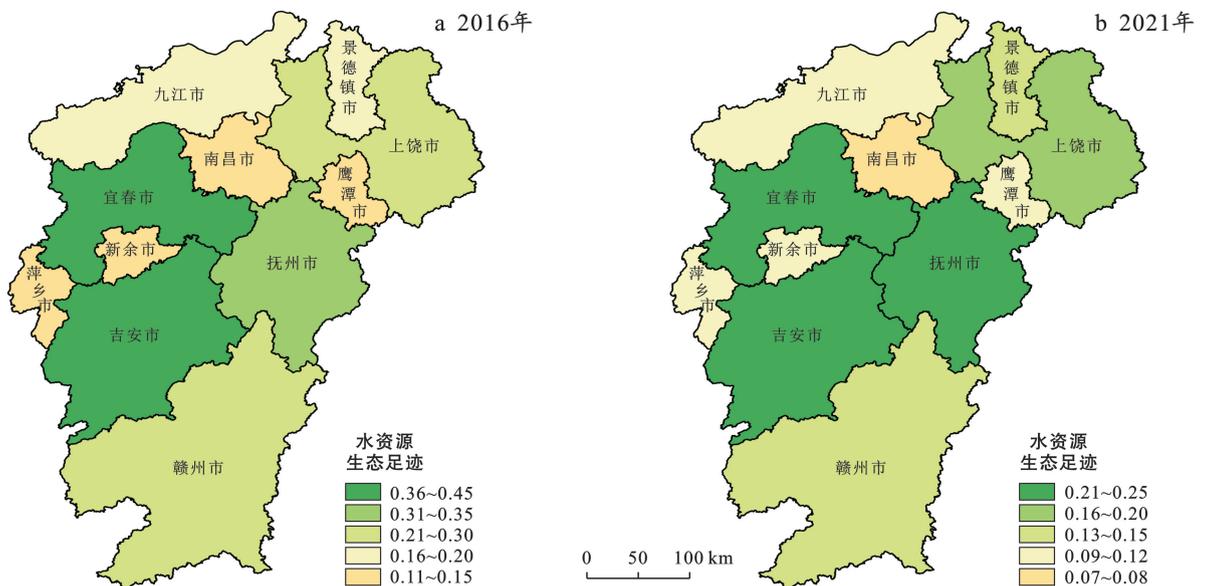


图 5 2016 与 2021 年江西省万元 GDP 水资源生态足迹分布

Fig.5 Distribution of water resources ecological footprint per 10 000 yuan GDP in Jiangxi Province in 2016 and 2021

3.2 长江中游地区水资源可持续利用评价

3.2.1 指标权重 本文构建了长江中游地区水资源可持续利用评价指标体系,权重计算结果见表 4。需要说明的是,由于 2021 年部分数据缺失,本表数据只测算到 2020 年。

从湖北省指标权重的计算结果看,指标层的最大权重为响应层的治理设施套数,权重为 0.112;最小权重为压力层的万元 GDP 用水量,权重为 0.059;准则层权重分别为压力层 0.330,状态层 0.294,响应层 0.377。从湖南省指标权重的计算结果看,指标层的最大权重为响应层的污水再生利用率,权重为 0.116;最小权重为状态层的水资源生态盈余,权重为 0.055;

准则层权重分别为压力层 0.359,状态层 0.256,响应层 0.384。从江西省指标权重的计算结果看,指标层的最大权重为响应层的工业用水重复利用率,权重为 0.1;最小权重为压力层的人口密度,权重为 0.061;准则层权重分别为压力层 0.347,状态层 0.296,响应层 0.358。

可以看出,3 省在准则层的最大权重都来自响应指标,最小权重都来自状态指标;在指标层的最大权重都来自响应指标,但湖北省指标层的最小权重来自压力指标,其他两省都来自状态指标。这充分表明采取积极有效的响应措施应对水资源利用存在的压力和威胁,会有效改善水资源的可持续利用状况。

表 4 长江中游地区各省水资源可持续利用评价指标体系权重
Table 4 Weight of evaluation index system for sustainable utilization of water resources in each province of middle reaches of Yangtze River

准则层	指标层	准则层权重			指标层权重		
		湖北省	湖南省	江西省	湖北省	湖南省	江西省
压力	人口密度/(人·km ⁻²)				0.062	0.073	0.061
	万元 GDP 用水量/(m ³ ·10 ⁻⁴ 元 ⁻¹)				0.059	0.064	0.066
	人均用水量/(m ³ ·人 ⁻²)	0.330	0.359	0.347	0.073	0.082	0.067
	万元 GDP 水资源生态足迹/(hm ² ·10 ⁻⁴ 元 ⁻¹)				0.063	0.067	0.069
状态	污水年排放量/10 ⁸ t				0.072	0.074	0.084
	地下水资源量/10 ⁸ m ³				0.067	0.059	0.074
	地表水资源量/10 ⁸ m ³	0.294	0.256	0.296	0.075	0.058	0.069
	水资源生态盈余/hm ²				0.072	0.055	0.066
响应	万元 GDP 水耗/(m ³ ·10 ⁻⁴ 元 ⁻¹)				0.080	0.084	0.086
	治理设施(套)				0.112	0.088	0.085
	治理废水投资额/(10 ⁴ 元)				0.098	0.078	0.092
	工业用水重复利用率/%	0.377	0.384	0.358	0.076	0.103	0.100
	污水再生利用率/%				0.090	0.116	0.081

3.2.2 综合评价结果 2011—2020 年长江中游地区水资源可持续利用评价结果见表 5 和图 6。3 省的压力指数、状态指数、响应指数的表现比较相似,总体呈现下降、上升和上升的趋势。3 种指数相比,3 省压力指数的下降趋势比较明晰;状态指数中湖北省的上升较其余两省更加明显;响应指数则是湖南省指数的上升较其他两省更加明显。以 2020 年为例,压力指数最高的是湖南省,为 0.094 9,最低是江西省,为 0.086 4;状态指数最高的是湖北省,为 0.127 8,最低是湖南省,为 0.079 0;响应指数最高的是湖南省,为 0.142 4,最低是湖北省,为 0.114 7。3 省的水资源可持续利用综合指数都是在波动中呈现上升的趋势,但上升幅度不大。2020 年综合指数最高的是湖北省 0.109 4,其次是湖南省 0.109 0,最后是江西省 0.102 1。可见,3 省的综合指数大体相当,可持续利用水平总体比较稳定;但 3 省的综合指数值并不高,主要是源于状态指

数和响应指数的改变较小,水资源的可持续利用仍然需要进一步采取有效措施,提升水资源的使用效率。

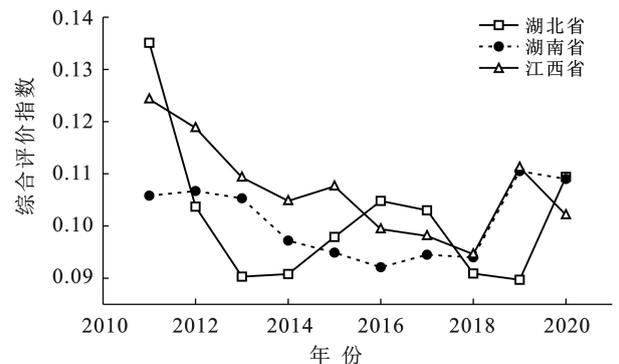


图 6 2011—2020 年长江中游地区各省水资源可持续利用综合评价结果

Fig.6 Results of comprehensive evaluation on sustainable utilization of water resources in each province of middle reaches of Yangtze River from 2011 to 2020

表 5 2011—2020 年长江中游地区水资源可持续利用综合评价结果
Table 5 Results of comprehensive evaluation on sustainable utilization of water resources in middle reaches of Yangtze River from 2011 to 2020

年份	湖北省				湖南省				江西省			
	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数
2011	0.118 9	0.083 3	0.189 4	0.135 1	0.135 6	0.071 1	0.101 4	0.105 8	0.139 8	0.082 0	0.144 0	0.124 3
2012	0.120 1	0.082 8	0.105 5	0.103 7	0.131 7	0.091 5	0.093 8	0.106 7	0.128 3	0.114 1	0.113 1	0.118 8
2013	0.107 2	0.076 4	0.086 1	0.090 3	0.127 4	0.078 5	0.102 8	0.105 3	0.130 2	0.088 5	0.105 9	0.109 3
2014	0.098 4	0.082 6	0.090 3	0.090 8	0.123 0	0.082 2	0.083 3	0.097 2	0.124 2	0.091 6	0.096 7	0.104 8
2015	0.107 2	0.086 6	0.098 4	0.097 9	0.105 2	0.082 1	0.094 0	0.094 9	0.096 4	0.102 0	0.122 9	0.107 6
2016	0.100 0	0.112 9	0.102 4	0.104 8	0.101 5	0.088 3	0.086 1	0.092 1	0.092 6	0.107 6	0.098 9	0.099 4
2017	0.097 4	0.097 5	0.112 0	0.103 0	0.098 8	0.078 3	0.101 5	0.094 5	0.089 8	0.083 8	0.117 7	0.098 1
2018	0.095 8	0.069 2	0.103 2	0.090 9	0.100 3	0.060 4	0.110 7	0.094 0	0.088 8	0.063 6	0.125 7	0.094 6
2019	0.093 6	0.051 5	0.115 9	0.089 7	0.098 5	0.081 0	0.141 7	0.110 5	0.086 8	0.096 5	0.146 7	0.111 2
2020	0.086 7	0.127 8	0.114 7	0.109 4	0.094 9	0.079 0	0.142 4	0.109 0	0.086 4	0.080 0	0.135 3	0.102 1

4 结论

本文运用水资源生态足迹模型对 2011—2021 年长江中游地区覆盖的湖北、湖南和江西三省的水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余进行时空分析,并基于生态足迹和 PSR 模型框架构建长江中游地区水资源可持续利用评价指标体系,分析其压力、状态、响应指数和综合指数情况,探究 3 省在水资源可持续利用方面的地区差异和存在的不足,得出以下结论。

(1) 长江中游 3 省的人均水资源生态足迹和生态承载力总体都呈上升趋势,生态承载力全部高于生态足迹,这使得 3 省都实现生态盈余,且上升趋势明显。湖北省的人均生态盈余最低,介于 0.304~2.603 之间,在 3 省中波动幅度最小;江西省的人均生态盈余最高,介于 3.186~7.966 之间,较其他两省波动幅度较大。湖北省和湖南省可以进一步采取措施提升水资源生态盈余,而江西省则需要关注生态盈余波动的原因,确保生态盈余平稳上升。

(2) 3 省各用水账户生态足迹都是生产用水占比最大,其次为生活用水。生态环境用水占比虽然最小,但是上升幅度最大,远高于其他两类账户,其中湖北省的生态环境用水涨幅最大。这说明提高水资源的可持续利用水平,仍然需要花大力气控制生产用水和生活用水的合理使用,尤其是生产用水,同时进一步鼓励生态环境用水的使用。

(3) 3 省的万元 GDP 水资源生态足迹虽然始终为正,但呈现明显的下降趋势,表明 3 省对水资源的利用效率正在逐渐提高,其中江西省最高,湖北省最低,三省差距正逐渐缩小。江西省在发展经济过程中要进一步提高第三产业的贡献率,缩小与其他省在万元 GDP 水资源生态足迹方面的差距。

(4) 3 省的压力指数、状态指数和响应指数整体呈现下降、上升和上升的趋势。压力指数的下降趋势明显,状态和响应指数的上升的表现有限,其中只有湖北省的状态指数和湖南省的响应指数达到新的峰值。3 省的综合评价指数都是处于波动中上升的趋势,各省综合指数都不高,表现比较平稳。可见,3 省的水资源可持续利用水平虽然总体比较稳定,但响应措施发挥的效果还不够,可持续发展仍面临较大挑战,需要采取更加有效和有利的举措。

参考文献 (References)

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析 [J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-616.
Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607-616.
- [3] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.
Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [4] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测 [J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3559-3568.
Tan Xiujian, Zheng Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [5] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局 [J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7048-7060.
Sun Caizhi, Zhang Zhixiong. Assessment of water eco-

- logical footprint size, depth, and spatial pattern in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21):7048-7060.
- [6] Li Jiahong, Lei Xiaohui, Fu Qiang, et al. Multi-scale research of time and space differences about ecological footprint and ecological carrying capacity of the water resources [J]. *Applied Water Science*, 2018, 8:22.
- [7] Wang Huan, Huang Jiejun, Zhou Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262:110331.
- [8] 岳晨, 刘峰, 杨柳, 等. 北京市 2010—2019 年水资源生态足迹和生态承载力 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):291-295.
Yue Chen, Liu Feng, Yang Liu, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Beijing City during 2010—2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3):291-295.
- [9] 岳晨, 李凡, 付路路, 等. 天津市水资源生态足迹研究 [J]. *水文*, 2022, 42(6):56-60.
Yue Chen, Li Fan, Fu Lulu, et al. Research on the ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Tianjin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(6):56-60.
- [10] 贾诗琪, 张鑫, 彭辉, 等. 湖北省水生态足迹时空动态分析 [J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(3):27-32.
Jia Shiqi, Zhang Xin, Peng Hui, et al. Spatio-temporal dynamics of water ecological footprint in Hubei Province [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(3):27-32.
- [11] 卢亚丽, 徐帅帅, 沈镭. 基于胡焕庸线波动的长江经济带水资源环境承载力动态演变特征 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(11):2811-2824.
Lu Yali, Xu Shuashuai, Shen Lei. The dynamic evolution of water resources environmental carrying capacity in the Yangtze River economic belt based on the fluctuation of Hu Line [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11):2811-2824.
- [12] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 等. 长江中游城市群水—碳—生态足迹变化特征及其平衡性分析 [J]. *生态学报*, 2022, 42(4):1368-1380.
Chen Yizhong, Qiao Youfeng, Lu Hongwei, et al. Water-carbon-ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4):1368-1380.
- [13] 唐莲, 刘子西, 黑正军, 等. 宁夏沿黄城市带不同区域碳水压力驱动机制研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(8):2931-2938.
Tang Lian, Liu Zixi, Hei Zhengjun, et al. Study on the driving mechanism of carbon-water pressure in different regions of the urban belt along the Yellow River in Ningxia [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(8):2931-2938.
- [14] 张婉玲, 邹磊, 夏军, 等. 长江中游城市群水资源生态足迹时空演变及其驱动因素分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(1):83-92.
Zhang Wanling, Zou Lei, Xia Jun, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of water resources ecological footprint of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(1):83-92.
- [15] 许典子, 张万顺, 彭虹, 等. 三峡库区水资源生态足迹及承载力时空演变研究 [J]. *人民长江*, 2019, 50(5):99-106.
Xu Dianzi, Zhang Wanshun, Peng Hong, et al. Spatio-temporal analysis of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Three Gorges Reservoir area [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(5):99-106.
- [16] 邵骏, 卢满生, 杜涛, 等. 长江流域水资源生态足迹及其驱动因素 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(12):19-24.
Shao Jun, Lu Mansheng, Du Tao, et al. Water resources ecological footprint in Yangtze River basin and its driving factors [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(12):19-24.
- [17] 张羽, 左其亭, 曹宏斌, 等. 沁蟒河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3):50-57.
Zhang Yu, Zuo Qiting, Cao Hongbin, et al. Spatio-temporal variation characteristics and equilibrium analysis of water resources ecological footprint in the Qinmang River basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(3):50-57.
- [18] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(6):121-129.
Zhao Zimeng, Cao Yongqiang, Chang Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6):121-129.
- [19] 李雨欣, 薛东前, 宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7):1574-1584.
Li Yuxin, Xue Dongqian, Song Yongyong. Spatio-temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7):1574-1584.
- [20] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5):1076-1087.

- An Hui, Fan Lijuan, Wu Hailin, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River basin based on BP neural network [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(5):1076-1087.
- [21] 魏亚茹,朱永明,康艳青.基于组合预测模型的沿黄省区水资源生态足迹研究[J].*水文*,2022,42(6):52-55.
- Wei Yaru, Zhu Yongming, Kang Yanqing. Water resources ecological footprint research based on the combination forecast model of the provinces along the Yellow River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022,42(6):52-55.
- [22] 宾零陵,蒋睿文,曹永强,等.京津冀水资源生态足迹动态变化与预测[J].*水资源保护*,2023,39(5):32-38.
- Bin Lingling, Jiang Ruiwen, Cao Yongqiang, et al. Dynamic change and prediction of ecological footprint of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(5):32-38.
- [23] 王广州,窦身堂,凡姚申,等.黄河下游地区水资源生态足迹时空分析与预测[J].*水土保持通报*,2023,43(1):117-123.
- Wang Guangzhou, Dou Shentang, Fan Yaoshen, et al. Spatiotemporal analysis and prediction of ecological footprint of water resources in lower reaches of Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):117-123.
- [24] 李逢港,刘伟,董战峰,等.四川省水资源生态足迹及可持续利用综合评价[J].*环境污染与防治*,2023,45(2):245-249.
- Li Fenggang, Liu Wei, Dong Zhanfeng, et al. Comprehensive evaluation of water resources ecological footprint and sustainable utilization in Sichuan Province [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023,45(2):245-249.
- [25] Rapport D J, Singh A. An Ecohealth-based framework for state of environment reporting [J]. *Ecological Indicators*, 2006,6(2):409-428.
- [26] 赵敏敏,何志斌,蔺鹏飞,等.基于压力—状态—响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价[J].*生态学报*,2021,41(22):9039-9049.
- Zhao Minmin, He Zhibin, Lin Pengfei, et al. Ecological security evaluation of Zhangye City in the middle reaches of the Heihe River based on pressure-state-response model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(22):9039-9049.
- [27] 李港,陈诚,姚斯洋,等.基于压力—状态—响应和物元可拓模型的城市河流健康评价[J].*生态学报*,2022,42(9):3771-3781.
- Li Gang, Chen Cheng, Yao Siyang, et al. Health assessment of urban river based on pressure-state-response and matter-element extension model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(9):3771-3781.
- [28] 陈志芳,李晴.基于PSR模型的政府环境绩效审计评价研究:以滇池治理项目为例[J].*科技与经济*,2019,32(1):106-110.
- Chen Zhifang, Li Qing. Research on the government environmental performance auditing evaluation based on PSR model: Taking Dianchi Lake pollution control project as an example [J]. *Science & Technology and Economy*, 2019,32(1):106-110.
- [29] 李重阳,江磊,刘兆香,等.中国大气污染防治技术推广效果评价:基于PSR评价模型[J].*科技管理研究*,2021,41(8):209-214.
- Li Chongyang, Jiang Lei, Liu Zhaoxiang, et al. Effect evaluation of air pollution control technology extension in China:Based on PSR assessment model [J]. *Science and Technology Management Research*, 2021,41(8):209-214.
- [30] 孙小祥,秦艺娟.基于PSR模型的城市土地集约利用评价研究:以苏州市为例[J].*西南大学学报(自然科学版)*,2021,43(4):100-108.
- Sun Xiaoxiang, Qin Yijuan. An evaluation study of urban land intensive utilization in Suzhou based on PSR model [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021,43(4):100-108.
- [31] 苗欣然,李泽红,王梦媛.粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变:以齐齐哈尔市为例[J].*资源科学*,2023,45(9):1801-1816.
- Miao Xinran, Li Zehong, Wang Mengyuan. Spatiotemporal changes of cultivated land use system resilience in the black soil region of Northeast China under food supply security: A case study of Qiqihar City [J]. *Resources Science*, 2023,45(9):1801-1816.