

基于能值水生态足迹模型的中部六省水资源利用评价

焦士兴¹, 王安周², 刘家乐¹, 刘畅³, 赵荣钦⁴, 李中轩⁵, 魏凌茵¹

(1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455002; 2. 洛阳市第十九中学, 河南 洛阳 471000; 3. 衡阳师范学院 地理与旅游学院, 湖南 衡阳 421001; 4. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 郑州 450046; 5. 许昌学院 城市与环境学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 【目的】定量评价中部六省水资源真实利用状况。【方法】基于能值理论, 研究了中部六省能值水生态承载力等时空格局, 分析了能值水生态足迹的构成。【结果】①中部六省能值水生态足迹呈波动上升趋势, 能值水生态承载力的地表水能值生态承载力最大, 地下水能值生态承载力次之, 雨水能值生态承载力最小, 三者占比分别为84%、9%、7%。②中部六省水生态盈余量呈波动上升趋势, 呈水生态赤字状态; 水生态压力指数则呈波动下降趋势, 2011、2016年均分别达到最大值和最小值。③中部六省能值水生态足迹和能值水生态承载力均呈南高、北低的格局, 六省排序具有一定的差别。④中部六省水生态盈余量从大到小依次为湖北($2.94 \times 10^8 \text{ hm}^2$)、安徽($2.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$)、河南($2.27 \times 10^8 \text{ hm}^2$)、湖南($1.22 \times 10^8 \text{ hm}^2$)、江西($1.06 \times 10^8 \text{ hm}^2$)、山西($0.62 \times 10^8 \text{ hm}^2$); 水生态压力指数空间分布不均且南方低于北方。⑤中部六省及南、北部能值水生态足迹构成中均是农业用水生态足迹最大、生态环境用水生态足迹最小; 南部排序为水产品、工业用水、生活用水、水污染生态足迹, 北部则为生活用水、工业用水、水污染和水产品生态足迹。【结论】中部六省水资源处于生态不可持续利用状态, 通过兴修水利工程、重视节水技术、优化用水结构等有利于实现区域水资源持续利用。

关键词: 能值水生态足迹; 中部六省; 水资源利用评价

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024175

焦士兴, 王安周, 刘家乐, 等. 基于能值水生态足迹模型的中部六省水资源利用评价[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(2): 11-18.
JIAO Shixing, WANG Anzhou, LIU Jiale, et al. Evaluating water resource utilization in central China using the energy-based water ecological footprint model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(2): 11-18.

0 引言

【研究意义】水资源是人类赖以生存和发展的物质基础^[1]。自2004年中部崛起战略提出以来, 水资源短缺等问题日益凸显, 已成为限制社会经济可持续发展的重要因素^[2], 因此明确水资源生态安全状况并提出针对性战略对策, 对实现中部崛起战略和水资源持续利用具有重要意义。【研究进展】1992年Rees等^[3]提出了生态足迹概念, 用于定量评价区域自然资源可持续发展利用状况^[4-5]; 2000年徐中民等^[6]最早将生态足迹理论引入我国, 受到国内学者广泛关注与研究^[7], 但具有生态偏向性、空间互斥性、参数不稳定性等缺陷, 致使计算误差较大^[8-9]。基于此, 张芳

怡等^[10]提出了基于能值分析的生态足迹模型, 并在省域^[8,10]、市域^[9]、流域^[11]以及旅游^[12]等层面开展了实证研究。能值生态足迹衍生出的水资源能值生态足迹是水资源研究的主要方向之一^[13-15], 曾晓霞^[13]构建了水资源能值生态足迹模型, 汪定盼等^[14]、刘珂伶等^[15]分别运用该模型评价了西北调水工程以及北京市的水资源持续利用状况。在此基础上, 王慧亮等^[16]、李友光等^[17]综合考虑淡水等生态足迹, 基于能值水生态足迹模型评价了黄河流域和河南省水资源利用状况。

【切入点】基于生态足迹、能值等理论建立能值水生态足迹模型, 其研究主要集中在模型测算^[13-14]和变动趋势等方面^[15], 而对于水资源利用评价的研究鲜见。在中部崛起战略背景下, 探讨中部地区水资源时空演变特征的研究相对缺乏。【拟解决的关键问题】为此, 运用能值水生态足迹模型, 计算中部六省能值水生态足迹和能值水生态承载力等, 并分析其时空变化趋势, 结合水生态盈余等指标评价水资源利用状况, 以期为中心六省水资源优化配置提供政策建议。

收稿日期: 2024-04-26 修回日期: 2024-08-29

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(24A170001); 安阳市科技
发展计划项目(2023C01SF216); 安阳师范学院大学生创新基金项目
(202310479036)

作者简介: 焦士兴(1970—), 男, 河南周口人。教授, 博士, 研究方向
为水资源和水环境。E-mail: jiaoshixing@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南六省, 介于 29°05'—40°44' N, 108°21'—119°31' E。本区地跨亚热带和暖温带, 植被呈南北过渡性, 土壤以红壤、黄棕壤和褐土为主, 土地面积为 $1.027 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占全国陆地总面积的 10.7%。中部地区年均降水量约为 1 120 mm, 水资源空间分布不均, 呈南多北少的特点; 中部地区人均水资源区域差异显著, 2022 年山西人均水资源量为 $592.5 \text{ m}^3/\text{人}$, 仅为江西的 1/5, 属于重度缺水省份。中部六省地处“内陆腹地”的核心区位, 联南接北、承东启西, 在全国的经济建设中占有举足轻重的战略地位。

1.2 数据来源

数据包括地表水资源量、地下水资源量、降水量、水资源总量、工业用水量、农业用水量、生活用水量、生态环境用水量、水产品产量、废水排放量、区域面积。其中地表水资源量、地下水资源量、降水量、水资源总量 4 项数据来自六省水资源公报(2006—2022 年)以及《中国水资源公报》(2006—2022 年); 工业用水量、农业用水量、生活用水量、生态环境用水量、水产品产量、废水排放量、区域面积 7 项数据来自中部六省统计年鉴(2007—2023 年)。

1.3 研究方法

1.3.1 能值理论与方法

能值指某种流动或贮存的能量包含的另一种类别能量的数量, 将原始数据统一转换为以能值(sej)为单位的数据, 其中地表水、地下水能值转化系数和雨水太阳能值转化率计算式^[18]为:

$$E=BT, \quad (1)$$

式中: E 为能值(sej); B 为能量或物质的质量

(J 或 g); T 为能值转换率(sej/J 或 sej/g)。

1.3.2 能值水生态足迹

能值水生态足迹是将能值理论和水生态足迹^[19]相结合, 有利于区域的横向对比^[13], 从而能够科学评估水资源的利用状况。其计算式为^[16]:

$$W_{ef} = W_{eff} + W_{efp} + W_{efa}, \quad (2)$$

$$W_{eff} = \sum_{i=1}^n \frac{E_{fi}}{P} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{fi}T_{fi}}{P}, \quad (3)$$

$$W_{efp} = \frac{E_p}{P} = \frac{Q_p T_p}{P}, \quad (4)$$

$$W_{efa} = \frac{E_a}{P} = \frac{M_a T_a}{P}, \quad (5)$$

式中: W_{ef} 、 W_{eff} 、 W_{efp} 、 W_{efa} 分别为能值水生态足迹、淡水生态足迹、水污染生态足迹和水产品生态足迹(hm^2); n 为三级账户个数; E_{fi} 为第 i 个三级账户的能值(sej); C_{fi} 为第 i 个三级账户的用水量(m^3); T_{fi} 为第 i 个三级账户的能值转换率(sej/ m^3); P 为区域能值密度(sej/ hm^2); E_p 为水污染能值(sej); Q_p 为污水排放量(t); T_p 为污染水体的能值转换率(sej/t); E_a 为水产品能值(sej); M_a 为水产品产量(t); T_a 为水产品的能值转换率(sej/t)。

1.3.3 能值水生态承载力

能值水生态承载力是指水资源能够支撑社会、经济和维持环境的能力。其计算式^[16]为:

$$W_{ec} = \frac{0.4(E_g + E_u + E_r)}{P_w}, \quad (6)$$

式中: W_{ec} 为能值水生态承载力(hm^2); E_g 、 E_u 、 E_r 分别为地表水化学能、地下水化学能和雨水势能(sej); P_w 为区域水资源平均能值密度(sej/ hm^2); 能值量化所涉及参数及其转换关系可参考文献[20-24], 其中水产品能值转换率为 $2.5 \times 10^6 \text{ sej/t}$ ^[20]。根据相关计算模型^[15], 对区域能值密度等进行计算(表 1)。

表 1 2006—2022 年中部六省区域能值密度和区域水资源能值密度

Tab.1 Regional energy density and regional water resources energy density in the six central provinces from 2006 to 2022

类别	河南	山西	湖北	安徽	湖南	江西	中部六省
区域能值密度/($10^{15} \text{ sej hm}^{-2}$)	2.302	0.703 4	3.344	3.399	2.399	2.674	2.477
区域水资源能值密度/($10^{15} \text{ sej hm}^{-2}$)	1.135	0.464	3.631	3.258	5.461	6.138	3.476

1.3.4 能值水生态足迹评价指标

能值水生态足迹评价指标包括水生态盈余量和水生态压力指数。其计算式^[25-26]为:

$$W_{ed} = W_{ef} - W_{ec}, \quad (7)$$

$$I_p = W_{ef} / W_{ec}, \quad (8)$$

式中: W_{ed} 为水生态盈余量(hm^2), 用于判断水资源的可持续利用情况。当 $W_{ed}=0$ 时, 水资源处于供需平衡状态; 当 $W_{ed}>0$ 时为水生态赤字, 表明区域水资源需求量大于供给量, 为水资源短缺; 当 $W_{ed}<0$ 时为水生态盈余, 表明区域水资源充足, 有利于社会

经济的可持续发展。 I_p 为水生态压力指数, 可用于判断区域内水资源的开发利用安全状态。

2 结果与分析

2.1 时间维度动态分析

2.1.1 能值水生态足迹与能值水生态承载力

中部六省能值水生态足迹呈波动上升趋势(图 1)。能值水生态足迹由 2006 年的 $0.91 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 上升到 2022 年的 $1.07 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 多年平均值为 $1.03 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。上升和下降趋势共包括 7 个时段: ①上升趋势 4 个时

间段分别是 2006—2013、2014—2015、2017—2019、2021—2022 年；其中在 2006—2013、2017—2019 年呈连续上升趋势，表明随着国家“十三五”规划的实施，中部六省社会经济发展对水资源需求量增加，导致能值水生态足迹大幅上升。②下降趋势 3 个时间段分别是 2013—2014、2015—2017、2019—2021 年；其中在 2015—2017、2019—2021 年呈连续下降趋势，表明中部六省加大了对水资源利用的防控力度，吸纳生活、生产废弃物需要水资源量减少，水资源紧缺状况有所缓解。

中部六省地表水能值生态承载力占比最大，地下水能值生态承载力次之，雨水能值生态承载力最小（图 2）。由图 1 可知，2006—2022 年能值水生态承载力由 $0.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增至 $0.39 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，年均增长 0.3%，表明通过采取水利工程建设等措施，水资源供给稳中有升，中部六省能值水生态承载力波动增长。由图 2 可知，地表水能值生态承载力最大，地下水能值生态承载力次之，雨水能值生态承载力最小，占比

分别为 84%、9% 和 7%，且以地表水资源的开发占据了主导地位，因此，地表水的供给能力直接决定中部六省能值水生态承载力的稳定性。

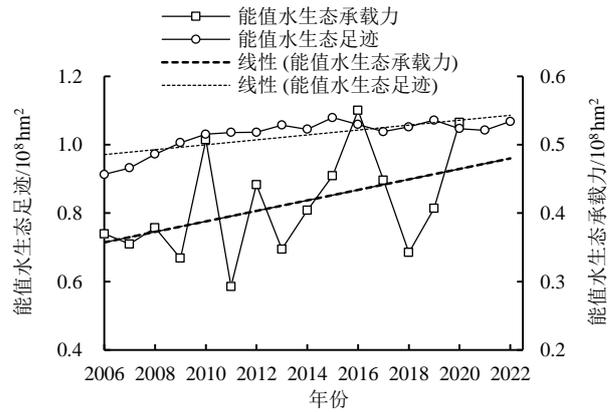


图 1 中部六省 2006—2022 年能值水生态足迹和能值水生态承载力

Fig.1 Energy water ecological footprint and carrying capacity in the six central provinces from 2006 to 2022

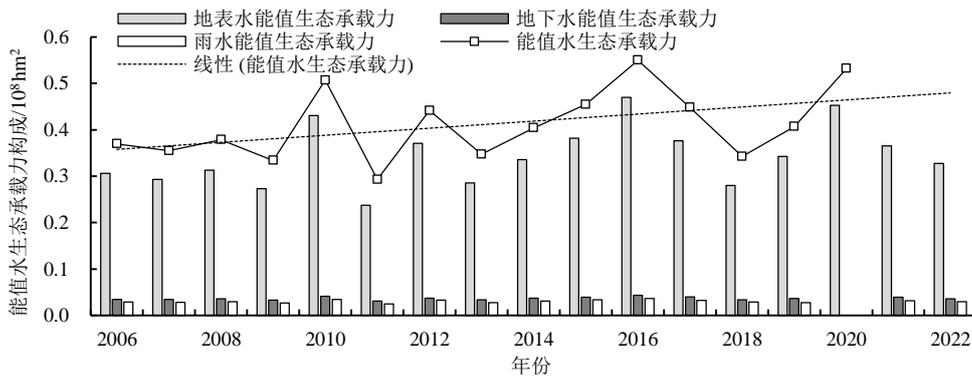


图 2 中部六省 2006—2022 年能值水生态承载力及其构成

Fig.2 Energy water ecological carrying capacity and its composition in the six central provinces from 2006 to 2022

2.1.2 水生态盈余量与水生态压力指数

中部六省水生态盈余量呈波动上升趋势，其发展趋势具有 9 个时段（图 3）。2006—2009、2010—2011、2012—2013、2016—2018、2020—2022 年，中部六省水生态盈余量呈上升趋势，其中 2006—2009 年呈缓慢上升趋势，从 $0.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增长到 $0.67 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，增长率约为 24%；2016—2018、2020—2022 年则呈快速上升趋势，分别由 0.508×10^8 、 $0.514 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增长到 0.71×10^8 、 $0.67 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，增长率分别为 39% 和 31%。2009—2010、2011—2012、2013—2016、2018—2020 年，中部六省水生态盈余量呈下降趋势，其中 2013—2016 年呈连续下降趋势，从 $0.709 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 下降到 $0.508 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，下降率约为 39%；2018—2020 年仍呈加速下降趋势，从 2018 年的 $0.708 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 下降到 2020 年的 $0.514 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，下降率约为 38%。研究期间，中部六省水生态盈余量分为 9 个发展阶段，且能值水生态足迹大于能值水生态承

载力，表现为水生态赤字状态。

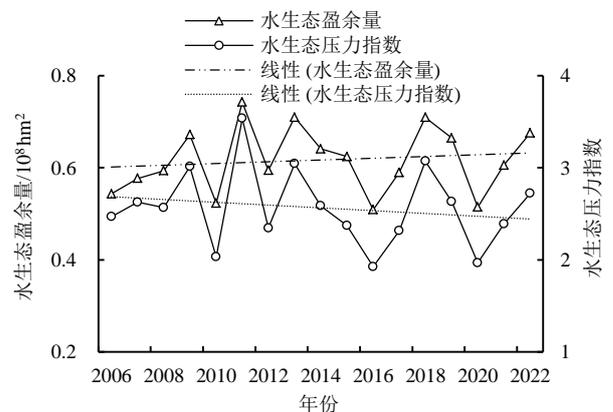


图 3 中部六省 2006—2022 年水生态盈余量和水生态压力指数

Fig.3 Water ecological deficit and stress index in six central provinces from 2006 to 2022

中部六省水生态压力指数呈波动下降趋势，其发展趋势具有 11 个时段（图 3）。2006—2007、2008—2009、2010—2011、2012—2013、2016—2018、

2020—2022 年, 中部六省水生态压力指数呈上升趋势, 其中, 2016—2018 年呈快速上升趋势, 从 1.93 增长到 3.07, 增长率约为 59%; 2020—2022 年则呈较快上升趋势, 从 1.97 增长到 2.72, 增长率约为 38%。2007—2008、2009—2010、2011—2012、2013—2016、2018—2020 年, 中部六省水生态压力指数呈下降趋势, 其中 2013—2016 年呈较快下降趋势, 从 3.04 下降到 1.93, 下降率约为 58%; 2018—2020 年则呈快

速下降趋势, 从 3.07 下降到 1.97, 下降率约为 56%。研究期间, 尽管水生态压力指数有缓慢下降趋势, 但水资源状况仍较为紧张, 不利于社会经济可持续发展。

2.2 空间分布格局分析

结合行政区划和山脉水系分布, 河南、安徽则分别以北方和南方为主, 基于此山西、河南归属于北方, 湖北、湖南、江西和安徽归属于南方, 据此来分析中部六省能值水生态足迹的空间分布格局 (表 2)。

表 2 2006—2022 年中六省能值水生态足迹总值构成和能值水生态承载力总值

Tab.2 Total value of energy water ecological footprint and carrying capacity in the six central provinces from 2006 to 2022

省份	能值水生态足迹/ 10^8 hm^2						总值	能值水生态承载力/ 10^8 hm^2		水生态压力指数
	农业用水	工业用水	生活用水	生态环境用水	水产品	水污染		10 ⁸ hm ²	10 ⁸ hm ²	
河南	0.77	0.53	0.60	0.13	0.27	0.34	2.64	0.37	2.27	7.14
山西	0.25	0.15	0.20	0.03	0.02	0.12	0.76	0.14	0.62	5.43
湖北	0.89	1.05	0.67	0.01	1.40	0.25	4.26	1.32	2.94	3.23
安徽	0.93	0.98	0.39	0.04	0.73	0.20	3.26	0.89	2.37	3.66
湖南	1.18	0.51	0.67	0.03	0.78	0.31	3.48	2.26	1.22	1.54
江西	0.98	0.62	0.41	0.02	0.82	0.20	3.06	2.00	1.06	1.53
均值	0.83	0.64	0.49	0.04	0.67	0.24	2.91	1.16	1.75	3.76

注 能值水生态足迹总值是指 2006—2022 年中六省能值水生态足迹总和。

2.2.1 能值水生态承载力与能值水生态足迹

中部六省能值水生态承载力整体呈南高北低的格局 (表 2)。南部的湖南、湖北、安徽和江西能值水生态承载力分别为 2.26×10^8 、 1.32×10^8 、 0.89×10^8 、 $2.00 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 其中湖南和湖北地下水及地表水较为丰富, 水资源禀赋好, 能够有效减缓用水压力; 安徽降水较多, 地表水资源相对较多; 江西的生态环境良好, 水资源丰富, 在当地政府有效管理下水资源利用效率不断提高。北部的山西、河南能值水生态承载力分别为 0.14×10^8 、 $0.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 其中山西地处黄土高原地区, 雨水较少, 能值水资源承载力相对较低; 河南多数地区的发展长期因水资源缺乏而受到制约, 存在水资源消耗量大且供给以开发地表水为主的状况。

中部六省能值水生态足迹整体呈南高北低的格局 (表 2)。南部的湖北、湖南、安徽和江西能值水生态足迹总值分别为 4.26×10^8 、 3.48×10^8 、 3.26×10^8 、 $3.06 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 其中湖北水产品能值生态足迹在中部六省中占比最大, 为 33%, 表明其水产品能值生态足迹贡献最大; 湖南随着人口逐年增加, 耕地开发利用数量和程度增大, 农业投入显著增多, 故农业用水能值生态足迹在中部六省占比最大, 为 34%; 安徽工业用水能值生态足迹在中部六省中占比较大, 为 30%, 表明工业用水对能值水生态足迹贡献较大; 江西生态环境良好, 生态环境用水和水污染能值生态足迹总值分别为 $0.02 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 和 $0.20 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 在中部六省占比均较小, 其能值水生态足迹最低。北部的河南、山西能值水生态足迹较低, 河南是农业大省, 农业用水生态足迹占比为 29%, 农业用水量较大; 山西盛产煤

炭, 水环境质量受到一定影响, 与其他五省相比各类用水量指标均较低。

中部六省的能值水生态承载力和能值水生态足迹空间差异显著, 应采取针对性的措施, 以实现水资源的可持续利用和保护。对于湖南等能值水生态承载力较高的省份, 应注重对水域生态的保护和涵养, 合理配置水资源, 提高水资源利用效率; 而对于湖北等能值水生态足迹较高的省份, 应优化产业结构, 提升污水处理转化能力, 推进农业节水增效, 从而降低能值水生态足迹。

2.2.2 水生态盈余量与水生态压力指数

中部六省水生态盈余量湖北最大, 山西最小, 其次为安徽、河南、湖南和江西。南部的湖南、湖北、安徽和江西水生态盈余量大多介于 $1.06 \times 10^8 \sim 2.94 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 呈水生态赤字状态。湖北是长江岸线最长的省份, 水资源丰富, 但其经济社会发展与能值水生态承载力空间匹配不均衡, 故生态盈余量在南部四省中最高; 安徽工业发展速度较快, 能值水生态承载力主要受工业发展、工业废水排放量的影响, 故水生态盈余量较高; 湖南、江西水资源禀赋优良, 能值水生态承载力总值相对较高, 故水生态盈余量较低。北部的山西和河南, 水生态盈余量分别为 $0.62 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 和 $2.27 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 山西因气候条件较差, 经济发展受水资源限制, 且总能值水生态足迹和总能值水生态承载力都为中部六省中最低, 故水生态盈余量最低; 河南能值水生态足迹总值为 $2.64 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 仍然大于能值水生态承载力 $0.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 表明工业化、城市化对水资源的需求量均超过水资源的供给量, 表现为

水生态赤字。

中部六省水生态压力指数空间分布不均且南方低于北方。南部的安徽、湖北、湖南和江西的水生态压力指数分别为 3.66、3.23、1.54、1.53。安徽地跨淮河、长江和新安江三大流域，2022 年人均水资源量为 889.8 m^3 ，属于重度缺水省份，水生态压力指数在南部四省中最大；湖北水资源时空分布不均，存在水质型缺水问题，能值水生态承载力总值为 $1.32 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，水生态压力指数仅次于安徽；湖南靠近长江中游地区，河网密布水系发达，能值水生态承载力在中部六省中最大，为 $2.26 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，水生态压力指数较低；江西地处长江中下游南岸，水资源相对丰富，年均降水量为 1 646 mm，能值水生态承载力在中部六省相对较高，故水资源供需矛盾趋于平缓，水生态压力指数最低。北部河南和山西水生态压力指数分别为 7.14 和 5.43，其中山西能值水生态足迹总值仅为 $0.76 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，约为中部六省的 1/4，能值水生态承载力为 $0.14 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，约为中部六省均值的 1/8，水资源消耗量相对其承载力较大，水生态承载力较小导致水生态压力较大。

2.2.3 能值水生态足迹构成

中部六省能值水生态足迹构成中农业用水生态足迹最大、生态环境用水生态足迹最小。能值水生态足迹构成表现为农业用水生态足迹 ($4.98 \times 10^8 \text{ hm}^2$) > 水产品生态足迹 ($4.01 \times 10^8 \text{ hm}^2$) > 工业用水生态足迹 ($3.84 \times 10^8 \text{ hm}^2$) > 生活用水生态足迹 ($2.94 \times 10^8 \text{ hm}^2$) > 水污染生态足迹 ($1.42 \times 10^8 \text{ hm}^2$) > 生态环境用水生态足迹 ($0.26 \times 10^8 \text{ hm}^2$)。

南部四省能值水生态足迹构成中农业用水生态足迹最大、生态环境用水生态足迹最小，其次为水产品、工业用水、生活用水、水污染生态足迹（图 4）。湖北、湖南、安徽、江西农业用水生态足迹占比最大（湖北除外），分别为 21%、34%、29%、32%，表明农业发展对水资源的消耗量最大；其次，4 个省份水产品生态足迹占比较大，分别为 33%、22%、22%、27%，表明水产品行业较为发达，水产品耗水量在经济发展中占据重要位置；再次，4 个省份工业用水生态足迹占比分别为 25%、15%、30%、20%，生活用水生态足迹占比分别为 16%、19%、12%、13%，而水污染生态足迹占比则为 6%、9%、6%、7%；生态环境用水生态足迹占比最低，仅维持在 1% 左右，但生态环境用水对于维持河道基流等具有重要作用，未来水资源配置仍然应该提高生态环境用水的比例。

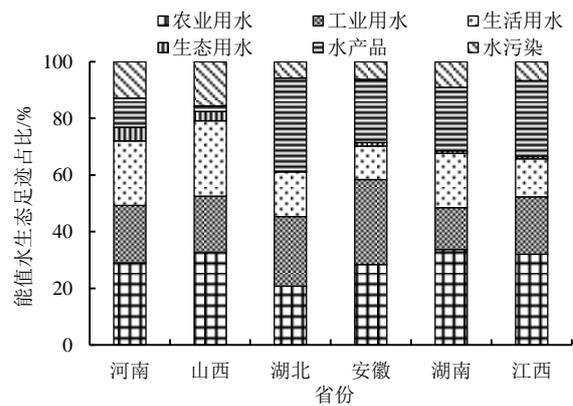


图 4 中部六省 2006—2022 年中能值水生态足迹构成

Fig.4 Composition of energy water ecological footprint in the six central provinces from 2006 to 2022

北部的河南、山西能值水生态足迹构成中农业用水生态足迹最大、生态环境用水生态足迹最小，其次为生活用水、工业用水、水污染、水产品生态足迹（图 4）。河南、山西农业用水生态足迹占比最大，分别为 29%、33%，表明大量的水资源仍然用于农业生产和灌溉，提高用水效率以及发展节水农业至关重要，而生活用水生态足迹占比仅次于农业用水生态足迹，分别为 23%、26%，表明随着经济发展、生活水平的提高，居民对生活用水的需求量上升。河南、山西工业用水生态足迹占比均为 20%，表明随着经济发展，工业对水资源的消耗都在一定的限度内，而水污染生态足迹占比相对较高，分别为 13%、15%，表明农业污染、工业废水和生活污水排放仍然不可忽视；生态环境用水生态足迹占比最低，大约维持在 4% 左右，表明北部需要加强在生态环境用水上的重视，合理控制用水需求，保障水生态环境安全。

3 讨论

能值水生态足迹模型将能值理论和水生态足迹相结合，拓展了水足迹理论研究范畴。研究中原始数据的真实性、可靠性以及核算中参数选取都会影响评价的结果，尤其是区域能值密度、能值转换率等参数的选取和计算，但能值水生态足迹法为度量区域水资源可持续利用提供了新的审视角度。

中部六省水生态盈余量在 2011 年呈最大值，在 2016 年呈最小值；水生态压力指数同样在 2011 年呈最大值，在 2016 年呈最小值，主要受能值水生态承载力年际变化的影响^[16]。中部六省能值水生态足迹整体呈南高北低的格局，这与焦士兴等^[27]研究结果一致，南部人口经济密集，社会经济发展中需水量较大，导致水足迹总量较大，且水产品生态足迹占比较大，这与李友光等^[17]研究结果一致；中部六省能值水生态承

承载力整体呈南高北低的格局,这与孙才志等^[28]研究结果一致,表明水生态承载力受降水和径流影响较大,水资源禀赋较好的南部水生态承载力较高;中部六省地表水生态承载力占比最大,因此地表水的供给能力直接影响区域水生态承载力^[17]。

中部六省水生态压力指数空间分布不均且南方低于北方,表明北部水生态压力的强度高于南部,这与郝帅等^[29]研究结果一致,北部的河南农业发达,城乡居民生产生活消费水资源量大且为水生态赤字,水生态压力指数为 7.14,处于亚安全状态^[15];研究表明,湖北、湖南、安徽、江西的水生态压力指数>1,表明水资源处于生态不可持续状态,这与郝帅等^[29]研究结果不一致,究其原因在于考虑了水产品生态足迹,致使计算结果更贴近实际;中部六省能值水生态足迹构成中农业用水生态足迹最大、生态环境用水生态足迹最小,这与马晓蕾等^[30]研究结果一致,且随着各地生态保护意识增强,生态环境用水将不断增加。

4 结论与建议

1) 中部六省能值水生态足迹呈波动上升趋势,地表水能值生态承载力最大,地下水能值生态承载力次之,雨水能值生态承载力最小,三者占比分别为 84%、9%、7%。中部六省通过兴修水利工程等措施,注重生态保护和水土保持,持续提高水资源利用效率和供给能力,从而有效缓解经济发展对水资源压力。

2) 中部六省水生态盈余量呈波动上升趋势,水生态压力指数则呈波动下降趋势。中部六省通过优化水资源利用方式,重视节水技术在农业、工业和生态保护等方面的应用,确保有限的水资源得到合理开发,从而维持其动态平衡,逐渐减小生态赤字和生态压力。

3) 中部六省能值水生态足迹和能值水生态承载力均呈南高北低的空间分布格局,水生态压力指数则呈北高南低的格局。湖北、湖南、江西和安徽要注重水利工程建设与完善,加大科技投入,降低水资源消耗,维持良好的水生态环境;河南和山西要优化产业结构,发展智慧农业、节水农业,确保粮食安全与生态安全。

4) 中部六省能值水生态足迹构成中均是农业用水能值生态足迹最大、生态环境用水能值生态足迹最小。中部六省要加大节水农业、科技农业的投入,在发展水产业、工业等的同时,加强环境污染的监测和治理,注重环境保护和生态建设,从而实现社会效益、经济效益和生态环境的可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 时润哲, 李长健. 长江经济带水资源生态补偿效率测度及其影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 1 048-1 058.
SHI Runzhe, LI Changjian. The measurement and influencing factors of water resource ecological compensation efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(6): 1 048-1 058.
- [2] 马慧君, 杨肖丽, 高甜. 我国中部地区水资源利用效率评价及归因分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2 662-2 672.
MA Huijun, YANG Xiaoli, GAO Tian. Evaluation and attribution of water resource utilization efficiency in the central China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(5): 2 662-2 672.
- [3] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [4] 王安周, 耿秀丽, 张桂宾. 基于生态足迹和R/S分析的河南省可持续发展评价[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(2): 104-106.
WANG Anzhou, GENG Xiuli, ZHANG Guibin. Study on sustainable development of Henan Province based on R/S analysis and ecological footprint model[J]. Areal Research and evelopment, 2009, 28(2): 104-106.
- [5] 左其亭, 姜龙, 冯亚坤, 等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 1-8, 34.
ZUO Qiting, JIANG Long, FENG Yakun, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the provinces in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 1-8, 34.
- [6] 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.
- [7] 孙才志, 张智雄. 水生态足迹及适应性理论视角下的中国省际水安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 9-16, 57.
SUN Caizhi, ZHANG Zhixiong. Evaluation of Chinese provincial water safety from the perspective of water ecological footprint and adaptability theory[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(3): 9-16, 57.
- [8] 赵雪雁, 刘霜, 赵海莉. 基于能值分析理论的生态足迹在区域可持续发展评价中的应用: 以甘肃省为例[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 524-531.
ZHAO Xueyan, LIU Shuang, ZHAO Haili. Application of ecological footprint in evaluating regional sustainable development based on energy analysis theory: A case study in Gansu Province[J]. Arid Zone

- Research, 2011, 28(3): 524-531.
- [9] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用: 以深圳市为例[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2 220-2 231.
- ZHAO Zhiqiang, LI Shuangcheng, GAO Yang. Emery-based modification for ecological footprint accounting and application to open eco-economic system: A case study of Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2 220-2 231.
- [10] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用: 以江苏省为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 653-660.
- ZHANG Fangyi, PU Lijie, ZHANG Jian. A modified model of ecological footprint calculation based on the theory of emery analysis: Taking Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 653-660.
- [11] 李月, 冯霞, 吴路华, 等. 基于能值-生态足迹的贵州高原典型喀斯特区域水资源可持续评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 96-104.
- LI Yue, FENG Xia, WU Luhua, et al. Evaluating sustainable development of water resources in typical Karst Basins in Guizhou Plateau using energy-ecological footprint analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 96-104.
- [12] 赵建强. 基于改进旅游生态足迹模型的生态系统旅游可持续发展能值评价研究[J]. 生态经济, 2016(11): 108-111, 130.
- ZHAO Jianqiang. Study on the energy value evaluation of sustainable development of ecological system based on the improved travel ecological footprint model[J]. Ecological Economy, 2016(11): 108-111, 130.
- [13] 曾晓霞. 基于能值生态足迹优化模型的湘江城市群生态安全研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- ZENG Xiaoxia. On the optimization model of the emergent ecological footprint: Ecological security analytics of the city cluster of the basin of the Xiangjiang River[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [14] 汪定盼, 李继清, 谢开杰. 基于能值生态足迹的调水工程供水区可持续性评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(5): 37-40.
- WANG Dingpan, LI Jiqing, XIE Kaijie. An assessment of sustainability based on emery theory and ecological footprint for the water supply district of water diversion project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 37-40.
- [15] 刘珂玲, 杨柳. 基于能值理论的水资源生态足迹变化特征: 以北京市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 406-414.
- LIU Keling, YANG Liu. Characteristics of water resources ecological footprint based on emery theory: Taking Beijing as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 406-414.
- [16] 王慧亮, 李卓成. 基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 147-152.
- WANG Huiliang, LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on emery water ecological footprint model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 147-152.
- [17] 李友光, 袁榆梁, 李卓成, 等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价[J]. 人民黄河, 2022, 44(6): 100-104, 162.
- LI Youguang, YUAN Yuliang, LI Zhuocheng, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Henan Province based on spatial-temporal variation of energy water ecological footprint[J]. Yellow River, 2022, 44(6): 100-104, 162.
- [18] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- LYU Cuimei. Research on ecological economic value of regional water resources based on emery theory[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009.
- [19] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4 111-4 124.
- ZHANG Yi, ZHANG Heping. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4 111-4 124.
- [20] 鲁丰先. 河南省综合生态承载力研究[D]. 开封: 河南大学, 2009.
- LU Fengxian. Study on comprehensive ecological carrying capacity of Henan Province[D]. Kaifeng: Henan University, 2009.
- [21] CHEN B, CHEN G Q. Emery-based energy and material metabolism of the Yellow River Basin[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(3): 923-934.
- [22] 杨晶晶. 基于能值生态足迹的城市可持续性评价研究: 以重庆市为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YANG Jingjing. Urban sustainability assessment based on the emery ecological footprint: A case study of Chongqing City[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [23] 连颖. 闽江流域改进能值生态足迹及其社会经济影响因素研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- LIAN Ying. Study on modified emery-ecological footprint of Minjiang River Basin and its socioeconomic causes[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [24] 陈丹, 陈菁, 罗朝晖. 天然水资源价值评估的能值方法及应用[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1 188-1 192.
- CHEN Dan, CHEN Jing, LUO Zhaohui. Evaluation method of natural water resources based on emery theory and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1 188-1 192.
- [25] 吴全志, 苏喜军, 龙林玲. 基于生态足迹模型的贵州省水资源可持续利用分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 36-40.
- WU Quanzhi, SU Xijun, LONG Linling. Analysis of sustainable utilization of water resources in Guizhou Province based on ecological footprint model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(3): 36-40.
- [26] 段锦, 康慕谊, 江源. 基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改

- 进模型[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 953-963.
- DUAN Jin, KANG Muyi, JIANG Yuan. Improvement of ecological footprint model based on freshwater resource account and pollution accounts[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 953-963.
- [27] 焦士兴, 王安周, 陈林芳, 等. 中国省域三维水生态足迹及其驱动研究[J]. 世界地理研究, 2022, 31(5): 988-997.
- JIAO Shixing, WANG Anzhou, CHEN Linfang, et al. Three-dimensional water ecological footprint measurement and its driving factors in China's Provinces[J]. World Regional Studies, 2022, 31(5): 988-997.
- [28] 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): 7 048-7 060.
- SUN Caizhi, ZHANG Zhixiong. Assessment of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7 048-7 060.
- [29] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4 651-4 662.
- HAO Shuai, SUN Caizhi, SONG Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4 651-4 662.
- [30] 马晓蕾, 郭婷文. 中国水生态足迹与承载能力时空演化研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(6): 81-87.
- MA Xiaolei, GUO Tingwen. Study on spatial-temporal evolution of water ecological footprint and ecological carrying capacity in China[J]. Yellow River, 2022, 44(6): 81-87.

Evaluating water resource utilization in central China using the energy-based water ecological footprint model

JIAO Shixing¹, WANG Anzhou², LIU Jiale¹, LIU Chang³, ZHAO Rongqin⁴, LI Zhongxuan⁵, WEI Linghan¹
 (1. School of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, China; 2. The Luoyang 19th High School, Luoyang 471000, China; 3. College of City and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421001, China; 4. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 5. School of Urban and Environment Science, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: **【Objective】** Understanding water utilization across sectors and regions is essential for regional water resource management and sustainable development. The objective of this paper is to evaluate water usage in six provinces in central China, providing insights into sustainable water resource management. **【Method】** Using an energy-based ecological theory, we calculated the spatiotemporal variation in the ecological carrying capacity of water in the six provinces and analyzed its composition. **【Result】** ① The energy-based water ecological footprint across the six provinces shows a fluctuating upward trend. Surface water contributes the highest ecological carrying capacity (84%), followed by groundwater (9%) and rainwater (7%). ② The water ecological surplus index indicates a fluctuating upward trend but reveals an overall water ecological deficit. The ecological pressure index exhibits a fluctuating downward trend, peaking in 2011 and reaching its lowest point in 2016. ③ Both the energy-based ecological carrying capacity and ecological footprint demonstrate significant spatial variation, high in the southern provinces compared to the Northern ones. ④ Ranking of the water ecological surplus index (largest to smallest) in the six province is as follows: Hubei ($2.94 \times 10^8 \text{ hm}^2$), Anhui ($2.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$), Henan ($2.27 \times 10^8 \text{ hm}^2$), Hunan ($1.22 \times 10^8 \text{ hm}^2$), Jiangxi ($1.06 \times 10^8 \text{ hm}^2$), and Shanxi ($0.62 \times 10^8 \text{ hm}^2$). The southern provinces exhibit lower ecological pressure indices compared to the northern provinces. ⑤ The composition of water ecological footprints varies significantly between provinces. Agricultural water use is the largest in all six provinces, while ecological and environmental water use is the smallest. In the southern region, water use is dominated by aquatic production, followed by industry water use, domestic use, and water pollution. In contrast, water use in the northern region is dominated by domestic use, industrial use, water pollution, and aquatic production. **【Conclusion】** The unsustainable use of water resources in central China poses significant challenges to ecological balance. To achieve sustainable water utilization, the region should focus on constructing water conservancy projects, implementing water-saving technologies, and optimizing water use.

Key words: energy water ecological footprint; six central provinces; evaluation of water resource utilization

责任编辑: 白芳芳