

基于三维水生态足迹的郑州市水资源状况评估

贾璐璐¹, 张梦莹²

¹河南省水文水资源测报中心, 河南 郑州

²华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年2月26日; 录用日期: 2026年3月18日; 发布日期: 2026年3月30日

摘要

郑州市作为严重缺水型城市, 对其进行水资源状况的综合评估确有必要。本文采用三维水生态足迹模型, 研究郑州市2016~2024年水生态足迹、水生态承载力等相关指标, 结合Tapio模型分析水资源与经济发展之间的联系, 结果表明: 1) 研究期间该市水量生态足迹保持稳定, 水质生态足迹总体呈上升趋势; 水资源生态承载力和水质生态承载力的变化趋势基本一致, 在波动中小幅上升; 2) 分析该市存量流量利用比, 研究期间除2021年安全状态为中度不可持续外, 其余年份均为极端不可持续; 3) 基于建立的Tapio脱钩模型, 该市水资源与经济发展有向强脱钩状态发展的趋势, 用水效率有所提高, 水资源状况与经济协调性逐渐增强。

关键词

三维水生态足迹, 水资源生态承载力, 水质生态承载力, 存量流量利用比, Tapio脱钩模型

Assessment of Water Resources Status in Zhengzhou City Based on the Three-Dimensional Water Ecological Footprint

Lulu Jia¹, Mengying Zhang²

¹Henan Provincial Hydrology and Water Resources Forecasting Center, Zhengzhou Henan

²College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: February 26, 2026; accepted: March 18, 2026; published: March 30, 2026

Abstract

Zhengzhou is a severely water-scarce city, making a comprehensive assessment of its water resources status imperative. This study employs the three-dimensional water ecological footprint model to investigate relevant indicators including the water ecological footprint and water ecological carrying

capacity of Zhengzhou City during the period 2016~2024. Combined with the Tapio decoupling model, it analyzes the relationship between water resources and economic development. The results indicate that: 1) Throughout the study period, the water quantity ecological footprint of the city remained stable, while the water quality ecological footprint showed an overall upward trend; the water resources ecological carrying capacity and water quality ecological carrying capacity exhibited a basically consistent variation trend, increasing slightly with fluctuations. 2) An analysis of the city's stock-flow utilization ratio reveals that all years under study were in an extremely unsustainable state, except for 2021, which was classified as moderately unsustainable. 3) Based on the established Tapio decoupling model, the relationship between water resources and economic development in the city tends to move towards a strong decoupling state, indicating an improvement in water use efficiency and a gradual enhancement in the coordination between water resources conditions and economic development.

Keywords

The Three-Dimensional Water Ecological Footprint, Water Resources Ecological Carrying Capacity, Water Quality Ecological Carrying Capacity, Stock-Flow Utilization Ratio, Tapio Decoupling Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几年郑州以国家中心城市建设为牵引,在经济、产业、创新、交通、城市更新、生态治理等领域实现质效双升,常住人口与建成区持续扩容,2024年GDP达14532.1亿元、常住人口1308.6万人,正加速迈向高质量发展的现代化国际大都市。在城市快速发展的同时,郑州市始终面临着水资源短缺的挑战,人均水资源量97.6立方米,不足全国人均水平的1/20,属于严重缺水型城市,对外调水依赖程度高。面对日益突出的水资源供需矛盾,合理评估水资源开发利用状况,掌握水资源可持续程度,对优化水资源配置、提升城市用水效率、实现郑州市水资源的可持续利用具有重要意义。

水生态足迹是将区域人口消耗的水资源量转化为相应的生物生产性土地面积,水资源生态承载力则表征区域水资源对经济社会发展的支撑能力[1]。国内、国外已围绕生态足迹做了大量的研究:生态足迹模型最初由加拿大生态经济学家Willam [2]于1992年提出,后Wackernagel [3]对这一概念进行完善,形成二维生态足迹模型。黄林楠等人[4]明确均衡因子等关键参数的计算,建立水资源账户。为了弥补存量资本研究领域的空白,Niccolucci等提出足迹广度和足迹深度的概念,以此来分析流量资本、存量资本的消耗程度[5][6]。随着水生态足迹模型的建立和完善,区域水资源的开发利用程度、安全状态及可持续程度的评估方式更加完备、评价结果更为准确[7]-[13]。

2. 研究区概况和数据来源

郑州是河南省省会,位于河南省中部偏北,地跨黄河、淮河两大流域。郑州市多年平均水资源量为12.3亿立方米,全域地表水可利用量3.5亿立方米,地下水可开采量5.6亿立方米,扣除重复计算量,实际本地可利用水资源量8.5亿立方米,人均水资源量远低于全国平均水平,属水资源严重匮乏地区。本文数据来源于2016年~2024年《郑州市水资源公报》、2017年~2023年《郑州市环境统计年报》。氨氮污

染物的统计口径与统计制度进行了调整, 导致相关数据与前期不可比, 因此在后续分析中对该指标进行分段处理。

3. 研究方法

3.1. 三维水生态足迹模型

3.1.1. 水量、水质生态足迹

传统水生态足迹模型仅对水资源的流量资本进行研究, 忽略了水资源存量, 故通过引入足迹广度、深度构建三维模型。水生态足迹涉及水量、水质两个方面: 水量生态足迹包括工业、农业、生活、生态四种水资源用途; 水质生态足迹的核算遵循“重叠效应取最大值、无重叠效应取总和”的原则, 选取化学需氧量和氨氮排放量作为核心核算参数[14]。其中 COD 是工业、生活污水排放的主要污染物, 而农业生产中使用的化肥、农药及养殖污水等含氨氮量较大[15]。计算公式:

$$EF_w = EF_{wr} + EF_{wq} \quad (1)$$

$$EF_{wr} = r_w \times W / P_w = r_w \times (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) / P_w \quad (2)$$

$$EF_{wq} = EF_{COD} + EF_{NH_3} = r_w \times (U_{COD} / P_{COD} + U_{NH_3} / P_{NH_3}) \quad (3)$$

式中, EF_w 为水生态足迹, hm^2 ; EF_{wr} 、 EF_{wq} 分别为水量、水质生态足迹, hm^2 ; r_w 为全球水资源均衡因子, 取值 5.19 [4]; W 为用水总量, W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为农业、工业、生活、生态用水量, m^3 ; P_w 为全球水资源平均生产能力, 取值为 $3140 m^3/hm^2$ [4]; EF_{COD} 、 EF_{NH_3-N} 分别为化学需氧量、氨氮的水质生态足迹, hm^2 ; U_{COD} 、 U_{NH_3-N} 分别为化学需氧量、氨氮的排放量, t ; P_{COD} 、 P_{NH_3-N} 分别为全球水域对化学需氧量、氨氮的平均吸纳能力, 分别为 $0.0629 m^3/hm^2$ 和 $0.0031 m^3/hm^2$ [16]。

3.1.2 水资源生态承载力

水资源生态承载力是区域水资源供给量对该区域资源、环境与社会可持续发展的支撑能力[16]。计算公式:

$$EC_{wr} = (1 - 60\%) \times r_w \times \varphi \times Q / P_w \quad (4)$$

式中, EC_{wr} 为水资源生态承载力, hm^2 ; φ 为区域水资源产量因子, 郑州市省公顷水资源产量因子取值为 0.54 [4]; Q 为区域水资源总量, m^3 。

3.1.3. 水质生态承载力

水质生态承载力是指从区域水资源量能够接纳污染物的水资源量的生物生产性土地面积[15]。计算公式:

$$EC_{wq} = (1 - 12\%) \times \frac{Q - W \times K}{P_w} \quad (5)$$

式中, EC_{wq} 为水质生态承载力, hm^2 ; K 为区域综合耗水率, 等于用水消耗量除以用水量; Q 、 W 、 P_w 含义同上。

3.1.4. 存量流量利用比

存量流量利用比是指存量资本领先于流量资本的程度, 是三维模型的重要评价指标。足迹广度、深度分别代表区域内人类活动对水资源流量资本的消耗及存量资本的占用情况, 通过分析推导, 得到存量流量利用比这一核心评价指标, 以此反映区域生态可持续性及自然资本存量与流量的结构变化。

$$R = \frac{EF - EF_{size}}{EF_{size}} = EF_{depth} - 1 \quad (6)$$

$$EF_{size} = \min(EF_w, EC_w) \quad (7)$$

$$EF_{depth} = 1 + \frac{\max(EF_w - EC_w, 0)}{EC_w} \quad (8)$$

式中, R 为存量流量利用比; EF_{size} 、 EF_{depth} 分别为足迹广度、足迹深度。存量流量利用比值越大, 存量资本消耗越严重, 区域可持续性越弱, 安全状态可根据比值范围分为 6 种状态, 具体见表 1。

Table 1. Classification of stock-flow utilization ratio levels

表 1. 存量流量利用比等级划分

指数	等级	数值范围	安全状态
R	I	<0.5	相对可持续
	II	0.5~1.0	轻微可持续
	III	1.0~2.0	轻微不可持续
	IV	2.0~4.0	中度不可持续
	V	4.0~6.0	高度不可持续
	VI	>6.0	极端不可持续

3.2. Tapio 脱钩模型

Tapio 模型在评价经济发展和环境压力之间的脱钩关系具有良好的适用性, 被广泛用于评价水资源利用与经济增长之间的关系。本文引入 Tapio 脱钩弹性模型, 对郑州市经济发展与水资源利用之间的联系进行研究[1]。计算公式:

$$e = \frac{\Delta EF_w}{\Delta G} = \frac{(EF_w^t - EF_w^{t-1}) / EF_w^{t-1}}{(G^t - G^{t-1}) / G^{t-1}} \quad (9)$$

式中, e 为脱钩指数; ΔEF_w 为水资源生态足迹变化量; ΔG 为经济变化量; EF_w^t 、 EF_w^{t-1} 分别为第 t 年和第 $t-1$ 年的水资源生态足迹, hm^2 ; G^t 、 G^{t-1} 分别为第 t 年和第 $t-1$ 年的经济, 万元。脱钩关系可根据脱钩指数分为 8 种脱钩状态, 具体见表 2。

Table 2. Eight decoupling states

表 2. 8 种脱钩状态

脱钩状态		ΔEF_w	ΔG	e	表征意义
脱钩	强脱钩	负	正	$(-\infty, 0)$	理想状态
	弱脱钩	正	正	$[0, 0.8)$	较理想状态
	衰退脱钩	负	负	$(1.2, +\infty)$	可允许状态
负脱钩	强负脱钩	正	负	$(-\infty, 0)$	最不理想状态
	弱负脱钩	负	负	$[0, 0.8)$	不可取状态
	扩张负脱钩	正	正	$(1.2, +\infty)$	不可取状态
连结	扩张连结	正	正	$[0.8, 1.2]$	不可取状态
	衰退连结	负	负	$[0.8, 1.2]$	可允许状态

4. 结果分析

根据式(2)计算出 2016~2024 年郑州市工业、农业、生活和生态环境的水量生态足迹, 如图 1 所示。该市生活用水生态足迹占比最高, 达到 36%左右, 该账户生态足迹呈波动上升态势, 2021 年达到峰值 0.014 亿 hm²。随着南水北调工程的投入及生活水平的提高, 郑州市居民的生活用水条件得到了极大的改善。工业用水生态足迹在波动中逐渐下降, 从 2016 年的 0.009 亿 hm² 下降至 2024 年的 0.004 亿 hm², 降幅约为 56%, 郑州市印发节水行动实施方案, 对高耗水行业企业(如火电、化工、洗浴等)用水情况进行严格管控, 同时通过提高中水回用、污水处理技术, 提高再生水利用率, 极大降低了工业用水量。农业用水生态足迹基本保持稳定, 多年用水生态足迹均值约为 0.007 亿 hm², 郑州市在农业规模与产能逐步提升的情况下, 不断通过政策、技术等手段提高水资源利用效率, 优化用水定额。生态环境用水生态足迹在逐步上升, 从 2016 年的 0.004 亿 hm² 增加至 2024 年的 0.011 亿 hm², 增幅高达 175%, 该足迹约占郑州市水资源生态足迹的 25%。据估算, 我国环境用水量约占全国总用水量的 1/6~1/5, 郑州市的生态环境用水量已经达到甚至超出国内平均水平, 在防治水污染、改善水质、协调生态平衡等方面成效显著。

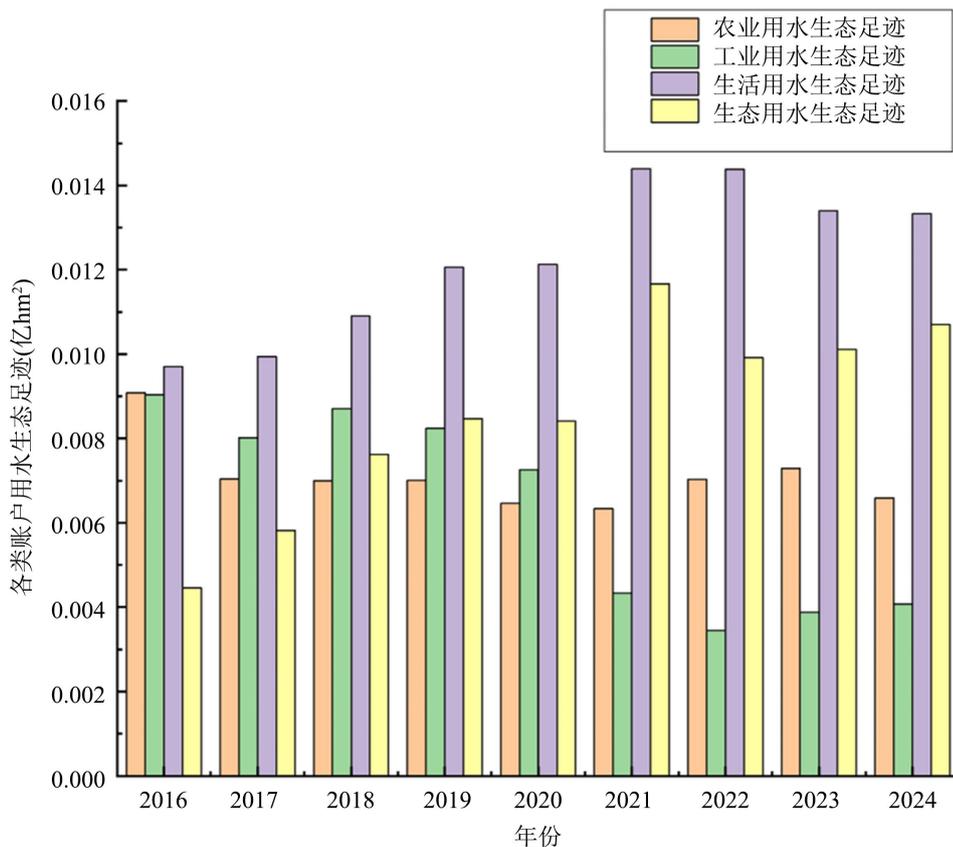


Figure 1. Trends of water ecological footprint for each water resource account in Zhengzhou during 2016~2024
图 1. 郑州市 2016~2024 年各水资源账户用水生态足迹变化趋势

由式(2)得出 2016~2024 年郑州市水量生态足迹, 变化趋势呈现先上升后下降后基本保持稳定的状态, 研究期均值为 0.03 亿 hm²。由式(3)得出 2017~2023 年郑州市水质生态足迹见图 2, 由图可知, 郑州市 COD 生态足迹呈逐年上升的趋势, 从 2017 年的 0.02 亿 hm² 上升至 2023 年的 0.04 亿 hm², 增加了近一倍, 统计数据显示, 2023 年第一、二、三产业增加值分别同比增长 1.0%、11.1%、5.1%, 2021 至 2024 年, 郑

州市规模以上工业增加值分别同比增长 10.4%、4.4%、12.8%、10.5%，表明在产业结构转型升级、经济高质量发展的同时，郑州市 COD 生态足迹略有增加。郑州市氨氮生态足迹在 2020~2023 年产生突变，原因是该年度区间污染物的统计口径有调整，数据与其他年份不可比，由 2017~2019 年数据可知，该足迹呈逐年增加的趋势，由 2020~2023 年数据可知，该足迹也呈逐年增加的趋势。即该市水质生态足迹总体呈上升趋势。

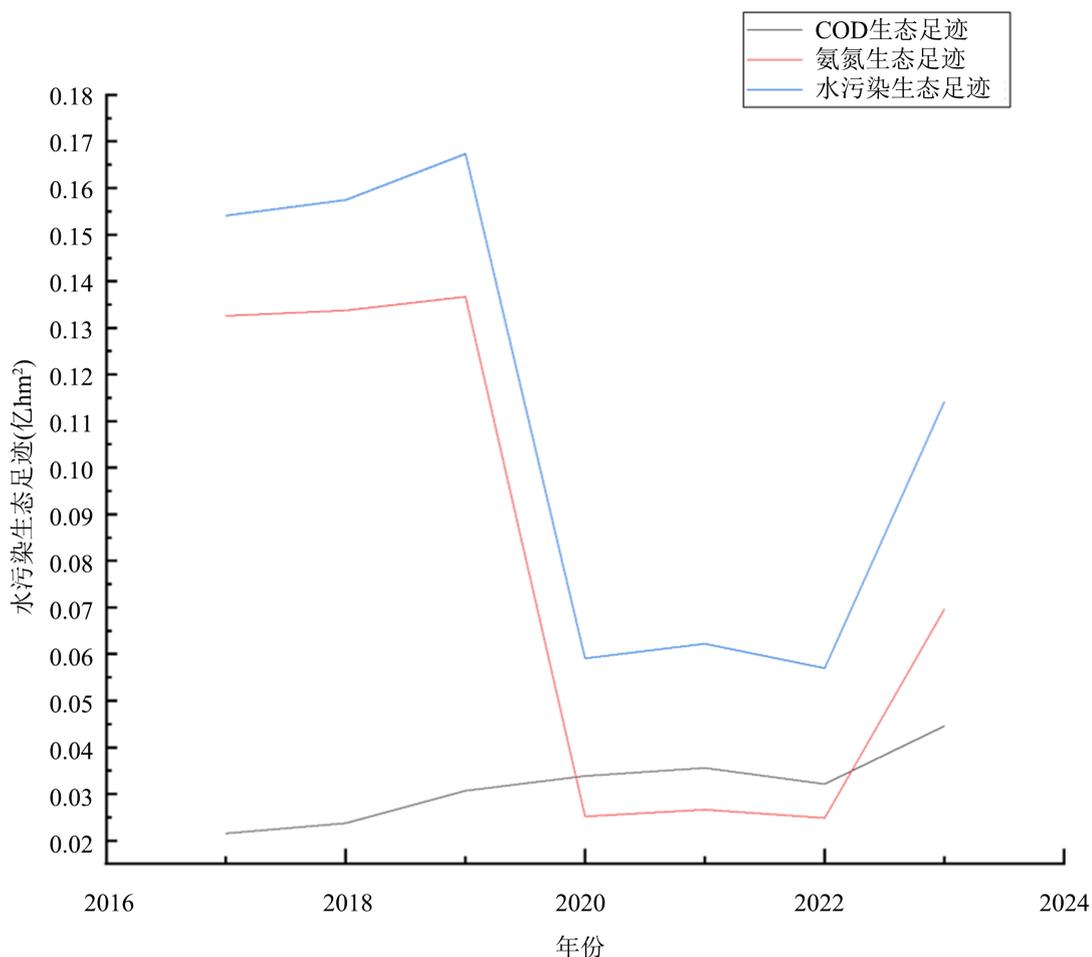


Figure 2. Trends of water quality ecological footprint in Zhengzhou during 2017~2023

图 2. 郑州市 2017~2023 年水质生态足迹变化趋势

由式(4)和(5)得出 2016~2024 年郑州市水资源生态承载力和水质生态承载力的变化趋势见图 3。从图 3 可以看出，二者的变化趋势基本一致，呈波动中小幅上升状态。根据分析不难发现，承载力与水资源总量成正比，而降雨量是水资源总量的主要影响因素。该市水资源生态承载力和水质生态承载力在 2021 年存在突变，最大值分别达到 0.010、0.005 亿 hm^2 ，原因是 2021 年郑州市遭遇“7·20”强降雨，7 月 20 日当天降雨量达 624.1 mm，几乎等同于郑州往年全年平均降水量，水资源总量得到了极大的补给。因地下水补给具有较长时期的调节作用，郑州市近几年的水资源匮乏的状况较以往得到缓解。由式(6)、(7)、(8)求出郑州市存量流量利用比，分析可知，研究期除 2021 年安全状态为中度不可持续外，其余年份均为极端不可持续。郑州是公认的缺水型城市，人均水资源占有量仅为全省的 1/4，不足全国的 1/20，需通过外流域调水来缓解水资源的供需矛盾。

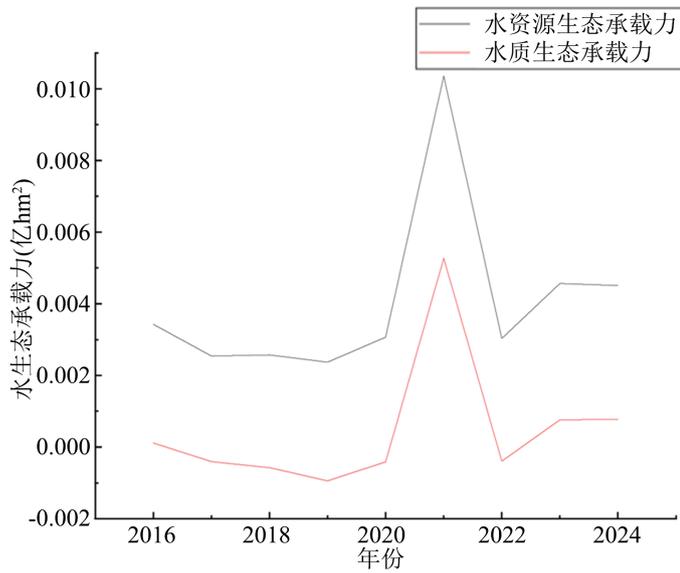


Figure 3. Trends of water ecological carrying capacity in Zhengzhou during 2016~2024
图 3. 郑州市 2016~2024 年水生态承载力变化趋势

根据式(9)得出 2017~2024 年郑州市水资源利用情况与经济发展变化之间的脱钩关系见图 4, 整体来看, 二者关系主要呈现强脱钩和弱脱钩两种特征, 在近几年有向强脱钩状态发展的趋势。该市 2021~2024 年脱钩指数分别为: 1.24、-3.38、-0.04、0.0002, 脱钩状态分别为: 弱脱钩、强脱钩、强脱钩、弱脱钩, 近几年万元 GDP 用水量逐年降低, 分别为: 17.5 m³、16.3 m³、15.4 m³、14.4 m³, 流域调水量分别为 10.5 亿 m³、9.8 亿 m³、9.3 亿 m³、10.1 亿 m³, 非常规水供水量分别为 4.8 亿 m³、3.8 亿 m³、4.1 亿 m³、4.2 亿 m³, 占总供水量的比例均有所上升。随着郑州市南水北调、再生水利用、生态水循环利用等工程的有序开展, 该市水资源供需矛盾得到缓解, 用水效率有所提高, 经济增长对水资源的依赖性呈逐步弱化态势, 水资源供需与经济高质量发展的协调水平不断提升, 以有限的水资源总量, 有力保障了郑州国家中心城市现代化建设。

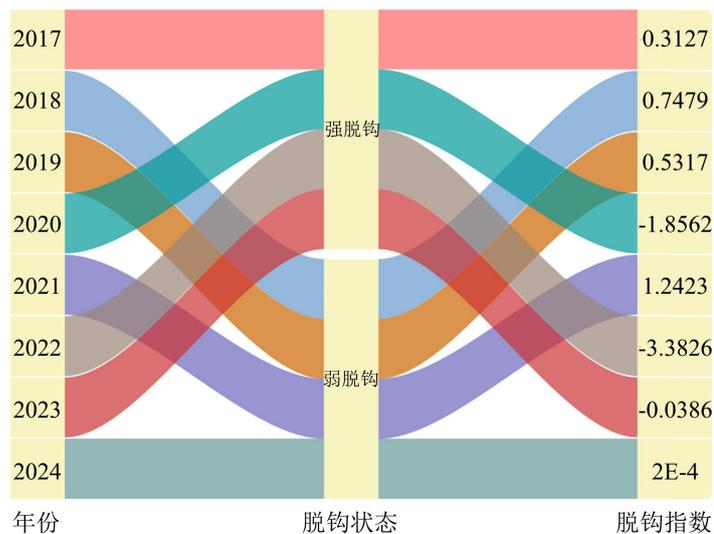


Figure 4. Decoupling status in Zhengzhou during 2017~2024
图 4. 郑州市 2017~2024 年脱钩状态

5. 结论

利用水生态足迹模型对郑州市 2016~2024 年水资源状况进行综合评估, 主要研究结论如下:

1) 研究期间郑州市水量生态足迹的变化趋势呈现先上升后下降最后基本保持稳定的状态, 水质生态足迹总体呈上升趋势。水资源生态承载力和水质生态承载力的变化趋势基本一致, 呈波动中小幅上升状态。分析郑州市存量流量利用比可知, 研究期除 2021 年安全状态为中度不可持续外, 其余年份均为极端不可持续, 郑州市水资源供需矛盾较为突出, 需通过外流域调水来缓解。

2) 研究期间郑州市 4 个水资源账户的水生态足迹变化特征各不相同: 生活用水生态足迹在郑州市水资源生态足迹中占比最大, 且呈波动上升态势, 工业用水账户的足迹在波动中逐渐下降, 农业用水账户的足迹基本保持稳定, 生态环境用水账户的足迹在逐步上升。

3) 研究 2017~2024 年郑州市水资源利用情况与经济发展变化之间的关系, 有向强脱钩状态发展的趋势, 总体较为理想。表明随着郑州市南水北调、再生水利用、生态水循环利用等工程的有序开展, 郑州市水资源供需矛盾得到缓解, 用水效率有所提高, 经济增长对水资源的依赖性呈逐步弱化态势, 水资源供需与经济高质量发展的协调水平不断提升。

基金项目

河南省自然科学基金面上项目(252300420293)、河南省科技攻关项目(252102320009)。

参考文献

- [1] 袁辉, 张英, 张超波, 等. 气候变化与人类活动影响下甘肃省水资源利用预测研究[J]. 节水灌溉, 2025(12): 72-79.
- [2] Rees, W.E. (1992) Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out. *Environment and Urbanization*, 4, 121-130. <https://doi.org/10.1177/095624789200400212>
- [3] Wackernagel, M. and Rees, W.E. (1997) Perceptual and Structural Barriers to Investing in Natural Capital: Economics from an Ecological Footprint Perspective. *Ecological Economics*, 20, 3-24. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(96\)00077-8](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(96)00077-8)
- [4] 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(3): 1279-1286.
- [5] van Den Bergh, J. and Grazi, F. (2010) On the Policy Relevance of Ecological Footprints. *Environmental Science & Technology*, 44, 4843-4844. <https://doi.org/10.1021/es1003582>
- [6] Niccolucci, V., Bastianoni, S., Tiezzi, E.B.P., Wackernagel, M. and Marchettini, N. (2009) How Deep Is the Footprint? A 3D Representation. *Ecological Modelling*, 220, 2819-2823. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.07.018>
- [7] 王健泉, 秦欢欢. 河北省水资源生态足迹分析与预测[J]. 人民长江, 2024, 55(8): 114-124+132.
- [8] 王田月. 中国农业用水生态足迹时空分异及驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2025(3): 23-29+36.
- [9] 钟鸣, 李析男, 高运法, 等. 城市水生态足迹的驱动机制与适应性管理路径评估[J/OL]. 水资源保护, 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260115.1245.002>, 2026-01-16.
- [10] 李继清, 赵新月, 薛智明, 等. 基于水足迹的南水北调中线工程水源区水资源利用评价[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(4): 769-780.
- [11] 周小琛, 赖苹. 基于三维生态足迹的重庆市农业用水生态效率水平测度、脱钩关系及驱动因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(6): 724-737.
- [12] 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+132.
- [13] 张浩然, 徐康宁, 郭飞, 等. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源可持续利用研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(6): 1732-1742.
- [14] 贾璐璐, 于国荣, 张代青, 等. 基于改进灰色模型的河南省水生态足迹分析与预测[J]. 水力发电, 2022, 48(3): 5-9+47.
- [15] 马晓蕾, 王婕, 刘若男. 中国“水量”和“水质”生态足迹及可持续能力量化方法与实证研究[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3677-3688.

- [16] 张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 93-100.
- [17] 李涛, 蒋琼, 杨亚琳, 等. 基于生态足迹模型的中原城市群生态安全评价及驱动因素分析[J]. 中国环境科学, 2025, 45(12): 6841-6857.