

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.005

京津冀水资源生态足迹动态变化与预测

宾零陵¹, 蒋睿文¹, 曹永强², 徐奎³, 韩振涛³

(1. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387; 2. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387; 3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要:采用水资源生态足迹模型、水资源生态承载力模型和水资源可持续利用评价指标对京津冀地区2010—2021年水资源生态足迹进行时空变化趋势分析,并利用长短期记忆时间序列神经网络模型对2022—2026年水资源生态足迹进行了预测。结果表明:2010—2021年京津冀地区水资源生态足迹呈先减后增趋势,其中北京生产用水生态足迹逐年下降并低于生活用水生态足迹,天津和河北生产用水生态足迹占比最大;京津冀地区生态环境用水生态足迹均呈波动上升趋势;2010年以来京津冀地区水资源生态足迹呈向中部核心城市转移趋势,各区市水资源生态承载力均远低于水资源生态足迹,呈生态赤字状态,其中,唐山市、辛集市、雄安新区、衡水市生态赤字较大,超过 $0.5\text{ hm}^2/\text{人}$,水资源供需严重不平衡;京津冀地区万元GDP水资源生态足迹总体呈下降趋势,其中河北绝对值远高于北京和天津,节水潜力空间较大;京津冀地区2022—2026年水资源生态足迹呈缓慢上升趋势,水资源供需矛盾将进一步加剧。

关键词:水资源生态足迹;水资源生态承载力;水资源可持续利用;京津冀地区

中图分类号:X37 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0032-07

Dynamic change and prediction of ecological footprint of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region// BIN Lingling¹, JIANG Ruiwen¹, CAO Yongqiang², XU Kui³, HAN Zhentao³ (1. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The water resources ecological footprint model, the water resources ecological carrying capacity model and the evaluation indicators for sustainable utilization of water resources were used to analyze the temporal and spatial trend of the water resources ecological footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2021. And a long short-term memory time series neural network model was used to predict the trend of water resource ecological footprint from 2022 to 2026. The results show that from 2010 to 2021, the ecological footprint of water resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region showed a trend of first decreasing and then increasing, with Beijing's production water ecological footprint decreasing year by year and lower than that of domestic water ecological footprint. Tianjin and Hebei have the largest proportion of production water ecological footprint. The ecological footprint of ecological environment water use in the Beijing-Tianjin-Hebei region shows a fluctuating upward trend. Since 2010, the water resources ecological footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region has been shifting towards core cities in the central region. The water resources ecological carrying capacity in each district and city is far lower than the water resources ecological footprint, showing an ecological deficit state. Among them, Tangshan City, Xinji City, Xiong'an New Area, and Hengshui City have significant ecological deficits, exceeding 0.5 hm^2 per person, and there is a serious imbalance between water supply and demand. The water resources ecological footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region with a GDP of 10 000 yuan shows an overall downward trend, with the absolute value of Hebei far higher than that of Beijing and Tianjin, indicating a significant potential for water conservation. The prediction results of the water resources ecological footprint show that the water resources ecological footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region is showing a slow upward trend from 2022 to 2026, and the contradiction between supply and demand of water resources will further intensify.

基金项目:国家自然科学基金项目(51809192);宁夏回族自治区重点研发项目(2022BEG02020)

作者简介:宾零陵(1987—),女,讲师,博士,主要从事水资源可持续利用研究。E-mail:bl1813@126.com

通信作者:徐奎(1987—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源风险分析研究。E-mail:kui.xu@tju.edu.cn

水资源是人类生存发展不可或缺的自然禀赋资源,加强水资源可持续开发和高效利用是水资源管理范畴的重要课题。近年来,干旱、高温、极端降水等气象灾害频发,降低了水资源可利用性,加剧了水资源供需不平衡的矛盾和风险,严重威胁人类生存和发展^[1]。京津冀地区是我国人口密集且经济高度发展地区,也是全国水资源供需矛盾、水问题最突出的地区之一^[2-3]。京津冀地处华北平原,大部分属于海河流域,水资源总量少,而区域人类活动强度高,经济发展迅速,人口急剧增长,导致流域水资源过度开发^[4]。近年来,水资源紧缺已成为制约京津冀地区经济社会可持续发展的主要瓶颈,缺水引起的生态退化、环境容量下降等问题也日渐突出,水资源安全保障形势尤其严峻^[5-6]。生态文明建设持续推进背景下,开展京津冀地区水资源可持续利用研究是缓解区域用水矛盾、促进经济社会和生态环境协调发展的重要前提^[7-8]。

水足迹和水资源生态足迹是两种最常用的水资源可持续利用评估方法。水足迹是在虚拟水研究基础上提出的概念,表示生产单位质量产品和服务所消耗的水量^[9-10]。水足迹主要从生产、贸易和消费的角度反映产品和服务相关用水消耗和虚拟水流动,较少考虑区域水资源供给条件^[11-14]。为了表示自然资源消耗与生态系统承载能力之间的关系,Wackernagel等^[15-16]提出了基于承载能力概念的生态足迹模型,包含森林、草地、耕地、能源用地、建筑用地和水域等6类资源账户。该模型对于水域资源评价仅考虑了地表水的生物生产力,如渔业功能,忽视了水资源在维护生态稳定、促进经济社会发展中的关键作用。针对该不足,黄林楠等^[17]建立了水资源生态足迹模型,其中增加了水资源账户,用土地面积表示区域用水量和水资源产量。因此,与水足迹相比,水资源生态足迹既能反映水资源消耗量,也可以表征水资源供给量,更适用于区域水资源可持续利用评估。我国学者采用该方法对全国和省级尺度的水资源生态足迹进行了分析评估^[18-21]。随着研究的不断深入,水资源生态足迹模型被进一步发展完善,例如:Hu等^[22]采用三维生态足迹法区分水资源的资本流动和资本存量,测算了2010—2019年“中部四城区”38个地区的水资源生态足迹大小和深度,并分析其空间相关性;Li等^[23]利用基尼系数、数据包络分析和水资源生态足迹模型,建立了包含水资源公平指数、水资源效率指数和水资源生态安全指

数的水资源可持续利用评价指标体系;Li等^[24]将三维水资源生态足迹模型与基尼系数法以及脱钩努力模型相结合,构建了水资源可持续综合分析框架,并在新疆地区进行了应用;王慧亮等^[25]进一步将能值分析理论与水资源生态足迹相结合,对黄河流域水资源可持续利用状况进行了评价。

已有研究表明,水资源生态足迹理论和核算方法是一种区域水资源可持续利用评价的有效手段。因此,本文以生态足迹理论为基础,对京津冀地区水资源开发利用和承载力进行现状评价和趋势预测,以期为该地区未来水资源可持续利用和缓解生态环境压力提供决策依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 水资源生态足迹

水资源生态足迹模型是根据生态足迹模型提出的,将地区所消耗的水资源转换为相应账户的水资源用地面积。根据京津冀地区水资源的利用现状,本文将水资源生态足迹分为3个二级账户,分别为生产用水、生活用水和生态环境用水。水资源生态足迹计算公式为

$$F_w = Nf_w = \gamma_w W/P_w \quad (1)$$

$$F_p = \gamma_w W_p/P_w \quad (2)$$

$$F_d = \gamma_w W_d/P_w \quad (3)$$

$$F_e = \gamma_w W_e/P_w \quad (4)$$

式中: F_w 为水资源生态足迹; N 为年末常住人口数; f_w 为人均水资源生态足迹; γ_w 为水资源全球均衡因子; W 为水资源消耗总量; P_w 为全球水资源平均生产能力,用全球多年平均产水模数表示; F_p 为生产用水生态足迹; F_d 为生活用水生态足迹; F_e 为生态环境用水生态足迹; 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。参考黄林楠等^[17]的研究结果,取 $\gamma_w = 5.19$, $P_w = 3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

1.2 水资源生态承载力

水资源承载力是指在一定历史发展阶段对应的技术、经济水平的环境下,能够容纳人口增长以及经济发展的承载力。一个国家或区域在计算水资源承载力时,为了满足区域生态系统健康运行,必须扣除至少60%的水资源量用于维持生态环境可持续发展,因此在模型中要乘以系数0.4^[26]。水资源生态承载力模型公式为

$$C_w = Nc_w = 0.4\psi\gamma_w Q/P_w \quad (5)$$

式中: C_w 为水资源生态承载力; c_w 为人均水资源生

态承载力; ψ 为区域水资源产量因子, 为区域水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力的比值; Q 为水资源总量。

1.3 水资源可持续利用评价指标

水资源生态承载力反映水资源对该地区经济发展的最大支撑力, 水资源生态足迹反映该地区消耗的水资源总量。区域水资源生态盈余(赤字) D_w 为区域水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值, 当 $D_w > 0$ 时, 为水资源生态盈余; 当 $D_w = 0$ 时, 为水资源生态平衡; 当 $D_w < 0$ 时, 为水资源生态赤字。采用地区万元 GDP 水资源生态足迹 F_c 来衡量区域水资源利用效率, 为水资源生态足迹与万元 GDP 的比值。

1.4 LSTM 时间序列神经网络模型

长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络是一种特殊的循环神经网络(recurrent neural network, RNN), 通过学习时间序列数据的长期依赖关系, 能够有效避免时间序列训练中的梯度消失和梯度爆炸问题^[27]。LSTM 网络结构如图 1 所示, 由输入层、隐藏层和输出层组成, 其中 $x_t, h_t, c_t, f_t, i_t, o_t$ 分别为 t 时刻的输入信息、输出信息、单元状态值、遗忘门、记忆门和输出门; σ 表示 sigmoid 函数; \tilde{c}_t 为通过 tanh 函数得到的新候选值。与 RNN 类似, LSTM 网络也具有神经网络的重复模块链形式, 但 LSTM 网络重复模块更为复杂^[28]。本文中 LSTM 网络为单隐藏层结构, 隐藏单元个数为 20, 求解器设置为 adam, 训练次数为 100 次。指定初始学习率为 0.01, 在第 20 轮训练后通过乘以 0.2 来降低学习率, 提高效率的同时可有效避免过拟合的发生。

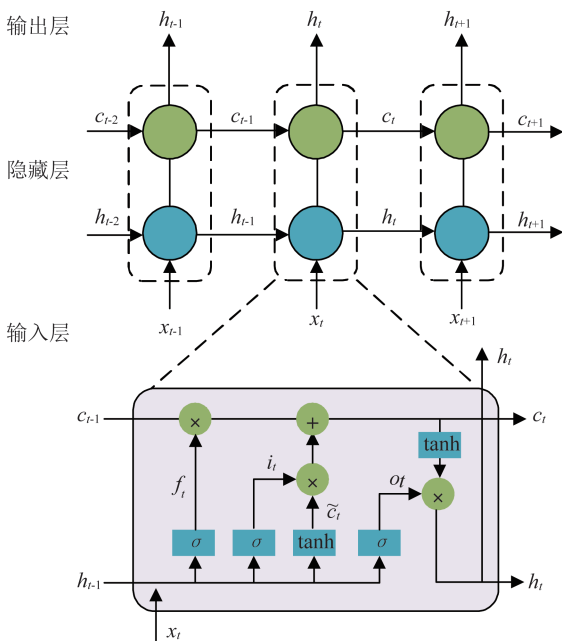


图 1 LSTM 网络结构

Fig. 1 Network structure of LSTM

采用均方根误差 (RMSE) 来评价 LSTM 时间序列神经网络模型预测精度及效果。计算所需数据包括京津冀地区的人口、经济、水资源、用水量等, 其中年末常住人口和国内生产总值 GDP 数据来自北京、天津、河北的统计年鉴, 水资源量及用水数据来自北京、天津和河北的水资源公报和国家统计局省级年度数据。

2 京津冀水资源生态足迹动态变化分析

2.1 水资源生态足迹动态变化趋势

图 2 为 2010—2021 年京津冀地区水资源生态足迹变化趋势。由图 2 可见, 2010—2021 年京津冀地区水资源生态足迹平均值为 $0.3809 \text{ hm}^2/\text{人}$, 小于我国 2021 年人均水资源生态足迹 ($0.6927 \text{ hm}^2/\text{人}$), 其中北京、天津和河北平均水资源生态足迹分别为 $0.2957, 0.3158, 0.4177 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。2010—2021 年京津冀地区水资源生态足迹整体呈先减后增趋势, 其中北京和天津呈波动性上升趋势、河北呈缓慢下降后增加趋势。从水资源生态足迹账户构成及其变化趋势来看, 天津及河北生产用水所占比例最大, 生活用水次之, 生态环境用水最小; 北京水资源生态足迹发生了结构性变革。在研究初期, 北京水资源生态足迹比例由大到小为生产用水、生活用水、生态环境用水, 随着工业生产重心转移, 生产用水生态足迹逐年下降(由 $0.1390 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降至 $0.0836 \text{ hm}^2/\text{人}$), 2012 年后生产用水生态足迹降至低于生活用水生态足迹; 由于人口密集且数量不断增长, 生活用水生态足迹呈上升态势(由 $0.1238 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增至 $0.1465 \text{ hm}^2/\text{人}$); 2010 年以来, 生态环境用水逐年增加, 占水资源生态足迹比例由 11.36% 增加至 38.48%。2010—2021 年, 天津市生产用水足迹比例最大但逐渐下降(由 $0.2253 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降至 $0.1691 \text{ hm}^2/\text{人}$); 生活用水生态足迹先减少后增加, 生态环境用水生态足迹呈波动性增长趋势。河北生产用水生态足迹占水资源生态足迹的比例最大(2010—2021 年平均为 82.05%) 但呈逐年下降趋势, 这与河北农业占比较大的产业结构相关。河北农业用水量较大, 且用水效率较低, 导致生产用水生态足迹较大。随着水资源保护意识增强及节水措施的施行, 河北生产用水足迹逐年下降, 从 2010 年的 $0.3983 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降至 2021 年 $0.2548 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。2010 年以来, 京津冀地区生活用水生态足迹较为稳定, 生态环境用水生态足迹在 2018 年后快速增长。

图 3 为 2010—2021 年京津冀地区水资源生态承载力和生态赤字变化趋势。京津冀地处华北平原, 属暖温带半湿润季风气候, 自然降水量对地表水

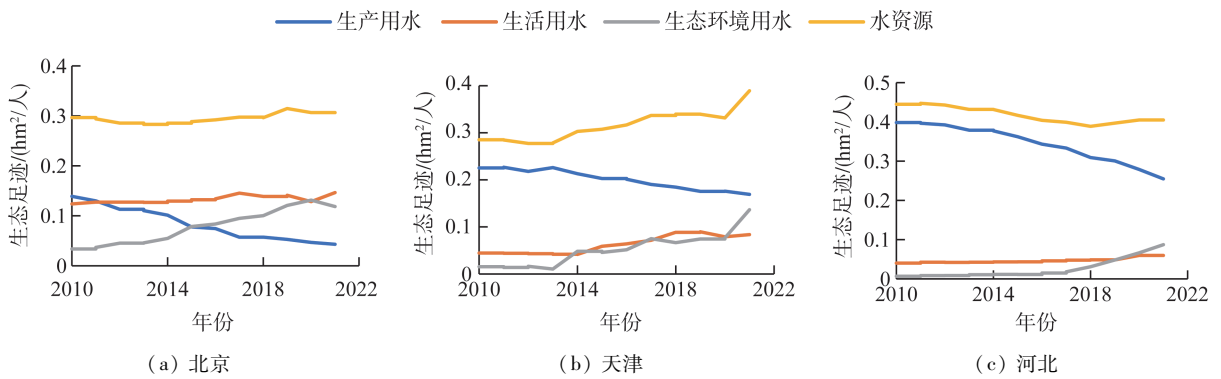


图2 2010—2021年京津冀地区水资源生态足迹变化趋势

Fig. 2 Variation trend of water resources ecological footprint in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2021

资源占主导地位。受降水量年际变率大的影响,京津冀地区各年水资源总量变化较大,水资源生态承载力年际波动也较大,北京、天津和河北水资源生态承载力变异系数分别为 82.80%、122.99% 和 100.86%。总体来看,京津冀地区除 2012 年和 2021 年水资源承载力较大以外,其余年份均较小。尤其是 2019 年天津全市降水量 436.2 mm,水资源总量仅 8.09 亿 m^3 ,比多年平均值偏少 48.4%,水资源生态承载力仅为 0.0083 hm^2 /人,远低于多年平均值。

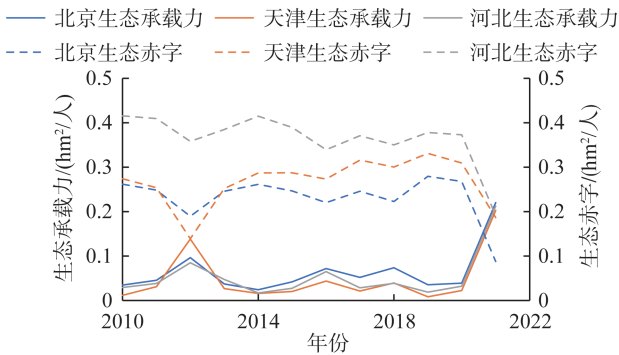


图3 2010—2021年京津冀地区水资源生态承载力变化趋势
Fig. 3 Variation trend of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2021

从图2和图3可以看出,京津冀地区水资源生态足迹远超过生态承载力,处于水资源生态赤字状态。2010—2021年北京、天津和河北水资源生态赤字变异系数分别为 22.17%、20.65% 和 16.41%,表明京津冀地区水资源生态赤字波动比生态承载力小,呈较平稳状态。2010年以来,京津冀水资源生态足迹与生态承载力比值最小的为 2021 年北京(1.40),最大的为 2019 年天津(40.83),表明京津冀地区水资源生态赤字较大且不稳定,水资源供需差额较大且严重不平衡。当前,京津冀地区水资源开发利用量不足以满足经济社会对水资源的需求,为了缓解水资源短缺矛盾、保障经济社会和生态环境持续增长,必须增加水源和提高水资源利用效率。

2.2 水资源生态足迹空间分布

为了探讨京津冀地区水资源生态足迹空间分布特征和变化趋势,对 2010 年、2020 年京津冀各市的水资源生态足迹、水资源生态承载力及生态盈余(赤字)进行了对比分析,结果如表 1 所示。2010—2020 年,石家庄市、保定市、张家口市、承德市、唐山市、秦皇岛市、廊坊市、衡水市、邢台市水资源生态足迹减少,而北京市、天津市和雄安新区等核心城市水资源生态足迹增加,表明城市化进程带来的人口和产业聚集效应促进水资源生态足迹向中部大城市转移的发展趋势,中部核心城市水资源消耗较大。

由表 1 可见,2010 年和 2020 年京津冀地区各市水资源生态足迹均大于水资源生态承载力,即京津冀地区一直处于水资源生态赤字状态,其中唐山市、衡水市、辛集市和雄安新区水资源生态赤字较大,超过 0.5 hm^2 /人。2010 年,衡水市和唐山市生态赤字较大;至 2020 年,唐山市水资源生态足迹下降,生态赤字从 0.5406 hm^2 /人降至 0.4101 hm^2 /人,但辛集市、雄安新区和衡水市水资源生态赤字大于 0.5 hm^2 /人,尤其是辛集市和雄安新区,水资源供需矛盾尤其突出。

2.3 万元 GDP 水资源生态足迹

图 4 为 2010—2021 年京津冀地区万元 GDP 水资源生态足迹变化趋势。由图 4 可见,2010—2021 年京津冀地区万元 GDP 水资源生态足迹总体呈下降趋势,表明京津冀地区的水资源利用效率有一定提高,其中河北降幅较大,平均每年降低 0.0079 hm^2 /万元,北京和天津平均每年下降 0.0017 hm^2 /万元和 0.0018 hm^2 /万元。总体而言,2010—2021 年京津冀地区万元 GDP 水资源生态足迹平均值为 0.0669 hm^2 /万元,低于全国 2021 年平均水平(0.0859 hm^2 /万元),区域水资源利用效率高于全国水平,这与 Xu 等^[29]研究中北京、天津和河北水资源利用效率处于“非常高”等级结果一致。

表 1 京津冀地区各市 2010 年、2020 年水资源生态足迹、承载力与生态赤字分布

Table 1 Distribution of water resources ecological footprint, carrying capacity and ecological deficit in cities of Beijing-Tianjin-Hebei region in 2010 and 2020

地区	生态足迹/(hm ² /人)		生态承载力/(hm ² /人)		生态赤字/(hm ² /人)	
	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年
北京市	0.2966	0.3066	0.0348	0.0381	0.2617	0.2684
天津市	0.2852	0.3316	0.0115	0.0222	0.2737	0.3094
邯郸市	0.3099	0.3296	0.0144	0.0272	0.2955	0.3023
邢台市	0.4330	0.4220	0.0221	0.0400	0.4109	0.3820
石家庄市	0.4941	0.4258	0.0315	0.0399	0.4626	0.3859
保定市	0.4512	0.3955	0.0295	0.0606	0.4217	0.3349
衡水市	0.6403	0.5210	0.0101	0.0183	0.6303	0.5027
沧州市	0.3055	0.3102	0.0223	0.0137	0.2832	0.2965
廊坊市	0.3888	0.3216	0.0179	0.0175	0.3709	0.3040
唐山市	0.5959	0.4682	0.0554	0.0582	0.5405	0.4101
秦皇岛市	0.4876	0.3714	0.1886	0.0770	0.2990	0.2945
张家口市	0.4070	0.2963	0.0379	0.0296	0.3691	0.2667
承德市	0.4597	0.3520	0.0534	0.0383	0.4063	0.3137
定州市		0.3599		0.0294		0.3305
辛集市		1.0336		0.0554		0.9782
雄安新区		1.0311		0.0560		0.9751

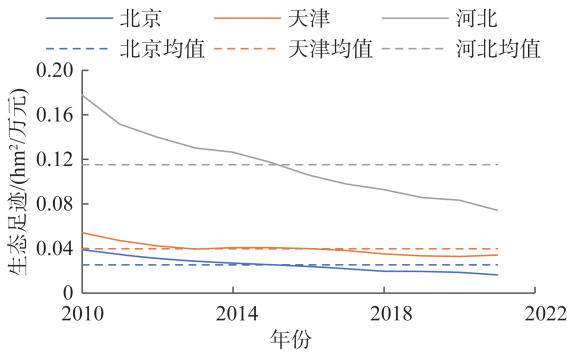


图 4 京津冀地区 2010—2021 年万元 GDP 水资源生态足迹变化趋势

Fig. 4 Change trend of water resources ecological footprint per ten thousand yuan of GDP in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2021

从研究区各省市来看,2010—2021 年万元 GDP 水资源生态足迹平均值由大到小依次为河北、天津、北京。北京、天津和河北万元 GDP 水资源生态足迹研究期平均值分别为 0.025 4、0.039 8、0.115 3 hm²/万元。2010—2021 年河北万元 GDP 水资源生态足迹显著高于天津及北京,说明河北虽然在研究期内水资源利用效率有所提高,但是相较于北京和天津还有一定的差距,其原因主要是河北经济发展速度比天津及北京缓慢,且第一产业中农业占比较大,农业是用水大户,相对于工业和生活用水,其水资源利用效率提高难度更大。近年来,河北产业结构呈现三产升、一产平、二产降的良好态势,加上不断启动农业节水增效项目,河北 2010 年以来万元 GDP 水资源生态足迹下降趋势显著,表明产业结构改革和节水措施

施行取得一定成效,但节水空间和潜力依然巨大。京津冀地区整体提高了技术要素并且降低了单位产值水资源消耗,提高了水资源的利用效率。

3 京津冀水资源生态足迹预测

3.1 验证结果分析

以 2010—2018 年京津冀水资源生态足迹数据作为 LSTM 时间序列神经网络模型的训练数据,并利用 2019—2021 年的数据对模型进行验证,结果见表 2。由表 2 可见,LSTM 时间序列神经网络模型验证期的模拟值和实测值较为接近,北京、天津和河北的均方根误差分别为 0.007 9、0.020 2 和 0.002 7,表明模型预测精度较高,可以用于京津冀地区未来水资源生态足迹的预测。

表 2 LSTM 时间序列神经网络模型验证结果

Table 2 Validation results of LSTM time series neural network model

年份	水资源生态足迹/(hm ² /人)					
	北京		天津		河北	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
2019	0.3147	0.3013	0.3395	0.3469	0.3969	0.4000
2020	0.3066	0.3042	0.3316	0.3564	0.4049	0.4015
2021	0.3081	0.3070	0.3893	0.3658	0.4036	0.4030

3.2 预测结果分析

利用 LSTM 时间序列神经网络模型对 2022—2026 年京津冀地区水资源生态足迹进行预测,结果见图 5。由图 5(a)可见,结合 2010—2021 年水资源生态足迹进行分析,2022—2026 年京津冀地区水资源生态足迹变化较平稳且呈缓慢上升态势,其中天

津增速较快。由图 5(b)可见 2022—2026 年京津冀地区生产用水生态足迹变化趋势,北京和河北呈下降趋势,天津则缓慢上升。由图 5(c)可见 2022—2026 年京津冀地区生活用水生态足迹变化趋势,北京缓慢上升,天津和河北呈下降趋势,天津快速下降的生活用水生态足迹与其人口降幅较大趋势一致。由图 5(d)可见 2022—2026 年京津冀地区生态环境用水生态足迹的变化趋势,北京、天津、河北未来均呈上升态势,与近年来国家对生态环境保护意识提高和力度加大密不可分。

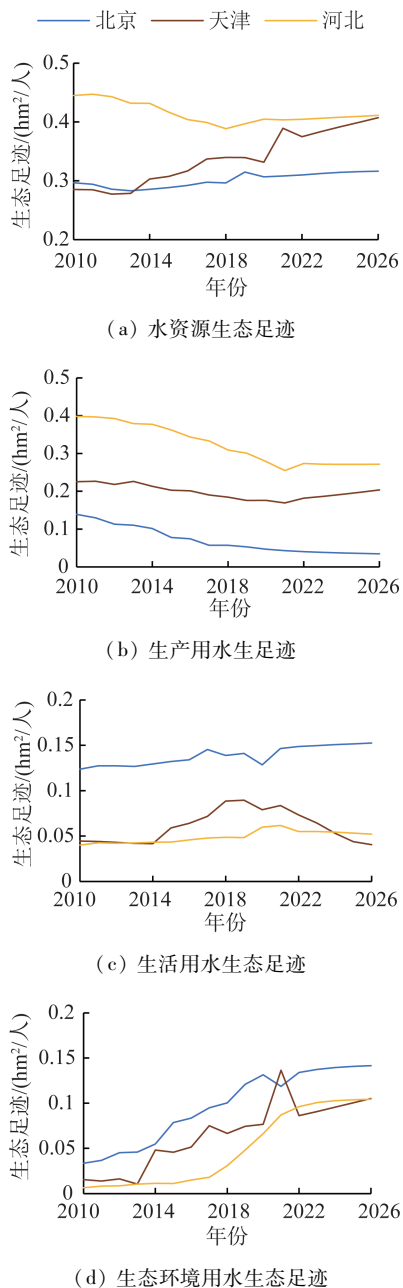


图 5 京津冀地区水资源生态足迹变化趋势及预测结果

Fig. 5 Variation trend and prediction results of water resources ecological footprint in Beijing-Tianjin-Hebei region

随着经济社会发展和生活水平提高,京津冀地区未来水资源供需不平衡问题将日益突出。未来要

提高区域水资源可持续利用水平,必须采取相对应措施,主要考虑以下几方面:①大力发展科技,推进水资源系统全方位高精度监测网络体系建设,提高水资源量化标准、水处理技术和水资源监控管理技术;②产业结构调整,京津冀地区水资源总量偏少,应限制一产和二产中高耗水、高污染企业建设,同时推行高效节水措施,促进产业向节水型和生态环保型转变;③提高水资源利用效率,挖掘雨水、云水资源等增加水资源潜力,扩展水资源量,增强水资源保护意识等以实现水资源可持续利用。

4 结 论

a. 2010—2021 年京津冀地区水资源生态足迹整体呈先减后增趋势,人均水资源生态足迹低于我国 2021 年平均水平。从水资源生态足迹账户构成及其变化趋势来看,天津及河北生产用水所占比例最大,生活用水次之,生态环境用水最小;北京水资源生态足迹发生了结构性变革,生产用水比例下降并低于生活用水。京津冀地区水资源生态承载力年际波动较大并远低于水资源生态足迹,区域水资源生态赤字严重,水资源供需差额较大且严重不平衡。

b. 2010 年以来京津冀地区水资源生态足迹有向中部核心城市转移的趋势,各市水资源生态承载力均远低于水资源生态足迹,呈生态赤字状态。其中,唐山市、辛集市、雄安新区、衡水市生态赤字较大,超过 $0.5 \text{ hm}^2/\text{人}$,水资源供需严重不平衡。

c. 2010—2021 年京津冀地区万元 GDP 水资源生态足迹总体呈下降趋势,其中河北远高于北京和天津,具有较大节水潜力。

d. 2022—2026 年京津冀地区水资源生态足迹变化较平稳且呈缓慢上升态势,但区域水资源生态承载力较小,水资源供需矛盾将进一步加剧。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese))

[2] 杜朝阳,于静洁. 京津冀地区适水发展问题与战略对策[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 17-25. (DU Chaoyang, YU Jingjie. Issues on the sustainable

- development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the limited water resources [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 17-25. (in Chinese))
- [3] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 80-86. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 80-86. (in Chinese))
- [4] 董增川. 海河流域生态环境变化及驱动力分析研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [5] 吴丹, 向筱茜, 冀晨辉. 京津冀水资源与产业结构优化适配模型 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 20-26. (WU Dan, XIANG Xiaoqian, JI Chenhui. Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in BeijingvTianjin-Hebei region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 20-26. (in Chinese))
- [6] 洪思扬, 王红瑞, 梁俊芬, 等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算 [J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))
- [7] 赵勇, 王庆明, 王浩, 等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 8-18. (ZHAO Yong, WANG Qingming, WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei Region: challenges and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 8-18. (in Chinese))
- [8] 郭旭宁, 郦建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [9] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [10] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45-56.
- [11] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 52-61. (SUN Caizhi, GAO Chunyang. Analysis on fractal characteristics of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 61-68. (in Chinese))
- [12] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价 [J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))
- [13] STOEGLERHNER G, EDWARDS P, DANIELS P, et al. The water supply footprint (WSF): a strategic planning tool for sustainable regional and local water supplies [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(15): 1677-1686.
- [14] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析 [J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1085-1093. (ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng. A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1085-1093. (in Chinese))
- [15] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [16] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] 张义敏, 张晓琳, 陈畅. 基于水资源生态足迹模型的广东省及珠三角九市水资源可持续利用研究 [J]. 人民珠江, 2022, 43(4): 31-40. (ZHANG Yimin, ZHANG Xiaolin, CHEN Chang. Analysis of the water resources sustainable utilization in Guangdong Province and nine cities in the Pearl River Delta based on ecological footprint theory [J]. Pearl River, 2022, 43(4): 31-40. (in Chinese))
- [19] 岳晨, 钱永, 崔向向, 等. 福建省 2010—2019 年水资源生态足迹与生态承载力 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 282-287. (YUE Chen, QIAN Yong, CUI Xiangxiang, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Fujian Province during 2010-2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 282-287. (in Chinese))

(下转第 57 页)

- 2012,1(6):407-412. (in Chinese))
- [37] 龚国辉. 主客观结合的 AHP-GWR 耕地地理空间质量评价方法研究[D]. 沈阳:辽宁工程技术大学,2021.
- [38] 张立新,王翔. 基于 AHP-熵权法下的装配式建筑项目绿色施工评价研究[J]. 佳木斯大学学报,2021,39(6):24-28. (ZHANG Lixin, WANG Xiang. Evaluation of green construction of assembly building based on AHP: entropy weight method[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2021, 39(6): 24-28. (in Chinese))
- [39] 李芳,李东坪. 基于熵权法的组合评价模型[J]. 信息技术与信息化,2021(9):148-150. (LI Fang, LI Dongping. Portfolio evaluation model based on entropy weight method [J]. Information Technology and Informatization,2021(9):148-150. (in Chinese))
- [40] 胡振通,王亚华. 地下水超采综合治理的农户评价、原因分析与改进建议[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):160-168. (HU Zhentong, WANG Yahua. Farmer's evaluation, cause analysis and improvement suggestions for comprehensive treatment of groundwater overextraction [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(10):160-168. (in Chinese))
- [41] 胡春胜,张喜英,程一松,等. 太行山前平原地下水动态及超采原因分析[J]. 农业系统科学与综合研究,2002,18(2):89-91. (HU Chunsheng, ZHANG Xiyong, CHENG Yisong, et al. An analysis on dynamics of water table and overdraft of groundwater in the Piedmont of Mt. Taihang [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2002, 18(2): 89-91. (in Chinese))
- [42] HU Y K, MOIWO J P, YANG Y H, et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang irrigation district, North China Plain [J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(3/4): 219-232.
- [43] 张光辉,费宇红,王金哲. 华北灌溉农业与地下水适应性研究[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [44] 齐永青,罗建美,高雅,等. 京津冀地区农业生产与水资源利用:历史与适水转型[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(5):713-722. (QI Yongqing, LUO Jianmei, GAO Yan, et al. Agricultural production and water resources utilization in Beijing-Tianjin-Hebei region: history and suitable water transition [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5): 713-722. (in Chinese))
- [45] LU Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 71-79.

(收稿日期:2022-10-13 编辑:王芳)

(上接第 38 页)

- [20] 门宝辉,蒋美彤. 基于生态足迹法的水资源承载力研究:以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):29-36. (MEN baohui, JIANG Meitong. Research on water resources carrying capacity based on ecological footprint: a case study of Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 29-36. (in Chinese))
- [21] 孙才志,陈栓,赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报,2013,28(4):571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Liangshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582. (in Chinese))
- [22] HU Minghao, YUAN Juhong, CHEN La. Water ecological footprint size, depth and its spatial pattern correlation in the "Four-city Area in Middle China" [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108387.
- [23] LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Zhizhou. A new assessment method of sustainable water resources utilization considering fairness-efficiency-security: a case study of 31 provinces and cities in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103839.
- [24] LI Donglin, ZUO Qiting, JIANG Long, et al. An integrated analysis framework for water resources sustainability considering fairness and decoupling based on the water resources ecological footprint model: a case study of Xinjiang, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135466.
- [25] 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 energy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 147-152. (in Chinese))
- [26] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁:广西科学技术出版社,2000.
- [27] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [28] SAK H, SENIOR A, RAO K, et al. Speech recognition with deep recurrent neural networks [C] // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York: IEEE, 2013: 6645-6649.
- [29] XU Kui, BIN Lingling, XU Xinyi. Assessment of water resources sustainability in Mainland China in terms of water intensity and efficiency [J]. Environmental Management, 2019, 63(3): 309-321.

(收稿日期:2023-02-02 编辑:王芳)