

·专家评述· (栏目主编: 杜太生 王景雷 左其亭)

文章编号: 1672-3317(2025)01-0001-07

河道外需水量影响因素及预测方法综述

何艳虎, 徐小迪

(广东工业大学 生态环境与资源学院, 广州 510006)

摘要: 综述河道外需水量影响因素及预测方法, 为水资源规划与管理提供支撑。采用 Cite Space 分析河道外需水量的影响因素和预测方法。人口、水价、降水量和气温是河道外需水量预测研究中普遍考虑的影响因素; 机器学习在河道外需水量预测中的应用是当前的研究热点; 机器学习和回归分析常考虑多个影响因素, 定额指标法常用于实际工程管理, 时间序列法多与各类方法组合修正以弥补自身的局限性, 组合预测模型能够获得较高的预测精度。随着遥感大数据、人工智能和机器学习算法的发展, 精细空间尺度的河道外需水预测成为可能, 未来需进一步加强需水量预测结果合理性的论证和历史数据质量的控制。

关键词: 需水量预测; Cite Space; 影响因素; 机器学习

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024155

何艳虎, 徐小迪. 河道外需水量影响因素及预测方法综述[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 1-7.

HE Yanhu, XU Xiaodi. A review of the determinants and prediction methods for off-channel water demand[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 1-7.

0 引言

河道外需水量预测是基于历史数据, 考虑未来社会经济发展和气象条件, 对未来河道外需水量进行测算的过程。随着社会发展、极端气候事件增加, 水资源短缺问题日益严峻, 科学合理的河道外需水量预测是缓解水资源危机的重要途径。预测结果的精准性直接影响水资源管理的多个方面^[1]。由于影响因素复杂多变^[2], 历史数据的完整性、精确性和方法适用性等因素, 需水量预测面临诸多挑战^[3]。因此, 梳理河道外需水量的影响因素和预测方法, 对提高预测精度具有重要意义。本文基于河道外需水量预测的大量文献, 采用 Cite Space 分析总结需水影响要素及预测方法, 分析不同方法的适用性和优缺点, 探讨了未来的发展趋势, 为河道外需水预测的理论研究和应用提供参考。

1 河道外需水量预测文献关键词分析

1.1 数据来源与分析工具

于 2024 年 3 月 12 日在中国知网 (CNKI) 和科学网 (WOS) 中分别检索了 1994—2024 年和 2000—

2024 年关于“需水量预测”的文献, 获得 447 篇中文文献和 994 篇英文文献。采用 Cite Space 知识图谱工具^[4-5]进行可视化分析^[6], 通过节点大小和连线反映关键词的频次和共现关系^[7]。

1.2 CNKI 核心期刊文献关键词分析

对 CNKI 中的文献进行关键词频次分析, 得到以“需水预测-预测-水资源”为主线的关键词共现图谱 (图 1)。图谱中的节点颜色对应该关键词出现的年份, 节点面积对应关键词出现的频次。国内常用的方法依次为灰色模型 (Grey Models, GM)、神经网络法、回归分析法、时间序列法、系统动力学法 (System Dynamics, SD) 和定额指标法。

1.3 WOS 核心期刊文献关键词分析

对 WOS 的检索数据进行关键词聚类分析, 绘制时间线图 (图 2)。各结点纵向对应的年份为关键词首次共现的年份, 结点内部的颜色对应左下角图例, 代表关键词出现的年份。关键词按照内部联系分为 7 类, 国外多使用神经网络法、SD、时间序列法、模糊逻辑和遗传算法进行相关研究。

根据 Cite Space 的“Burstness”功能提取突现强度较高的关键词 (表 1)。突现词是短时间内出现频次激增的关键词, 反映研究领域发展的新热点。表 1 中红线代表关键词突现时间, 突现强度反映突现词在突现时段内频次增加的程度^[8], 能够明确研究领域的热点演替情况。目前, 研究的热点区域已从盆地转为流域, 研究热度最高的方向为机器学习。

收稿日期: 2024-04-16 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979043); 中国工程院咨询项目 (2022-PP-04)

作者简介: 何艳虎 (1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源合理配置研究。E-mail: heyanhua456@gdut.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议



图 1 1994—2024 年 CNKI 核心期刊需水量预测文献关键词共现图谱

Fig.1 Co-occurrence map of key words in water demand prediction literature of core journals of CNKI from 1994 to 2024

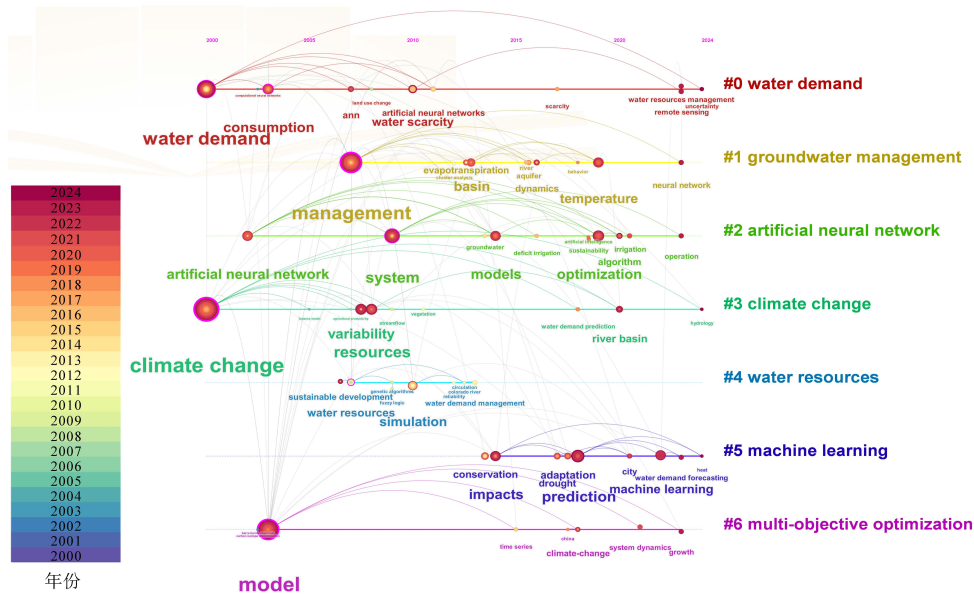


图 2 2000—2024 年 WOS 数据库核心期刊需水量预测文献关键词时间线图

Fig.2 Timeline view of key words of water demand prediction literature in core journals of WOS database from 2000 to 2024

表 1 WOS 数据库核心期刊需水量预测领域突现强度排名前 13 的关键词

Tab.1 Top 13 keywords in the field of water demand prediction in the core journals of WOS database

序号	关键词	突现强度	开始年	结束年	2000—2024 年
1	水资源	5.64	2007	2013	-----
2	需水量	4.03	2008	2015	-----
3	模拟	4.25	2010	2013	-----
4	消耗	3.86	2014	2017	-----
5	设计	3.47	2015	2021	-----
6	系统	4.06	2016	2017	-----
7	土壤	3.83	2016	2017	-----
8	适应	3.58	2017	2018	-----
9	盆地	3.84	2018	2021	-----
10	温度	6.35	2019	2022	-----
11	影响	4.72	2020	2021	-----
12	流域	3.39	2020	2024	-----
13	机器学习	6.37	2022	2024	-----

2 河道外需水量影响因素

影响因素由于需水主体不同而呈现出差异性，突显出明确不同主体需水量影响因素的必要性^[9]。河道外需水量的影响因素复杂多样，包括社会经济因素和气象因素^[10]。社会经济因素如人口、水价、收入^[11-14]对用水需求具有长期影响，而气象因素如降水量和气温^[15-17]则对其产生季节性影响。在考虑多种需水量预测的影响因素时，以往研究多采用回归分析和机器学习。Jain 等^[14]发现未考虑影响因素的模型表现最差。由表 2 可知，以往研究根据需水主体和区域的不同，考虑的因素有所差异，但普遍包括降水量、气温、人口和水价。上述研究表明，综合考虑多种影响因素是提高需水量预测精度的有效途径。

表 2 需水量主要影响因素

Tab.2 The main influencing factors of water demand

来源	需水区域	考虑的主要影响因素
Xu 等 ^[11]	城市	人口、气温、湿度、季节
Yasar 等 ^[12]	城市	人口、气温
Yang 等 ^[13]	地区	降水量、人口、气温、日照时间、国内生产总值、水量、废水排放量、有效灌溉面积、粮食总产量
Jain 等 ^[14]	学校	降水量、气温
Zubaidi 等 ^[15]	地区	降水量、气温、太阳辐射量、气压
Yin 等 ^[16]	城市	人口、降水量、国内生产总值、废水排放量、污水处理量
Alamanos ^[17]	地区	降水量、气温、水价、收入、教育水平、家庭成员、楼层、居住面积

3 河道外需水量预测方法

河道外需水量预测方法多样，按预测时长分为短、中、长期预测，按空间尺度分为区域、流域、城市预测，按用水特征分为生活、生产、生态环境需水量预测^[18]。短期预测用于实际的用水管理，有利于水资源合理分配。中长期预测用于水资源的统筹规划，为区域、流域水资源工程布局提供依据^[19]。目前，在城市及区域需水量短期预测方面已有部分研究^[20-21]，由于中长期需水量受社会经济发展和政策调控的影响具有多变性，预测结果的精确性难以提升^[22]。需水量预测方法可分为统计分析法、时间序列法、回归分析法、机器学习及其他方法（表 3）。

3.1 统计分析法

统计分析法基于历史数据设定指标值或计算增长率来预测未来需水量，包括定额指标法^[23]和增量法等，由于该法计算简便、与城市规划关系密切，常用于估算各规划区的用水需求^[21]，但难以适应复杂多变的用水情况^[24]，考虑到指标优化的滞后性，不建议用该法进行短期需水量的精确预测，适用于中、长期预测^[25-26]。

3.2 时间序列法

时间序列法通过历史数据建立时序关系模型，包含移动平均法和 GM 法。该方法适用于短、中期预测，但无法处理复杂非线性的数据序列^[27-28]，无法用于情况复杂、数据波动大的多周期需水预测。由于该方法仅考虑时间因素、假设未来的发展规律与过去一致，当条件发生较大改变时，容易出现较大的预测偏差^[29]。其中，自回归综合移动平均法由于原理简单且在无数数据缺失的线性非平稳时间序列中预测精度高、鲁棒性强而得到广泛应用^[30-31]。为应对用水数据的随机波动性，耦合不同模型特性的组合需水预测法是增强预测

精度的重要手段^[32]。

表 2 需水量主要影响因素

Tab.2 The main influencing factors of water demand

来源	需水区域	考虑的主要影响因素
Xu 等 ^[11]	城市	人口、气温、湿度、季节
Yasar 等 ^[12]	城市	人口、气温
Yang 等 ^[13]	地区	降水量、人口、气温、日照时间、国内生产总值、水量、废水排放量、有效灌溉面积、粮食总产量
Jain 等 ^[14]	学校	降水量、气温
Zubaidi 等 ^[15]	地区	降水量、气温、太阳辐射量、气压
Yin 等 ^[16]	城市	人口、降水量、国内生产总值、废水排放量、污水处理量
Alamanos ^[17]	地区	降水量、气温、水价、收入、教育水平、家庭成员、楼层、居住面积

精度的重要手段^[32]。

3.3 回归分析法

回归分析法分为线性回归和非线性回归，通过建立需水量与影响因素间的回归方程进行预测，适用于中、长期的需水预测^[2]。由于影响因素复杂多变，多重共线性等问题可能影响预测结果^[33]，因此常采用逐步回归法提高预测精度^[34]。回归分析适用于数据量大、需水对象复杂的情况^[35-36]，对自变量的选择及历史数据的准确性要求较高^[37]。

3.4 机器学习

机器学习通过监督学习对数据进行回归和分类预测^[38]，高度依赖数据的质量和数量，能够综合考虑多方面影响因素，适用范围广，但存在结果解释性较差和模型复杂的局限性^[39]。主要包括随机森林^[40]和 ANN^[41-44]等。Bougadis 等^[1]与 Jain 等^[14]发现，ANN 的预测准确性优于回归分析法和时间序列法。Mousavi-mirkalaei 等^[45]开发了贝叶斯网络概率模型作为预测城市需水量的进化算法，发现该模型能提供更准确和理想的性能。该法在短、长期的需水预测中均展现出良好效能。

3.5 其他方法

除上述方法外，SD 和马尔可夫法也在需水量预测中得到应用。SD 是将定性和定量结合，进行系统分析、综合推理的集成方法，能处理多变量、多反馈、高阶次、非线性的问题^[46]，适用于中、长期预测^[47-48]，在多情景预测方面具有优势^[49]。马尔可夫法无法处理非线性关系^[50]，但常用于修正随机波动大的问题^[51-52]，适用于短、中期预测^[53]。

现有需水预测方法在多时间、多空间尺度上取得成果，尤其在精细时间尺度上获得了较高的精度，而精细空间尺度预测有待探索，这也是水资源精细化配

置^[54-56]的基础和前提。随着遥感地理大数据的可获取性增强,人工智能和机器学习智能算法日趋成熟,需水空间网格化等更精细空间尺度的需水预测将成为可能,可为水资源精细化配置和水利工程空间精细化布局提供重要依据。另一方面,当前河道外需水预测多为确定性预测,即点预测,然而需水影响要素复杂多变,使得预测具有较大的不确定性和随机性,点预测的结果需进行充分的论证,否则将对水资源规划造

成影响^[57]。此外,研究者引入影响因素以获取更加精准的预测结果,提高模型的精度、稳定性和鲁棒性,但河道外需水影响因素关系错综复杂,筛选时存在遗漏关键因素的可能,以致预测结果出现偏差。未来需加强中长期预测模型开发,以支持水资源的规划管理工作。同时,需水量预测的精确性依赖于现有数据的质量控制,严格的历史统计数据质量控制对提升河道外需水预测精度至关重要。

表 3 不同类别需水量预测方法对比

Tab.3 Comparison of different types of water demand forecasting methods

类别	预测方法	时间尺度	使用条件	局限性	预测精度
统计分析法	定额指标法 ^[16-17,58]	中、长期	指标预评估	无法适应复杂多变的用水情况	依赖指标的可靠性 ^[24]
	增量法 分类和法				
时间序列法	趋势外推法	短、中期	连续且精确的历史数据支持	无法用于多周期需水预测 ^[27]	取决于数据的完整性和准确性
	移动平均法 ^[2,11,30-32,42]				
	指数平滑法 灰色模型法 ^[32,51-52,59-61]				
回归分析法	线性回归法 ^[3,34-36,59]	中、长期	自变量与因变量之间存在明显的相关关系	对自变量的选择及历史数据的准确性要求较高 ^[37]	较高
	非线性回归法 ^[3,12]				
机器学习	神经网络 ^[1,3,13-14,41-44,51,59-60,62]	无限制	数据预处理	依赖数据的质量和数量,模型复杂,结果解释性较差 ^[39]	较高
	最近邻居算法				
	贝叶斯 ^[45]				
	随机森林 ^[36,40] 支持向量机				
其他方法	系统动力学法 ^[48-49,62]	中、长期	明确构建各子系统的相互作用关系 ^[47]	模型复杂、对参数设置敏感	较高
	马尔可夫法 ^[2,51-54,60]	短、中期	根据历史数据确定不同状态的转移概率 ^[50]	无法处理非线性关系	较高

4 结论与展望

河道外需水量的影响因素包括气象因素和社会经济因素,人口、水价、收入、降水量和气温是预测时普遍考虑的因素。常用的需水量预测法包括灰色模型、神经网络法、回归分析法、时间序列法、系统动力学法和定额指标法,机器学习是目前需水量预测的研究热点。定额指标法多应用于实际水资源规划与管理,时间序列法多与其他方法组合使用,回归分析法和机器学习常考虑多个影响因素,组合需水预测模型已获得较高预测精度。

河道外需水量预测在模型改进、创新及精度提升方面取得了一定进展,但仍存在待完善的方面:加强空间精细化预测:利用遥感地理大数据、人工智能和机器学习算法,实现需水空间网格化预测,为水资源精细化配置和水利工程布局提供依据。考虑社会经济和气候变化影响:评估气候变化和社会经济发展对需水量预测的影响,综合考虑人口动态变化、城市化发展进程、产业结构调整等因素,进一步分析未来水资源需求的变化趋势。跨学科合作与数据共享:加强计算

机科学、环境科学、水资源管理等领域的合作,推动数据共享平台建设,提高预测模型的准确性和可靠性。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] BOUGADIS J, ADAMOWSKI K, DIDUCH R. Short-term municipal water demand forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1): 137-148.
- [2] DU H Y, ZHAO Z H, XUE H F. ARIMA-M: A new model for daily water consumption prediction based on the autoregressive integrated moving average model and the Markov chain error correction[J]. *Water*, 2020, 12(3): 760.
- [3] ADAMOWSKI J, FUNG CHAN H, PRASHER S O, et al. Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(1): e2010wr009 945.
- [4] 陆志华, 李敏, 石亚东. 基于文献计量可视化图谱分析的河湖水系连通研究现状[J]. *水利经济*, 2021, 39(1): 65-70, 82.
- [5] LU Zhihua, LI Min, SHI Yadong. Research status of connection of rivers and lakes based on visual graph analysis of bibliometrics[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(1): 65-70, 82.
- [5] 陈艳萍, 朱瑾, 吴凤平. 我国水权交易价格研究综述: 基于 CiteSpace 的可视化图谱分析[J]. *水利经济*, 2020, 38(4): 60-67, 84.
- [5] CHEN Yanping, ZHU Jin, WU Fengping. Literature review of water

- rights transaction price: Visual atlas analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(4): 60-67, 84.
- [6] CHEN C M. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(S1): 5 303-5 310.
- [7] 曹永强, 刘明阳. 基于 CiteSpace V 的国内生态工程研究文献可视化分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4 190-4 199.
- [8] 邵翔宇, 曹天豪, 熊言义, 等. 近 30 年 (1994—2023) 中国液氢领域研究热点、前沿及演进[J/OL]. *化工进展*, 1-15[2024-12-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0046>.
SHAO Xiangyu, CAO Tianhao, XIONG Yanyi, et al. Research hotspots, frontiers and evolution in the field of liquid hydrogen in China during the last 30 years (1994—2023)[J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 1-15[2024-12-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0046>.
- [9] HAQUE M M, EGODAWATTA P, RAHMAN A, et al. Assessing the significance of climate and community factors on urban water demand[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2015, 4(2): 222-230.
- [10] MIAOU S P. A class of time series urban water demand models with nonlinear climatic effects[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(2): 169-178.
- [11] XU Z H, LYU Z Q, LI J B, et al. A novel approach for predicting water demand with complex patterns based on ensemble learning[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(11): 4 293-4 312.
- [12] YASAR A, BILGILI M, SIMSEK E. Water demand forecasting based on stepwise multiple nonlinear regression analysis[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, 37: 2 333-2 341.
- [13] YANG Z C, LI B, WU H, et al. Water consumption prediction and influencing factor analysis based on PCA-BP neural network in Karst regions: A case study of Guizhou Province[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(12): 33 504-33 515.
- [14] JAIN A, KUMAR VARSHNEY A, CHANDRA JOSHI U. Short-term water demand forecast modelling at IIT Kanpur using artificial neural networks[J]. *Water Resources Management*, 2001, 15: 299-321.
- [15] ZUBAIDI S L, DOOLEY J, ALKHADDAR R M, et al. A Novel approach for predicting monthly water demand by combining singular spectrum analysis with neural networks[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 136-145.
- [16] YIN Z Y, JIA B Y, WU S Q, et al. Comprehensive forecast of urban water-energy demand based on a neural network model[J]. *Water*, 2018, 10(4): 385.
- [17] ALAMANOS A, SFYRIS S, FAFOUTIS C, et al. Urban water demand assessment for sustainable water resources management, under climate change and socioeconomic changes[J]. *Water Supply*, 2020, 20(2): 679-687.
- [18] DONKOR E A, MAZZUCHI T A, SOYER R, et al. Urban water demand forecasting: Review of methods and models[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(2): 146-159.
- [19] HERRERA M, TORGO L, IZQUIERDO J, et al. Predictive models for forecasting hourly urban water demand[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(1/2): 141-150.
- [20] BEN ÍTEZ R, ORTIZ-CARABALLO C, PRECIADO J C, et al. A short-term data based water consumption prediction approach[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2 359.
- [21] ZHOU S L, MCMAHON T A, WALTON A, et al. Forecasting operational demand for an urban water supply zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1-4): 189-202.
- [22] 李想, 郭丹红, 刘家宏, 等. 京津冀协同发展背景下的县域水资源安全诊断[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(10): 59-71.
LI Xiang, GUO Danhong, LIU Jiahong, et al. Assessing water resource security in the Beijing-Tianjin-Hebei region at county level in the context of regional synergistic development[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(10): 59-71.
- [23] 栾清华, 庞婷婷, 王志友, 等. 需水量预测技术方法文献分析及其应用综述[J]. *人民黄河*, 2022, 44(12): 62-66.
LUAN Qinghua, PANG Tingting, WANG Zhiyou, et al. Review and bibliometrics analysis of prediction technology and method of water demand[J]. *Yellow River*, 2022, 44(12): 62-66.
- [24] 高雅玉, 张新民, 金毅. 马莲河流域水资源供需量预测及平衡分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(6): 169-175.
GAO Yayu, ZHANG Xinmin, JIN Yi. Forecast of water resources supply and demand as well as balance analysis in Malian river basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(6): 169-175.
- [25] 朱连勇, 雷晓云, 文静. 基于定额定量法的阿克苏市需水量预测分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(2): 13-15, 19.
ZHU Lianyong, LEI Xiaoyun, WEN Jing. Forecast analysis of Aksu city's water demand based on quantitative quota method[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(2): 13-15, 19.
- [26] 魏杰, 楼凯. 国土空间规划背景下的深圳市用水量预测指标优化研究[J]. *给水排水*, 2022, 58(10): 39-44.
WEI Jie, LOU Kai. Modification of water consumption norms in Shenzhen under the background of territorial spatial planning[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(10): 39-44.
- [27] 韦慧. ARIMA 模型在非居民用水基准额度预测中的应用[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(12): 124-129.
WEI Hui. Application of ARIMA model in predicting non-residential water consumption benchmark quotas[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(12): 124-129.
- [28] 吴凡, 陈伏龙, 张志君, 等. 基于改进灰色模型的石河子市需水量预测[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 76-82.
WU Fan, CHEN Fulong, ZHANG Zhijun, et al. Water demand prediction of Shihezi City based on improved grey model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3): 76-82.
- [29] 刘鑫, 桑学锋, 常家轩, 等. 基于聚类分析的滑动时均序列需水预测优化方法[J]. *中国农村水利水电*, 2021(9): 199-205.
LIU Xin, SANG Xuefeng, CHANG Jiakuan, et al. Water demand prediction optimization method of sliding time-average series based on cluster analysis[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(9): 199-205.
- [30] SARDINHA-LOURENÇO A, ANDRADE-CAMPOS A, ANTUNES A, et al. Increased performance in the short-term water demand forecasting through the use of a parallel adaptive weighting strategy[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 392-404.
- [31] ARANDIA E, BA A, ECK B, et al. Tailoring seasonal time series models to forecast short-term water demand[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(3): 04 015 067.
- [32] LI J, SONG S B. Urban water consumption prediction based on CPMBNIP[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(13): 5 189-5 213.
- [33] 袁志发, 周静芊. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [34] BREKKE L, LARSEN M D, AUSBURN M, et al. Suburban water demand modeling using stepwise regression[J]. *American Water Works Association*, 2002, 94(10): 65-75.
- [35] HUGHES T C. Peak period design standards for small western U.S. water supply SYSTEMS[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1980, 16(4): 661-667.
- [36] STAŃCZYK J, KAJEWSKA-SZKUDLAREK J, LIPIŃSKI P, et al. Improving short-term water demand forecasting using evolutionary algorithms[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 13 522.
- [37] 张少杰, 游洋. 基于主成分回归分析的需水预测研究[J]. *海河水利*, 2016(3): 43-45, 56.
ZHANG Shaojie, YOU Yang. Research on the water demand prediction

- based on principal component regression[J]. *Haihe Water Resources*, 2016(3): 43-45, 56.
- [38] 李思敏, 产青青, 金鑫, 等. 机器学习在水务行业中的应用现状与发展前景[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(3): 43-48.
LI Simin, CHAN Qingqing, JIN Xin, et al. Application status and development prospect of machine learning in water industry[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(3): 43-48.
- [39] 朱婉怡, 张振克, 郭新亚, 等. 马拉河流域植被生态需水特征及估算[J]. *生态学报*, 2023, 43(18): 7 523-7 535.
ZHU Wanyi, ZHANG Zhenke, GUO Xinya, et al. Characteristics and estimation of vegetation ecological water demand in the Mara River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7 523-7 535.
- [40] 王盼, 陆宝宏, 张瀚文, 等. 基于随机森林模型的需水预测模型及其应用[J]. *水资源保护*, 2014, 30(1): 34-37, 89.
WANG Pan, LU Baohong, ZHANG Hanwen, et al. Water demand prediction model based on random forests model and its application[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(1): 34-37, 89.
- [41] FIRAT M, TURAN M E, ALI YURDUSEV M. Comparative analysis of neural network techniques for predicting water consumption time series[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(1/2): 46-51.
- [42] AL-ZAHRANI M A, ABO-MONASAR A. Urban residential water demand prediction based on artificial neural networks and time series models[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(10): 3 651-3 662.
- [43] PEREA R G, POYATO E C, MONTESINOS P, et al. Irrigation demand forecasting using artificial neuro-genetic networks[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(15): 5 551-5 567.
- [44] ZUBAIDI S L, GHARGHAN S K, DOOLEY J, et al. Short-term urban water demand prediction considering weather factors[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(14): 4 527-4 542.
- [45] MOUSAVI-MIRKALAEI P, ROOZBAHANI A, BANIHABIB M E, et al. Forecasting urban water consumption using Bayesian networks and gene expression programming[J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15(1): 623-633.
- [46] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 180-188.
ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 180-188.
- [47] 吴泽宁, 张海君, 王慧亮. 基于不同预测方法组合的郑州市工业需水量评价[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(3): 46-48.
WU Zening, ZHANG Haijun, WANG Huiliang. Evaluation of industrial water demand of Zhengzhou City based on different prediction methods[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(3): 46-48.
- [48] 秦欢欢, 赖冬蓉, 万卫, 等. 基于系统动力学的北京市需水量预测及缺水分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(21): 175-182.
QIN Huanhuan, LAI Dongrong, WAN Wei, et al. Water demand prediction and water deficit analysis in Beijing based on system dynamics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(21): 175-182.
- [49] 刘爽, 白洁, 罗格平, 等. 咸海流域社会经济用水分析与预测[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1 257-1 273.
LIU Shuang, BAI Jie, LUO Geping, et al. Analysis and prediction of socio-economic water use in the Aral Sea Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1 257-1 273.
- [50] 杨皓翔, 梁川, 崔宁博. 基于加权灰色-马尔可夫链模型的城市需水预测[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(7): 15-21.
YANG Haoxiang, LIANG Chuan, CUI Ningbo. Prediction of urban water demand by using weighted grey-Markov chain model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(7): 15-21.
- [51] 景亚平, 张鑫, 罗艳. 基于修正组合模型的青海省城市需水量预测[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1 013-1 021.
JING Yaping, ZHANG Xin, LUO Yan. Forecast of Qinghai urban water demand based on amending combination model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 1 013-1 021.
- [52] 刘献, 袁旦, 张小丽, 等. 基于残差灰色-马尔可夫链的生活用水量预测研究[J]. *人民珠江*, 2020, 41(8): 1-6.
LIU Xian, YUAN Dan, ZHANG Xiaoli, et al. Study on prediction of domestic water consumption based on residual grey Markov chain model[J]. *Pearl River*, 2020, 41(8): 1-6.
- [53] PACCHIN E, GAGLIARDI F, ALVISI S, et al. A comparison of short-term water demand forecasting models[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(4): 1 481-1 497.
- [54] LI Y B, HAN Y H, LIU B, et al. Construction and application of a refined model for the optimal allocation of water resources: Taking Guantao County, China as an example[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109 929.
- [55] MA J, LIU H L, WU W F, et al. Research on optimal allocation of water resources in Handan City based on the refined water resource allocation model[J]. *Water*, 2022, 15(1): 154.
- [56] 谭安琪, 穆振宇, 艾学山, 等. 流域精细化水资源优化配置模型及应用[J]. *中国农村水利水电*, 2023(2): 28-34.
TAN Anqi, MU Zhenyu, AI Xueshan, et al. Refined and optimal allocation model of water resources in watershed and its application[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(2): 28-34.
- [57] GHALEHGHONDABI I, ARDJMAND E, YOUNG W A, et al. Water demand forecasting: Review of soft computing methods[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(7): 313.
- [58] 侯效灵, 杨瑞祥, 侯保灯, 等. 复杂不确定环境下雄安新区多水源联合配置[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 45-54.
HOU Xiaoling, YANG Ruixiang, HOU Baodeng, et al. Joint allocation of multiple water sources in Xiongan New Area under complex and uncertain environment[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(1): 45-54.
- [59] 黄天意, 周晋军, 李雅君, 等. 六种预测模型在北京市城市生态环境用水短期预测中的比较[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(3): 119-133.
HUANG Tianyi, ZHOU Jinjun, LI Yajun, et al. Comparison of six prediction models for short-term prediction of urban eco-environmental water use in Beijing[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(3): 119-133.
- [60] 刘春成, 曾智, 庞颖, 等. 城市需水量预测方法比较[J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 179-183.
LIU Chuncheng, ZENG Zhi, PANG Ying, et al. Comparison of urban water demand forecasting methods[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 179-183.
- [61] 王玉亮, 吴利丰. 灰色预测法在水资源管理中的应用综述[J]. *人民黄河*, 2023, 45(7): 86-90.
WANG Yuliang, WU Lifeng. Review on the application of grey prediction theory in water resources management[J]. *Yellow River*, 2023, 45(7): 86-90.
- [62] 薛晴, 杨侃. 基于 BP 神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(11): 86-99.
XUE Qing, YANG Kan. Study on forecast and regulation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on GA-BP-SD coupling model[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(11): 86-99.

A review of the determinants and prediction methods for off-channel water demand

HE Yanhu, XU Xiaodi

(School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Off-channel water demand and consumption are critical components of water resource management, influenced by various natural and anthropogenic factors. This study systematically analysed these influencing factors and the methods for predicting off-channel water demand, aiming to provide insights for effective water resource planning and management at the catchment level. The research employed Cite Space for bibliometric analysis to identify current research trends, key hotspots, and systematically categorised the factors that influence the off-channel water demand, as well as the methods used for its prediction. Key factors affecting off-channel water demand in most catchments include population, water pricing, precipitation, and air temperature. Machine learning algorithms have emerged as a prominent tool for predicting off-channel water demand, often used alongside regression analysis to assess the influence of multiple factors. The quota index method remains widely applied in practical water resource management. Additionally, hybrid approaches, combining time series analysis with other methods, address limitations in standalone models and enhance prediction accuracy. Advances in remote sensing, geospatial big data, artificial intelligence, and machine learning algorithms have significantly improved the accuracy of off-channel water demand predictions, particularly at smaller scales. Future research should focus on enhancing the validation of prediction models and ensuring the robust integration of historical data to improve modeling reliability for off-channel water demand and consumption.

Key words: water demand prediction; Cite Space; influencing factors; machine learning

责任编辑：韩 洋