

汉江中下游最小生态需水及保证率研究

黄惟亚¹, 邹振华², 李二明³, 程小翠⁴, 苏海岚¹, 陈美瑶¹, 张俊宏^{1*}, 岳垚¹, 陈欣鑫¹

¹中南民族大学资源与环境学院, 资源转化与污染控制国家民委重点实验室, 湖北 武汉

²长江水利委员会长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

³武汉水务科学研究院, 湖北 武汉

⁴湖北省水文水资源应急监测中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年8月24日; 录用日期: 2023年9月25日; 发布日期: 2023年10月23日

摘要

近年人为因素对河流径流量的影响越来越大, 研究河流生态需水量显得尤为重要。为研究汉江中下游的生态需水, 利用黄家港站、皇庄站和仙桃站三个水文站1974年至2022年的水文资料, 采用Tennant法、流量历时曲线法和逐月最小生态径流法计算得到最小生态需水量, 并根据丰水期40%、枯水期70%和平水期50%的保证率得到了适宜生态需水量。结果表明: 皇庄站生态需水量最大, 年最小生态需水量为198.65亿m³, 年适宜生态需水量为364.04亿m³。同时, 从上游到下游生态需水满足度降低, 三个水文站丰水期最小生态需水量远大于枯水期。通过研究汉江中下游生态需水及保证率, 可对后续生态保护及水资源配置提供一定参考。

关键词

汉江中下游, 生态需水量, Tennant法, 逐月最小生态径流

Study on the Minimum Ecological Water Demand and Guarantee Rate in the Middle and Lower Han River

Weiya Huang¹, Zhenhua Zou², Ermeng Li³, Xiaocui Cheng⁴, Hailan Su¹, Meiyao Chen¹, Junhong Zhang^{1*}, Yao Yue¹, Xinxin Chen¹

¹Key Laboratory of Resources Conversion and Pollution Control of the State Ethnic Affairs Commission, College of Resources and Environmental Science, South-Central Minzu University, Wuhan Hubei

²Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resource Survey, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

³Wuhan Water Science Research Institute, Wuhan Hubei

作者简介: 黄惟亚(2000-), 女, 云南红河人, 硕士研究生, 研究方向为河湖水环境模拟方法及应用。Email: hweiya001@163.com

*通讯作者 Email: zjh411891611@mail.scuec.edu.cn

文章引用: 黄惟亚, 邹振华, 李二明, 程小翠, 苏海岚, 陈美瑶, 张俊宏, 岳垚, 陈欣鑫. 汉江中下游最小生态需水及保证率研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 538-545. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125059

⁴Hubei Provincial and Water Resources Emergency Monitoring Center, Wuhan Hubei

Received: Aug. 24th, 2023; accepted: Sep. 25th, 2023; published: Oct. 23rd, 2023

Abstract

With the increasing influence of anthropogenic factors on river runoff in recent years, it is particularly important to study the ecological water demand of rivers. To study the ecological water demand in the middle and lower Han River, the hydrological data from 1974 to 2022 at Huangjiagang, Huangzhuang and Xiantao stations were collected. The Tennant method, flow duration curve method and the monthly minimum ecological runoff method were used to calculate the minimum ecological water demand, and the suitable ecological water demand was obtained according to the guarantee rate of 40% in the wet season, 70% in the dry season, and 50% in the normal season. The results show that from the ecological water demand of Huangzhuang station is the largest, the annual minimum ecological water demand is 19.865 billion m³, and the annual suitable ecological water demand is 36.404 billion m³. At the same time, the ecological water demand satisfaction decreases from upstream to downstream, and the minimum ecological water demand of the three hydrological stations in the wet season is much larger than that in the dry season. The study of ecological water demand and guarantee rate in the middle and lower Han River can provide some reference for the subsequent ecological protection and water resources allocation.

Keywords

The Middle and Lower Han River, Ecological Water Demand, Tennant Method, Monthly Minimum Ecological Runoff

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

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

汉江流域在生态、经济、粮食等方面在湖北甚至全国都有着重要地位，对汉江生态需水量进行研究，对水资源利用和分配都具有重要意义。作为南水北调中线工程的水源地和汉江流域水资源开发利用的核心工程，丹江口水库扮演着至关重要的角色。根据工程规划，丹江口水库引调汉江流域约 20% 的年径流量，极大地影响了下泄流量[1]。维持河湖系统和谐及稳定所必须消耗的水量，即最小生态需水量，其减少直接影响到河湖生态系统的动态平衡和正常功能，进而对社会经济和生态环境的协调发展产生深远影响[2] [3]。

近年来，国内外研究人员采用多种方法研究河道的生态需水量。根据不同的研究角度，全球范围内有 200 余种方法可用于计算生态需水量[4]。主要有水文法、水力学法、栖息地模拟法和整体分析法，以及在上述方法基础上提出的水文生物分析法和生态水力半径法等。其中，水力学法不能体现季节性变化规律[5]；整体分析法需要广泛征求的专家意见和技术，对结果的人为影响较大。栖息地模拟法数据需求量大且操作复杂耗时，基于栖息地指标计算生态需水量，今后仍需进一步丰富指标与生态系统之间的机理研究[6]；生态水力半径法既集中了水文学和水力学法的优点，又考虑了水生物的生命周期，但该法需要利用低空遥感技术对河道断面进行测量，对技术要求较高，还需要得到典型河段关键物种数据，该数据的获取存在一定随机性和不确定性[7]。水文法是

以水文指标为基础，来定义生态基流的一种方法，其操作简单易行、成本相对较低[8]。因此，本文采用水文法进行计算，所需数据采用水文站实测资料。

2. 研究区域概况

汉江流域($106^{\circ}12' \sim 114^{\circ}35'E$, $30^{\circ}06' \sim 34^{\circ}23'N$)位于我国中部地区，是长江中游最大的支流，它的流域面积达 $159,000 km^2$ ，涵盖了鄂陕川渝甘五省共20个县[9]。作为湖北省甚至全国的主要粮食仓库，汉江中下游成为了汉江生态经济带的重要组成部分，而汉江不仅是该地区不可或缺的水源地，也是纳污最为严重的水体[10]。丹江口至钟祥为中游，河谷较宽，沙滩多，长约270 km；钟祥至汉口为下游，长约382 km，流经江汉平原，河道蜿蜒曲折逐步缩窄。汉江流域属亚热带季风区，气候温和湿润，雨量丰沛，同时由于季风气候的作用，降水量与径流年际与年内均存在较大差异。汉江中下游流域图见图1。

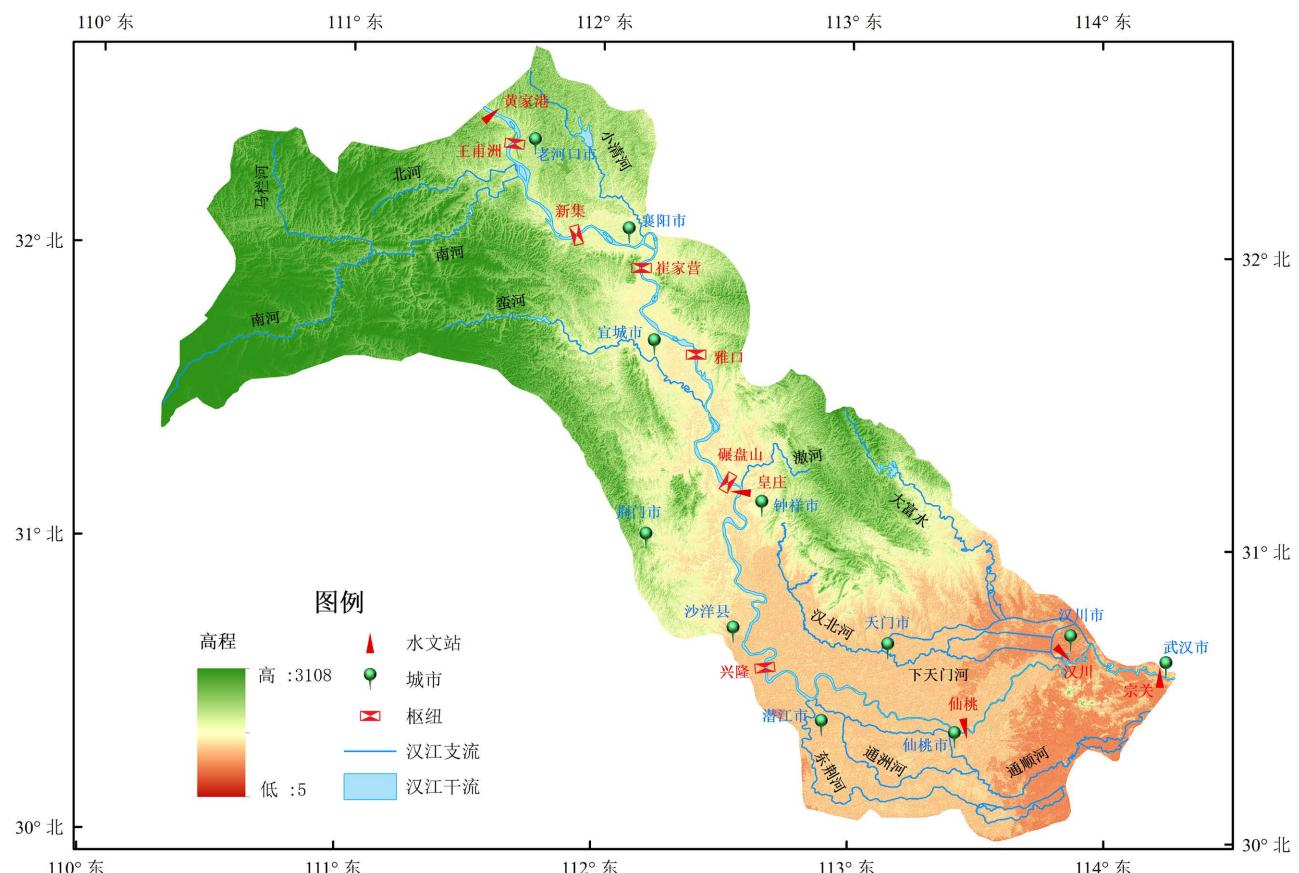


Figure 1. Watershed map of the middle and lower reaches of Han River

图1. 汉江中下游流域图

南水北调中线工程从汉江丹江口水库引水，设计年调水量 130亿 m^3 ，为了补给汉江兴隆以下河段因南水北调中线工程引水而减少的水量，并改善该河段的生态、灌溉、供水、航运等用水条件，作为配套工程的引江济汉工程同步实施。引江济汉工程从荆州区李埠镇长江龙洲垸河段引水到潜江市高石碑镇汉江兴隆段，地跨荆州、荆门两地级市所辖的荆州区和沙洋县，于2014年9月正式开始供水[11]。汉江中下游水文监测站点完善，其中黄家港水文站建于1953年8月，是丹江口水库出库控制站，也是汉江干流丹江口段的重要水情站及中央报讯站，控制集水面积为 $95,217 \text{km}^2$ ，主要服务于丹江口水库调度及汉江中下游防洪预报[12]。汉江中下游的庄皇水文站以及仙桃水文站等控制性观测站点分布以及站点特征见图1和表1。

Table 1. Information of main hydrological stations in the middle and lower reaches of Han River**表 1. 汉江中下游主要水文站点信息**

站名	距离丹江口水库/km	集水面积/km ²	设站年份	使用资料年限
黄家港	6	95,217	1953 年	1974 年 1 月~2022 年 12 月
皇庄	241	142,000	1932 年	1974 年 1 月~2022 年 12 月
仙桃	493	144,684	1932 年	1974 年 1 月~2022 年 12 月

3. 计算方法

3.1. Tenant 法

Tenant 法采用确定的多年平均流量的百分数为计算基础, 将流量分为 8 个等级, 该法认为: 10% 的平均流量可维持大多数水生生物的基本生存, 30%~60% 的平均流量可满足水生环境适宜生境需求, 60%~100% 的平均流量可维持水生生物的良好生境条件[13]。其计算公式为:

$$W = \sum_2^{12} Q_i \times Z_i \quad (1)$$

式中: W 为河道生态需水量, m³; Q_i 为一年内第 i 个月多年平均流量, m³/s; Z_i 为对应第 i 个月的推荐流量百分比, 即多年平均流量百分比, %。

该法将一年分为 4~9 月的多水期和 10 月至次年 3 月的少水期两个计算时段, 并将河流流量推荐值分为 8 个等级, 见表 2。

Table 2. Standards of river flow conditions**表 2. 河流流量状况标准表**

评价	最大	最佳	极好	很好	好	一般或差	差或最小	极差	
推荐流量百分比(%)	4 月~9 月	200	60~100	60	50	40	30	10	0~10
	10 月~3 月	200	60~100	40	30	20	10	10	0~10

3.2. 逐月最小生态径流法

月最小生态径流法需要尽可能长的实测流量系列, 每个站点的流量数据从 1 月至 12 月分为 12 组, 每组的最小值被选作该月的最小生态需水量, 这样就形成了各站点全年的环境需水过程[14]。该方法因把河流生态需水看作一个动态过程而比较适合实际情况。

3.3. 流量历时曲线法

该方法建立在至少 30 年的实测流量数据基础上, 根据收集到的水文站月流量过程进行频率分析, 每个月给一个代表流量, 即月最小生态需水量为 90% 保证率月流量[15]。该方法可反映出径流年际及年内的不均匀性。

3.4. 适宜生态径流计算

适宜生态径流是指满足和维持河流生态系统稳定及保持物种多样性最合适的流量[16]。汉江流域汛期径流丰富, 枯水期径流平稳, 分别按照丰水期 40%、枯水期 70%、平水期 50% 的保证率, 对汉江中下游适宜生态径流进行计算。根据历年流量情况, 取 7~9 月为丰水期, 11 月~次年 3 月为枯水期, 4~6 月和 10 月为平水期。

某一条河流在某个特定时期所测得的河道实际流量大于生态需水阈值的序列长度与总序列长度的比值, 即为其生态需水保证率[17]。满足度为河流实测径流量大于河流最小生态需水量的序列长度的比值。

$$P_{ij} = D_{ij}/D = \sum \operatorname{sgn}(Q_{ijk} - Q_j)/D \quad (2)$$

$$\operatorname{sgn}(Q_{ijk} - Q_j) = \begin{cases} 1 & Q_{ijk} \geq Q_j \\ 0 & Q_{ijk} < Q_j \end{cases}$$

式中: P_{ij} 为第 i 年 j 月的河流生态需水保证率, %; D_{ij} 为第 i 年 j 月生态需水满足天数; D 为第 i 年 j 月的总天数; Q_{ijk} 为第 i 年第 j 月第 k 日的实测流量; Q_j 为第 i 年 j 月生态需水量。

4. 计算结果及分析

4.1. 生态需水的时空分布

利用 Tennant 法计算黄家港、皇庄、仙桃三个水文站的生态需水量, 结果如表 3 所示。汉江丹江口下游段黄家港水文站附近适宜生态需水量为 98.58 亿 m^3 ~197.05 亿 m^3 , 最小生态需水量为 32.92 亿 m^3 ; 皇庄水文站附近适宜生态需水量为 130.38 亿 m^3 ~260.61 亿 m^3 , 最小生态需水量为 38.62 亿 m^3 ; 仙桃水文站附近适宜生态需水量为 111.89 亿 m^3 ~223.78 亿 m^3 , 最小生态需水量为 37.24 亿 m^3 。4~9 月径流量远超 10~次年 3 月, 同时段从黄家港到皇庄, 再到仙桃, 径流量先增大后减小, 但仙桃水文站实测径流量仍比黄家港水文站大。

生态需水和径流量趋势类似, 皇庄生态需水最大, 黄家港生态需水最小, 用流量历时曲线法计算出的最小生态需水量以及按丰、枯、平水期确定保证率的适宜生态径流见表 4。从上游到下游满足度减小, 适宜生态需水的保证率逐渐升高, 该结果量化证明了南水北调中线引水工程的实施导致了汉江中下游环境用水需求的保证率和满足度下降, 而引江济汉工程则能够显著提升汉江中下游环境用水需求的满足程度, 从而带来明显的生态效益[18]。

Table 3. Ecological water requirement calculated by Tennant method

表 3. Tennant 法计算的生态需水量

站名	时段	最大	最佳	极好	很好	好	一般或差	差或最小	极差
黄家港	4~9 月	396.66	119.00~198.33	119	99.19	79.32	59.53	19.87	0~19.87
	10~次年 3 月	260.17	78.05~130.09	52.01	39.05	26	13.05	13.05	0~13.05
皇庄	4~9 月	543.49	163.05~271.75	163.05	135.91	108.7	81.56	27.22	0~27.22
	10~次年 3 月	325.2	97.56~162.60	65.06	48.82	32.49	16.24	16.24	0~16.24
仙桃	4~9 月	448.28	134.48~224.14	134.48	112.06	89.68	67.22	22.38	0~22.38
	10~次年 3 月	297.68	89.30~148.84	59.53	44.67	29.81	14.86	14.86	0~14.86

Table 4. The ecological water demand guarantee rate of each hydrological station

表 4. 各水文站生态需水量保证率

站名	多年实测年均径流量/亿 m^3	年最小生态需水量		年适宜生态需水量	
		计算结果/亿 m^3	满足度/%	计算结果/亿 m^3	保证率/%
黄家港	328.44	143.31	100	273.90	61.70
皇庄	434.34	198.65	100	364.04	65.96
仙桃	372.98	180.25	97.87	312.01	74.42

4.2. 调水前后生态需水对比分析

2014 年南水北调中线开始运行, 故把 1974 年~2022 年三个水文站的实测数据分为 1974 年~2014 年和 2015 年~2022 年两个时段, 对调水前后的最小生态需水进行对比分析。因调水后时间序列较短, 不能满足流量历时曲线法的时间序列长度要求, 综合考虑, 选择 Tennant 法和逐月最小生态径流法的中间值作为最小生态需水量。

根据表 4 和图 2 的结果显示, 从黄家港站到仙桃站, 调水前后的年最小生态需水都是先升高再降低, 皇庄站的年最小生态需水量最大, 调水前月最小生态需水量最大值为 11.54 亿 m^3 , 调水后月最小生态需水量最大值为 13.52 亿 m^3 ; 黄家港站的年最小生态需水量最小, 调水前月最小生态需水量最大值为 8.48 亿 m^3 , 调水后月最小生态需水量最大值为 8.95 亿 m^3 。

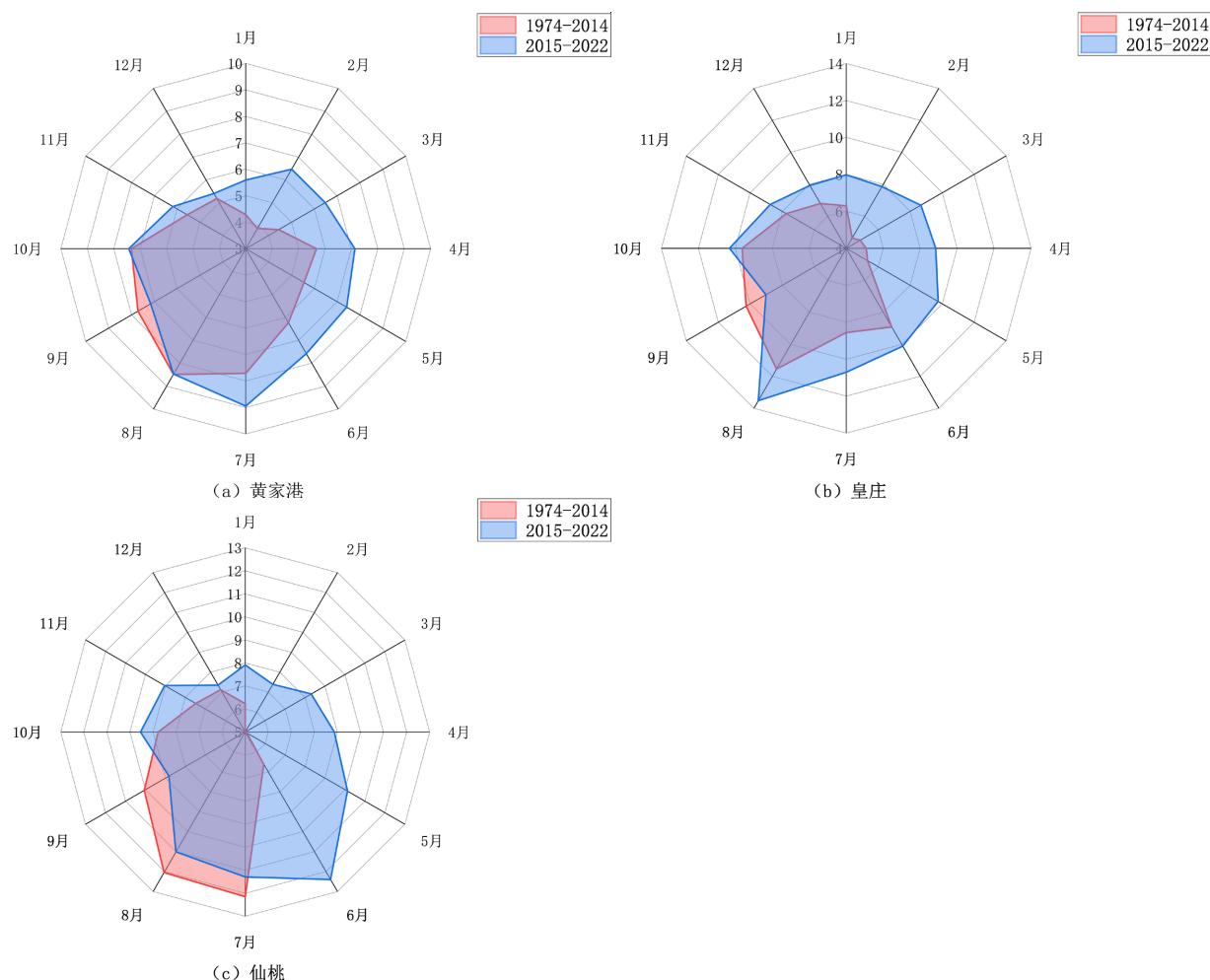


Figure 2. The minimum ecological water demand filling map of each hydrological station before and after water diversion
图 2. 各水文站调水前后最小生态需水填充图

三个水文站 1974~2014 时段内的最小生态需水量均小于 2015~2022 时段, 可看出南水北调中线引水工程对汉江中下游径流量存在一定影响。黄家港站和皇庄站调水前后最小生态需水量的最大值集中在 7 月和 8 月, 仙桃站调水后最小生态需水量的最大值出现在了 6 月。黄家港站及皇庄站除 9 月外, 其余月份调水后最小生态需水量均大于调水前, 仙桃站 7~9 月调水前最小生态需水量大于调水后。三个水文站丰水期最小生态需水量均远大于枯水期。

4.3. 河流生态系统健康评价

表 5 为各水文站最小生态径流评价结果, 计算结果不仅能够满足河流的最小生态需水要求, 还能够体现河流的年内径流变化。根据 Tennant 法评价结果, 在调水前, 多水期的最小生态需水基本为“最小”, 少水期的最小生态需水可达到“好”甚至“很好”。调水后, 多水期评价结果基本为“最小”或“一般”, 少水期为“好”或“很好”。调水后的评价结果好于调水前, 可能是因为受到引江济汉工程的影响, 调水后的几年水量情况较

好，且时间序列过短，导致结果偏大，评价结果偏好。

三个水文站调水前的最小生态需水评价结果基本为多水期“最小”及少水期“好”；调水后多水期的评价结果出现“一般”，仙桃站出现了“好”，少水期评价结果均为“好”或“很好”。总体上看，仙桃站评价结果最好。

Table 5. The minimum ecological runoff evaluation results of each hydrological station

表5. 各水文站最小生态径流评价结果

月份	最小生态径流与同期多年平均值比值/%						Tennant 法评价结果					
	1974~2014			2015~2022			1974~2014			2015~2022		
	黄家港	皇庄	仙桃	黄家港	皇庄	仙桃	黄家港	皇庄	仙桃	黄家港	皇庄	仙桃
1	21.28	26.99	28.28	27.76	34.21	35.89	好	好	好	好	很好	很好
2	21.86	22.8	24.47	36.38	38.58	38.52	好	好	好	很好	很好	很好
3	22.53	20.98	23.67	32.86	37.26	38.25	好	好	好	很好	很好	很好
4	26.97	20.46	22.53	33.91	35.56	41.19	最小	最小	最小	一般	一般	好
5	23.07	17.71	19.37	30.82	32.33	38.63	最小	最小	最小	一般	一般	一般
6	23.13	25.31	22.2	28.13	28.71	41.6	最小	最小	最小	最小	最小	好
7	18.72	14.35	24.96	21.72	17.93	23.2	最小	最小	最小	最小	最小	最小
8	20.11	17.85	23.51	20.07	20.91	21.5	最小	最小	最小	最小	最小	最小
9	17.98	17.94	21.53	16.7	15.77	18.88	最小	最小	最小	最小	最小	最小
10	21.86	21.03	22.16	22.16	22.54	24.08	好	好	好	好	好	好
11	28.26	29.29	30.82	31.42	33.01	37.24	好	好	很好	很好	很好	很好
12	26.97	29.02	32.4	28.1	33.82	33.44	好	好	很好	好	很好	很好

5. 结论

通过上述采用 Tennant 法、逐月最小生态径流法和流量历时曲线法对皇家港、皇庄、仙桃三个水文站的生态需水计算分析，皇庄站径流量最大，生态需水量最大。从黄家港站到仙桃站，调水前后的年最小生态需水量先升高再降低，皇庄站的年最小生态需水量最大，黄家港站的年最小生态需水量最小。从上游到下游生态需水保证率逐渐升高，受到了南水北调引水工程和引江济汉工程的影响，调水后丰水期最小生态需水量大于枯水期。

因调水到现在时间序列较短，调水后的计算结果与长系列数值结果会存在一定差异。Tennant 法以各月流量的同期均值对河流生态流量做评价，仍难以克服个别极端流量对整体结果的影响。逐月最小生态径流法计算结果相较于 Tennant 法偏大。

近些年人为因素对河流生态的影响越来越大，对生态需水进行计算分析可进一步掌握河流生态情况。希望通过上述对汉江中下游生态需水及保证率的研究，可对后续生态保护及调水提供一定参考。

基金项目

国家自然科学基金(51509273)；中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(CZY20032)。

参考文献

- [1] 曾凌, 陈金凤, 刘秀林. 南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析[J]. 水文, 2022, 42(6): 13-18.
ZENG Ling, CHEN Jinfeng and LIU Xiulin. Analysis of the evolution of hydrological situation in the middle and lower reaches of Hanjiang River since the operation of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. Hydrology, 2022, 42(6): 13-18. (in Chinese)
- [2] TILLEY, D. R., BADRINARAYANAN, H., ROSATI, R., et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale

- shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26: 81-109.
- [3] NGANA, J. O., MWALYOSI, R. B. B., MADULU, N. F., et al. Development of an integrated water resources management plan for the Lake Manyara sub-basin, Northern Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 1033-1038.
- [4] THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19: 397-441.
- [5] 薛辰影. 新安江干流段河道内生态需水计算研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2020.
XUE Chenying. Research on the calculation of ecological water demand in the main stream of Xin'an River. Master's Thesis, Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [6] 郑超磊, 刘苏峡, 舒畅, 张守红. 泥曲河道内最小生态需水研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 329-334.
ZHENG Chaolei, LIU Suxia, SHU Chang and ZHANG Shouhong. Study on minimum ecological water requirement in Niqu River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(3): 329-334. (in Chinese)
- [7] 杨阳, 汪中华, 王雪莲, 赵长森, 张纯斌, 潘天力. 河流生态需水计算及空间满足率分析——以济南市为例[J]. 地球科学进展, 2020, 35(5): 513-522.
YANG Yang, WANG Zhonghua, WANG Xuelian, ZHAO Changsen, ZHANG Chunbin and PAN Tianli. Calculation of river ecological water demand and analysis of spatial satisfaction rate: Taking Jinan City as an example. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(5): 513-522. (in Chinese)
- [8] REZA, A., MEHDI, Y. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in perennial rivers. *Water Science and Technology*, 2015, 72: 354-363.
- [9] 涂家婷, 周敏. 基于水足迹理论和多目标模糊规划的粮食作物种植结构优化和农业用水管理研究——以汉江流域为例[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(11): 187-193.
TU Jiating, ZHOU Min. Optimization of grain crop planting structure and agricultural water management based on water footprint theory and multi-objective fuzzy programming: A case study of Hanjiang River basin. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(11): 187-193. (in Chinese)
- [10] 张胜, 林莉, 王珍, 潘雄, 刘敏, 董磊, 陶晶祥. 汉江中下游丰枯水期水质时空变化特[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 47-53.
ZHANG Sheng, LIN Li, WANG Zhen, PAN Xiong, LIU Min, DONG Lei and TAO Jingxiang. Spatial-temporal variation of water quality in the middle and lower reaches of the Hanjiang River during wet and dry seasons. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(8): 47-53. (in Chinese)
- [11] 宋书亭, 范琼. 引江济汉工程在湖北省长湖流域防汛中的运用[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(4): 54-57.
SONG Shuting, FAN Qiong. Application of Yangtze River Diversion Project to flood control in Changhu basin of Hubei Province. *China Flood and Drought Management*, 2021, 31(4): 54-57. (in Chinese)
- [12] 连雷雷, 赵学军, 甄治军. 落差指数法在水位流量关系推求中的应用——以汉江黄家港水文站为例[J]. 人民长江, 2013, 44(23): 70-72.
LIAN Leilei, ZHAO Xuejun and ZHEN Zhijun. Application of the gap index method in the calculation of the relationship between water level and flow-taking the Huangjiagang Hydrological Station of the Hanjiang River as an example. *Yangtze River*, 2013, 44(23): 70-72. (in Chinese)
- [13] 赵坤元. 汾河太原段生态需水研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2012.
ZHAO Kunyuan. Study on ecological water demand of Taiyuan Section of Fenhe River. Master's Thesis, Taiyuan: Shanxi University, 2012. (in Chinese)
- [14] 陈晓璐, 林建海, 梁华玲. 基于水文学法的海南省三大江生态需水量研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(2): 28-35.
CHEN Xiaolu, LIN Jianhai and LIANG Hualing. Research on ecological water demand of three major rivers in Hainan Province based on hydrological method. *Pearl River*, 2020, 41(2): 28-35. (in Chinese)
- [15] 任莉. 辽河生态需水计算方法探讨[J]. 地下水, 2023, 45(2): 213-215.
REN Li. Discussion on the calculation method of ecological water demand in Liaohe River. *Groundwater*, 2023, 45(2): 213-215. (in Chinese)
- [16] 侯盼, 陆宝宏, 黄济琛. 河流生态径流评价的流量区间组成法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 22-26.
HOU Pan, LU Baohong and HUANG Jichen. Flow interval composition method for river ecological runoff evaluation. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 22-26. (in Chinese)
- [17] 陈朝阳, 徐金鹏, 管新建, 张一鸣. 径流变化特征分析及生态需水保证率评估[J]. 水力发电, 2021, 47(5): 17-22.
CHEN Chaoyang, XU Jinpeng, GUAN Xinjian and ZHANG Yiming. Analysis of runoff variation characteristics and assessment of ecological water demand guarantee rate. *Water Power*, 2021, 47(5): 17-22. (in Chinese)
- [18] 徐杨, 常福宣. 汉江中下游河道内生态需水满足率初探[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 1-4.
XU Yang, CHANG Fuxuan. Preliminary study on ecological water demand satisfaction rate in the middle and lower reaches of Hanjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(1): 1-4. (in Chinese)