

平原河网生态流量计算方法及其适宜性研究

吴可怡^{1,2}, 张翔^{1,2}, 闫少锋³, 赵焯^{1,2}, 邓梁堃^{1,2}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉

³湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年10月20日; 录用日期: 2023年1月10日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

平原河网区经济社会高速发展导致的河流生态退化、环境恶化是当前生态文明建设重点关注的问题之一。本文针对长江中游江汉平原中小型河流全年不同时期的水文及生态特点, 基于现有的生态流量计算方法, 研究建立一套考虑长江中游平原河道形态、河网水力特征及主要水生生物适宜流速全年分时段生态流量的综合确定方法。该方法推荐在主要鱼类重要生长阶段采用生态水力半径法, 在枯水期采用逐月Tennant法、逐月频率法计算适宜生态流量, 并采用多目标湿周法和Tennant法确定全年最低流量, 在长江中游平原河网区的典型河流汉北河下游得到验证与应用。适宜性分析表明, 该方法计算的生态流量既考虑了区域的特征, 又考虑了重点生态保护对象的需求, 可为长江中游平原中小型河流水资源高效利用提供参考依据。

关键词

平原河网, 汉北河, 生态流量, 适宜性, 综合确定方法

Ecological Flow Calculation Method and Its Suitability Study in the Plain River Network

Keyi Wu^{1,2}, Xiang Zhang^{1,2}, Shaofeng Yan³, Ye Zhao^{1,2}, Liangkun Deng^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan Hubei

³Hubei Institute of Water Resources Survey and Design, Wuhan Hubei

Received: Oct. 20th, 2022; accepted: Jan. 10th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

作者简介: 吴可怡, 女, 湖北武汉人, 出生于2000年3月。硕士研究生, 研究方向: 平原河网区生态流量、水资源评价等,
Email: keyiwu@whu.edu.cn

文章引用: 吴可怡, 张翔, 闫少锋, 赵焯, 邓梁堃. 平原河网生态流量计算方法及其适宜性研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 1-9. DOI: 10.12677/jwrr.2023.121001

Abstract

As a result of the rapid economic and social development of plain river network area, river ecological degradation and environmental deterioration have become the focus of ecological civilization construction. Considering the hydrological and ecological traits of small and medium-sized rivers at different periods throughout the year in the Jiangnan Plain located in the middle reach of Yangtze River, this study establishes a set of comprehensive calculation method for determining the ecological flow in different periods based on existing calculation methods, which takes the river morphology, hydraulic traits and appropriate velocity for main aquatic organisms into account. This method adopts ecological hydraulic radius method in spawning period, monthly Tennant method and monthly frequency method in dry season to determine the suitable ecological flow process, and uses Tennant method and multi-objective wet perimeter method to determine the minimum ecological flow process. The method is applied in the downstream of Hanbei River basin, a typical river in the plain network area of the middle reaches of the Yangtze River. The suitability analysis of ecological flow showed that the ecological discharge calculated by this method considered not only the characteristics of the region, but also the needs of key ecological protection objects, which could provide a reference for the efficient utilization of water resources in small and medium-sized rivers in the middle reach plain of Yangtze River.

Keywords

Plain River Network, Hanbei River, Ecological Flow, Suitability, Comprehensive Calculation Method

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

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

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



Open Access

1. 引言

平原河网为地区经济发展提供了丰富的资源和优越的地理条件，一般是高度城镇化、经济发展迅速的地区。平原河网区频繁的人类活动，严重影响了区域内经济可持续发展和生态环境健康。研究生态流量实现流域水资源的优化配置，协调工业生产、居民生活和生态环境之间的需求关系，为维持流域生态系统健康和经济社会可持续发展提供科学依据，具有重要意义。平原区河湖水系具有地势平坦、河网发达、河床宽浅等典型地理特征，绝大多数河道流速缓慢，换水周期较长，受闸坝调控影响较大，是科学管理生态流量的难点区域。

生态流量的计算方法经历了水文学法、水力学法、栖息地法、综合法的演变，现已有计算方法二百余种。其中栖息地法和综合法利用历史数据和监测数据建立水文-生态响应关系，适用于管理目标明确、对地区生态系统有深入了解的情况，对生物资料、现场数据要求较高[1]。对于河网交错、水动力机制复杂、各种规模水利工程密布、管理协调机制尚不清晰的平原河网，水文学法和水力学法更具有普适性。水文学法利用已有的长序列水文学资料来推求河道内生态流量。历史流量可以用于表征河流历史条件下原有水生生物对于栖息地、流速、水质等指标的要求，对于缺乏生物资料的地区依据水文历史数据可快速获得结果，主要方法有 Tennant 法、逐月频率法、7Q10 法等。水力学法以河道内水力参数作为指标，研究水生生物对于湿周、水力半径、流速、水深的最适宜区间，为生态流量数值赋予生态内涵。水力学法对缺少长序列水文资料、生态系统研究不充分[2]的河流具有较高适用性。现阶段主要的水力学方法包括湿周法、生态水力半径法、R2Cross 法等。

尽管生态流量计算方法较为成熟，但是考虑不同区域的水文、水动力和水生态特征，分析各种方法的适用

性并建立更科学的计算方法是当前生态流量研究的空缺之处和热点所在。在平原河网区生态流量的相关研究中,王振祺(2022)等针对苏北平原河网区总六塘河的客观环境及其运行管理实际情况,依据苏北平原河网区河流的水文特性、水动力特征以及水文实测资料条件等,运用90%年最低水位法、湿周法、最小月平均水位法、生存最小水深法等方法分别计算河流中游段的生态水位阈值[3];方萍(2021)以水位作为生态水量的表征,利用主成分分析法(PCA)从河流湖泊类型、湿润程度将南方平原河网分为四个类别,从维持基本生态水位、维持鱼类生境水位两个方面总结生态水位核算方法,并为四类分区推荐了使用的生态水位计算方法。国内相关研究成果主要集中在长江下游平原河网及该地区城市河网,且其河流特征多选择水位为表征。国内现有平原河网生态流量研究存在对生态学意义的讨论不充分、缺少时段划分的问题,除长江下游平原以外,其他区域平原河网生态流量相关研究成果甚少。为了给长江中游众多平原河流提供控制开发强度、维护生态系统的依据,需要有一套考虑全年不同时段流量需求、简单易行且具有生态意义的生态流量计算方法。本文针对上述问题和平原区生态流量计算研究的迫切需求,研究适用于平原河网区的生态流量综合确定方法,并以长江中游江汉平原汉北河流域为案例论证该方法的适用性,对生态流量计算结果的适宜性进行评价,为区域水生态保护和水资源可持续利用提供科学依据。

2. 研究区概况

汉北河位于长江中下游平原的江汉平原,发源于大洪山脉东南麓京山县孙桥镇朱家冲,穿过长约10 km的石门水库,南流至天门市渔薪镇杨场,于天门市万家台折向北进入人工河道,东流沿程北岸纳入皂市河(洩水)、大富水等支流,于汉川市新河镇新沟闸注入汉江,全长237.6 km。其中,石门水库以上为上游,河道长42.0 km,属山区型河流,两岸无堤防;石门水库至天门市万家台为中游,河道长103.0 km,为山区型向平原型河流过渡段,沿河两岸间断筑有堤防;万家台至新沟闸下河口为下游(人工改道河),河道长92.6 km,属平原型河流,两岸均筑有堤防,为本文研究区段(如图1所示),具有平原河网区典型水文及水资源特征。流域内水系众多,连通性复杂。年蒸发量1300~1500 mm,多年平均降水量950~1200 mm,降水年际变化大,年内分配不均,汛期5~9月降水量占全年的70%左右[4]。流域内人工河岸、闸门、水库等水利工程兴建;河道内溶解氧含量高($DO > 4.0$ mg/L),多年平均水温稳定在4℃~30℃之间,河道流速在0.1~0.5 m/s,水深0.75~1.5米,浮游动植物种类丰富,水体水质较好。根据相关研究[4],研究区内主要鱼类产卵期为4~7月,喜爱流速及极限流速如表1所示。该河网还分布有国家特有珍稀淡水贝类橄榄蛭蚌自然保护区。天门水文站位于汉北河下游起始处,对该水文站1997~2013年径流序列进行M-K突变检验,结果表明2007年发生突变,经调查,当年丹江口水库三次泄洪、累计泄洪量近46亿方。因此本文采用天门水文站1997~2006年的日平均水位流量、月平均流量资料进行分析计算。研究区地形及水系分布如图1所示。

Table 1. Favored and limit flow velocity of main fish in Hanbei River

表 1. 汉北河主要鱼类喜爱流速及极限流速

种类	产卵类型	产卵期(月份)	感觉流速(m/s)	喜爱流速(m/s)	极限流速(m/s)
鲤鱼	粘性	2~5	0.2	0.3~0.8	1.1
鲫鱼	粘性	4~7	0.2	0.3~0.6	0.8
青鱼	漂流性	4~7	0.2	0.3~0.6	0.8
草鱼	漂流性	3~6	0.2	0.3~0.6	0.8
鲢鱼	漂流性	4~7	0.2	0.3~0.6	0.9
鳙鱼	漂流性	4~7	0.2	0.3~0.6	0.8
瓦氏黄颡鱼	漂流性	4~7	0.2	0.3~0.6	0.8

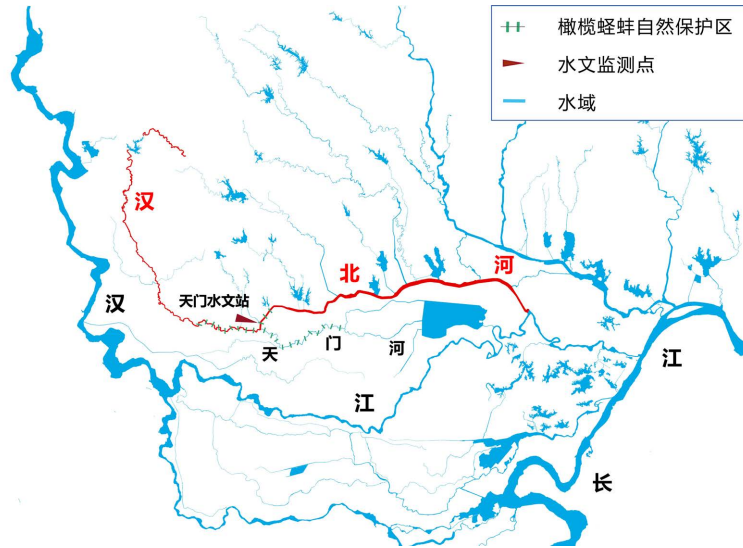


Figure 1. Distribution of main rivers in study area
图 1. 研究区主要水系分布图

3. 平原河网区生态流量综合确定方法

对于长江中游平原区众多具有含沙量较低、水量丰富、有连续流量过程等特征的中小型河流，水文学及水力学方法计算生态流量具有简单易行、普遍适用的优点。但水文学法的缺陷是依赖经验，比较主观、缺乏生态学依据[5]，会导致枯水期生态流量值过低；水力学法中的湿周法虽然对历史数据要求不高，但只能得出单一的计算结果，没有考虑年际年内流量的丰枯变化[2]，对于长江中下游大量断面宽浅的河道较汛期计算值会偏小，也没有考虑水生生物不同阶段生命活动的需要。因此需要根据研究区的水文、水力、水生态等特征筛选计算方法，提出一套综合的生态流量计算方法以弥补单个计算方法的片面性。

针对长江中游平原河网区丰枯明显的特点，许多学者改进 Tennant 法[6]，考虑了天然径流的水文变化规律，制定逐月变化的 Tennant 法生态需水推荐值标准。逐月频率法考虑了长江中游地区径流量年内变化大的特征，能够根据年内不同月份的径流变化特征确定具有较高保证率的生态流量。针对研究区生态保护对象的需求，生态水力半径法考虑到主要和重要水生生物在特定时期对流速的需要，其计算结果在鱼类产卵期等生物敏感期更有参考性。针对平原河网生态与经济用水冲突较大的特点，水力学法中的湿周法在确定临界值时可以采用多目标规划，找到兼顾生态用水与经济用水的临界点，使其结果兼具经济意义，又因为平原河网河道宽浅的特征，湿周法所得阈值常偏小，

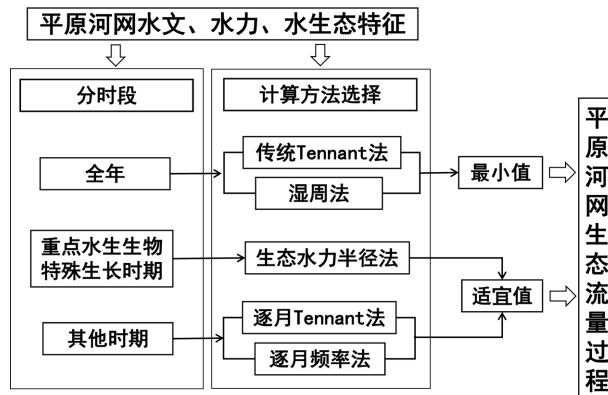


Figure 2. Technology roadmap
图 2. 技术路线图

因此其结果宜作为最低流量阈值。因此推荐在流域内重点鱼类对流速有特殊需要的生长阶段采用生态水力半径法,在枯水期及其他时期采用逐月 Tennant 法、逐月频率法计算适宜生态流量,并采用多目标湿周法和 Tennant 法确定全年最低流量。基于水文学法和水力学法综合确定平原区河流生态流量的技术路线如图 2 所示。

限于篇幅,图中的水文学方法[6] [7] [8]和水力学方法[9] [10] [11] [12]的计算步骤不再赘述,读者可参考有关文献。

4. 生态流量计算与适宜性分析

应用图 2 的生态流量综合确定方法,分别采用逐月频率法、逐月 Tennant 法、生态水力半径法计算全年生态流量上限值,并采用 Tennant 法、湿周法计算全年生态流量下限值,得到综合确定结果,并做适宜性分析。

4.1. 逐月频率法

逐月频率计算法即对历史流量资料逐月进行排频和适线计算,本文选取 90% 保证率下的径流量作为河道内生态需水量。根据 Green 等关于频率分布函数的研究指出,任何一种分布函数没有绝对的优劣之分,只是对于某种分布或子样本容量的检验效果好[13]。据此,本研究主要采用了两参数正态分布(Norm)、伽玛分布(Gamma)、三参数广义极值分布(GEV)、皮尔逊 III 型分布(P-III)对实测长序列逐月径流过程进行适线计算,并用概率点据相关系数线性矩法(PPCC)进行拟合优度检验分析,结果表明 P-III 分布对天门站断面实测径流样本拟合效果优于其他三种分布,因此本研究选用 P-III 分布作为月径流过程理论频率分布,可求得如表 2 所示生态用水过程。

Table 2. Ecological flow calculated by monthly frequency method in P-III distribution (Unit: m^3/s)

表 2. 逐月频率法 P-III 分布生态流量计算(单位: m^3/s)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
逐月频率计算生态流量	10.2	8.8	9.3	11.7	19.4	24.5	29	30.5	22.1	23.4	17.9	13.2

4.2. Tennant 法

选取天门水文站断面多年平均流量的 50% 作为鱼类产卵育幼期的生态流量标准;研究区多年平均流量的 30% 作为一般用水期所需的生态流量标准,得到天门水文站断面 Tennant 法生态流量。Tennant 法不能很好地反应天然径流的丰枯变化规律,在作为水力学法参照时存在一定局限性。考虑天然径流的水文变化规律,制定逐月频率变化的 Tennant 法生态流量推荐值,较年相对值更加合理。Tennant 法及改进的逐月 Tennant 法计算结果如图 3 所示:

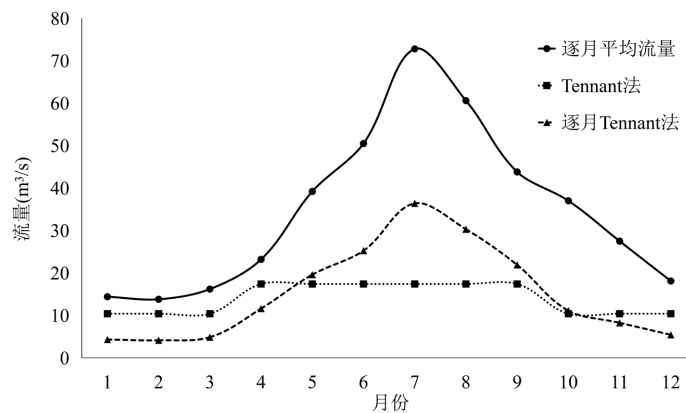


Figure 3. Comparison between ecological flow results calculated by different Tennant methods

图 3. 不同 Tennant 法计算生态流量结果对比

由图 3 可以看出, 如果以同期天然径流量作为估算标准, 逐月 Tennant 法更能反映天然径流随时间变化的过程, 而且流量也能满足河道内水生生物的适宜生态流量。但是由于天然径流的季节性变化, 在枯水期选取逐月 Tennant 法估算生态流量比年平均流量计算结果偏小, 枯水期生态流量的估算相对风险较大。

4.3. 湿周法

选取天门水文站 1997~2006 年的日平均水位及流量资料, 将河道概化为梯形断面明渠均匀流, 流量与湿周有如下关系:

$$Q = \frac{1}{n} A^{3/5} J^{1/2} P^{-2/3} \quad (4)$$

式中: Q 为相对流量, n 为糙率, A 为断面面积, J 为水力坡度, P 为相对湿周。以多年平均流量位特征流量, 分别采用对数函数和幂函数拟合相对湿周 - 相对流量曲线, 对数函数的拟合曲线为 $P = 0.1965 \ln Q + 1.155$, 幂函数的拟合曲线为 $P = 1.1319Q^{0.2116}$, 如图 4 所示。

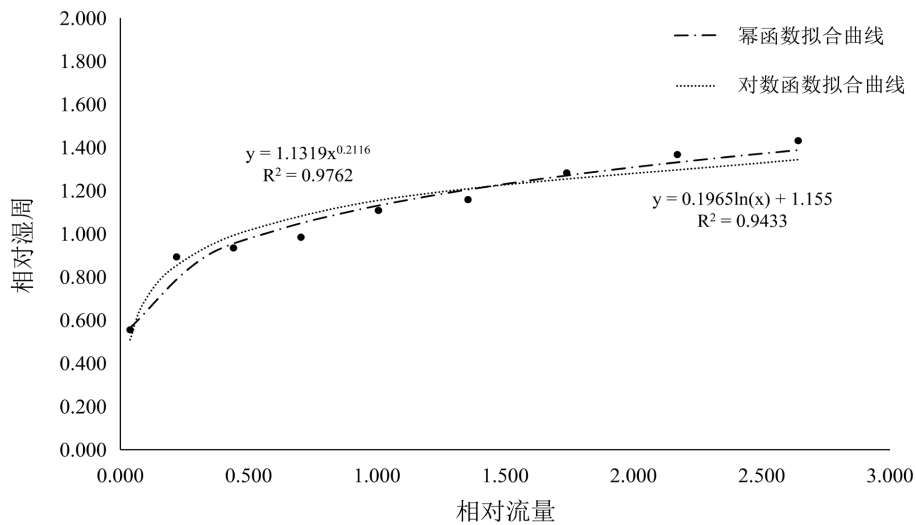


Figure 4. Relative perimeter and discharge relationship of Tianmen hydrological station section
图 4. 天门站断面相对湿周 - 流量

假设在研究区内河流生态用水与经济生活用水具有同等重要的地位, 以河道内流量最小、湿周长度最大两目标的权重系数设为相等的多目标规划法, 计算结果如表 3 所示。幂函数拟合曲线的 R 值为 0.98, 对数函数拟合曲线的 R 值为 0.94, 两种拟合效果良好, 说明断面稳定, 生态流量转折点具有唯一性。据表 3 可知, 幂函数计算的生态流量约为多年平均流量的 13.94%, 相对湿周为 74.61%, 能够维持水生生物的正常生长发育。从绝对流量来看, 断面实际流量 $6.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 属于较低水平, 对于河道内抗风险的能力较弱。当研究河段内绝对流量在 $7 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时, 能够获得接近 80% 的多年平均湿周, 可作为本研究区内的湿周生态的保护目标。

Table 3. Ecological flow calculated by multi-objective perimeter method
表 3. 湿周法多目标生态流量计算

相对流量	幂函数拟合结果		对数函数拟合结果		
	实际流量(m^3/s)	相对湿周	相对流量	实际流量(m^3/s)	相对湿周
13.94%	6.04	74.61%	19.65%	8.52	83.53%

湿周 - 流量对数函数拟合曲线相对于幂函数的拟合结果生态需水量取值偏高, 相对流量达到了 19.56%, 对

应绝对流量为 $8.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ，河道内流量抗风险的能力较高，此时对应的河道湿周占多年平均湿周的 80% 左右，估算结果相较幂函数估算结果更符合实际需要。

由于平原区河道一般都属于宽浅型河道，在较小的流量能够维持比较适宜的湿周大小，故天门站水文断面平均流量达到 $8.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，能够使研究区断面保持多年平均湿周的 83.53%。这一流量达到了 Tennant 法设定的 10%~30% 之间，在一般用水期能够使得水生生态系统达到较好状态，而在鱼类产卵期则为“较差”或“差”的水平，因此，湿周法计算的天门站断面的生态流量更适宜作为研究河段一般用水期最低生态流量。

4.4. 生态水力半径法

通过对研究区内主要鱼类和省级水生野生稀有物种橄榄蛭蚌的生存条件的文献调查，参考《水利水电建设项目生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指标指南(试行)》，确定研究区不同生态控制断面合适的年内生物栖息地环境因子参数标准，采用生态水力半径法计算天门水文断面的适宜生态流量。汉北河下游水生生物适宜流速及生态水力半径计算结果见表 4。

Table 4. Suitable discharge of aquatic organisms and ecological hydraulic radius of Tianmen station cross section (Unit: m/s)
表 4. 天门站断面水生生物适宜流速及生态水力半径表(单位: m/s)

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
流速(m/s)	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
水力半径(m)	0.56	0.56	0.86	0.86	1.20	1.20	1.20	0.86	0.56	0.56	0.56	0.56

根据生态水力半径与断面面积以及水力半径与水位之间的关系曲线，结合断面适宜流速，计算生态流量。生态水力半径法的结果能较好满足河道内水生生物的需求，年内变化和汉北河河道径流量变化基本一致，反映了生态流量来源于天然径流的生态特征，年内差值相差较大。计算结果表明，汉北河生态流量最大值出现在 5、6、7 三个月，达到 $39.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ，这几月处于鱼类产卵季节，也处于汉北河丰水期，体现出本方法的生物学意义；最小值在 1 月和 9~12 月，生态流量为 $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ；年平均生态径流量为 $17.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.5. 生态流量综合确定与适宜性分析

采用逐月频率法、逐月 Tennant 法、生态水力半径法计算全年生态流量上限值，并采用以河道内流量最小、

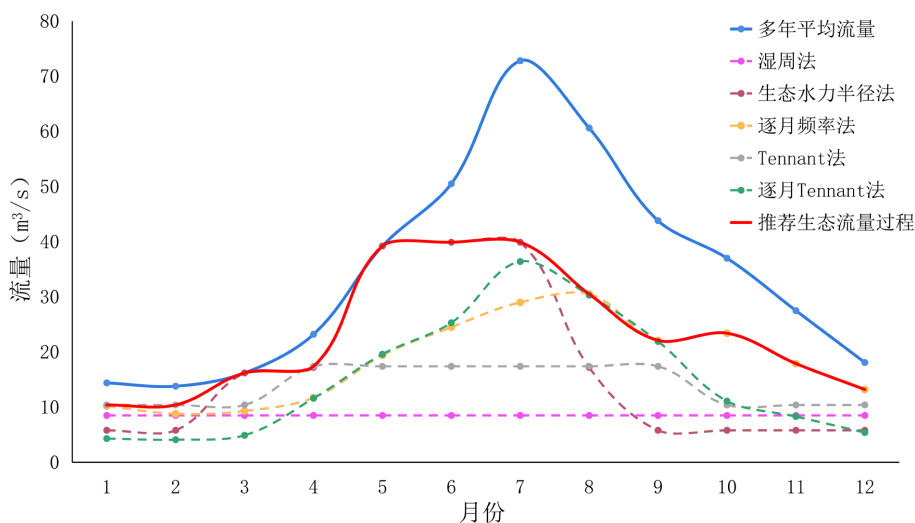


Figure 5. Comparison and recommendation of ecological flow process line of Hanbei River
图 5. 汉北河逐月生态流量过程线比较与推荐

河道断面湿周面积最大为目标的多目标湿周法以及 Tennant 法计算全年生态流量下限值。当计算结果超过天然流量时,选择河道内天然流量作为推荐生态流量,据此得到了汉北河下游的逐月生态流量推荐过程如图 5 所示。

从图 5 可知,多目标湿周法的计算结果在全年范围内明显较低;生态水力半径法的计算结果在五、六月显著高于其他计算方法,但在九月至次年二月计算结果显著较低;逐月频率法的变化规律与多年平均流量基本保持一致,在十至十二月具有较高计算结果;逐月 Tennant 法计算结果变化趋势与多年平均流量一致,与 Tennant 法相比在汛期更为合理,但在枯水期过低。

从最终确定的适宜生态流量曲线中可知:三至七月采用生态水力半径法的计算结果,对应河道内重点鱼类产卵发育期;八至九月为汛末期,逐月 Tennant 法与逐月频率法的计算结果接近,二者皆可采用;九月到次年二月都采用了逐月频率法计算结果。在鱼类产卵发育期,生态水力半径法计算结果偏高,其中三月、五月的计算结果甚至超过多年平均流量,其生态意义是鱼类产卵发育期间需要的生态流速较大,采用生态水力半径法才能最大程度考虑到水生生物成长对流量的需求,体现对水生态的充分重视。长江中游平原河网地区是长江水生生物重要的产卵场所、栖息地和洄游通道,考虑重点鱼类生长对最小生态流量的需求具有重要生态经济意义。在非汛期尤其是枯水期采用逐月频率法,有利于维持河道形态和水生物适宜环境。

Tennant 法根据生态流量占多年平均流量对河流状况进行分级,常被用来估算生态流量的下限值;多目标湿周法一方面具有传统湿周法的生态意义,另一方面能兼顾多种用水目标。长江中游河网的河道普遍宽浅,较小的流量能够维持比较适宜的湿周大小,因此多目标湿周法在平原河网区的计算结果相较其他方法显著偏低,在汛期尤为突出,宜作最低流量值;当以河道内流量最小、河道断面湿周面积最大为目标时,多目标湿周法能够同时保障社会经济用水量与水生物适宜生境。长江中游平原河网区是用水冲突较大的区域,有限的水资源既要保障水生态水环境的健康与安全,又要支持活跃的经济、生活的用水需求,多目标湿周法计算的最小生态流量既能够兼顾多种用水目标,也能在用水目标变化时提供灵活适宜的生态流量参考。

5. 结论

地势平坦、水资源丰富的平原区大都要经历高强度建设发展,为满足日益增长的水资源的需求,水资源的供需分配面临越来越大的挑战。为给平原河网区众多河流的配置管控提供简便易行、具有生态学意义的依据,本文根据平原水文水资源特点,从计算方法的可行性、简易性等方面提出了在流域内鱼类产卵发育期采用生态水力半径法、其余月份综合考虑逐月频率法、逐月 Tennant 法计算生态流量推荐上限,用多目标湿周法与 Tennant 法计算全年生态流量下限的综合计算方法。在具有平原河网典型特征的长江中游江汉平原汉北河下游进行案例分析,生态流量计算结果表明在鱼类产卵发育期,生态水力半径法更好地考虑了对流速的需求,对于水生生物自然繁育和人工养殖业十分活跃的长江中游平原河网区具有较大的应用意义;逐月频率法、逐月 Tennant 法对非汛期时段的生态流量有较高的计算结果,可以作为推荐上限值;Tennant 法对河流状况的分级可以粗略计算生态流量的下限推荐值,以河道内流量最小、社会经济可用水量最大、河道断面湿周面积最大为目标的多目标湿周法可以得出经济效益最大化时的生态流量,这两种计算方法均可作为生态流量的下限参考。在上限值的计算中,本方法充分考虑长江中游平原河网区作为长江水生生物重要的产卵场所、栖息地和洄游通道的特点,以重点水生生物对流量的需求为重;在下限值的计算中,本方法考虑平原河网区具有经济生活用水与生态用水冲突较大的特点,考虑了发展经济时能保障河道水生态安全的生态流量下限值。本文提出的生态流量综合确定方法可为平原河网区中小型河流的水资源高效利用提供参考依据,对保障河道的水生态安全、实现水资源可持续利用具有科学意义与使用价值。

基金项目

国家自然科学基金委区域创新发展联合基金重点支持项目(U21A2002)、中国工程科技发展战略湖北研究院 2020 咨询研究项目重点项目(HB2021B07)资助。

参考文献

- [1] PRAKASAM, C., SARAVANAN, R. and KANWAR, V. S. Evaluation of environmental flow requirement using wetted perimeter method and GIS application for impact assessment. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107019>
- [2] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 生态流量的科学内涵[J]. *中国水利*, 2020(15): 15-19.
DONG Zheren, ZHANG Jing and ZHAO Jinyong. Scientific connotation of ecological flow. *China Water Resources*, 2020(15): 15-19. (in Chinese)
- [3] 王振祺, 方红远, 许广东, 朱晔, 王铨洁. 苏北平原河流生态水位确定与保障措施研究[J]. *人民珠江*, 2022, 43(5): 36-42.
WANG Zhenqi, FANG Hongyuan, XU Guangdong, ZHU Ye and WANG Chengjie. Study on determination and safeguard measures of river ecological water level in North Jiangsu Plain. *Pearl River*, 2022, 43(5): 36-42. (in Chinese)
- [4] 闫少锋, 邓秋良, 刘昱, 等. 基于流速法的汉北河生态需水研究[J]. *江苏水利*, 2017(11): 25-29+33.
YAN Shaofeng, DENG Qiuliang, LIU Yu, et al. Study on the ecological water demand of Hanbei River based on velocity method. *Jiangsu Water Resources*, 2017(11): 25-29+33. (in Chinese)
- [5] 林育青, 陈求稳. 生态流量保障相关问题研究[J]. *中国水利*, 2020(15): 26-28+19.
LIN Yuqing, CHEN Qiwen. The study on relevant issues of ecological flow assurance. *China Water Resources*, 2020(15): 26-28+19. (in Chinese)
- [6] 王霞, 夏自强, 唐志坚. 黄河下游生态径流量计算研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 153-157.
WANG Xia, XIA Ziqiang and TANG Zhijian. Computation of ecological flow in the lower reaches of Yellow River. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(2): 153-157. (in Chinese)
- [7] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- [8] 李捷, 夏自强, 马广慧, 郭利丹. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. *生态学报*, 2007(7): 2916-2921.
LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui and GUO Lidan. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow. *Acta Ecologica Sinica*, 2007(7): 2916-2921. (in Chinese)
- [9] GIPPEL, C. J., STEWARDSON, M. J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(1): 53-67. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199801/02\)14:1<53::AID-RRR476>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199801/02)14:1<53::AID-RRR476>3.0.CO;2-Z)
- [10] SHANG, S. A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter. *River Research and Applications*, 2008, 24(1): 54-67. <https://doi.org/10.1002/rra.1047>
- [11] BARTSCHI, D. K. A habitat-discharge method of determining instream flows for aquatic habitat. *Proceedings of Symposium and Specility Conference on Instream Flow Needs II*. Bethesda: American Fisheries Society, 1976: 285-294.
- [12] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007(1): 42-48.
LIU Changming, MEN Baohui and SONG Jinxi. Ecological hydraulic radius method for estimation of ecological water demand in river channels. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 42-48. (in Chinese)
- [13] GREEN, J. R., HEGAZY, Y. A. S. Powerful modified-EDF goodness-of-fit tests. *Journal of the American Statistical Association*, 1976, 71(353): 204-209. <https://doi.org/10.1080/01621459.1976.10481516>