DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.01.17

基于生态水力半径法的贾鲁河生态需水量计算

刘丹',邢琼琼',郭欣欣',马萌萌',范鹏宇2

(1. 中原环保股份有限公司,河南郑州 450000; 2. 郑州大学环境技术咨询工程有限公司,河南郑州 450002)

摘 要:介绍了生态水力半径法的计算过程,并以淮河的二级支流贾鲁河为例计算了中牟和扶沟两个水文站不同 水文频率年对应的最小生态需水量。根据研究区域的气候、地理特征和流域范围内鱼类对流速的要求对 Tennant 法的计算标准进行修正,并使用修正后的 Tennant 法对中牟和扶沟水文站最小生态需水量的计算结果进行验证。 结果表明,生态水力半径法得到的中牟站丰、平、枯水年和扶沟站丰、平水年最小生态需水量计算结果是合理的,扶 沟站枯水年最小生态需水量多数月份无法满足 Tennant 法设定的最小值,可用 Tennant 法计算结果代替。该方法更 多地考虑了河流水文水力学特征和河流生态系统中水生生物对栖息地的要求,具有更强的生态学意义。 关键词: 生态水力半径法; Tennant 法; 生态需水量; 生态流速; 贾鲁河

中图分类号:TV131; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)01-0105-06

Ecological hydraulic radius approach and its applications in ecological water demand calculation in the Jialu River Basin

LIU Dan¹, XING Qiongqiong¹, GUO Xinxin¹, MA Mengmeng¹, FAN Pengyu²

(1. Central Plains Environmental Protection Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China;

2. Zhengzhou University Environmental Technology and Consulting Company, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this paper, the calculation process of ecological hydrodynamic radius method was introduced. Taking the Jialu River, the second tributary of Huaihe River as an example, we calulated the minimum ecological water demand corresponding to different hydrological frequencies of two hydrological stations in Zhongmou and Fugou. Based on the regional climate and geographic features of the study area and demands of fishes on flow velocity within the river basin , the calculation standard of Tennant method was amended. The modified Tennant method was used to verify the calculation results of the minimum ecological water demand of Zhongmou hydrologic station and Fugou hydrologic station. The results showed that the calculation results of minimum ecological water demand of Zhongmou hydrologic station in high flow, normal flow and low flow year and Fugou hydrologic station in high flow and normal flow year cant meet minimum value set in Tennant Approach in majority months, which can be replaced by results calculated by Tennant Approach. This approach gives more consideration on river hydrology and hydraulics features and demands of habitats for aquatic organism in river ecological system , which has more ecological significance.

Key words: ecological hydraulic radius approach; Tennant method; ecological water demand; ecological flow velocity; Jialu River

1 研究背景

近年来,随着工业化和城镇化进程的加快,我国

北方地区工农业及生活用水量剧增,水资源供需失 衡,导致许多河流生态用水无法得到保证,水生态系 统遭到破坏。为实现经济与水环境之间的协调发

收稿日期:2016-03-31; 修回日期:2017-09-27

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项"淮河流域(河南段)水生态修复关键技术研究与示范课题" (2012ZX07204-004)

作者简介:刘丹(1991-),女,河南安阳人,本科,助理工程师,主要从事污水处理方面研究。

通讯作者:范鹏宇(1989-),男,河南郑州人,助理工程师,主要从事水生态修复方面研究。

展,推动水资源的合理开发和可持续利用,对生态需 水理论和实践的研究越来越得到重视。目前,据不 完全统计,生态需水量已有200余种计算方法,主要 包括水文法、水力法、栖息地法和综合法^[1-4]。水文 学法计算相对简便,对水文资料要求较少,但准确性 较差,一般作为其他方法的检验方法;水文学法中使 用最多的方法为 Tennant 法^[5] 及其各种改进方法: 栖息地法同时考虑了河流的水文特点和生物需求, 但相关生物资料的获取较为困难,其代表方法为 IF-IM 法^[6];综合法综合考虑专家意见和生态功能的整 体性,但需要实测数据和大量资料并消耗大量人力 物力,开展起来较为困难、耗时较长,其代表方法为 BBM 法^[6]。水力学法利用水位、流速、水力半径、湿 周等河流水力学参数来估算生态需水量,该方法考 虑了河道生态功能对流量的需求,常用的方法为湿 周法^[7-8],湿周法的主要假设是流量-湿周曲线上 的突变点处对应的流量能为水生生物提供合适的生 存环境^[9]。生态水力半径法是刘昌明等^[10]提出的 一种计算河道内生态需水量的水力学方法,该方法 同时利用水力半径、水力坡度、糙率等河道参数和维 持某一河流生态功能所需的河流流速来计算河道内 生态需水量。

本文根据贾鲁河流域的特点,使用生态水力半 径法分别计算丰水年(水文频率 P = 25%)、平水年 (P = 50%)和枯水年(P = 75%)河道内最小生态 需水量,并使用修正后的 Tennant 法对计算结果进 行检验和修正。

2 生态水力半径法

生态水力半径法既考虑了水力条件(水力半 径、糙率、水力坡度)又考虑了维持水生生物生存、 繁殖所需河流流速,是一种具有生态意义的水力学 方法^[10-11]。

生态水力半径法中,生态流速 v_{生态} 是指水生生物及鱼类生存、繁殖所需的最小流速;生态水力半径 R_{生态} 是指生态流速 v_{生态} 对应的水力半径。

生态水力半径法主要是针对保护鱼类所需要的 生态需水量而提出的^[10]。水力半径 R 与过水断面 平均水流流速 v、水力坡降 J 以及河道糙率 n 之间的 关系为:

$$R = n^{3/2} v^{-2/3} J^{-3/4} \tag{1}$$

根据鱼类的生活、繁殖习性确定的过水断面生态流速 v_{±态} 作为过水断面的平均流速,利用糙率和水力坡降计算出河道过水断面的生态水力半径 R_{±态};再用 R_{±态}来计算过水断面面积A;然后由水力 半径 – 流量关系:

$$Q = n^{-1} R^{3/2} A J^{1/2}$$
 (2)

计算流量,估算生态需水量 $Q_{\pm\infty}$ 。

天然河道的断面形状是不规则的,但可以用矩 形、三角形及抛物线形等形状作为断面的近似形状。 根据不同河流断面形态,过水断面面积及水力半径 关系如表1所示。

河流断面形状	过水断面面积 A	水力半径 R	说明
矩形	A = bh	$R = \frac{bh}{b+2h}$	b为宽度,h为水深。
梯 形	$A = 0.5(b_1 + b_2)h$	$R = \frac{0.5(b_1 + b_2)h}{b_2 + h(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2})}$	b_1 为水面宽, b_2 河底宽度, m_1 为左边坡系数, m_2 为右 边坡系数,其余同上。
三角形	A = 0.5bh	$R = \frac{0.5b}{\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}}$	同上。

表1 不同断面形状过水断面面积及水力半径关系

生态水力半径法是通过曼宁公式来确定生态流 速所对应的生态水力半径,然后利用水力半径与流 量的关系(图1)估算满足鱼类生存需求的河道内生 态需水量。

目前贾鲁河流域受人类活动影响大,且没有需 要特别保护的濒危鱼类或洄游鱼类,因此,在进行生 态需水量计算时不采用生境模拟法和整体法。

本研究从保护水生生物栖息地的角度出发,生态需水量计算主要侧重于河流生态系统,因此采用 生态水力半径法来计算贾鲁河的最小生态需水量, 并用 Tennant 法对得到的结果进行验证。



3 实 例

3.1 研究区域

贾鲁河是淮河的二级支流,全长 276 km,流域 面积5 896 km²,是淮河流域污染最为严重的支流之 一。贾鲁河流域一方面集中反映了淮河污染的严重 性,同时作为淮河上游经济最发达地区,经济发展与 环境保护的矛盾日益突出。为协调社会发展与生态 环境之间的关系,维护生态平衡,实现水资源的合理 开发、配置,促进水资源的可持续利用,对该流域生 态需水的研究已势在必行。

3.2 Tennant 法计算标准修订及生态需水量计算

使用 Tennant 法计算生态需水量,需要根据河流的所在区域的气候条件,河流的需水类型和保护 对象对 Tennant 法的计算标准进行调整^[12]。

贾鲁河流域属暖温带气候,鱼类区系与长江中 下游鱼类区系相似,主要分布有:四大家鱼、唇鲴、鲤 鱼、泥鳅、鲫鱼及麦穗鱼等,其中以四大家鱼为主。 四大家鱼产卵育幼期为5-8月^[13],据此对 Tennant 法进行计算标准的修正^[14]。

最小生态需水量的修正标准为:9月至次年4 月取多年平均月流量的10%作为河道内最小生态 需水量,5至8月(鱼类产卵期)取多年平均流量的 20%作为河道内最小生态需水量;河道内适宜生态 需水量的修正标准为:9月至次年4月取多年平均 月流量的20%作为河道内适宜需水量,5至8月(鱼 类产卵期)取多年平均流量的30%作为河道内适宜 需水量。

3.3 生态水力半径法计算结果

根据贾鲁河中牟站和扶沟站 1982 - 2012 年历 年流量数据进行水文频率计算,选取频率 P = 25%、 P = 50% 和 P = 75% 所对应的年份作为丰水年、平 水年和枯水年的典型年。中牟站、扶沟站水文频率 典型年计算结果和生态水力学法所需水文数据见表 2,中牟站和扶沟站各典型年实测断面形状如图 2、3 所示。

表 2 中牟站和扶沟站典型年及所需水文资料

水文站	频率 P / %	年份	年均流量/ (m ³ ・s ⁻¹)	糙率n	水力坡 降 J /‰
	25	1996	16.0		
中牟站	50	2003	13.3	0.022	0.58
	75	1999	11.1		
扶沟站	25	2005	19.7		
	50	1992	12.7	0.022	0. 25
	75	1991	7.93		



图 2 中牟站各典型年实测断面形状





四大家鱼产卵期适宜流速为0.2~0.6 m/s^[15]。 本研究取适宜流速的平均值0.4 m/s 作为生态流速 进行计算。

利用实测断面水位资料,可求得中牟站、扶沟站 各典型年月平均水位条件下的河道过水断面的水力 半径,如图4、5所示。





图 5 扶沟站各典型年水力半径月过程

根据 1996 年、2003 年和 1999 年中牟站、扶沟 站实测流量序列和上述计算的水力半径,即可求得 流量Q与水力半径R的关系曲线,如图6、7所示。



根据曼宁公式,计算得到中牟站 R_{4态} =0.221 m, 扶沟站 R_{4态} =0.415 m。由中牟站和扶沟站各典型年 R-Q关系曲线图6、7可得中牟站各典型年 R_{4x} 对应的 生态需水量。1996年中牟站生态需水量 $Q = 2.61 \text{ m}^3/\text{s}$, 2003 年生态需水量 Q = 2.22 m³/s,1999 年生态需水量 $Q = 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$;扶沟站 2005 年生态需水量 Q = 3.28m³/s,1992 年生态需水量 Q = 3.57 m³/s,1991 年生态 需水量 $Q = 2.27 \text{m}^3/\text{s}_{\odot}$

生态水力半径法与 Tennant 法计算的生态需水 量计算结果对比见表3。

由表3可知,生态水力半径法计算中牟站各典 型年生态需水量都处于 Tennant 法所设定一般用水 期中最小生态需水量与适宜生态需水量之间,其中 丰水年(1996年)生态水力半径法计算生态需水量 结果比 Tennant 法设定的鱼类产卵育幼期最小生态 需水量小0.18 m³/s,平水年(2003 年)生态需水量 结果比 Tennant 法设定的鱼类产卵育幼期最小生态 需水量小0.57 m³/s,枯水年(1999年)生态需水量 结果比 Tennant 法设定的角类产卵育幼期最小生态 需水量小1.12 m³/s;扶沟站丰水年和平水年生态需 水量都处于 Tennant 法所设定鱼类产卵育幼期中最 小生态需水量与适宜生态需水量之间,枯水年生态 需水量处于 Tennant 法所设定一般用水期中最小生 态需水量与适宜生态需水量之间,比 Tennant 法设 定的鱼类产卵育幼期最小生态需水量小0.57 m³/s。

为进一步验证计算结果,对中牟站和扶沟站采 用"同比缩减"法对照各典型年月平均流量进行 Q_{4x} 的年内展布,通过推算的月流量过程来验证生 态水力半径法计算结果的合理性,各典型年生态需 水量月过程见表4。

%, m³/s

水文站	年份		年平均 流量	生态水	力半径法	Tennant 法					
		频率 P		生态需水量	生态需水量/	鱼类产卵	间育幼期	一般用水期			
					年平均流量	最小	适宜	最小	适宜		
中牟站	1996	25	16.0	2.61	16.3						
	2003	50	13.3	2.22	16.7	2.79	4.20	1.40	2.79		
	1999	75	11.1	1.67	15.0						
扶沟站	2005	25	19.7	3.28	16.6						
	1992	50	50 12.7 3.57		28.1	2.84	4.26	1.42	2.84		
	1991	75	7.9	2.27	28.6						

生态水力半径法与 Tennant 法生态需水量计算结果对比 表 3

由表4可以看出,除1996年1月生态需水量为1.

能满足 Tennant 法设定的最小生态需水量,产卵育幼 38 <1.40 外,中牟站各水文频率典型年一般用水期均 期5、6 月生态需水量计算结果一般无法满足,7、8 月生 态需水量计算结果基本可以满足;扶沟站丰水年和平 水年(除2月外)一般用水期均能满足 Tennant 法设定 的最小生态需水量,枯水年大部分月份无法满足,鱼类 产卵育幼期丰、平水年均有2个月无法满足,枯水年有 3个月无法满足。由此可见,对于中牟站,生态水力半 径法计算结果在大多数月份是满足要求的;对于扶沟 站,丰、平水年生态水力半径法计算结果在大多数月份

满足要求,枯水年多数月份无法满足要求,因此,扶沟 站枯水年生态需水量取 Tennant 法计算结果,中牟站 各水文频率年以及扶沟站丰、平水年生态需水量取生 态水力半径法计算结果。因而确定贾鲁河中牟站丰、 平和枯水年对应的最小生态需水量分别为2.61、2.22 和1.67 m³/s;扶沟站丰、平、枯水年对应的最小生态需 水量分别为3.28、3.57 和2.84 m³/s。

			—————————————————————————————————————									п	1/5	
								月	份					
站点	年份	计算项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			一般用水期				鱼类产卵育幼期			一般用水期				
	1996	平均流量	6.74	11.30	12.70	11.90	16.40	13.00	22.00	36.80	27.40	11.70	12.70	9.08
		生态需水量	1.38	2.32	2.61	2.44	3.37	2.67	4.52	7.56	5.63	2.40	2.61	1.86
		流量下限	1.40	1.40	1.40	1.40	2.79	2.79	2.79	2.79	1.40	1.40	1.40	1.40
中牟站	2003	平均流量	9.41	8.04	10.60	8.29	8.81	9.72	12.40	18.20	22.70	23.50	15.30	12.00
		生态需水量	2.54	2.17	2.86	2.23	2.37	2.62	3.34	4.91	6.12	6.33	4.12	3.23
		流量下限	1.40	1.40	1.40	1.40	2.79	2.79	2.79	2.79	1.40	1.40	1.40	1.40
	1999	平均流量	7.89	10.20	10.00	7.93	8.55	8.85	21.80	10.50	19.40	11.30	8.90	7.29
		生态需水量	1.62	2.09	2.05	1.63	1.76	1.82	4.48	2.16	3.98	2.32	1.83	1.50
		流量下限	1.40	1.40	1.40	1.40	2.79	2.79	2.79	2.79	1.40	1.40	1.40	1.40
	2005	平均流量	18.10	16.80	17.50	11.80	9.34	8.74	27.10	22.80	26.40	37.80	21.40	17.70
		生态需水量	3.03	2.81	2.93	1.97	1.56	1.46	4.53	3.81	4.41	6.32	3.58	2.96
		流量下限	1.42	1.42	1.42	1.42	2.84	2.84	2.84	2.84	1.42	1.42	1.42	1.42
扶沟站	1992	平均流量	9.97	3.76	14.00	13.70	14.00	2.18	9.83	24.80	26.00	13.70	11.50	13.04
		生态需水量	2.73	1.03	3.84	3.75	3.84	0.60	2.69	6.79	7.12	3.75	3.15	3.57
		流量下限	1.42	1.42	1.42	1.42	2.84	2.84	2.84	2.84	1.42	1.42	1.42	1.42
	1991	平均流量	3.95	1.76	2.49	6.78	9.28	9.18	5.50	17.80	26.60	2.31	4.35	8.18
		生态需水量	1.10	0.49	0.69	1.88	2.58	2.55	1.53	4.94	7.39	0.64	1.21	2.27
		流量下限	1.42	1.42	1.42	1.42	2.84	2.84	2.84	2.84	1.42	1.42	1.42	1.42

表4 贾鲁河各典型年生态需水量年内分配推算

4 结 论

河流生态需水是河流退化评价和生态修复研究 的重要内容,生态需水量的满足是开展河流生态修 复的前提。开展生态需水量研究,可以为水资源的 合理开发及调配提供数据支持,是建立生态需水保 障机制的理论基础。

本研究根据贾鲁河流域中牟和扶沟两个水文站 1982-2012年历年流量数据进行水文频率的计算, 选取1996、2003和1999年为中牟站丰、平、枯水年 的典型年;2005、1992和1991年为扶沟站丰、平、枯 水年的典型年。

使用生态水力半径法对两个水文站不同水文频

率年的最小生态需水量进行计算,并用修正标准后的 Tennant 法对计算结果进行验证,得出以下结论:

(1)根据研究区域的气候、地理特征和流域范 围内鱼类对流速的要求对 Tennant 法的计算标准进 行修正是较为合理的。

(2) 生态水力半径法综合考虑了河流水文特征 和河流生态系统中水生生物对栖息地的要求,计算 比 Tennant 法更具有针对性,具有较高的科学性和 适用性。

(3)在进行生态需水量逐月年内分配推算时, 若多数月份计算结果小于 Tennant 法设的最低标 准,可取 Tennant 法计算结果作为最小生态需水量。

(4)本研究与前期研究中^[16]使用改进湿周法计

2018 年

算得到的贾鲁河中牟站生态需水量计算结果相近, 与扶沟站生态需水量计算结果($Q_{2005} = 5.86 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{1992} = 5.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{1991} = 5.53 \text{ m}^3/\text{s}$)相比偏小,这 是两种方法计算结果选取标准不同造成的,对计算 结果的合理性的判定还需开展深入研究。

参考文献:

- [1] THAME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications, 2003,19(5-6):397-441.
- [2] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水 [J].水利学报,2002,33 (9):14-19+26.
- [3] 倪晋仁,金玲,赵业安,等.黄河下游河流最小生态环境 需水量初步研究[J].水利学报,2002,33(10):1-7.
- [4] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水 动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):294-301.
- [5] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4):6-10.
- [6] 冯宝平,张展羽,陈守伦. 生态环境需水量计算方法研究 现状[J]. 水利水电科技进展,2004,24(6):59-62+73.
- [7] 潘扎荣,阮晓红,周金金,等.河道生态需水量研究进展[J].

(上接第104页)

- [38] 姚怡光,张云,孙铁,等.人工渗流场中的地下水流数 值模拟[J].水力发电,2017,43(5):25-29.
- [39] 张 鑫,徐世光,黄建国,等. GMS 在地下水数值模拟中 的应用——以云南文山州某水库为例[J]. 河南科学, 2015,33(11):1994-1997.
- [40] 刘建峰,张 妨,邬 立,等. Visual Modflow 模型在马城铁 矿床地下水数值模拟中的应用[J]. 矿业工程,2016,14 (2):49-52.
- [41] 赵晓玲,王 博. 基于 Visual MODFLOW 的煤矿开采对 地下水影响的数值模拟研究[J]. 西部勘探工程,2016 (7):124-128.
- [42] 徐如超,向龙,崔光柏等.太湖地区典型小流域地下水储量动态模拟与分析[J].水资源保护,2016,32(2):51-56.
- [43] 魏光辉. 基于人工神经网络模型的地下水水位动态变 化模拟[J]. 西北水电,2015(3):6-9.
- [44] 魏恒,肖洪浪.地下水溶质迁移模拟研究进展[J].冰川冻土,2013,35(6):1582-1589.
- [45] HSIEH B B,ZAKIKHANI M,MARTIN W D. Development of a regional 3-D groundwater modeling system for the Savannah River nuclear site, South Carolina [J]. Groundwa-

水资源与水工程学报,2011,22(4):89-94.

- [8] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. River Research & Applications, 2015,14(1):53-67.
- [9] 吉利娜,刘苏峡,王新春.湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J].地理科学进展,2010,29
 (3):287-291.
- [10] 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,2007,17(1):42-48.
- [11] 马育军,李小雁. 生态水力半径法改进及其在青海湖流 域的应用[J]. 科技导报,2011,29(17):22-28.
- [12] 郑小康,侯红雨,付永锋. 基于改进 Tennant 法的湟水流 域河道内生态环境需水量分析[J]. 南水北调与水利科 技,2015,13(4):681-685+690.
- [13] 孙义,邵东国,顾文权.基于关键物种繁殖的汉江中游 生态需水量计算方法[J].南水北调与水利科技,2008, 6(3):97-100.
- [14] 门宝辉,刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):479-482.
- [15] 刘建康,曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策 [J]. 长江流域资源与环境,1992,1(1):17-23.
- [16]于鲁冀,陈慧敏,王 莉,等.基于改进湿周法的贾鲁河
 河道内生态需水量计算[J].水利水电科技进展,2016, 36(3):5-9+94.

ter Management, 2014, 37(7): 315 - 319.

- [46] VALLNER L, GAVRILOVA O, VILU R. Environmental risks and problems of the optimal management of an oil shale semi – coke and ash landfill in Kohtla – Järve, Estonia. [J]. Science of the Total Environment, 2015:524 – 525:400 – 415.
- [47] 郑玉虎,吴明洲,徐爱兰,等.考虑土壤吸附作用的地下 水污染物运移特征研究[J].地下水,2017,39(3):4-7.
- [48] 钱 伟,王 玮,任宇泽,等.甘肃格宏道金矿尾矿库污染物运 移规律[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):78-83.
- [49] 钱程,穆文平,邢渊,等.某气田石油类污染物运移数值模 拟研究[J].环境工程,2016,34(4):68-72.
- [50]高小文,吕敬,李秀娟,等.铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟[J].水资源与水工程学报, 2017,28(2):120-125.
- [51] 钱程,武雄,穆文平,等. GIS 技术在水文地质领域的应用进展[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):115-122,131.
- [52] 马钧霆,陈锁忠,朱晓婷,等. 3DGIS 下地下水流有限元数值模拟方法与应用[J].地球信息科学学报,2016,18
 (6):749-757.