

高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法

华祖林^{1,2}, 董越洋^{1,2}, 褚克坚^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对高度人工化城市河流生态水位和生态流量确定方法不成熟的问题,通过分析高度人工化城市河流特征和生态功能,解析了生态水位和生态流量的内涵,从维持河流连通性、水生生物生境、水质保障、城市景观娱乐功能等维度,提出了一种考虑河流形态、河道水生生物、水质和景观娱乐为要点的实用计算方法。以南京市秦淮河为案例,计算得到了秦淮河上段、秦淮河下段、外秦淮河和秦淮新河4个河段的生态水位分别为6.8 m、6.7 m、6.3 m和6.7 m,生态流量分别为20.8 m³/s、25.8 m³/s、26.5 m³/s和19.1 m³/s;计算结果介于Tennant标准的“好”和“非常好”之间,表明计算方法合理可信。

关键词:城市河流;高度人工控制;生态流量;生态水位;秦淮河

中图分类号:TV131.4;TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0140-05

Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river // HUA Zulin^{1,2}, DONG Yueyang^{1,2}, CHU Kejian^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the method of determining ecological water level and ecological flow in the highly artificial urban rivers being far from mature, this paper analyzes the characteristics and ecological functions of highly artificial urban rivers, analyzes the connotation of ecological water level and ecological flow. From different perspectives of connectivity of river, aquatic habitat, water quality assurance, urban landscape entertainment function, an practical calculation method is put forward considering river morphology, river aquatic life, water quality and landscape recreation. Taking Qinhuai River in Nanjing as an example, the ecological water level of the four channels such as upper section of Qinhuai River, lower section of Qinhuai River, outer section of Qinhuai River and the new Qinhuai River, is 6.8 m, 6.7 m, 6.3 m, 6.7 m, respectively, and their ecological flow is 20.8 m³/s, 25.8 m³/s, 26.5 m³/s, 19.1 m³/s, respectively. The calculation results are between “good” and “very good” according to the Tennant standard, showing that the calculation method is reasonable and credible.

Key words: urban river; highly artificial control; ecological discharge; ecological water level; Qinhuai River

城市河流是城市景观环境的重要依托和历史文化的重要载体,也是城市品质的重要标志之一,具有强烈的社会属性。我国城市河流面临着污染负荷日益加重、河道内水量被社会经济用水大量挤占、生态流量与生态水位难以保障的困境,从而导致了河流水质恶化、水生生物锐减、生态系统严重退化等一系列问题,严重伤害了城市河流功能。为了城市防洪排涝安全,许多城市河流进行了大量的人工改造,出

现了高度人工化城市河流,对于其生态水位和生态流量的计算目前还没有很好的方法,究其原因在于高度人工化城市河流有着其显著的特点和特定的生态功能与服务需求,具体表现为:①河道径流高度人工控制,闸坝分布密集,水文情势发生巨大改变,造成河流上下游水文、水力、生态等参数的不连续性,流量与水位关系已经不对应,这就决定了河流生态需水的计算必须同时给出生态流量和生态水位,并

根据人工控制情况,分不同河段进行计算;②高度人工化城市河流生物多样性锐减,物种相对单一,有着明显的同质性生境通道,不像自然河流,即使恢复到原有的流量与水位,也难以恢复原有的生物种类,因此现实的生态功能和目标应为维持河道内主要水生生物(如鱼类等)和河道岸滩植物生境等;③对城市河流而言,维持良好景观,保障水体功能,实现人水相亲,服务于城市居民,是其生态服务功能的最为集中与重要的体现;④由于人为的阻隔作用,造成城市河流河水大多呈滞流状态,死水区增多,水体自然复氧困难,加之入河污染物排放,水质恶化,极易诱发蓝藻暴发。

对于城市河流生态水位和生态流量的计算,国内外学者进行了一定的尝试,如 Souter 等^[1]基于河流天然节律,将水文情势分为 5 组 28 个参数,分别从流量、时间、频率和变化速率等方面分析了澳大利亚 Murray 河受严格管控后水文情势的变化,并以恢复天然水文情势为生态目标计算了生态流量;Hough 等^[2]基于生物习性的生态流量推求方法^[3-5]利用 SRH-2D 和 CASiMiR 模型构建了适用于英格兰西北部某河流的水生态模型,通过流速偏好得到水生生境适宜度曲线,评估并提出了研究地点的生态流量;张士峰等^[6]根据人工重建河道生态目标,考虑生态基流、水面蒸发和植被耗水等多个要素,计算了永定河北京段生态需水量;杨毓鑫等^[7]从湖泊形态、最小空间需求以及生态需求等角度推求了洞庭湖的生态水位,对城市河流生态水位的计算有一定的借鉴作用;涂晶晶等^[8]基于河流天然流量的基本特征,构建了河流生态流量特征图,建立了判断生态流量满足程度的生态需水综合指标。但是在高度人工化城市河流中,水文情势已明显不同于自然河流,难以以此来推求生态流量;城市河流生物多样性已显著减少,若仅依据生物习性推算生态流量,计算结果的可靠度难以保证;城市河流生态流量计算还应适当考虑城市生态景观这一极其重要的目标,同时关注高度人工化城市河流生态水位与生态流量不对应的特性。

本文针对现有方法的不足,根据高度人工化城市河流的显著特点和特定的生态功能,提出了一种既考虑维护其基本生态功能,又满足特定服务需求为关注点的计算方法,并以南京市秦淮河为例,对所提出的方法进行了验证计算,为高度人工化城市河流的生态需水计算进行了一次有益的探索。

1 计算方法

1.1 生态水位和生态流量的内涵

高度人工化城市河流生态水位和生态流量内涵

是指为保障城市河流各项生态功能正常发挥,必须同时满足的一定水深、流速、水质和水量条件。城市河流生态功能包括:①连通性功能。维持城市河流连通性功能在于有一定水深以维持河流基本形态稳定,并以一定流速保持河道流动性,维持河道廊道畅通,这是因为在高度人工化城市河流中,水系连通受阻,水体流动性受限。②水生生物生境功能。考虑到城市河流生物多样性已经急剧下降,城市河流水生生物生境功能主要目标为维持河道内主要水生生物(如鱼类等)和河道岸滩植物生境等,保障鱼类和植物的生长空间和适宜的水流条件。③景观娱乐功能。景观娱乐功能是城市河流最为主要的生态服务功能,其始于城市居民对河流自身的景观美学感受,尤为注重视觉感知和嗅觉体验,要求河流应具有一定的水面面积、水深和水质条件。④抑制高度人工化城市河流在滞流状态下可能的藻类爆发性生长。

1.2 生态水位计算方法

a. 维持城市河流连通性的生态水位 H_1 ,具体指维持河流的基本形态的水位。河流水面宽度是表征城市河流形态与廊道通道功能完整性的重要因子,直接受河道水位过程控制。河流水面宽度与水位之间通常呈非线性正相关关系,其变化率存在一个高值区,此高变化率相应河道水位以下,水位降低到某一水位时,水面宽度的减少量将显著增加,河流生态功能的减少量也将随之显著上扬。以河道水位为控制指标,河流水面宽度为功能指标,通过建立河道控制断面水位与水面宽度的关系曲线,识别水面宽度出现急速退化情形所对应的临界水位,以此作为维持河道连通性的生态水位。

b. 维持城市河流河道内鱼类生境的生态水位 H_2 。 H_2 的计算需要考虑鱼类生命各阶段所必要的生存水深,以及游鱼垂向转身需要的水深(为鱼类体长的 2~3 倍(平均体长按 70~80 cm 计))。参考国内外鱼类生态学^[9-10]研究的成果,鱼类适宜水深取为:产卵期(3~6 月)和幼鱼期(7~9 月)大于或等于 0.9 m;成鱼期(10 月至次年 2 月)大于或等于 0.8 m。垂向转身水深取为鱼类平均体长的 2~3 倍。

c. 维持城市河流河道岸滩植物生境的生态水位 H_3 。 H_3 可以根据各类水生植物适生水深,结合生长区域和分布的高程范围进行估算。例如,挺水植物芦苇、水花生等(生长期 6—8 月)适生水深取 20~40 cm;草本植物高羊茅、一年蓬、水蓼等(生长期 6—8 月)适生水深取 10~20 cm;浮水植物凤眼莲等(生长期 6—10 月)适生水深取 20~80 cm。

d. 维持河流景观娱乐的生态水位 H_4 。 H_4 的计算侧重于居民的审美需求,可以从市民亲水、游船航行等多角度进行主观定性分析:

$$H_4 = \max(H_5, H_6, H_7) \tag{1}$$

式中: H_5 为亲水平台要求,有研究^[11]表明水面距亲水平台下约 0.5 m,景观娱乐效果最佳; H_6 为旅游观光游船航行要求水深,水深 1.5 m 左右即可满足小型游船航行要求; H_7 为城市雨水排入河口高度限制要求水深。

综合以上计算结果,可得河段生态水位 H :

$$H = \max(H_1, H_2, H_3, H_4) \tag{2}$$

1.3 生态流量计算方法

维持河流连通性、生物生境、景观娱乐等功能的生态流量 Q_1 ,可基于生态水位、生态流速及河道控制断面参数确定。 Q_1 的计算关键在于生态流速的确定。流速是维持河流水系连通、保持河流生物生境功能以及营造河流景观的一个重要因子,其计算公式为

$$v = \max(v_1, v_2, v_3) \tag{3}$$

式中: v 为河流生态流速; v_1 为维持河流连通性生态流速,可保持河道流动性,实现畅通流动,另外一定的流速可提高河流的复氧量,增强河流的自净能力^[12]; v_2 为鱼类适宜流速,在鱼类生命各阶段中,产卵期对流速最为敏感,按实测与相关研究成果推算,流速 0.1 ~ 0.2 m/s 为宜; v_3 为抑制藻类繁殖流速。藻类的生长繁殖机理十分复杂,其发生机制和过程尚不清楚,已有研究^[13]表明,流速、水温和营养物质是决定藻类生长的主要因素,其中水体流动可以有效抑制藻类的大量繁殖;一般认为,当流速大于 0.1 ~ 0.2 m/s,可以明显抑制藻类过量繁殖^[14-16]。

由于城市河流一般会存在排污口,计算生态流量时还应当充分考虑各功能正常发挥下的自净需水^[17],即环境需水量 Q_2 。 Q_2 常常采用一维水质模型^[18]来估算,计算公式为

$$Q_2 = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \rho_i \exp\left(-\frac{KL_i}{86.4u}\right) - \rho_s \sum_{i=1}^n q_i}{\rho_s - \rho_0 \exp\left(-\frac{KL}{86.4u}\right)} \tag{4}$$

式中: ρ_s 为河段终止断面的污染物质量浓度,mg/L; ρ_0 为河段起始断面的污染物质量浓度,mg/L; ρ_i 为排污口 i 排放的污染物质量浓度,mg/L; q_i 为排污口 i 排入河流的水量,m³/s; L_i 为排污口 i 距离终止断面的长度,km; L 为河段总长,km; u 为河段平均流速,m/s; K 为综合衰减系数,d⁻¹; n 为排污口总数。

河流生态流量 Q 为

$$Q = \max(Q_1, Q_2) \tag{5}$$

2 计算案例

2.1 秦淮河概况

以江苏省南京市秦淮河为例进行计算验证。秦淮河素有“十里秦淮”之称,具有厚重的文化历史韵味,近年来南京市大力建设林荫大道和绿地,构建层次丰富、各有特色的滨水景观节点,打造水上游船线路,恢复重塑秦淮河风光带。确定并保障生态水位与生态流量对城市品质提升有着重要的作用。

南京市秦淮河是秦淮河流域中下游河道,指前圩村以下南京城区秦淮河段,属于典型的高度人工化城市河流(图 1)。南京市秦淮河河网交错纵横,主要包括秦淮河和秦淮新河两条二级河道,以及若干条五级、六级河道,主要河道的基本特征值见表 1。河道上闸坝分布密集,大大小小泵站有十几座,主要控制性水工建筑物有武定门枢纽、三汊河口闸和秦淮新河枢纽。

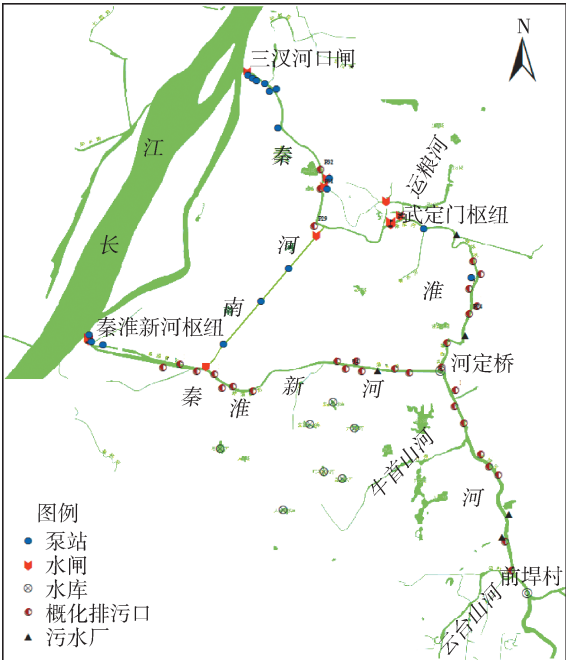


图 1 秦淮河水系

Fig. 1 Drainage of Qinhuai River

表 1 秦淮河主要河道特征值

Table 1 Characteristic value of main channel of Qinhuai River

河段	起点	终点	长度/km	糙率	河宽/m
秦淮河上段	前圩村	河定桥	11.4	0.028	100 ~ 120
秦淮河下段	河定桥	武定门枢纽	10.8	0.028 ~ 0.030	100 ~ 120
外秦淮河	武定门枢纽	三汊河口闸	12.8	0.028	100 ~ 120
秦淮新河	河定桥	秦淮新河枢纽	16.8	0.026 ~ 0.027	80 ~ 180

秦淮河内生物多样性较弱,鱼类以鲫、青、草等常见鱼种为主,浮游植物以蓝藻和硅藻门占优势,河道内叶绿素 a 最高检出 36.50 mg/m³,富营养化程度整体较高,每年均有不同程度的蓝藻水华暴发,这些

都严重损害了河流健康和城市形象。河道外部分有岸滩湿地分布,但植物群落组成单一且缺乏沉水植物,结构较为简单,生物量贫乏。

2.2 计算结果

将南京市秦淮河人工控制情况按表 1 划分为 4 段,生态水位和生态流量也相应逐段进行计算。限于篇幅,生态水位计算以秦淮河上段为例,生态流量计算以外秦淮河为例。

秦淮河上段采用典型大断面(图 2)为该河段生态水位控制断面,计算不同水位下该控制断面对应的水面宽度,并建立两者关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知,水面宽随水位的降低而减小,其变化率在高程 3.2 m 水位处有一拐点,当水位低于 3.2 m 时,河流水面宽随水位降低的减少量将显著增大,即维持城市河流连通性的生态水位为 3.2 m。根据前述鱼类适宜水深,由河道断面形态特征,并考虑一定的安全余量,计算出维持鱼类生境的水深为 1.5 m,换算成生态水位为 5.3 m。现场踏勘与不同时期卫星影像调查资料分析表明,秦淮河上段堤坝内岸滩分布有芦苇、高羊茅、一年蓬、凤眼莲、水花生、水蓼等大型水生植物,生长区域主要位于 5.3 ~ 6.5 m 高程之间的河道滩地。根据前述相关水生植物适生水深,结合植被的高程分布,可推算秦淮河上段维持岸滩水生植物生境的最小生态水位约为 5.5 m,则秦淮河上段维持河流生物生境的生态水位为 5.5 m。景观生态水位按式(1)计算,调查秦淮河沿线亲水

平台、观光游船和市政排水, H_4 约为 6.8 m。综合以上计算结果,由式(2)计算得到秦淮河上段生态水位 $H=6.8$ m。

同理可计算得秦淮河下段、外秦淮河和秦淮新河的生态水位分别为 6.7 m、6.3 m 和 6.7 m。

对于生态流量,由式(3)计算得外秦淮河生态流速 $v=0.1$ m/s,这与王超等^[19]提出的将 0.1 m/s 作为维持城市河流生态系统的最小参考流速一致。基于生态水位、生态流速和控制断面,得 $Q_1=26.5$ m³/s;由图 1 中的概化排污口,按式(4)计算得到 $Q_2=20$ m³/s。综合以上计算结果,由式(5)可得到外秦淮河段生态流量 $Q=26.5$ m³/s。

同理,可计算得秦淮河上段、秦淮河下段和秦淮新河生态流量分别为 20.8 m³/s、25.8 m³/s 和 19.1 m³/s。

2.3 计算结果合理性分析

Tennant 法^[20-21]是应用最广泛的水文学法,是依据观测资料而建立起来的流量和栖息地质量之间的关系来确定生态流量的方法。Tennant 法使用历史流量资料来确定生态需水,使用简单、方便,通常可作为其他方法的检验方法。将本文方法与 Tennant 计算结果进行对比,结果见表 2,对比发现 4 个河段采用本文方法得到的生态流量计算结果均介于 Tennant 方法计算结果的 40% ~ 60% 之间,即 Tennant 标准的“好”和“非常好”之间,计算结果合理,由此证明本文方法合理可靠。

表 2 两种方法生态流量计算结果对比

Table 2 The comparison between the calculation results of ecological discharge by two methods m³/s

河 段	本文方法	Tennant 方法	
		40% 的流量	60% 的流量
秦淮河上段	20.8	19.1	28.7
秦淮河下段	25.8	17.7	26.5
外秦淮河	26.0	17.7	26.5
秦淮新河	19.1	13.0	19.5

3 结 语

本文分析了高度人工化城市河流的特点及生态功能需求,解析了城市河流生态水位和生态流量的内涵,针对目前城市河流生态水位和生态流量确定方法的欠缺,从维持河流连通性、河道内主要生物生境、城市景观娱乐、水质保障以及抑制可能的蓝藻暴发等角度,尝试性地提出了一种高度人工化城市河流生态水位和生态流量的计算方法。以南京市秦淮河为例,分别计算得到了秦淮河上段、秦淮河下段、外秦淮河和秦淮新河 4 个河段的生态水位分别为

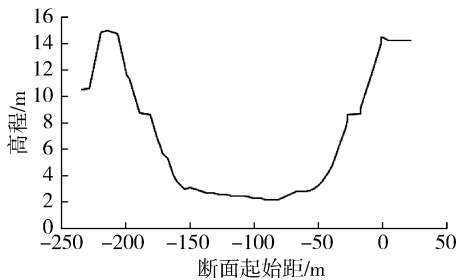


图 2 秦淮河上段典型大断面
Fig. 2 The typical segment in the upper section of Qinhuai River

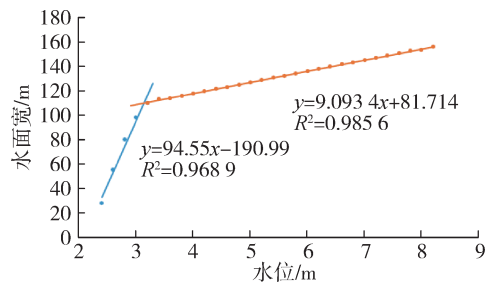


图 3 秦淮河上段大断面水面宽与水位的关系
Fig. 3 Relationship between water width and water level of segment in the upper section of Qinhuai River

6.8 m、6.7 m、6.3 m 和 6.7 m,生态流量分别为 20.8 m³/s、25.8 m³/s、26.5 m³/s 和 19.1 m³/s,并利用 Tennant 法检验了其合理性,可为像南京市秦淮河等我国高度人工化城市河流的生态水位和生态流量的确定提供参考。

参考文献:

- [1] SOUTER N J. Applying the environmental flow components approach to the River Murray in South Australia[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia Incorporated Incorporating the Records of the South Australian Museum,2017,141(2):132-150.
- [2] HOUGH I M, WARREN P H, SHUCKSMITH J D. Designing an environmental flow framework for impounded river systems through modelling of invertebrate habitat quality[J]. Ecological Indicators,2019,106:105445.
- [3] ARUNACHALAM M. Assemblage structure of stream fishes in the Western Ghats (India) [J]. Hydrobiologia, 2000,430(1/2/3):1-31.
- [4] 王珮,肖昌虎,黄站峰. 河流生态流量研究进展[J]. 江西水利科技,2018,44(3):230-234. (WANG Bei, XIAO Changhu, HUANG Zhanfeng. The development of research on ecological flow [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,2018,44(3):230-234. (in Chinese))
- [5] BEESLEY L, CLOSE P G, GWINN D C, et al. Flow-mediated movement of freshwater catfish, *Tandanus bostocki*, in a regulated semi-urban river, to inform environmental water releases [J]. Ecology of Freshwater Fish,2019,28(3):434-445.
- [6] 张士锋,刘晓菲,李瑞,等. 永定河北京段生态需水量研究[J]. 水资源研究,2016,5(2):108-119. (ZHANG Shifeng, LIU Xiaofei, LI Rui. Study on environmental flow in Beijing section of Yongding River[J]. Journal of Water Resources Research,2016,5(2):108-119. (in Chinese))
- [7] 杨毓鑫,杜春艳,张金帆,等. 洞庭湖湖区最低生态水位的确定[J]. 水资源保护,2019,35(3):89-94. (YANG Yuxin, DU Chunyan, ZHANG Jinan, et al. Determination of lowest ecological water level in Dongting Lake area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3): 89-94. (in Chinese))
- [8] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护,2015,31(1):99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):99-105. (in Chinese))
- [9] 李梅,黄强,张洪波,等. 基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J]. 水利学报,2007,38(6):738-742. (LI Mei, HUANG Qing, ZHANG Hongbo, et al. Determination of ecological water demand based on necessary flow depth and velocity for specific ecological function[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(6):738-742(in Chinese))
- [10] 李洋. 筑坝河流鱼类产卵生态流量研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [11] 余明勇,张海林. 基于综合效益发挥的南方平原区城市湖泊景观水位[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):222-229. (YU Mingyong, ZHANG Hailin. Suitable water level for landscape function of lakes in southern plains of China based on optimization of comprehensive benefits [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(3):222-229. (in Chinese))
- [12] PICCININI M, CARO A S, GULTEMIRIAM M L, et al. Estimating the self-depuration capacity of a reach of the Lujan River [J]. International Journal of Environmental Research,2015,9(3):1037-1046.
- [13] ZHANG H, CHEN R, LI F, et al. Effect of flow rate on environmental variables and phytoplankton dynamics: results from field enclosures [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2015,33(2):430-438.
- [14] LIAN J J, YAO Y, MA C, et al. Reservoir operation rules for controlling algal blooms in a tributary to the impoundment of Three Gorges Dam [J]. Water, 2014, 6 (10):3200-3223.
- [15] 李飞鹏,高雅,张海平,等. 流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验[J]. 湖泊科学,2015,27(1):44-49. (LI Feipeng, GAO Ya, ZHANG Haiping. Experiment on the effect of flow velocity on phytoplankton growth and composition[J]. Journal of Lake Sciences,2015,27(1):44-49. (in Chinese))
- [16] 周静,苟婷,张洛红,等. 流速对不同浮游藻类的生长影响研究[J]. 生态科学,2018,37(6):75-82. (ZHOU Jing, GOU Ting, ZHANG Luohong. The effect of flow velocity on the growth of different phytoplankton [J]. Ecological Science,2018,37(6):75-82. (in Chinese))
- [17] 宋刚福,沈冰. 基于水功能区划的河流生态环境需水量计算研究[J]. 西安理工大学学报,2012,28(1):49-55. (SONG Gangfu, SHEN Bing. Calculation research on river eco-environmental water requirements based on water function regionalization[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2012,28(1):49-55. (in Chinese))
- [18] 徐伟,董增川,罗晓丽,等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(5):454-457. (in Chinese))
- [19] 王超,王沛芳. 城市水生态系统建设与管理[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [20] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries,1976,1(4):6-10.
- [21] HUANG X, ZHONG J, FANG G, et al. Evaluation of ecological flow process of river by coupling matter element analysis and tennant method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2019,36(2):20-26.

(收稿日期:2020-08-14 编辑:熊水斌)