

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180193

# 资水河道内生态需水量研究

侯婷娟<sup>1</sup>, 高 耶<sup>2,3</sup>

(1.郴州水文水资源勘测局,湖南 郴州 423000;2.湖南农业大学生命科学技术学院,湖南 长沙 410128;  
3.湖南省水文水资源勘测局,湖南 长沙 410000)

**摘 要:**河道取水、水库蓄水、跨流域调水等水资源开发方式改变着河流自然水文情势,保留适宜的河道内生态需水能够维持河流所需的自净扩散能力,维系河势稳定,保护和维持河湖生态系统结构和功能的完整性。本文采用 Qp 法、田纳特法(Tennant Method)、逐月频率算法、逐月最小生态径流计算方法、最小月平均实测径流法 5 种方法对资水河道内生态需水量进行计算分析和比较。结果表明逐月频率算法结果较为合理,设定资水逐月河道内生态需水量,确定年生态需水量应为  $112.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 。为政府部门提供了更具操作性的分时段水量控制参考标准。

**关键词:**河道内生态需水量;资水;逐月频率算法

**中图分类号:**TV 213.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2019)05-0040-05

河道取水、水库蓄水、跨流域调水等人类水资源开发方式改变着河流自然水文情势,影响了河流生态系统结构与功能的完整性<sup>[1]</sup>。实现人类用水需求与维持河流生态系统健康用水需求之间的平衡已经成为 21 世纪河流管理面临的重要挑战<sup>[2-3]</sup>。

目前,国内外河道内生态需水的计算方法主要有水文学法、水力学法、生物栖息地模拟法、整体法等<sup>[4]</sup>。水文学法主要依据历史流量资料,根据简单的水文指标设定河流流量<sup>[5]</sup>。水力学法根据河道的各种水力几何学参数确定河流流量,如刘丹等<sup>[6]</sup>和王秀英等<sup>[7]</sup>采用生态水力半径法分别计算贾鲁河和楠溪江干流的河道内生态需水量。生境模拟法根据指示物种所需的水力条件,通过模拟生境-流量关系确定河道生态需水<sup>[8]</sup>,吴春华<sup>[9]</sup>曾在现场调查基础上,采用生境模拟法模拟雅砻江干流河道内生态需水量。整体法<sup>[10-11]</sup>从生态系统整体出发,使河道流量同时满足生物保护、栖息地维持、污染控制等多种功能。其中,水力学法应用尺度较小,容易受局部河段地貌形态影响,不能明确地将河道物理特性、河道流量与生物的栖息地偏好性联系起来<sup>[12]</sup>;生境模拟法需要指示物种与水力条件关系的长时间序

列观测资料,而且该方法仅针对指示物种,具有局限性;整体法需要多学科专家知识,计算成本较高,普适性不强。水文学法蕴含生态理论基础,计算成本相对较低,应用范围广,比较适合我国国情。

本文对资水流域河道内生态需水量计算采用的 Qp 法、田纳特法(Tennant Method)、逐月频率算法、逐月最小生态径流计算方法、最小月平均实测径流法 5 种方法属于水文学法。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区状况

资水流域面积  $28\,211 \text{ km}^2$ ,全长  $653 \text{ km}$ ,发源于广西资源县和湖南城步县,至邵阳县双江口汇合,由南向北流入洞庭湖。资水流域多年平均降水量  $1\,497.2 \text{ mm}$ ,降水的时空分布不均,具有明显的季节性和地域性,其中降雨多集中于 4~7 月,沿雪峰山脉为降雨高值区,衡邵丘陵区为降雨低值区。资水流域径流时空分布特征与降水基本一致,多年平均天然径流量  $251.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,4~7 月径流量约占全年径流量的 54%,5~6 月径流量最大,约占全年水量的 30%。12 月和次

收稿日期:2018-05-23

作者简介:侯婷娟(1986-),女,湖南郴州人,硕士研究生,主要研究方向为生态水文学。E-mail:410838418@qq.com

通讯作者:高耶(1984-),男,湖北北京山人,博士研究生,主要研究方向为淡水生态学。E-mail:66358560@qq.com

年1月水量最枯,占全年的8%左右。此外,资水流域建成了筱溪、柘溪、马迹塘、修山、六都寨等系列梯级水利水电工程,人为的削丰补枯调节径流,改变了流域自然水文情势。随着经济社会发展,生产生活用水挤占河流生态需水的问题将更加突出,有必要保留河道内一定的生态需水量,以便维持河流生态系统结构和功能的完整性。

### 1.2 数据来源

本文选取资水干流控制站冷水江站和桃江站作为代表站点计算资水河道内生态需水量。冷水江站为资水中游控制站,集水面积16260km<sup>2</sup>。桃江水文站为资水下游控制站,集水面积26748km<sup>2</sup>,控制资水流域面积的94.8%。采用1956~2016年冷水江站、桃江站历年逐月实测径流资料和还原的天然径流资料,两站天然径流量与实测径流量比较见图1。

用Mann-Kendall非参数秩次相关检验法(简称M-K法)分析实测序列和天然序列的年际变化,具体计算方法参见刘娜等人的文献<sup>[21]</sup>。当Z为正值时表示增加趋势,为负值时表示减少趋势,绝对值大于等于1.28、1.64、2.32时分别表示通过90%、95%、99%的检验。冷水江站Z=0.52,桃江站Z=0.70,表明两站实测年径流量均无明显变化趋势,逐年径流量变化呈波动状态;冷水江站Z=1.48,桃江站Z=1.22,表明两站天然年径流量呈上升趋势。

天然径流资料采用逐项还原法<sup>[19]</sup>对月实测径流资料进行还原,该方法基于水量平衡原理,控制断面天然径流量等于控制断面实测径流加上控制断面以上各项还原水量,计算公式见式(1)。

$$W=W_1+W_2+W_3+W_4\pm W_5\pm W_6\pm W_7 \quad (1)$$

式中:W为天然河川径流量;W<sub>1</sub>为实测径流河川径流量;W<sub>2</sub>为农业灌溉耗损量;W<sub>3</sub>为工业用水耗损量;W<sub>4</sub>

为城镇生活用水耗水量;W<sub>5</sub>为跨流域(或跨区间)引用水量;W<sub>6</sub>为河道分洪不能回归后的水量;W<sub>7</sub>为大中型水库蓄变量;单位均为m<sup>3</sup>。2000年前式(1)中各项还原水量数据参照湖南省第二次水资源调查成果,2000年后依据历年湖南省水资源公报数据。

### 1.3 计算方法

#### 1.3.1 最小月平均实测径流法

最小月平均实测径流法<sup>[13]</sup>依据实测径流量,以最小月平均实测径流量的多年平均值作为基本需水量。计算公式如式(2)。

$$W_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau Q_{min,i} \quad (2)$$

式中:W<sub>b</sub>为河道基本生态需水量;Q<sub>min,i</sub>为第i年实测最小月均流量;τ为换算系数,值为31.536×10<sup>6</sup>s;n为统计年数。

#### 1.3.2 田纳特法(Tennant Method)

田纳特法也称蒙大拿法<sup>[14]</sup>建立流量和水生生态系统之间的经验关系,确定年内不同时间段的生态环境需水量,使用简单方便,计算方法见式(3)。

$$W_R = 24 \times 3600 \times \sum_{i=1}^{12} M_i Q_i P_i \quad (3)$$

式中:W<sub>R</sub>为多年平均条件下维持河道一定功能的需水量(m<sup>3</sup>);M<sub>i</sub>为第i月天数;Q<sub>i</sub>为第i月多年平均流量(m<sup>3</sup>/s);P<sub>i</sub>为第i月生态环境需水百分比(%)。

采用田纳特法计算生态需水量的关键在于选择合理的流量百分比(见表1)。本文按照河道内生态环境状况等级“好”,枯水期选取多年平均流量的20%作为河道内生态需水量,丰水期选取多年平均的40%作为河道内生态需水量。资水流域枯水期为10月~次年3月,汛期为4~9月。

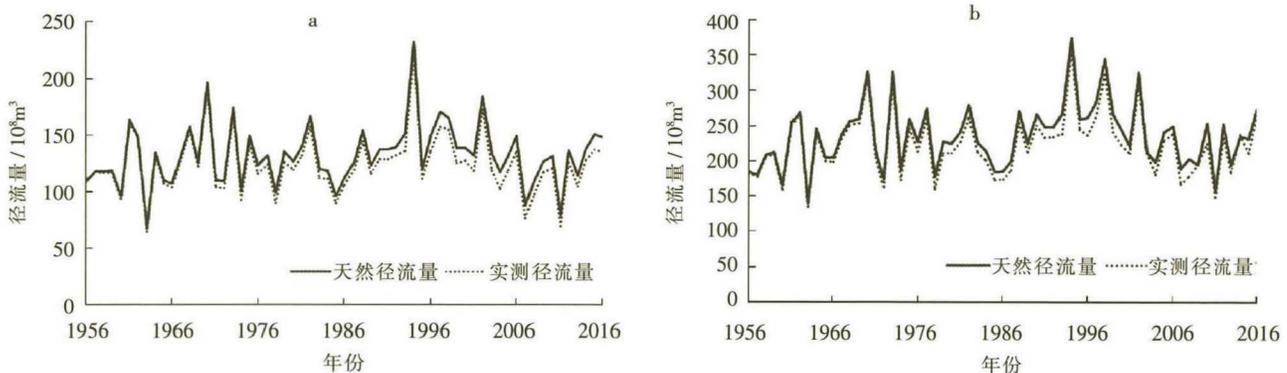


图1 天然径流量与实测径流量比较图(a:冷水江;b:桃江)

Fig.1 Comparison of natural runoff and measured runoff (a: Lengshuijiang;b: Taojiang)

表1 不同河道内生态环境状况对应的流量百分比  
Table1 The percentage of flow corresponding to ecological environment in different river courses

生态环境状况	占同时段多年年均天然流量百分比/%	
	年内较枯时段	年内较丰时段
最大	200	200
最佳	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差	10	10
极差	0~10	0~10

### 1.3.3 逐月频率计算法

逐月频率计算法计算包括季节频率计算法和新逐月频率计算法<sup>[15]</sup>。季节频率计算法是根据历史流量资料将一年划分为丰、平、枯3个时期,对各个时期拟定不同保证率(枯水期90%保证率、平水期70%保证率、丰水期50%保证率)<sup>[16-17]</sup>,最后分别计算各个时期设定的不同保证率下的径流量,得到生态径流过程。新逐月频率计算法计算每个月相同保证率下的径流量,求得河流适宜生态径流过程。这两种方法都适用于计算大中型且有连续流量过程的河流。资水是典型的南方河流,未出现断流,过程连续。本文根据资水流域的径流特点采用新逐月频率计算法,取90%保证率计算生态需水量。

### 1.3.4 逐月最小生态径流计算方法

逐月最小生态径流计算法根据逐月平均径流系列资料,取每个月平均系列的最小值作为该月的最小的生态环境需水量,即全年最小生态径流过程<sup>[18]</sup>。

### 1.3.5 Q<sub>p</sub>法

Q<sub>p</sub>法又称不同频率最枯月平均值法,以长时间序列( $n \geq 30$  a)天然月平均径流量为基础,计算不同频率下的最枯月平均径流量。《河湖生态环境需水计算规范》(SL/Z712-2014)规定Q<sub>p</sub>法计算出的径流量作为节点基本生态环境需水量的最小值。频率根据河湖水资源开发利用程度、规模、来水情况等实际情况确定,宜取90%或者95%,实测水文资料应进行还原和修正。本文根据资水流域情况将每年的最小月天然平均径流量进行频率计算,取保证率90%的径流量作为生态水量。

### 1.3.6 满足度评价方法

生态需水满足度定义为一定时期内,河道内径流

量大于生态需水阈值的序列长度与总序列长度的比值<sup>[20]</sup>。能够反映河道内水资源量是否满足维持河道生态系统稳定的要求,分析其生态用水保障存在的主要问题和原因,为加强流域水资源调度和生态环境治理修复等工作奠定基础。本文采用2000~2016年系列逐月实测径流量、逐月天然径流量数据分别与计算的河道内生态需水量进行比较评价。

## 2 结果与分析

根据1956~2016年冷水江站还原的历年天然径流资料,采用Q<sub>p</sub>法、最小月平均实测径流法、田纳特法、逐月最小生态径流计算方法、逐月频率计算法计算河道内生态需水量分别为18.84,30.00,44.88,39.67,60.98 $\times 10^8$ m<sup>3</sup>,分别占多年平均径流量14.2%,22.7%,33.9%,30.0%,46.1%。各种方法计算河道内生态需水量的逐月比较见图2。

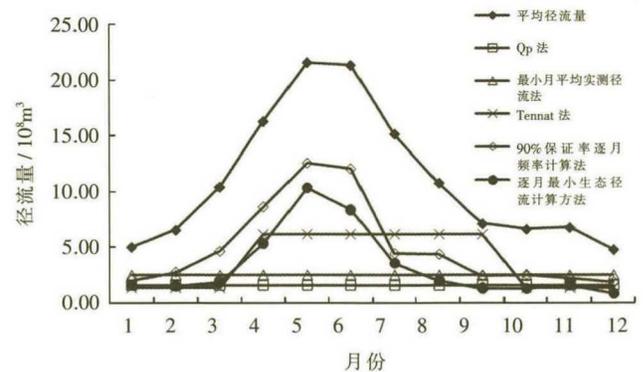


图2 冷水江站各种方法计算河道内生态需水量逐月比较图  
Fig.2 The in-stream environmental flow calculated for the Lengshuijiang station

根据1956~2016年桃江站还原的历年天然径流资料,采用Q<sub>p</sub>法、最小月平均实测径流法、田纳特法、逐月最小生态径流计算方法、逐月频率计算法计算河道内生态需水量分别为28.20,68.04,79.38,66.34,112.1 $\times 10^8$ m<sup>3</sup>,分别占多年平均径流量11.9%,28.8%,33.6%,28.1%,47.5%。不同方法计算河道内生态需水量的逐月比较见图3。

比较不同生态需水量计算方法的结果可得:

(1)各种算法生态需水量相差较大,Q<sub>p</sub>法的计算值最小,占多年平均径流量的10%多;90%保证率逐月频率计算法的生态需水量最大,占多年平均径流量的40%多,达到Tennant法等级“好”所要求的河道生态环境水量。

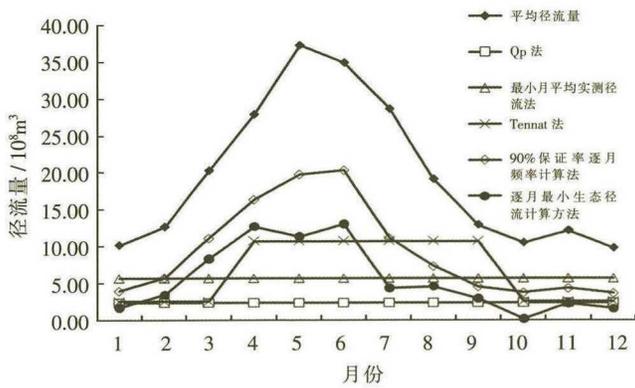


图3 桃江站各种方法计算河道内生态需水量逐月比较图

Fig.3 The in-stream environmental flow calculated for the Taojiang station

(2)Qp 法与最小月平均实测径流法仅是一个生态水量,全年不同时间段的生态水量都相同。Tennant 法将全年分为汛期与非汛期,分别提供一个生态流量值,即全年仅 2 个生态水量值。最小月平均实测径流法容易受到人类活动影响,而且这 3 种方法没有考虑自然径流情势变化。

(3)逐月最小生态径流计算方法和 90% 保证率逐月频率算法每个月提供一个生态需水量值,考虑了河流的季节性变化,汛期的生态流量大,枯水期的生态流量少,较好协调了经济需水与河道生态需水量的关系。但是逐月最小生态径流计算方法只是能保证河流生态系统在自然条件最不利情况下不致受到较大损坏,而且容易受极端事件影响,如 1956~2016 年期间 10 月份出现特殊水情,最小生态径流量为  $0.1848 \times 10^8 \text{m}^3$ ,把这个值定为 10 月的河流生态需水量,非常不利于河流生态系统的保持。

综上所述,从维护河流健康环境和可持续发展的角度出发 90% 保证率逐月频率算法确定的生态水量是比较合适的。

### 3 满足度评价

由图 4 可知,冷水江站 4 月和 5 月实测径流量满足度较低,分别为 64.7% 和 76.2%;4 月还原径流量满足度较低,为 70.6%;其它月份生态需水满足度较高,均达到 80% 以上。此外,用 M-K 法分析 1956~2016 年序列中 4 月份还原径流量的年际变化,  $Z=-1.50 (P>90\%)$ ,4 月份还原径流量呈显著减少趋势,说明主要是气候和流域下垫面变化共同作用导致评价期 4 月份还原径流量和实测径流量满足度较低。

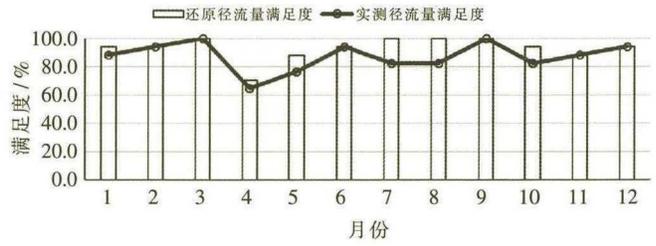


图4 冷水江满足度逐月过程图

Fig.4 The monthly assuring degree process for Lengshuijiang River

由图 5 可知,桃江站 4 月实测径流量满足度较低,为 76.5%;1 月还原径流量满足度较低,为 76.5%;其余月份满足度高,均大于 80%。用 M-K 法分析 1956~2016 年序列中 1 月份还原径流量的年际变化,  $Z=1.90 (P>95\%)$ ,呈显著上升趋势,但是由于评价期年 1 月还原径流量波动幅度较大,低水年出现次数较多,导致评价时期还原径流量满足度较低。

由于逐项还原法逐项还原断面以上未实测到的水量,加上断面实测径流,还原为断面天然径流量,实际上仅还原了水利工程增加和损耗水量对径流的影响,但未还原下垫面状态改变对径流的影响,是当年下垫面上的一种天然年径流<sup>[9]</sup>。冷水江站 7 月和 8 月与桃江站 3 月和 8 月还原径流量满足度大于实测径流量满足度;桃江站 1 月、2 月、10 月、11 月和 12 月实测径流量满足度大于还原径流量满足度。因此,实测径流量满足度和还原径流量满足度之间的差异主要受流域水利工程削峰补枯、人为调节河道内径流过程所导致。

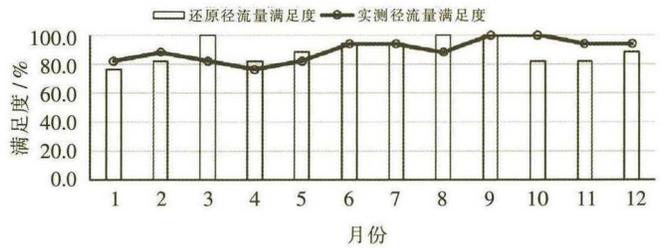


图5 桃江满足度逐月过程

Fig.5 The monthly assuring degree process for the the Taojiang River

### 4 结论

(1)经多种方法比较分析,逐月频率算法计算的资水河道内生态需水量更为合理,冷水江站河道内生态需水量 5 月最大,为  $10.31 \times 10^8 \text{m}^3$ ,12 月最小,为  $0.87 \times 10^8 \text{m}^3$ ;桃江站河道内生态需水量 6 月最大,为

20.33×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,12月最小,为3.65×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

(2)生态需水量满足度评价结果表明,资水生态需水量满足度较高,冷水江4月和5月与桃江4月实测径流量满足度较低,其余月份满足度较高。实测径流量满足度与还原径流量满足度之间的差异主要受流域水利工程削峰补枯、人为调节河道内径流过程所导致。

#### 参考文献:

- [1] Rosenberg D M, McCully P, Pringle C M. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction [J]. *Bio-Science*, 2000,50(9):746-751.
- [2] Petts G E, Morales Y, Sadler J. Linking hydrology and biology to assess the water needs of river ecosystems [J]. *Hydrological Processes*, 2006,20:2247-2251.
- [3] Palmer M A, Bernhardt E S. Hydroecology and river restoration: ripe for research and synthesis [J]. *Water Resources Research*, 2006,42(3).
- [4] 王西琴. 河流生态需水理论、方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (WANG Xiqin. *River Environmental Water Requirements* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 王法磊. 流域生态环境需水研究—以抚河流域为例[D]. 南昌: 江西师范大学, 2010. (WANG Falei. *The Study of Ecological Water Demand in River Basin—Taking the Fuhe River Basin as an Example* [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2010. (in Chinese))
- [6] 刘丹, 邢琼琼, 郭欣欣, 等. 基于生态水力半径法的贾鲁河生态需水量计算[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(1):105-110. (LIU Dan, XING Qiongqiong, GUO Xinxin, et al. Ecological hydraulic radius approach and its applications in ecological water demand calculation in the Jialu River Basin [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018,29(1):105-110. (in Chinese))
- [7] 王秀英, 白音包力举, 许凤冉. 基于水生态保护目标的河道内生态需水量研究[J]. *水利水电技术*, 2016,47(2):63-68. (WANG Xiuying, Baiyinbaoligao, XU Fengran. Aquatic ecosystem protection objective-based study on eco-water demand of river channel [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016,47(2):63-68. (in Chinese))
- [8] Bovee K D. A guide to stream habitat analyses using the instream flow incremental methodology: instream flow information [R]. Washington: US Fish and Wildlife Service, 1982:67-73.
- [9] 吴春华. 雅砻江干流河道内生态需水量生境模拟法研究[J]. *生态科学*, 2007,(6):536-539. (WU Chunhua. The habitat simulation method of research on the ecological flow in river course of Yalong mainstream [J]. *Ecological Science*, 2007,(6):536-539. (in Chinese))
- [10] King J M, Low D. Instream flow assessment for regulated rivers in South Africa using the building block methodology [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1998,1:109-124.
- [11] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirement for South African rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 2001,241:140-151.
- [12] 毛熹, 张杰豪, 罗婷, 等. 生态需水计算方法综述[J]. *水资源研究*, 2017,6(3):215-220. (MAO Xi, ZHANG Jiehao, LUO Ting, et al. Overview of calculation method for ecological water requirement [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2017,6(3):215-220. (in Chinese))
- [13] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. *水科学进展*, 2005,16(4):617-622. (ZHAO Xining, Wu Pute, Wang Wanzhong, et al. Research advance on eco-environmental water requirement [J]. *Advances in Water Science*, 2005,16(4):617-622. (in Chinese))
- [14] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources[A]. *Proceedings of Symposium and Specility Conference on Instream Flow Needs II* [C]. Bethesda: American Fisheries Society, Maryland, 1976:359-373.
- [15] 李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. *生态学报*, 2007,27(7):2916-2931. (LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(7):2916-2931. (in Chinese))
- [16] 于龙娟, 夏自强, 杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004,32(1):18-22. (YU Longjuan, XIA Ziqiang, DU Xiaoshun. Connotation of minimum ecological runoff and its calculation method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004,32(1):18-22. (in Chinese))
- [17] 陈竹青. 长江中下游生态径流过程的分析计算 [D]. 南京: 河海大学出版社, 2002. (CHEN Zhuqing. *Ecological Flow Requirements for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River* [D]. Nanjing: Hohai University Press, 2002. (in Chinese))
- [18] 汪秀丽. 河流生态流量浅论[J]. *水利电力科技*, 2007,33(1):20-29. (WANG Xiuli. River ecological flow theory of shallow [J]. *Water Resources and Electric Power*, 2007,33(1):20-29. (in Chinese))
- [19] 沈红. 天然径流还原计算方法初步探讨 [J]. *水利规划与设计*, 2003,(3):15-18. (SHEN Hong. Preliminary discussion on calculation method of natural runoff reduction [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2003,(3):15-18. (in Chinese))
- [20] 潘扎荣, 阮晓红. 淮河流域河道内生态需水保障程度时空特征解析[J]. *水利学报*, 2015,46(3):280-290. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong. Spatio-temporal analysis of satisfactory degree of ecological water demand in Huaihe River basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015,46(3):280-290. (in Chinese))
- [21] 刘娜, 谢永宏, 张称意, 等. 澧水水沙变化特征及成因分析[J]. *水文*, 2014,34(2):87-92. (LIU Na, XIE Yonghong, ZHANG Chengyi, et al. Characteristics of water and sediment discharge in Lishui River and factor analysis [J]. *Journal of China Hydrology*, 2014,34(2):87-92. (in Chinese))

(下转第60页)

设施,制订理论线时,在淹没出流状态未考虑淹没系数 $C_f$ ,中高水理论线推算流量数据较实测偏大。因此要按照水文巡测规范要求,做好洪水过程的连续监测,开展水位流量关系的定线工作,确定断面报汛曲线。

(3)影响三角形剖面堰流量精度的物理因子主要涉及施工精度、沉降、淤积、堰下顶托及堰上水头监测位置等,特别是堰下顶托会造成理论线和实测定线吻合的水位量程缩短,对应流量量级缩小,而堰上严重淤积则造成水位抬高而实际流量变小。因此在考虑该类型堰时,应选择顺直且行洪通畅处河段,堰形断面按照矩形或梯形对称进行设计,并细化施工工艺,加强清淤运维,开展人工巡测定线比对等工作,发挥小水时三角形剖面堰的水位流量单值化功能。

(4)通过三角形剖面堰建设,改变了河道断面的水流形态,使水位流量呈现单一关系,在低水监测时可靠性高,可为北京地区及北方干旱地区河道提供小水的精测方法,也可在海绵城市项目中合适断面进行推广应用,特别适用于生态流量的水量计量。

#### 参考文献:

- [1] SL537-2011, 水工建筑物与堰槽测流规范[S]. (SL537-2011, Code for Measurement of Discharge by Hydraulics Structures, Weirs and Flumes [S]. (in Chinese))
- [2] SL247-2012, 水文资料整编规范 [S]. (SL247-2012, Code for Hydrologic Data Processing [S]. (in Chinese))
- [3] GB50179-2015, 河流流量测验规范[S]. (GB50179-2015, Code for Liquid Flow Measurement in Open Channels [S]. (in Chinese))

## Research on Discharge Calculating for Water Stage at Triangular Cross-section Weirs in Beijing

ZANG Min, JI Mingfeng, WEN Zixi, ZHANG Xin, WANG Yang

(Beijing Hydrology Center, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of monitoring low ecological flow and realize the fine management of water resource, this paper studied the relationship between the water stage and discharge by triangular weirs at some stream cross-sections in Beijing. The water stage at the weirs were measured continuously. The comparison between the measured results and theoretical relationship of the water stage and discharge at triangular weir cross-sections shows that the flow head of the weir in the low water interval deviated from the theoretical value within the the reasonable range. Therefore, the small flow could be calculated with this theoretical relationship curve and the medium or large flow could be calculated with the calibrated relationship curve. These weirs with triangular cross-sections could be widely applied to some typical streams that meet the requirements of flood control, water resources and water quality evaluation, which also contribute to monitor the ecological discharge at some typical cross-sections of sponge-city project.

**Key words:** hydrometry; weir with triangular cross-section; theoretical curve; comparative analysis

(上接第 44 页)

## Analysis of Ecological Water Demand in Zishui River Channel

HOU Tingjuan<sup>1</sup>, GAO Ye<sup>2,3</sup>

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chenzhou City, Chenzhou 423000, China;

2. College of Life Science, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China)

**Abstract:** River water intake, reservoir storage and inter-basin water transfer have changed the natural hydrological regime of rivers around the world. Retaining sufficient ecological water demand is the key to maintain river ecosystem integrality. According to Qp method, Tennant method, monthly frequency calculation method etc., monthly ecological water demand in the Zishui River Channel were calculated respectively, and the calculation results by different calculation methods were compared and analyzed. The minimum annual ecological water demand of  $112.1 \times 10^8 \text{m}^3$  was recommended.

**Key words:** in-stream ecological water demand; Zishui River; monthly frequency calculation method