

# 基于生态水力半径法的武江流域生态流量研究

高雪山<sup>1,2</sup>, 刘树锋<sup>3</sup>, 贾建辉<sup>2</sup>, 关帅<sup>3</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 广东省水利厅, 广东 广州 510635;

3. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

**摘要:** 采用综合反映水生生物需求和河道断面信息的生态水力半径法, 对武江北上北江特有珍稀鱼类省级自然保护区内的生态流量和生态水位进行估算。结果表明: 生态水力半径法计算的生态流量过程线上存在明显的低流量、高流量和流量脉冲等水文要素, 符合鱼类的自然需求; 天然径流量下生态水力半径法估算的生态需水均可得到满足, 但武江上梯级开发较多, 需进行生态水位开展闸坝联合调度来保障河道的生态需水, 确保犁市(二)站断面处各月份水深不小于平均生态水深。

**关键词:** 生态流量; 生态水力半径; 生态流速; 武江流域

中图分类号: TV211.2; Q178.1<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0008-05

## Research on ecological instream flow of Wujiang River Basin based on ecological hydraulic radius approach

GAO Xueshan<sup>1,2</sup>, LIU Shufeng<sup>3</sup>, JIA Jianhui<sup>2</sup>, GUAN Shuai<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Water Resources Department of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China;

3. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** With the ecological hydraulic radius approach reflecting aquatic needs and channel section information, the ecological instream velocity and ecological water level in the provincial natural reserve of rare and endemic fishes in Beijiang River of Wujiang River were estimated. The results showed that hydrological elements such as low velocity, high velocity, and flow pulse featured on the ecological instream velocity process curve by ecological hydraulic radius approach, meeting the natural demands of fishes. The ecological water demand estimated by ecological instream velocity process at natural runoff could be met. Due to the cascade development on Wujiang River, the management of gate dam operation is required to guarantee the ecological water demand of the river, so as to ensure the appropriate water depth of Lishi (II) station, which is not less than the mean ecological waterdepth.

**Key words:** ecological instream flow; ecological hydraulic radius; ecological instream velocity; Wujiang River Basin

## 1 研究背景

广东省小型水利工程数量较多, 仅小型水电站就有 9 847 座, 约占全国小水电站总数的 21%。水利工程在发挥防洪、供水、灌溉等社会效益的同时, 受开发理念、技术、资金等因素制约, 不可避免地会对河流的水环境、水动力甚至水温等产生影响<sup>[1-3]</sup>, 主要表现

在: 一是改变河流水文特征, 局部河段减水脱流, 影响河流生态和下游生产生活用水<sup>[4]</sup>; 二是闸坝形成阻隔, 破坏河流连通性, 影响洄游鱼类等水生生物生境<sup>[5]</sup>。部分小水电在实际运行中片面强调经济效益, 造成下游河段时常脱水, 尤其是来水较少的枯水期, 电站的拦水或引水发电, 常造成数周甚至数月的断流, 对下游河道的生态环境、生态系统造成严重的破

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779165); 广东省水利科技创新项目(2017-12)

作者简介: 高雪山(1976-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事水资源管理问题研究。

通讯作者: 关帅(1992-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源研究。

坏。国务院印发的《水污染防治行动计划》明确提出“科学确定生态流量,维持河湖基本生态用水需求,重点保障枯水期生态基流”,因此如何满足下游河道的生态流量已成为亟待解决的课题<sup>[6-9]</sup>。

目前生态流量的研究方法较多,据不完全统计,全球生态流量计算方法已超过200种<sup>[10-12]</sup>,按计算原理可概括为:水文学法、水力学法、栖息地法、整体分析法等4类<sup>[13-15]</sup>,不同的方法计算出的生态流量计算结果相差较大,且各种方法均存在各自的局限和不足<sup>[16]</sup>。水文学法操作简单但缺乏对生物需求的关注;水力学法体现不出季节性,同时该方法假定河道在时间尺度上是稳定的,并且所选择的横断面能够确切地表征整个河道的特征,而实际上并非如此<sup>[17]</sup>;栖息地法需要大量的人力物力,操作复杂;整体分析法缺乏物种对水量和水质需求的关注,且现有的数据一般难以满足计算需要。生态水力半径法<sup>[18-21]</sup>克服了这些方法的不足,赋予过水断面生态学的意义,通过建立断面面积、断面水位等与生态水力半径的关系,利用曼宁公式计算出河道的生态需水量,计算结果综合反映了水生生物需求和河道断面信息,但其在南方河流中目前仍鲜有应用。

鉴于此,本文采用生态水力半径法,选取北江上游的武江支流为试点,对生态水力半径法计算生态流量的过程进行实例分析,以期对珠江流域生态需水的研究提供一种新的思路与研究视角。

## 2 研究区域概况及数据来源

### 2.1 研究区域概况

武江<sup>[22]</sup>是北江流域的一级支流,位于东经112°23′~113°36′,北纬24°46′~25°41′之间。武江发源于湖南省三峰岭,于韶关市区沙洲尾汇入北江,全长260 km。武江河在广东境内共有7个梯级,分别为乐昌峡水库、张滩电站、富湾电站、长安电站、七星墩电站、塘头电站与靖村电站。研究区域概况和水文站分布见图1。

北江特有珍稀鱼类省级自然保护区的核心区位于乐昌峡下游的武江河上,保护区对象为北江特有的、珍稀的、濒危鱼类和主要经济鱼类及其栖息地,武江河上各梯级水利工程应重点保障鱼类自然保护区的需求。

### 2.2 数据来源

本文从《中华人民共和国水文年鉴—珠江流域水文资料(北江区)》及广东省水文局等部门收集了武江犁市水文站点1956年至2016年共61年的逐

月流量资料与2016年的实测大断面资料<sup>[23]</sup>。犁市水文站位于北江特有珍稀鱼类省级自然保护区核心区内,是武江上的控制性站点,设立于1955年4月,于1979年1月向下游左岸600 m处迁移,改称犁市(二)站。



图1 研究区域概况和水文站位置

## 3 研究方法

生态水力半径法是刘昌明院士<sup>[16,18]</sup>最先提出的,后来赵长森等<sup>[6,19]</sup>对其进行了改进。生态水力半径是在曼宁公式基础上,利用水力半径 $R$ 与过水断面平均水流流速 $\bar{v}$ 、水力坡度 $J$ 和糙率 $n$ 之间的关系进行计算的<sup>[24-25]</sup>,其计算公式为:

$$R = n^{3/2} \cdot (\bar{v})^{3/2} \cdot J^{-3/4} \quad (1)$$

式中: $R$ 为水力半径,m; $n$ 为河道糙率; $\bar{v}$ 为断面平均流速,m/s; $J$ 为河道坡度。

在公式(1)中,赋予断面平均流速 $\bar{v}$ 一定生态学意义,如水生生物产卵的脉冲流速、防止泥沙淤积的流速、阻止咸潮上溯的流速等,此时流速 $\bar{v}$ 是指为了保护一定的生态目标,维持河道生态系统或保持其生态功能的生态流速,由此计算出的水力半径就变成了具有一定生态意义的生态水力半径<sup>[24]</sup>。

由此可见,只要根据不同的保护目标确定出对应条件下的生态流速值,计算出的生态水力半径就反映了水生生物需求和河道断面的综合信息,进而推求得到的生态流量就具备了生态学与水力学的综合意义。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 确定 $R-A$ 、 $R-Z$ 关系

根据水文年鉴中实测的断面资料,绘制犁市

(二)站 2016 年实测的大断面,大断面示意图见图 2。

利用最小二乘法分别拟合不同水位 ( $Z$ ) 和过水面积 ( $A$ ) 与水力半径 ( $R$ ) 的关系,可以得到  $R-A$ 、 $R-Z$  关系曲线,结果见图 3。由图 3 可以看出,犁市(二)站的  $R-A$  与  $R-Z$  拟合关系均较好,相关系数均在 0.99 以上。

#### 4.2 确定生态流速

北江特有珍稀鱼类省级自然保护区内鱼类共有 97 种,隶属于 8 目,16 科,80 属。保护区内主要有产漂流性卵、产草属性卵、产黏沉性卵与产石隙隐藏性卵等 4 类鱼类产卵场<sup>[26]</sup>。其中:(1)产漂流性卵的时间为 4-6 月,产卵水流 0.3 m/s 以上;(2)产草属性

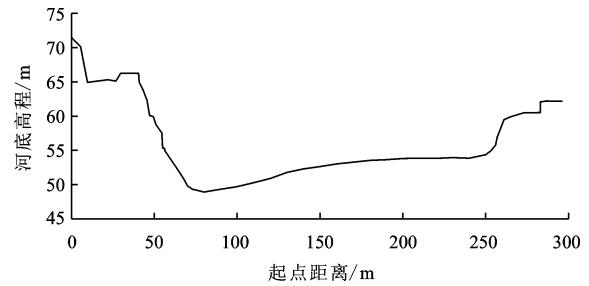
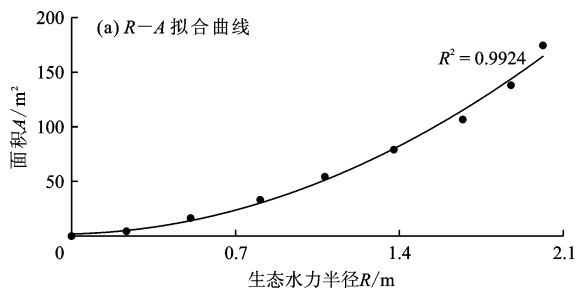


图 2 2016 年武江犁市(二)站实测大断面

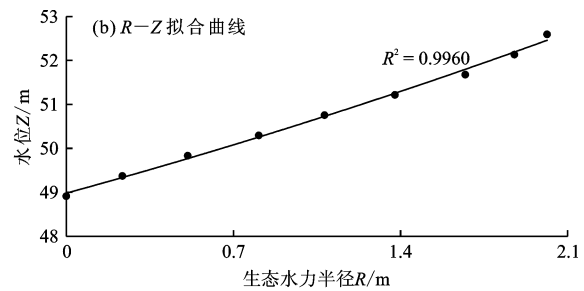


图 3 武江犁市(二)站  $R-A$  与  $R-Z$  曲线拟合效果图

选取保护区内珍稀鱼类和重要紧急鱼类中的赤眼鳟为代表鱼类。根据鱼类的生活习性,赤眼鳟在越冬期、产卵期和肥育期有不同的喜好流速,其中越冬期和肥育期流速需求较低;产卵期对水流变化敏感,需要流量脉冲、高流量及漫滩流量等水文过程来促进产卵。

根据水利部南京水利科学研究所编著的《鱼道》<sup>[27]</sup>,赤眼鳟各月份喜好流速见表 1。

表 1 赤眼鳟喜好流速<sup>[27]</sup>

生命周期	月份	流速/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
越冬期	12	0.20
	1	0.20
	2	0.20
	3	0.30
产卵期	4	0.55
	5	0.60
	6	0.66
	7	0.55
肥育期	8	0.40
	9	0.30
	10	0.30
	11	0.30

卵的为犁市产卵场和黄田坝产卵场;(3)产黏沉性卵的季节为 5-7 月份,水流 0.3 m/s 以上;(4)产石隙隐藏性卵的季节为 5-8 月份,水流缓慢。

由表 1 可以看出赤眼鳟越冬期对流速要求较低,可将鱼类的感应流速 0.2 m/s 作为越冬期流速下限,越冬期于 3 月下旬结束,鱼类对流速需求逐渐增大。4 月下旬至 8 月上旬为繁殖季节,其中 6-7 月为盛产期,产卵对流速要求高,其产卵场平均流速通常为 0.5~0.6 m/s。6、7 月为赤眼鳟产卵旺季,流速的需求于 6 月达到最大,为 0.66 m/s,7 月底产卵期临近结束,所需流速降至 0.5 m/s。8 月份赤眼鳟进入肥育季节,对流速需求有所降低,流速范围为 0.3~0.4 m/s。

#### 4.3 确定生态水力半径与生态流量

根据 2016 年水文年鉴中的实测资料,犁市(二)站的糙率  $n$  定为 0.039,河道坡度  $J$  定为 0.154‰,根据公式(1),结合表 1 中赤眼鳟各月份喜好的流速值,可计算出各月份对应的生态水力半径,计算结果见表 2。

根据公式(1),结合  $R-A$  关系曲线,可计算得到河道内生态流量。

$$Q_{\text{生态}} = \frac{1}{n} R_{\text{生态}}^{2/3} A J^{1/2} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{生态}}$  为河道生态流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $R_{\text{生态}}$  为生态水力半径, $\text{m}$ ;  $A$  为河道过水断面面积, $\text{m}^2$ 。

生态水位是指生态流量所对应的河流水位,在

指导水库、电站等水利工程基于生态流量保障的调度方面,生态水位往往比生态流量的数值更具有指导意义。根据生态水力半径,结合 R-Z 关系,可计算得到生态流量对应条件下的生态水位,计算结果见表 2。

表 2 各月份生态水力半径法计算结果

生命周期	月份	生态水力半径/m	生态流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	生态水位/m	对应的平均生态水深/m
越冬期	12	0.50	11.4	49.8	0.8
	1	0.50	11.4	49.8	0.8
	2	0.50	11.4	49.8	0.8
	3	0.92	33.4	50.4	1.5
产卵期	4	2.27	114.1	53.0	4.1
	5	2.59	160.2	53.6	4.7
	6	2.99	232.7	54.5	5.6
	7	2.27	114.1	53.0	4.1
肥育期	8	1.41	59.4	51.3	2.4
	9	0.92	33.4	50.4	1.5
	10	0.92	33.4	50.4	1.5
	11	0.92	33.4	50.4	1.5

4.4 讨论

为了对生态水力半径法计算生态流量的结果进行评估,本文同时采用 Tennant 法<sup>[28]</sup>对犁市(二)站不同月份的生态流量进行计算,计算结果见表 3。将两种方法的计算结果进行对比分析,比较结果见图 4。

表 3 Tennant 法计算生态流量

生态流量划分	生态流量计算结果/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
	一般用水期 (10-次年3月)	鱼类产卵育幼期 (4-9月)
最大	385.18	383.18
最佳	193.59	193.59
极好	77.84	116.76
非常好	58.68	97.80
好	39.32	76.24
中	19.06	57.18
最小	19.06	19.06

由图 4 可知,12-次年 2 月份,生态水力半径法的计算结果略小于 Tennant 法标准的“最小”标准;3、8、10 和 11 月份,生态水力半径法的计算结果位于 Tennant 法标准的“中”与“好”之间;4 和 7 月份,

生态水力半径法的计算结果位于 Tennant 法标准的“非常好”与“极好”之间;5 月份生态水力半径法的计算结果位于 Tennant 法标准的“极好”与“最佳”之间;6 月份生态水力半径法的计算结果位于 Tennant 法标准的“最佳”与“最大”之间;9 月份生态水力半径法的计算结果位于 Tennant 法标准的“最小”与“中”之间。可以看出采用生态水力半径法的计算结果均符合 Tennant 法河流生态用水标准,且能更好地反映鱼类生活习性及其河流的季节性变化。由于 Tennant 法只根据水文资料来估算生态流量,其计算出的生态流量无明确的保护目标,因此相较之下,生态水力半径法能更好地反映了水生生物需求和河道水力学综合信息,计算出的生态流量更加合理。

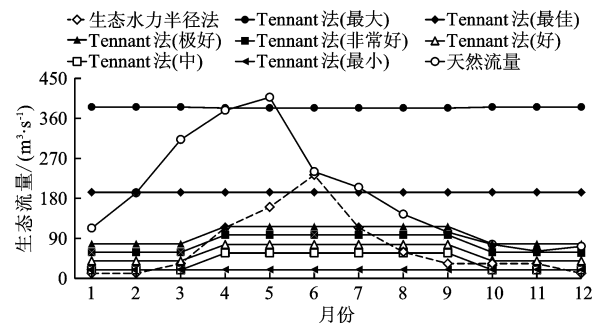


图 4 生态水力半径法与 Tennant 法生态流量计算结果比较

由图 4 中的生态水力半径法计算结果与犁市(二)站天然月平均流量的对比分析可知,生态水力半径法的计算结果与天然来水过程比较相似,生态流量过程线上存在明显的低流量、高流量和流量脉冲等水文要素,符合鱼类的自然需求。另外鱼类对生态流量需求最大的月份为 6 月份,而犁市(二)站最大月平均流量出现在 5 月份,二者存在一个月的时间差,但各月份的天然流量仍能满足鱼类的生态需水要求。不过由于武江上已修建较多的梯级开发水电站工程,梯级电站的运行调度改变了河流的天然状态,因此为保障赤眼鳟的生态流量,武江上需开展梯级调度。在梯级调度中,水位和水深往往比流量更具有操作性。

图 5 为犁市(二)站逐月最小生态流量对应的平均生态水深,由表 2 和图 5 中的平均生态水深可以看出,为了满足赤眼鳟在越冬期、产卵期和肥育期对流速的需求,保证其正常的生理繁殖等活动,保护区及上游的水利工程需通过开展闸坝调度,确保犁市(二)站位置处,12-次年 2 月份期间的水深不低于 0.8 m,3 月份水深不低于 1.5 m,4 月份水深不低于 4.1 m,5 月份水深在 4.7 m 以上,6 月份水深在

5.6 m以上,7月份水深在4.1 m以上,8月份水深在2.4 m以上,9-11月份水深在1.5 m以上。

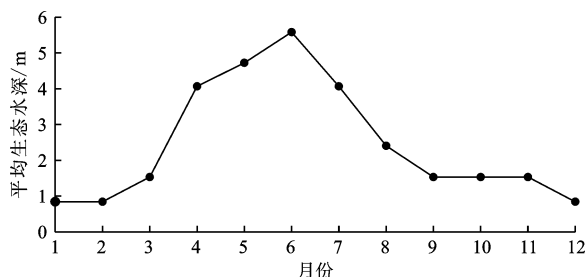


图5 犁市(二)站逐月最小生态流量对应的平均生态水深

## 5 结论

本文采用刘昌明院士最先提出、后经赵长森等对其进行改进的生态水力半径法,以北江上游的主要支流武江河为例,选取北江特有珍稀鱼类省级自然保护区内的珍稀鱼类和重要紧急鱼类中的赤眼鲮为代表鱼类进行计算,主要结论如下:

(1)在河道断面固定的条件下,生态流量主要由生态流速确定。非产卵期,鱼类对生态流量的需求较低,能为生产生活预留更多的水资源,为枯水期的优化调度提供更多空间;在产卵期,鱼类所需生态流量最大,需要较大流量来维持生态系统的平衡。

(2)生态水力半径法的计算结果与天然来水量比较相似,生态流量过程线上存在明显的低流量、高流量和流量脉冲等水文要素,计算结果均符合 Tennant 法河流生态用水标准,且能更好地反映鱼类生活习性及河流的季节性变化。

(3)为维持河道内鱼类的生态需水,需要通过闸坝联合调度,确保犁市(二)站位置处,12-2月份期间的水深在0.8 m以上,3月份水深在1.5 m以上,4月份水深在4.1 m以上,5月份水深在4.7 m以上,6月份水深不低于5.6 m,7月份水深不低于4.1 m,8月份水位不低于2.4 m,9-11月份水深不低于1.5 m。

实际应用中生态流速的选择对计算结果影响较大,由于河流生态保护目标的不同,生态流速的选择往往不同,因此本方法仍需要进一步的研究和完善。

### 参考文献:

[1] 董哲仁. 河流生态修复[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.  
[2] 张秀琴,王亚华. 中国水资源管理适应气候变化的研究综述[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(12):2061-2068.

[3] 封志明,杨艳昭,游珍. 中国人口分布的水资源限制性与限制制度研究[J]. 自然资源学报,2014,29(10):1637-1648.  
[4] 孙小利,赵云,于爱华. 国外水电站生态流量的管理经验[J]. 水利水电技术,2010,41(2):13-16.  
[5] 魏卿,薛联青,张敏,等. 淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J]. 水资源保护,2019,35(4):89-94.  
[6] ZHAO Changsen, YANG Shengtian, LIU Junguo, et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: A practical method for streamflow regulation and pollution control[J]. Water Research,2018,141:96-108.  
[7] ZHANG Qiang, ZHANG Zongjiao, SHI Peijun, et al. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River Basin, China[J]. Global & Planetary Change,2018,160:61-74.  
[8] XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):1-12.  
[9] 陈昂,吴森,王鹏远,等. 中国水电工程生态流量实践主要问题与发展方向[J]. 长江科学院院报,2019,36(7):33-40.  
[10] 易斐. 分汉型河道生态流量过程研究[D]. 北京:清华大学,2010.  
[11] 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.  
[12] HUGHES D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African Rivers[J]. Journal of Hydrology,2001,241(1):140-151.  
[13] HUGHES D A, HANNART P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology,2003,270(3/4):167-181.  
[14] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries Management & Ecology,1976,1(4):6-10.  
[15] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于生态保护目标的太子河下游河道生态需水量计算[J]. 环境科学学报,2010,30(7):1466-1471.  
[16] LIU Changming, ZHAO Changsen, XIA Jun, et al. An instream ecological flow method for data-scarce regulated rivers[J]. Journal of Hydrology,2011,398:17-25.  
[17] 吴春华,轩晓博,刘达通,等. 调水工程河道内生态需水量研究及实例分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(Z1):524-530.

(下转第18页)

- 的动态吸附研究[J]. 环境工程, 2011, 29(S1):289 - 293.
- [6] 徐卫华,冯莉,刘腾飞. 羟基磷灰石除氟滤料的吸附平衡及动力学[J]. 环境工程学报, 2012, 6(7):2351 - 2355.
- [7] SHEN Feng, CHEN Xueming, GAO Ping, et al. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(3-6): 987 - 993.
- [8] 左卫元,黄汉猛,蒋小龙. 铁/铝复合氧化物对氟离子的吸附[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(04):110 - 112 + 118.
- [9] 陈涛,韩卓育,贾旭,等. 改性粘土除氟剂处理高氟地下水研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(9):40 - 44.
- [10] 陈红红,黄丽玫,毋福海,等. 载铝改性人造沸石对含氟水除氟效果的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7):42 - 45 + 190.
- [11] 于华龙,周立岱,姜君,等. 改性沸石除氟的动态实验研究[J]. 辽宁化工, 2011, 40(6):561 - 563.
- [12] HABUDA-STANIĆ M, RAVANČIĆ M E, FLANAGAN A. A review on adsorption of fluoride from aqueous solution[J]. Materials, 2014, 7(9):6317 - 6366.
- [13] 付松波,孙殿军,宋丽,等. 新型饮水除氟剂蛇纹石除氟效果研究[J]. 中国地方病学杂志, 2002, 21(4): 306 - 308.
- [14] 陈涛,孙成勋,杨晓瑛,等. 改性粘土除氟剂硬度改善及再生性能研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(9):37 - 40.
- [15] 王长秋,叶立金. 辽宁营口蛇纹石玉成因分析[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(2):397 - 406.
- [16] 李喜林,刘思源,刘艺,等. 蛇纹石-粘土复合颗粒吸附地下水中氟离子实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(10):3343 - 3348 + 3354.
- [17] 李刘刚,吴晓芙,冀泽华,等. 粟米糠-耐Pb菌株复合吸附剂固定床穿透曲线特性[J]. 环境科学学报, 2017, 37(7):2658 - 2666.
- [18] BOITEUX V, BACH C, VÉRONIQUE S, et al. Analysis of 29 per-and polyfluorinated compounds in water, sediment, soil and sludge by liquid chromatography - tandem mass spectrometry [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2016, 96(6-10): 705 - 728.
- [19] 李莉,王业耀,孟凡生. 含氟地下水饮用处理技术[J]. 地下水, 2007, 29(5):85 - 86 + 142.
- [20] GUO Rui, Sim W J, LEE E S, et al. Evaluation of the fate of per-fluoroalkyl compounds in wastewater treatment plants[J]. Water Research. 2010, 44(11), 3476 - 3486.

(上接第12页)

- [18] 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.
- [19] 赵长森,刘昌明,夏军,等. 闸坝河流河道内生态需水研究——以淮河为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3):400 - 411.
- [20] 张远,赵长森,杨胜天,等. 基于关键功能组的河道内生态需水计算[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):108 - 113.
- [21] ZHAO Changsen, ZHANG Chunbin, YANG Shengtian, et al. Calculating e-flow using UAV and ground monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:351 - 365.
- [22] 林娴,陈晓宏,何艳虎,等. 气候变化和人类活动对长江流域年径流及最大日流量影响的定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5):828 - 839.
- [23] 张庭荣,关帅,刘祖发,等. 基于Copula函数的北江上游干支流丰枯遭遇分析[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2018, 16(2):5 - 11.
- [24] 吴春华,刘昌明. 生态水力半径法计算河道内生态需水量研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(10):52 - 54.
- [25] 薛朝阳. 确定水力半径的新方法[J]. 河海大学学报, 1995, 23(2):107 - 112.
- [26] 水利部南京水利科学研究所. 鱼道[M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [27] 梁正芳,梁庚顺,梁秩桑,等. 韶关市北江水系经济鱼类产卵场的分布、成色与规模[J]. 水产科技, 2002(6):14 - 20.
- [28] 徐志侠,陈敏建,董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1):5 - 9.