

基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法

黄冬菁^{1,2}, 李一平³, 崔广柏⁴, 段永刚^{1,2}, 姚嘉良¹

(1. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;

3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对现有河道基本生态流量计算方法无法兼顾结果准确和流程简约的问题,提出了一种综合水文频率、水力条件及生境需求的基本生态流量计算方法。选取流域控制断面进行径流还原,根据河道天然来水特性和水生生物需水特性划分水期,进行分期水文排频;利用水力学方法计算断面流量与平均水深和平均流速之间的关系;根据生态水深和生态流速等生境指标需求,综合分析得到不同水期下的河道基本生态流量。将该方法应用于浙江始丰溪流域基本生态流量计算,并将计算结果与 Tennant 法结果进行对比分析,结果表明:沙段水文站控制断面产卵育幼期的基本生态流量为 $16.0 \text{ m}^3/\text{s}$,一般用水期的基本生态流量为 $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$,计算结果落在 Tennant 法的计算区间值中;本文提出的方法计算结果合理,可针对不同水期给出更为精准的基本生态流量。

关键词:生态流量;控制断面;水文频率;水力计算;生境需求;始丰溪流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0142-07

Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis//HUANG Dongjing^{1,2}, LI Yiping³, CUI Guangbo⁴, DUAN Yonggang^{1,2}, YAO Jialiang¹ (1. School of Water Conservancy & Environment Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In response to the problem that existing methods for calculating the basic instream ecological flow fail to balance the accuracy of calculated results and the simplicity of processes, a basic instream ecological flow calculation method integrating hydrological frequency, hydraulic conditions, and habitat requirements was proposed. With the natural runoff restored on the selected control section, the water use periods were classified according to hydrological characteristics of the river channel and water requirements of aquatic organisms, and the hydrological frequency arrangement was conducted for different periods. Then, the relationships between water discharge, mean water depth, and mean flow velocity were specified by the hydraulic method. Through analyzing requirements of biological environment indicators, including ecological water depth and ecological flow velocity, the basic instream ecological flow for different water use periods was determined. The proposed method was applied to the Shifeng River Basin in Zhejiang Province, and the results show that the calculated basic ecological flow of the representative section at the Shaduan hydrological station in the river basin was $16.0 \text{ m}^3/\text{s}$ during the spawning and larval development period and $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ during the general water use period. By comparison, the calculated results of the proposed method were in the range of those of the Tennant method, demonstrating the feasibility of the proposed method, and the values of basic instream ecological flow with higher accuracy can be obtained by the proposed method in different water use periods.

Key words: ecological flow; control section; hydrological frequency; hydraulic calculation; habitat requirement; Shifeng River Basin

基金项目:浙江省水利厅科技计划项目(RA2008, RB2206);浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室开放基金项目(ZJWEU-RWM-20200104B);浙江省联合基金重点项目(LZJWZ24E090003)

作者简介:黄冬菁(1989—),女,讲师,博士,主要从事水生态与水资源研究。E-mail: huangdj@zjweu.edu.cn

2020 年水利部《关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见》中提出了(河湖)生态流量的含义,是指为了维系河流、湖泊等水生态系统的结构和功能,需要保留在河湖内符合水质要求的流量(水量、水位)及其过程。生态流量的确定是水资源开发、利用、节约、保护及调度管理的重要基础性工作,保障生态流量是推进河湖生态保护修复的基本要求^[1-3],因此开展生态流量的相关计算十分重要。

生态流量包括基本生态流量和目标生态流量。基本生态流量指维持河流、湖泊、沼泽的生态保护目标所对应的生态环境功能不丧失需要保留的基本水流过程;目标生态流量指维护河流、湖泊、沼泽良好生态状况或维持给定生态保护目标需要保留的水流过程。考虑到河湖生态复苏的循序渐进性和实际需求,本文所研究的是基本生态流量。生态流量计算研究起步于 20 世纪 40 年代,目前针对单一性河道已形成了一些相对成熟的估算方法,基本可以分为 4 类^[4]:①水文学法,如 Tennant 法^[5]、流量历时曲线法^[6]、7Q10 法^[7]等;②水力学法,如湿周法^[8]、R2-Cross 法^[9]、水动力模型法^[10]等;③生境模拟法,如河道流量法^[11]、物理栖息地法^[12]等;④综合法,如结构单元法^[13]、整体研究法^[14]、量质结合法^[15]等。

以上 4 类计算方法研究重点和适用条件各不相同。总体来说,水文学法和水力学法计算相对简单,主要思路是根据来水条件和河道水力计算推求生态流量,但缺点也明显,不能分别计算河流中代表性生物不同生命周期所需的生态流量^[16];生境模拟法和综合法计算结果相对精确,通过考虑河流中代表性生物对流速、水质、水温、水深、浊度等指标的需求综合确定生态流量,但其制约因素较多,需要对河道生态系统进行长期全面的监测分析^[17]。本文参考水文学法、水力学法、生境模拟法及综合法的计算思路,提出了一种基于水文-水力-生境分析、考虑因素较全面、计算过程简便且相对精确的基本生态流量计算方法,可为河道基本生态流量的计算提供方法参考。

1 计算方法

利用本文提出的方法计算河道基本生态流量,首先选取控制断面并获取实测水文和大断面数据,选择合适方法对实测水文数据进行逐日还原,根据河道天然水文特性和水生生物需水特性划分水期,确认对应的时间段,分期进行水文排频;其次利用水力学方法计算流量与平均水深和平均流速间的关系,并确定不同水期生态水深和生态流速等生境指标;最后综合分析计算不同水期下的河道基本生态流量。计算过程主要分为以下步骤:

a. 控制断面选取。控制断面的选取要同时考虑断面代表性、数据完整性。断面代表性是指所选断面径流能基本代表该河道的来水过程,根据 SL 34—2013《水文站网规划技术导则》,一般要求断面控制面积占河道集雨面积的 85% 以上。数据完整性是指所选断面具有连续 30 a 以上逐日水文资料(包括水位、流量等),且尽可能有精确的枯水期小流量数据,同时应具有多次河道大断面测量数据,用以分析断面冲淤变化和河道水文水力情况。此外,为保证后续断面流量与平均水深和平均流速关系曲线计算的稳定性,所选择的断面应避免受变动回水和潮水上溯等影响。

b. 径流还原。天然水流状态是基本生态流量计算的基础,也是河流生态保护与修复遵循的原则。受人类活动等影响,实测的水文资料会在一定程度上发生相应的变化,水文资料不一致性会影响基本生态流量的确定。为保证数据一致性,需要对实测逐日径流进行还原处理,一般可采用水文模型法、投影寻踪法、综合修正法等^[18-21]。

c. 水期划分与水文排频。水期通常可划分为产卵育幼期、一般用水期等^[22-24],可根据河道天然来水特性和代表性水生生物需水特性等因素综合确定各水期的对应时间段。再利用控制断面的长序列径流还原资料,选定径流频率分析的控制时段,一般可采用日、旬、月作为控制时段^[25],获取不同水期下的径流排频情况。

d. 水力计算。水力计算指根据实测大断面形态数据,利用基础参数,包括糙率 n 、水力坡度 J 、不同水位下的过水断面面积 A 、湿周 χ 和水面宽 B 等,计算得到相关水力学参数,包括断面流量 Q (式(1))、平均水深 $\bar{h}$ (式(2))、平均流速 $\bar{v}$ (式(3))。与湿周法^[9]类似,本文控制断面水力学参数计算采用明渠均匀流公式,同时绘制 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 关系曲线,推导关系式,并利用实测数据对其进行验证。最后基于 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 关系式以及径流频率分析,根据控制时段不同来水频率 P 的径流量 Q_p ,获取对应频率下的平均水深 $\bar{h}_p$ 和平均流速 $\bar{v}_p$,并列出 $Q_p-\bar{h}_p-\bar{v}_p$ 查询表。

$$Q = AC\sqrt{RJ} \tag{1}$$

$$\bar{h} = A/B \tag{2}$$

$$\bar{v} = Q/A \tag{3}$$

其中 $R = A/\chi$ $C = (1/n)R^{1/6}$
式中: R 为水力半径; C 为谢才系数。

e. 生境分析。考虑河道内生物群落构成,根据关键水生生物生存特性,如体感流速、适宜流速和临界流速^[26-29]等综合确定不同水期所需的生态水深

和生态流速^[30-31]。

f. 基本生态流量分析。将确定的分期生态水深和生态流速带入 $Q_p-\bar{h}_p-\bar{v}_p$ 查询表,当生态水深和生态流速均满足生境要求时,其最小流量值即为控制断面所需的基本生态流量 Q_e ,同时对基本生态流量计算结果进行对比分析和验证。

2 实例计算与分析

始丰溪流域位于浙江省台州市境内,干流河长 133 km,主要流经天台县、临海市,为山区性河流,河道坡降 2.8‰,流域高程为 2 ~ 1235 m,面积 1 610 km²(图 1)。随着人口的不断聚集和工农业不断发展,流域内水资源利用量逐年增加。为保证流域内生态稳定,兼顾经济发展,有必要对其基本生态流量进行计算。

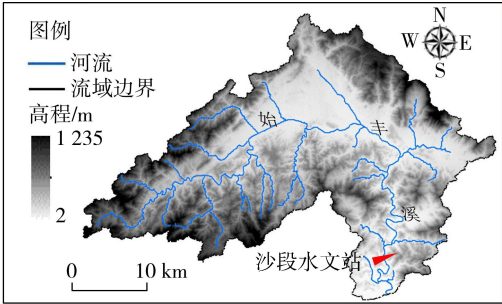


图 1 始丰溪流域水系地形分布

Fig. 1 Drainage and topographic distributions of the Shifeng River Basin

2.1 控制断面选取

始丰溪流域位于 120° 30' E ~ 121° 20' E, 28°50'N ~29°20'N 之间,沙段水文站位于始丰溪干流下游,设站年份为 1958 年,断面以上集雨面积 1 482 km²,占流域总面积的 92%^[32](图 1)。该站具有 1961—2021 年逐日实测水位、流量等数据,2016 年完成标准化改造后,经过多年率定,数据质量尤其是枯水期数据准确度大幅提升。沙段水文站在 2011 年 3 月和 2021 年 6 月进行横断面实测,此外,该站下游无控制性工程,不受工程回水和潮水上溯影响,基本满足控制断面选取要求。因此,本文以沙段水文站为例,计算始丰溪流域适宜的基本生态流量。

2.2 径流还原

始丰溪流域人类活动影响主要包括水利工程建设和城市化进程,始丰溪流域建有 1 座大型水库(里石门水库,1973 年建设)、4 座中型水库(龙溪水库,1985 年建设;黄龙水库,2003 年建设;桐蓄上水库和桐蓄下水库,2008 年建设)以及 40 余座小型水库(建设年份集中在 1968—2000 年)。根据土地利

用遥感解译和相关学者研究,始丰溪流域城市化进程始于 1985 年,主要集中在 1995—2015 年^[33-34],可认为 1968 年以前始丰溪流域产汇流接近天然状态。本文采用新安江模型对沙段断面逐日径流进行还原,将 1961—2021 年逐日实测水文数据分为两部分,其中 1961—1967 年为近天然数据,用于模型的率定验证;1968—2021 年为实测数据,模型主要对该部分数据进行还原。根据统计结果,多年平均还原流量比实测流量偏大约 12%(图 2)。以 2016 年为例,还原流量比实测流量偏大 8.9%,由于工程调蓄等原因,实测径流过程比还原过程相对平缓(图 3)。

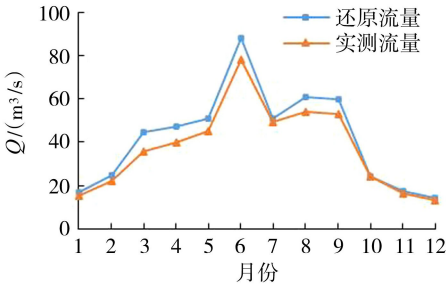


图 2 沙段水文站逐月平均实测与还原流量对比

Fig. 2 Comparison of measured and restored average monthly flow at Shaduan hydrological station

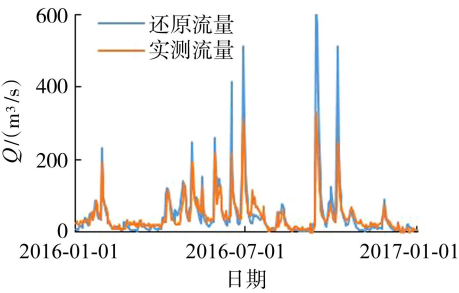


图 3 沙段水文站 2016 年实测与还原逐日流量对比

Fig. 3 Comparison of measured and restored daily flow at Shaduan hydrological station in 2016

2.3 水期划分与水文排频

根据 1961—2021 年逐日径流还原资料,沙段水文站多年平均流量为 41.0 m³/s。根据流量年内分布情况,可将年来水分为两个时段:4—9 月为丰水段,10 月至次年 3 月为枯水段,4—9 月水量约占全年来水的 71.5%。始丰溪河段花鱼骨资源丰富,无特别珍稀动植物物种,本次选择其作为关键代表性水生生物,产卵育幼期一般在每年的 4—9 月^[35-36]。综合考虑始丰溪流域的水文特性和水生生物需水特性等因素,将始丰溪产卵育幼期定义为 4—9 月,多年平均流量为 58.7 m³/s;一般用水期定义为 10 月至次年 3 月,多年平均流量为 23.3 m³/s。

根据沙段水文站逐日还原流量数据,分别对产

卵育幼期和一般用水期进行径流频率分析,每个水期均采用日、月、旬作为控制时段分别计算,结果如表1所示。同一频率下,不同计算时段的流量差别较大,旬时段流量介于日时段与月时段之间,与日时段流量较为接近。产卵育幼期,月时段和旬时段各频率流量分别为日时段的2.0倍和1.3倍;一般用水期,月时段和旬时段各频率流量分别为日时段的1.4倍和1.1倍。为避免月时段的计算结果偏大,同时考虑与日时段计算结果的衔接,选择旬时段作为研究流域基本生态流量计算的控制时段。

表1 沙段水文站径流频率分析

P/%	产卵育幼期 $Q/(m^3/s)$			一般用水期 $Q/(m^3/s)$		
	日时段	旬时段	月时段	日时段	旬时段	月时段
60	22.4	29.0	40.2	10.0	10.7	12.7
65	19.8	25.1	36.1	8.3	9.6	11.9
70	17.5	22.2	31.8	7.5	8.5	10.0
75	14.9	19.4	26.1	6.4	7.3	8.5
80	12.5	16.0	23.0	5.2	5.9	7.3
85	9.9	13.3	19.7	3.9	4.4	5.9
90	7.0	9.8	16.6	2.5	3.0	4.3
95	4.1	6.3	8.9	1.7	1.8	2.1

2.4 水力计算

2.4.1 断面形态变化分析

根据2011年3月和2021年6月的实测数据,沙段水文站断面为宽浅型(图4)。2011—2021年断面底高程由3.58 m降低为3.53 m,变化率为-1.4%;主河槽宽度由121 m增宽至123 m,变化率为1.7%;在5、10、15、20 m水位下的过流面积分别由41.4、367.2、876.5和1472.4 m²变化为40.9、374.2、868.9和1483.1 m²,变化率分别为-1.1%、1.9%、-0.9%和0.7%。由此可知,2011—2021年沙段水文站断面河势相对稳定。

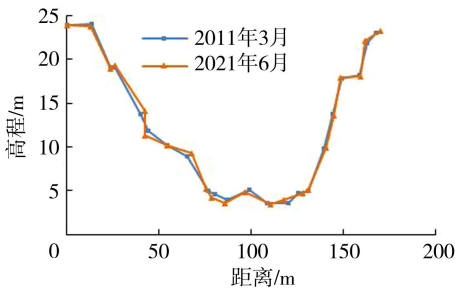


图4 沙段水文站实测断面对比

Fig.4 Comparison of measured sections of Shaduan hydrological station

2.4.2 断面流量与平均水深和平均流速方程

根据《浙江省椒江流域防洪规划(2021)》中始丰溪流域水动力计算结果,沙段断面附近河段在中低水位下的糙率 $n=0.040$,水力坡度 $J=1.4‰$ 。利

用沙段实测断面资料,采用式(1)~(3)计算不同水位下流量 Q 、平均水深 $\bar{h}$ 、平均流速 $\bar{v}$ 等,并绘制 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 散点图。基于对数函数曲线拟合方法,分别得到 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 关系曲线和方程(式(4)(5)),相关系数 r 分别为0.9812和0.9944,均大于0.95,拟合效果较好(图5)。

$$\bar{h} = 0.1348 \ln Q + 0.2361 \tag{4}$$

$$\bar{v} = 0.1359 \ln Q + 0.3772 \tag{5}$$

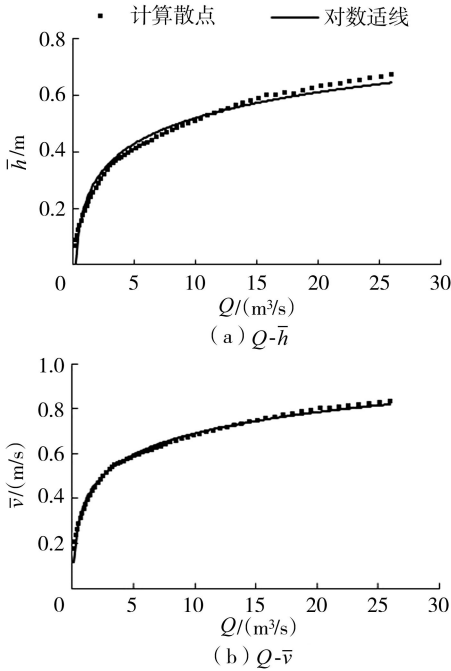


图5 沙段断面 $Q-\bar{h}$ 和 $Q-\bar{v}$ 关系曲线

Fig.5 Relation curves of $Q-\bar{h}$ and $Q-\bar{v}$ of Shaduan section

选用沙段水文站标准化改造后的部分实测小流量数据对 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 关系曲线进行验证,为保证验证结果的准确性,将流量分为0~5、>5~10、>10~15、>15~20、>20~25、>25~30 m³/s共6个范围(表2)。由表2可知,流量、平均水深和平均流速的计算值和实测值相对误差绝对值均小于5%,可认为断面流量的计算结果以及 $Q-\bar{h}$ 和 $Q-\bar{v}$ 关系曲线与实际相符。

2.4.3 $Q_p-\bar{h}_p-\bar{v}_p$ 查询表

根据沙段水文站不同水期径流频率分析成果以及建立的 $Q-\bar{h}$ 、 $Q-\bar{v}$ 关系曲线,计算得出不同来水频率 P 的旬时段流量 Q_p 及其对应的平均水深 $\bar{h}_p$ 和平均流速 $\bar{v}_p$,列出 $Q_p-\bar{h}_p-\bar{v}_p$ 查询表(表3)。

2.5 生境分析

始丰溪河段无特别珍稀动植物物种,花鱼骨为关键代表性鱼类。根据中国科学院科普云平台中淡水鱼趋流性的相关介绍,花鱼骨属鲤科,体感流速为0.2 m/s,适宜流速为0.3~0.8 m/s,临界流速为1.1 m/s。鱼类生存的水深一般为超过身体长度的

表2 沙段断面流量、平均水深和平均流速验证结果

Table 2 Verification results of calculated flow rate, average water depth, and average flow velocity of Shaduan section										
流量范围/ (m ³ /s)	水位/m	Q/(m ³ /s)		Q 相对 误差/%	$\bar{h}$ /m		$\bar{h}$ 相对 误差/%	$\bar{v}$ /(m/s)		$\bar{v}$ 相对 误差/%
		实测值	计算值		实测值	计算值		实测值	计算值	
0 ~ 5	3.90	2.63	2.53	4.1	0.34	0.33	3.2	0.52	0.50	3.8
>5 ~ 10	4.18	6.69	6.44	3.7	0.47	0.49	-2.7	0.64	0.63	1.9
>10 ~ 15	4.44	12.33	12.63	-2.4	0.57	0.58	-1.8	0.69	0.72	-4.2
>15 ~ 20	4.62	19.17	18.72	2.3	0.65	0.63	3.5	0.80	0.78	2.8
>20 ~ 25	4.72	21.77	22.55	-3.6	0.63	0.66	-4.2	0.78	0.80	-2.4
>25 ~ 30	4.80	26.88	25.97	3.4	0.68	0.67	1.9	0.84	0.82	2.6

表3 沙段水文站不同来水频率旬时段 Q_p - $\bar{h}_p$ - $\bar{v}_p$ 查询表
Table 3 Query table of Q_p - $\bar{h}_p$ - $\bar{v}_p$ for each ten days of
a month at different runoff frequencies of
Shaduan hydrological station

P/%	产卵育幼期			一般用水期		
	Q_p /(m ³ /s)	$\bar{h}_p$ /m	$\bar{v}_p$ /(m/s)	Q_p /(m ³ /s)	$\bar{h}_p$ /m	$\bar{v}_p$ /(m/s)
60	29.0	0.69	0.83	10.7	0.56	0.70
65	25.1	0.67	0.82	9.6	0.54	0.68
70	22.2	0.65	0.80	8.5	0.52	0.67
75	19.4	0.64	0.78	7.3	0.50	0.65
80	16.0	0.61	0.75	5.9	0.48	0.62
85	13.3	0.58	0.73	4.4	0.45	0.58
90	9.8	0.54	0.69	3.0	0.38	0.53
95	6.3	0.48	0.63	1.8	0.29	0.46

3 倍,花鱼骨体长为 0.15 ~ 0.30 m,平均约为 0.20 m,据此得出适宜水深应大于 0.45 m,平均为 0.60 m^[37-38]。对于始丰溪河段鱼类产卵育幼期,拟定生态水深为 0.60 m,生态流速为其适宜流速,即为 0.3 ~ 0.8 m/s。考虑到在一般用水期,鱼类对水深和流速的要求相对较低,设定生态流速的最小值为体感流速 0.2 m/s,最大值为临界流速 1.1 m/s,生态水深取最小适宜水深 0.45 m。

2.6 基本生态流量分析

根据 Q_p - $\bar{h}_p$ - $\bar{v}_p$ 查询表(表 3),当生态水深和生态流速均满足生境要求时,其最小流量值为控制断面所需的基本生态流量。

a. 产卵育幼期。以生态水深 0.60 m 和生态流速 0.3 ~ 0.8 m/s 为筛选控制条件,确定满足条件的流量为 80% 来水频率下的旬平均流量,即始丰溪河段产卵育幼期的基本生态流量 Q_e 为 16.0 m³/s,对应的断面平均水深为 0.61 m,平均流速为 0.75 m/s。

b. 一般用水期。以生态水深 0.45 m 和生态流速 0.2 ~ 1.1 m/s 为筛选控制条件,确定满足条件的流量为 85% 来水频率下的旬平均流量,即始丰溪河段一般用水期的基本生态流量 Q_e 为 4.4 m³/s,对应的断面平均水深为 0.45 m,平均流速为 0.58 m/s。

2.7 合理性分析

近年来,Tennant 法在国内尤其是南方湿润地区用于生态流量计算的案例越来越多^[39-42],水利部水利水电规划设计总院《关于印发 2019 年重点河湖生

态流量(水量)保障实施方案编制及实施有关技术要求的通知》(水总研二[2019]328 号)第四部分“生态流量(水量)目标及确定”中对基本生态流量计算方法作了具体介绍:“基本生态流量可采用最枯月平均流量法、Tennant 等方法计算,原则上,对丰枯变化剧烈、工程调控能力较弱的主要控制断面可以采用最枯月平均流量法,其他断面可以采用 Tennant 法”。始丰溪流域沙段控制断面丰枯变化不剧烈,上游有里石门等大型水库,因此可将 Tennant 法应用于始丰溪流域沙段断面基本生态流量计算。Tennant 法规定生态流量为多年平均流量的 10% ~ 30%,而沙段断面产卵育幼期多年平均流量为 58.7 m³/s,一般用水期多年平均流量为 23.3 m³/s。估算得到产卵育幼期基本生态流量为 5.9 ~ 17.6 m³/s,一般用水期基本生态流量为 2.3 ~ 6.9 m³/s。本文得到的沙段断面产卵育幼期基本生态流量为 16.0 m³/s,在 5.9 ~ 17.6 m³/s 范围内,为产卵育幼期多年平均流量的 27.3%;本文得到的一般用水期的基本生态流量为 4.4 m³/s,在 2.3 ~ 6.9 m³/s 范围内,为一般用水期多年平均流量的 18.9%。与 Tennant 法计算成果对比分析表明,本文提出的河道基本生态流量计算方法的结果合理,并能针对不同水期给出更为精准的基本生态流量数值。

3 结 语

本文提出了一种基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法,该方法不仅考虑了控制断面的来水频率和水力特性,还兼顾了河段代表性生物在不同水期下的生境需求。将构建的方法应用于浙江始丰溪流域基本生态流量计算。选取沙段水文站作为控制断面,采用新安江模型对实测径流进行逐日还原,综合天然来水特征和主要鱼类花鱼骨需水特性等因素,将产卵育幼期定义为 4—9 月,一般用水期定义为 10 月至次年 3 月。对还原径流进行分期排频,选择旬时段径流量作为基本生态流量分析的控制时段,根据实测横断面水力坡降、糙率等

资料计算相关水力学参数,推求流量与平均流速和平均水深的关系曲线,并利用实测数据进行验证。根据代表性生物花鱼骨的生态水深和生态流速,得到始丰溪代表性断面产卵育幼期基本生态流量为 $16.0\text{ m}^3/\text{s}$,一般用水期基本生态流量为 $4.4\text{ m}^3/\text{s}$ 。与 Tennant 法计算区间值对比分析表明,本文提出的河道基本生态流量计算方法合理且更加准确。

参考文献:

[1] 邓志民,李斐,邓瑞,等.长江流域生态流量满足程度及其保障措施研究[J].人民长江,2021,52(7):71-75. (DENG Zhimin, LI Fei, DENG Rui, et al. Study on satisfaction degree of ecological flow and its guarantee measures in Changjiang River Basin[J]. Yangtze River, 2021,52(7):71-75. (in Chinese))

[2] 南军虎,刘一安,陈垚,等.裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J].水资源保护,2022,38(3):189-197. (NAN Junhu, LIU Yi'an, CHEN Yao, et al. Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 189-197. (in Chinese))

[3] 李扬,孙翀,刘涵希.福建省域河流生态流量监管与控制目标核定[J].水资源保护,2020,36(2):92-96. (LI Yang, SUN Chong, LIU Hanxi. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province[J]. Water Resources Protection, 2020,36(2):92-96. (in Chinese))

[4] 王中根,赵玲玲,陈庆伟,等.关于生态流量的概念解析[J].中国水利,2020(15):29-32. (WANG Zhonggen, ZHAO Lingling, CHEN Qingwei, et al. Analysis of the ecological flow concept[J]. China Water Resources, 2020(15):29-32. (in Chinese))

[5] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [R]. Fisheries, 1976,1(4):6-10.

[6] LOAR J M, SALE M J. Analysis of environmental issues related to small-scale hydroelectric development [R]. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1981: 123-128.

[7] 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))

[8] 张叶,魏俊,黄森军,等.基于湿周法的济南山区中小河流生态流量研究[J].人民黄河,2022,44(1):89-93. (ZHANG Ye, WEI Jun, HUANG Senjun, et al. Research

on ecological flow of small and medium-sized rivers in Jinan mountain area based on wet cycle[J]. Yellow River, 2022,44(1):89-93. (in Chinese))

[9] MOSLEY M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a braided river, Ohau River, New Zealand [J]. Water Resources Research, 1982,18(4):800-812.

[10] 景梦园,王立权,褚丽丽,等.基于改进 River2D 模型的呼兰河干流生态流量研究[J].中国农村水利水电,2023(3):102-110. (JING Mengyuan, WANG Liquan, CHU Lili, et al. Research on the ecological flow of the mainstream of the Hulan River based on the improved River2D model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3):102-110. (in Chinese))

[11] STALNAKERC B, LAMB B L, HENRIKSEN J, et al. The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM [R]. Colorado: National Ecology Research Center, 1994.

[12] 张文鸽,黄强,蒋晓辉.基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J].水科学进展,2008,19(2):192-197. (ZHANG Wenge, HUANG Qiang, JIANG Xiaohui. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation[J]. Advances in Water Science, 2008,19(2):192-197. (in Chinese))

[13] KING J, LOW D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1998,1(2):109-124.

[14] ARTHINGTON A H, KING J M, O'KEEFFE J H, et al. Development of an holistic approach for assessing Environmental flow requirements of riverine ecosystems [C]//PIGRAM J J, HOOPER B P. Proceedings of an International Seminar and Work Shop on Water Allocation for the Environment. Armidale: The Centre for Water Policy Research, 1992:69-76.

[15] 章运超,柴朝晖,王家生,等.量质结合的举水新洲段生态流量[J].长江科学院院报,2023,40(7):1-7. (ZHANG Yunchao, CHAI Zhaozhui, WANG Jiasheng, et al. Ecological flow involving water quantity and water quality: case study on Xinzhou segment of Jushui River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(7):1-7. (in Chinese))

[16] 金纯,姜翠玲,吴为.基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J].水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):8-14. (in Chinese))

[17] 向晨光.沙颍河生态流量保障优化方案研究[D].宜昌:三峡大学,2019.

[18] 范辉,肖恒,马金一,等.基于 VIC 模型的天然径流还原

- 研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 7-10. (FAN Hui, XIAO Heng, MA Jinyi, et al. Study on restoring computation of runoff based on VIC model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(2): 7-10. (in Chinese))
- [19] 乔云峰, 夏军, 王晓红, 等. 投影寻踪法在径流还原计算中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 6-10. (QIAO Yunfeng, XIA Jun, WANG Xiaohong, et al. Estimation of restoration of annual runoff series by using projection pursuit method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 6-10. (in Chinese))
- [20] 金新芽. 径流还原实用方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [21] 宋承新. 径流还原计算的综合修正法[J]. 水文, 1999, 39(2): 46-48. (SONG Chengxin. Comprehensive correction method for runoff reduction calculation[J]. Journal of China Hydrology, 1999, 39(2): 46-48. (in Chinese))
- [22] 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. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 89-94. (in Chinese))
- [23] 王鸿翔, 桑明崎, 查胡飞, 等. 基于生态水文学法的湘江生态流量研究[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 70-73. (WANG Hongxiang, SANG Mingqi, ZHA Hufei, et al. Ecological flow of Xiangjiang River based on eco-hydrological method[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 70-73. (in Chinese))
- [24] 于子钺, 张晶, 赵进勇, 等. 考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 175-184. (YU Zicheng, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, et al. Study on ecological flow of dewatered river sections considering whole life cycle of key species[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 175-184. (in Chinese))
- [25] 叶守泽, 詹道江. 工程水文学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 66-71.
- [26] 曹平. 基于鱼类游泳行为特性的鱼道水力学研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [27] 马卫忠, 安瑞冬, 李敏讷, 等. 洄游鱼类坝下集群的水动力学特征与行为预测[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 433-440. (MA Weizhong, AN Ruidong, LI Minne, et al. Habitat hydrodynamic characteristics and behavior forecasting for migratory fish downstream of dams[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(3): 433-440. (in Chinese))
- [28] 诸葛亦斯, 刘德富, 谭红武. 鱼类栖息地流速适宜性曲线实验方法[J]. 水利学报, 2013, 44(增刊1): 1-7. (ZHUGE Yisi, LIU Defu, TAN Hongwu. A laboratorial method for establishing the velocity curve of fish habitat suitability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(Sup1): 1-7. (in Chinese))
- [29] 韩鲁杰, 王红瑞, 许新宜, 等. 生态流速-临界水深法及在杜柯河中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(21): 62-65. (HAN Lujie, WANG Hongrui, XUE Xinyi. Application of ecological velocity-critical water depth method in Duke River[J]. Yangtze River, 2009, 40(21): 62-65. (in Chinese))
- [30] 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 Qiang, 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))
- [31] 刘昌明, 门宝辉, 赵长森. 生态水文学: 生态需水及其与流速因素的相互作用[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 765-774. (LIU Changming, MEN Baohui, ZHAO Changsen. Ecohydrology: environmental flow and its driving factors[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 765-774. (in Chinese))
- [32] 徐雪松, 张新周, 李琼, 等. 椒(灵)江水沙特性及最大浑浊带模拟[J]. 水运工程, 2018(12): 134-142. (XU Xuesong, ZHANG Xinzhou, LI Qiong, et al. Simulation on flow-sediment characteristic and turbidity maximum zone in Jiao (Ling) River[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(12): 134-142. (in Chinese))
- [33] 姚石. 基于县域单元的浙江省城乡融合发展评价研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [34] 邓舒洪. 区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [35] 王西琴, 张远, 刘昌明. 基于鱼类保护目标的椒江环境流量研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 712-717. (WANG Xiqin, ZHANG Yuan, LIU Changming. Using fish conservation as object to estimate environmental flow in Jiaojiang River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 712-717. (in Chinese))
- [36] 张艳君, 陈洁, 肖军. 水电站改造工程区域生态特征与生物资源保护研究: 以天台县里石门水电站为例[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(6): 168-173. (ZHANG Yanjun, CHEN Jie, XIAO Jun. Study on eco-features and bio-resources protection after reconstruction of hydropower station: a case of Lishimen hydropower station in Tiantai County[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(6): 168-173. (in Chinese))

(下转第 156 页)

- Zhaosheng, YANG Bo, et al. Effects of temperature on growth, photosynthesis and buoyancy regulation of the cyanobacteria *Microcystis flosaquae* and *Planktothrix mougeotii* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28 (1):50-55. (in Chinese))
- [26] 王锦旗,宋玉芝,薛艳. 气候变化诱导水体富营养化研究进展 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 145-155. (WANG Jinqi, SONG Yuzhi, XUE Yan. Research progress of water eutrophication induced by climate change [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 145-155. (in Chinese))
- [27] HECHT J S, ZIA A, CLEMINS P J, et al. Modeling the sensitivity of cyanobacteria blooms to plausible changes in precipitation and air temperature variability [J]. Science of the Total Environment, 2022, 812: 151586.
- [28] RANJBAR M H, HAMILTON D P, ETEMAD-SHAHIDI A, et al. Impacts of atmospheric stilling and climate warming on cyanobacterial blooms: an individual-based modelling approach [J]. Water Research, 2022, 221: 118814.
- [29] ARIF S, DJELLAL A, DJEBBARI N, et al. Modelling *Microcystis* cell density in a mediterranean shallow lake of Northeast Algeria (Oubeira Lake), using evolutionary and classic programming [J]. Geomatics and Environmental Engineering, 2023, 17: 31-68.
- [30] WANG S, ZHANG X, WANG C, et al. Temporal continuous monitoring of cyanobacterial blooms in Lake Taihu at an hourly scale using machine learning [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159480.
- [31] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (6): 542-551. (WU Juan, ZHU Yuelong, JIN Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 542-551. (in Chinese))
- [32] TAYLOR J, HONDZO M, VOLLER V R. Abiotic drivers of a deep cyanobacteria layer in a stratified and eutrophic lake [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (6): e2020WR027987.
- [33] LI J, LI Y, BI S, et al. Utilization of GOCI data to evaluate the diurnal vertical migration of *Microcystis aeruginosa* and the underlying driving factors [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 310: 114734.
- [34] ZHU W, FENG G, CHEN H, et al. Modelling the vertical migration of different-sized *Microcystis* colonies: coupling turbulent mixing and buoyancy regulation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (30): 30339-30347.
- [35] ZHANG S H, WANG W L, ZHANG K X, et al. Phosphorus release from cyanobacterial blooms during their decline period in eutrophic Dianchi Lake, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (14): 13579-13588.
- [36] WANG C L, TIAN L Q, ZHU B S, et al. Production of bio-stable fluid sediment from accumulation of cyanobacterial bloom biomass under various water depths [J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154224.
- [37] ZHANG Q, FENG M, HAO X. Study on effect of overlying water environment on the nitrogen and phosphorus release of sediment [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(1): 7-11. (收稿日期: 2023-04-03 编辑: 王芳)
- +++++
- (上接第 148 页)
- [37] 杨宇,高勇,韩昌海,等. 鱼类水力学试验研究进展[J]. 水生态学杂志, 2013, 34 (4): 70-75. (YANG Yu, GAO Yong, HAN Changhai, et al. Advance of hydraulic tests concerning about fishes [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(4): 70-75. (in Chinese))
- [38] 阿膺兰,胡鹏,曾庆慧,等. 基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 253-260. (A Yinglan, HU Peng, ZENG Qinghui, et al. Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in the Taoer River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 253-260. (in Chinese))
- [39] 郭文献,夏自强. 长江中下游河道生态流量研究[J]. 水利学报, 2007 (增刊 1): 619-623. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang. Study on ecological flow in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007 (Supl): 619-623. (in Chinese))
- [40] 肖卫,周刚炎. 三种生态流量计算方法适应性分析及选择[J]. 水利水电快报, 2020, 41 (12): 59-62. (XIAO Wei, ZHOU Gangyan. Analysis of adaptability of 3 ecological flow calculation methods and selection [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, 41(12): 59-62. (in Chinese))
- [41] 周宏伟,曹菊萍,尚钊仪,等. 丰水地区河流生态流量确定及实践[C]//中国水利学会 2021 学术年会论文集第一分册. 北京:中国水利学会, 2021: 92-95.
- [42] 李佳惠,张丹蓉,管仪庆,等. 基于多种水文学法的闽江下游生态流量计算[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 10-13. (LI Jiahui, ZHANG Danrong, GUAN Yiqing, et al. Ecological flow calculation of the lower Minjiang River based on various hydrology methods[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6): 10-13. (in Chinese)) (收稿日期: 2023-03-12 编辑: 施业)