

基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定

金 纯¹,姜翠玲¹,吴 为²

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.江苏汇智工程技术有限公司,江苏 南京 210000)

摘要:利用湿周法、Tennant 法、Tessman 法、逐月最小径流法分别计算大渡河上游的最小生态流量,并通过鱼类繁殖产卵所需的流量验证 4 种方法的合理性。结果表明,Tennant 法、Tessman 法、逐月最小径流法能保证足木足断面鱼类繁殖产卵所需的最低流量,大金断面 4 种方法均能满足。推荐 3—8 月采用 Tennant 法,9 月至次年 2 月选择湿周法,计算得到的最小生态流量过程能够满足鱼类及栖息地保护的要求,又对人类取用水影响最小。

关键词:生态流量;湿周法;Tennant 法;Tessman 法;逐月最小径流法;大渡河

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0008-07

Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods//JIN Chun¹, JIANG Cuiling¹, WU Wei² (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Huizhi Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The wetted perimeter method, Tennant method, Tessman method and month-by-month minimum ecological runoff calculation method were used to calculate the ecological flow respectively. The flow required for fish breeding and spawning was applied to verify the rationality of the four methods. The results show that the Tennant method, Tessman method, and month-by-month minimum ecological runoff calculation method can ensure the minimum flow required for the fish breeding and spawning at the Zumuzu cross section and all the four methods can ensure the minimum flow required at the Dajin section. Tennant method is recommended from March to August and the wetted perimeter method is suggested to use from September to February. The minimum ecological flow process can meet the requirements of fish and habitat protection, and has the smallest impact on human water intake, which can provide reference for the determination of ecological flow.

Key words: ecological flow; wetted perimeter method; Tennant method; Tessman method; month-by-month minimum ecological runoff calculation method; Daduhe River

河流是水生生物发育和繁衍的重要场所,过度取水会影响鱼类及水生生物的栖息环境^[1]。生态流量作为维持河流生态系统健康的重要条件^[2-3],对于保持河道内生态环境稳定,保护生物多样性起到了很大的作用。为了保护河流生态系统,河流生态流量的研究和确定方法也越来越受到重视。目前全球已有 200 多种生态流量计算方法^[4-5],这些方法大致可以分为 4 类:水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体法^[6]。

水文学法是最常用的方法,主要利用长系列流量资料估算生态流量。一般选择简单的水文指标来设定最小生态流量,如平均流量的百分率或者天然流量频率曲线上的保证率^[7-8],代表方法有 Tennant

法、7Q10 法、Texas 法、流量历时曲线法、Q90 法等。水力学法通过收集流量、大断面以及目标物种的水力特性喜好度等资料来计算生态流量^[6]。通过建立水力学参数与流量之间的关系曲线确定一个阈值,该阈值表明随着流量的减少,生境质量显著下降,此时对应的流量即为保证生态环境不再恶化的最小流量^[9]。常用的水力学法有湿周法、R2-CROSS 法等。栖息地模拟法关注指示物种的具体需求,综合考虑了生物栖息地特征与水文特征之间的关系,通过建立有效栖息地面积-流量关系曲线来确定生态流量^[8-10],IFIM 法是最常见的栖息地模拟法。整体法是水文、水力、栖息地模拟法和专家知识的结合,综合研究流量、泥沙运输、河床形状与河岸带群

落之间的关系,其中最具代表性的是 BBM 法和整体研究法^[11]。

但是,迄今为止,尚不存在理想的生态流量计算方法。任何现有的方法都是基于特定的河流或地区,存在局限性。水文学法由于原理简单和计算快速等,在国内外得到了广泛的应用。但是,水文学法仅仅是基于历史流量数据的经验估计,并未直接考虑生物需求。以湿周法为代表的水力学法包含更多的河流信息,能够为水生生物栖息地提供足够的保护,且数据容易获取。但是,湿周法计算得到的生态流量是一个确定的值,不能反映生态流量的年内变化。栖息地模拟法考虑了生物因素,但对数据的要求高,所需的生态资料不易获得。整体法考虑较为全面,但需要花费大量的人力和物力。由于河流生态流量计算的复杂性,不同计算方法的侧重不同,适用范围不同^[12],单一的计算方法缺乏对生态系统的全面考虑^[13],因此在研究河流生态流量时,应根据不同地区的实际情况,采用多种不同的计算方法,综合确定生态流量^[14-15]。

西南地区蕴含着丰富的水能资源,近几十年来兴建了许多水利工程,用于发电、供水和灌溉。水利工程的建设造成河流水文情势、栖息地的改变,进而影响生物种群的生存和繁衍^[16-17]。大渡河流域水资源开发利用程度较高,且功能单一,以发电为主,生态功能处于次要地位,水电开发与生态环境保护之间的矛盾突出。双江口水电站坝址位于大渡河上游足木足河与绰斯甲河汇口处以下 2 km 河段,是大渡河流域水电梯级开发的上游控制性水库工程,能较大幅度地提高其下游梯级电站的枯期出力^[18-19]。双江口水电站的修建,势必会对大渡河上游的生态环境造成影响。本研究以大渡河上游为研究对象,分别采用水力学法中的湿周法和水文学法中的 Tennant 法、Tessman 法和逐月最小径流法计算生态流量,同时考虑鱼类产卵育幼的需要,对比分析各种方法的优缺点,来确定大渡河上游最小生态流量。

1 研究区域概况

大渡河是岷江水系最大的支流,发源于青海省果洛山东南麓,于乐山市汇入岷江,全长 1 062 km,流域面积 77 400 km² (不含青衣河)。绰斯甲河口以上为河源,泸定以上为上游,泸定—铜街子河段为中游,铜街子以下为下游。大渡河河床落差大,达 4 175 m,流域水电资源丰富,是我国西电东输基地之一。

大渡河流域鱼类资源丰富,共有 7 目 17 科 73 属 111 种,上游的鱼类种数基本维持在 10 ~ 13 种,以裂腹鱼类、条鳅亚科鱼类和鮡科鱼类为主^[20]。其

中,我国特有种类川陕哲罗鲑 (*Hucho bleekeri*) 是国家Ⅱ级保护鱼类,被《中国濒危动物红皮书》列入濒危物种,在动物地理学、鱼类系统发育与气候变化等方面具有重要的研究价值。历史上,川陕哲罗鲑曾分布于整个大渡河水系^[21],由于生态环境变化、水利水电工程建设、非法捕捞等原因,川陕哲罗鲑目前主要分布在大渡河上游足木足河干流茶堡河汇口—柯河乡河段^[20]。

足木足、大金水文站处于大渡河上游,分别位于双江口水电站的上下游(图 1),有着较为完整的水位、流量、大断面数据资料。理论上,生态径流计算应使用还原后的天然径流资料,但由于缺少大渡河的用水资料,无法进行还原计算。考虑到双江口水电站于 2015 年开工建设,在此之前大渡河上游并未修建任何大型的水利工程,1970—1987 年大渡河干流虽然受到了人类活动的影响,但处于自身能够逐渐恢复的范围之内,实测径流资料可作为天然径流进行生态流量计算。这个时期,河道受人类活动影响相对较小,河流的生态环境没有遭到破坏。因此本研究选择大渡河流域的足木足和大金水文站 2 个典型断面作为控制断面进行计算。表 1 给出了两个水文站的基本信息。



图 1 研究区域概况

表 1 典型水文站的基本信息

水文站	纬度	经度	集水面积/km ²	资料年份
足木足	32°00'N	102°01'E	19 896	1970—1987 年
大金	31°32'N	102°04'E	40 484	1970—1987 年

2 研究方法

本研究采用水力学法中的湿周法确定足木足、大金水文站断面水生生物栖息地保护所需的最小流量,采用水文学法中的 Tennant 法、Tessman 法和逐月最小径流法分别计算足木足、大金水文站断面生

态流量,同时考虑鱼类繁殖产卵所需要的流量,验证计算结果的合理性。

2.1 湿周法

湿周法的基本假设认为湿周直接关系到水生生物栖息地的有效性,河流临界湿周被认为是水生生物栖息地保护的最低要求^[22]。临界湿周对应于湿周-流量关系曲线上从陡峭到平坦的突变点,以此估算最小生态流量。

对于河床形态稳定的河道,其断面的湿周-流量关系曲线可拟合为对数函数或幂函数。近似矩形或梯形的河道断面形态,湿周-流量关系曲线可采用对数函数拟合;近似三角形或抛物线型的河道断面形态,湿周-流量关系曲线可采用幂函数拟合^[23-24]。

确定临界点的传统方法包括曲率法(曲率绝对值最大)和斜率法(斜率为1)^[25]。斜率为1对应的临界点表示在该点单位流量的增加会引起单位湿周的增加,但突变性不明显。相对而言,曲率最大对应的临界点可以更好地反映突变点的意义^[26],因此,本研究采用曲率最大法确定临界点,估算河道内最小生态流量。

2.2 Tennant 法

Tennant 方法是目前世界上广泛应用的方法,1964—1974 年,Tennant 通过对美国 3 个州的 11 条河流进行详细的实地研究,发现河流流量达到多年平均流量的 10% 能够维持大多数水生生物短期生存栖息的需要;河流流量达到多年平均流量的 30% 就可以为大多数水生生物提供良好的生存栖息条件^[27]。Tennant 法将全年划分为两个时期:一般用水期(10 月至次年 3 月)和鱼类产卵育幼期(4—9 月)^[27-28]。根据多年天然平均流量百分比和河道内生态环境条件的对应关系,直接计算不同时期河道内生态流量^[29]。

考虑到大渡河上游水域包括川陕哲罗鲑在内的 12 种鱼类的繁殖季节始于 3 月,止于 8 月^[30],对 Tennant 法的计算时段进行调整,既能继承传统 Tennant 法的合理性,又符合大渡河上游的实际情况。本研究将一般用水期修正为 9 月至次年 2 月,取多年平均流量的 10% 作为河道内的最小生态流量;鱼类产卵育幼期修正为 3—8 月,取多年平均流量的 30% 作为河道内的最小生态流量。

2.3 Tessman 法

Tessman 法是对 Tennant 法的改进,将一年 12 个月划分成丰、平、枯 3 个不同的时期,根据月平均流量和年平均流量之间的比率确定生态流量^[31-33]。当月平均流量低于年平均流量的 40% 时,将月平均流量作为生态流量;当月平均流量在年平均流量的

40% ~ 100% 时,将年平均流量的 40% 作为生态流量;当月平均流量高于年平均流量时,将月平均流量的 40% 作为生态流量。

2.4 逐月最小径流法

逐月最小径流法^[34-35]是根据历史多年天然月径流系列,取各月的最小月平均流量作为当月最小生态流量。

3 结果与分析

3.1 水力学法计算结果

通过分析足木足、大金水文站 1970—1987 年实测大断面资料,可以看出 2 个水文测站的大断面形态基本保持稳定,只在局部发生轻微的变动,可用于湿周法计算生态流量。选取 1976 年实测河道大断面(图 2)和实测水位、流量资料作为分析基础,计算大渡河上游河道最小生态流量。

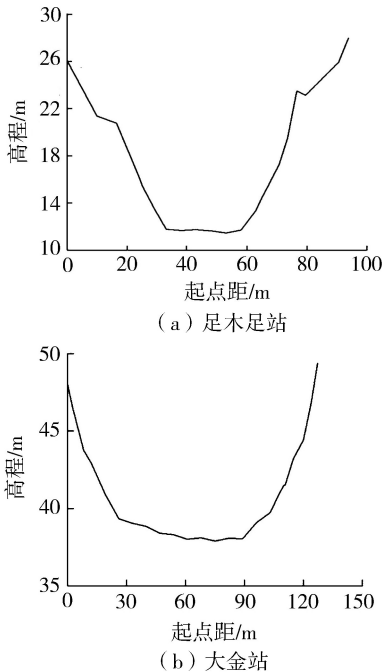


图 2 足木足站和大金站 1976 年实测大断面

根据足木足、大金水文站实测河道大断面资料确定水位-湿周关系,根据实测水位、流量资料确定水位-流量关系,最终得到湿周-流量关系。为消除确定变化点时坐标轴比例的影响,本研究将流量和湿周无量纲化。由图 2 可以看出足木足水文站的断面形状为梯形,大金水文站的断面形状为抛物线型。因此,本研究对足木足水文站断面湿周-流量曲线采用对数函数拟合,大金站采用幂函数曲线拟合。

由图 3 可以看出,曲线拟合精度高,相关系数均接近于 1,拟合结果具有代表性。拟合得到足木足站流量-湿周关系接近对数函数曲线,大金站流量-湿周关系接近于幂函数曲线,采用曲率最大法计算

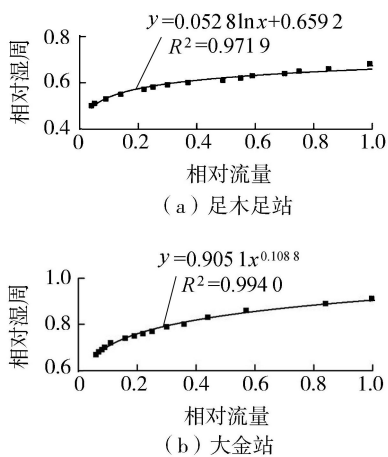


图3 足木足站和大金站湿周-流量关系曲线

得到足木足站生态流量为 45.92 m³/s, 大金站生态流量为 110.80 m³/s。

3.2 水文学法计算结果

根据大渡河流域足木足、大金两个水文站 1970—1987 年的实测月径流资料分别利用 Tennant 法、Tessman 法、逐月最小径流法计算河道的生态流量, 结果见表 2。

表2 3种水文学方法计算的生态流量 m³/s

月份	Tennant 法		Tessman 法		逐月最小径流法	
	足木足站	大金站	足木足站	大金站	足木足站	大金站
1	23.31	51.18	52.61	134.28	40.80	110.00
2	23.31	51.18	50.64	123.83	41.60	106.00
3	69.92	153.53	62.48	141.78	45.70	116.00
4	69.92	153.53	93.23	204.71	68.20	159.00
5	69.92	153.53	93.23	204.71	129.00	264.00
6	69.92	153.53	170.67	365.62	256.00	546.00
7	69.92	153.53	213.51	466.29	223.00	529.00
8	69.92	153.53	137.62	309.44	127.00	361.00
9	23.31	51.18	184.02	393.40	181.00	436.00
10	23.31	51.18	132.76	280.29	171.00	425.00
11	23.31	51.18	93.23	204.71	92.50	236.00
12	23.31	51.18	75.62	191.56	56.30	150.00

3.3 满足鱼类繁殖产卵所需的流量

鱼类位于河流生态系统食物链的顶端, 对河流生态系统的变化极为敏感^[36], 因此本研究将鱼类作为指示物种。考虑到流速是鱼类繁殖期间的重要水文条件, 本研究选择流速作为关键指标, 确定鱼类繁殖产卵所需的流量。

足木足、大金水文站均位于川陕哲罗鲑的重点保护河段^[21], 足木足上游的麻尔曲河和马柯河是川陕哲罗鲑的主要产卵场, 产卵期为 3 月下旬至 4 月上旬, 经 40~50 d 后孵出鱼苗^[37]。洪思扬等^[38]研究发现长丝裂腹鱼 (*Schizothorax dolichonema*)、青石爬鮡 (*Euchiloglanis davidi*)、中甸叶须鱼 (*Ptychobarbus chungtienensis*) 及黄石爬鮡 (*Euchiloglanis kishinouyei* Kimura) 等几种代表性鱼

类产卵所需的流速应控制在 0.4~1 m/s。茹辉军等^[21]研究了不同生活阶段川陕哲罗鲑对于栖息地环境的需求, 得出川陕哲罗鲑繁殖期洄游及鱼卵漂浮需要的流速范围是 0.38~0.75 m/s, 幼鱼期要求流速大于 0.5 m/s, 因此本研究选择 0.55 m/s 作为大渡河鱼类产卵需求的适宜标准。根据已有的大断面资料和拟合得到的水位-流量关系, 可以得到断面面积-流量关系, 以此推导出流速-流量关系。计算得到足木足段川陕哲罗鲑繁殖产卵所需的适宜流量为 65.76 m³/s, 大金段为 80.23 m³/s。

根据 4 种计算方法以及鱼类产卵所需流量确定的大渡河上游生态径流过程如图 4 所示。

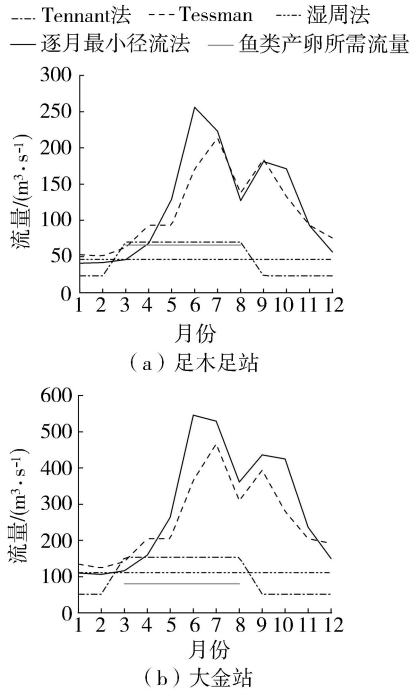


图4 不同方法计算的足木足站和大金站生态径流过程

3.4 分析

不同研究方法由于计算原理和科学假设存在差异, 因此计算得到的结果也不同。其中, 大金站各方法计算得到的生态流量均大于足木足站, 满足从上游到下游最小生态流量增大的合理趋势。

从保护生态的角度来看, 湿周法要求河床形态稳定, 通过计算临界流量来确定保护水生生物栖息地所需的最小流量。Tennant 法基于多年平均流量, 在一般用水期(9 月至次年 2 月)取多年平均流量的 10% 作为河道内的最小生态流量, 只考虑维持河流生态系统不退化所需流量; 在鱼类产卵育幼期(3—8 月)取多年平均流量的 30%, 能够为大多数水生生物提供良好的生存栖息条件。Tessman 法考虑了月平均流量, 使水生生物在各生长阶段均能得到所需的水流, 被广泛应用于水文和生物循环多样化的地区^[39]; 逐月最小径流法^[40]基于天然径流资

料,认为水生生物在天然情况下已经安全地经历了这样的最小径流过程,并且生态系统没有受到无法恢复的破坏,计算得到的最小生态流量能够保证水生生物的最低生存条件。可以看出,4种方法均有各自的生态保护目标,对大渡河上游生态保护具有一定的参考价值。

从反映流量的年内季节变化的角度来看,3种水文学方法均能在一定程度上反映流量的季节性变化,其中逐月最小径流法能反映出枯水月份和丰水月份生态流量的显著变化,其次是 Tessman 法, Tennant 法最小。

大渡河上游涉及重点保护鱼类川陕哲罗鲑,在生态流量计算时需要考虑保护鱼类产卵期的生态用水。3—8月,只有 Tennant 法能够满足足木足段鱼类繁殖产卵所需生态条件,湿周法不能满足, Tessman 法和逐月最小径流法仅在3月不能满足。川陕哲罗鲑繁殖期洄游及鱼卵漂浮需要的最低流速为 0.38 m/s ,此时对应的最低流量为 $37.82\text{ m}^3/\text{s}$ 。由表2可以看出 Tessman 法、逐月最小径流法在3月能够满足川陕哲罗鲑繁殖产卵所需的最低流量,而湿周法依旧不能满足。大金站4种生态流量计算方法均能满足鱼类产卵的需要。逐月最小径流法更加注重自然的水文情势过程,且数值远高于鱼类需求,可能更具有生态学价值。但本研究以鱼类需求为管理目标,考虑年内流量的季节变化,又要对人类取水影响最小,因此推荐使用 Tennant 法。

9月至次年2月需要考虑确保水生生物栖息地保护所需的流量。保证栖息地不会退化的最低条件是多年平均流量的10%。一旦低于此值,河流生境将严重受损,并且难以恢复,因此应预留一定的空间。12月至次年2月为枯水月份, Tessman 法取月平均流量作为生态流量,会加深生产用水、生活用水和生态用水的矛盾。9—11月湿周法计算得到的生态流量大于 Tennant 法,小于 Tessman 法和逐月最小径流法。因此选择湿周法计算结果作为最终生态流量以保证一定的栖息地。

相较于单一计算方法得到的生态流量,综合多种方法得到的生态径流过程既能反映年内丰枯时段的径流变化,满足控制断面水生生物产卵繁殖需要,还有助于保护水生生物临界栖息地,结果较为合理。

由于河流所处地区河道类型存在差异,即使同一河流的不同河段,对于生态流量的要求也是千差万别,因此,需根据具体情况采用多种合适的方法进行计算和选择,使得计算结果中考虑的因素更加全面。一般河流应确定最小生态流量,以确保栖息地不会退化。当生态系统需求较高时,应增加流量,可

以根据河流控制断面所需的流速、水深、水面宽等水文情势特征值,采用水力学模型定量计算得到;对于具有重要水生生物保护目标的河段,应根据重要水生生物在生态系统不同时期的流量需求给出生态径流过程。

4 结 论

a. 不同的方法对应着不同的区域类型、不同生态特征及保护目标,在计算生态水量时,应根据河流河段的具体情况,选取几种适宜方法进行计算,将计算结果统筹考虑,综合确定生态流量。

b. 4种方法对应不同的保护目标,湿周法能够满足水生生物栖息地保护的需要;Tennant 法考虑了维持河流生态系统不退化所需的流量;Tessman 法确保了水环境中的生命进程能够顺利进行;逐月最小径流法能够保证水生生物的最低生存条件。

c. 3—8月 Tennant 法、Tessman 法、逐月最小径流法都能够保证足木足水文站川陕哲罗鲑繁殖产卵所需的最低流量,大金水文站4种方法均适用。综合考虑生态保护、径流变化特征、鱼类产卵需求、人类取水影响等,本研究在3—8月采用 Tennant 法计算结果作为最小生态流量,9月至次年2月选择湿周法计算结果作为最小生态流量。

参考文献:

- [1] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等.基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J].水资源保护,2020,36(2):8-12. (HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 8-12. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 褚俊英,严登华,周祖昊,等.基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用[J].水利学报,2018,49(11):1357-1368. (CHU Junying, YAN Denghua, ZHOU Zuhao, et al. Ecological flow calculation in urban rivers and lakes base on synthesized ecosystem service function identification: model and application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (11): 1357-1368. (in Chinese))
- [4] THARME 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: 397-441.

- [5] 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))
- [6] 林炜,褚丽. 河道内生态需水量研究[J]. 山西建筑,2018,44(14):211-212. (LIN Wei, CHU Li. Research on river ecological water demand[J]. Shanxi Architecture, 2018,44(14):211-212. (in Chinese))
- [7] 常福宣,陈进,黄薇. 河道生态流量计算方法综述及在汉江上游的应用研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):11-13. (CHANG Fuxuan, CHEN Jin, HUANG Wei. Eco-environment water demand in the upper-stream of Hanjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 11-13. (in Chinese))
- [8] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):35-41. (in Chinese))
- [9] PETERS D L, BAIRD D J, MONK W A, et al. Establishing standards and assessment criteria for ecological instream flow needs in agricultural regions of Canada[J]. Journal of Environment Quality,2012,41(1):41-45.
- [10] PENG L, SUN L. Minimum instream flow requirement for the water-reduction section of diversion-type hydropower station: a case study of the Zagunao River, China[J]. Environmental Earthscences,2016,75(17):12101-12108.
- [11] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18(12):5041-5059.
- [12] MA L, WANG H, QI C, et al. Characteristics and adaptability assessment of commonly used ecological flow methods in water storage and hydropower projects, the case of Chinese river basins[J]. Water,2019,11(10):2035.
- [13] 刘悦忆,朱金峰,赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报,2016,35(12):23-34. (LIU Yueyi, ZHU Jinfeng, ZHAO Jianshi. Development history and frontiers of river environmental flow research [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(12): 23-34. (in Chinese))
- [14] 陈昂,王鹏远,吴森,等. 国外生态流量政策法规及启示[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(5):49-53. (CHEN Ang, WANG Pengyuan, WU Miao, et al. Ecological flow policies and regulations review and enlightenment[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 49-53. (in Chinese))
- [15] 华祖林,董越洋,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))
- [16] 姜翠玲,王俊. 我国生态水利研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):168-175. (JIANG Cuiling, WANG Jun. Recent advances of ecological water conservancy in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 168-175. (in Chinese))
- [17] 陈昂. 环境流量研究的前沿问题与挑战[J]. 水利水电科技进展,2019,39(2):1-6. (CHEN Ang. Frontiers and challenges of environmental flow research[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 1-6. (in Chinese))
- [18] 胡强,银宏. 浅析双江口水电站建设对马尔康市林业生态环境的影响[J]. 四川林勘设计,2019(3):37-40. (HU Qiang, YIN Hong. Analysis on the impact of Shuangjiangkou Hydropower Station construction on forestry ecological environment in Markang City [J]. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2019(3): 37-40. (in Chinese))
- [19] 湛洋,黄炜斌,陈仕军,等. 基于 POA 优化的双江口水电站对下游梯级发电补偿效益研究[J]. 水电能源科学,2015,33(9):65-68. (ZHAN Yang, HUANG Weibin, CHEN Shijun, et al. Study on compensation benefits of Shuangjiangkou Hydropower Station to downstream cascades based on POA[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 65-68. (in Chinese))
- [20] 曹娜,毛战坡. 大渡河干流水电开发中鱼类保护对策及建议[J]. 水利水电技术,2017,48(1):116-121. (CAO Na, MAO Zhanpo. Countermeasures and suggestions on fish protection during hydropower development of mainstream of Daduhe River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(1): 116-121. (in Chinese))
- [21] 茹辉军,李云峰,沈子伟,等. 大渡河流域川陕哲罗鲑分布与栖息地特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(10):1779-1785. (RU Huijun, LI Yunfeng, SHEN Ziwei, et al. Distribution and habitat character of *Hucho bleekeri* in the Dadu River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1779-1785. (in Chinese))
- [22] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated Rivers Research and Management,1998,14(1):53-67.
- [23] 吉小盼,蒋红. 基于湿周法的西南山区河流生态需水量计算与验证[J]. 水生态学杂志,2018,39(4):1-7. (JI Xiaopan, JIANG Hong. Calculation and verification of ecological water demand in southwestern mountains river based on the wetted perimeter method [J]. Journal of

- Hydroecology, 2018, 39(4): 1-7. (in Chinese))
- [24] 彭涛, 陈晓宏, 王高旭, 等. 基于湿周法的河道最小生态需水量多目标评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 6-10. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, WANG Gaoxu, et al. Multi-objective evaluation model for minimum environmental flows based on wetted perimeter method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5): 6-10. (in Chinese))
- [25] 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. (YU Luji, CHEN Huimin, WANG Li, et al. Study of ecological instream flow requirement of Jialu River based on improved wetted perimeter method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 5-9. (in Chinese))
- [26] 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. (JI Lina, LIU Suxia, WANG Xinchun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: a case study in Luanhe Water System[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 287-291. (in Chinese))
- [27] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [28] MAHMOODA R, JIA Shaofeng, LYU Aifeng, et al. A preliminary assessment of environmental flow in the three rivers' source region, Qinghai Tibetan Plateau, China and suggestions [EB/OL]. [2020-01-09]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105709>.
- [29] 许亚雄, 赵志怀. 基于改进 Tennant 法的河流生态基流估算[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 38-40. (XU Yaxiong, ZHAO Zhihui. Estimation of river ecological base flow based on modified tennant method[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 38-40. (in Chinese))
- [30] 张湘隆, 高峰, 赵伟. 大渡河泸定水电站鱼类增殖放流站设计构想[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(1): 116-120. (ZHANG Xianglong, GAO Feng, ZHAO Wei. Introduction the design of fish breeding and releasing station of Luding Hydropower Station on Dadu River [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(1): 116-120. (in Chinese))
- [31] KARAKOYUN Y, DONMEZ A H, YUMURTACI Z. Comparison of environmental flow assessment methods with a case study on a runoff river: type hydropower plant using hydrological methods [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(12): 7221-7225.
- [32] 葛金金, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法: 以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 75-80. (GE Jinjin, PENG Wenqi, ZHANG Wenhai, et al. Comparison among several hydrological methods to determine the suitable ecological flow in instream river: a case study of Zhoukou Hydrological Station in Shaying River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 75-80. (in Chinese))
- [33] 贾绍凤, 柳文华. 水资源开发利用 40% 阈值溯源与思考[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 87-89. (JIA Shaofeng, LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 87-89. (in Chinese))
- [34] 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(7): 2916-2921. (LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007(7): 2916-2921. (in Chinese))
- [35] 黄显峰, 钟婧玮, 方国华, 等. 基于 ME-Tennant 法的河道生态流量过程评价模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 20-26. (HUANG Xianfeng, ZHONG Jingwei, FANG Guohua, 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. (in Chinese))
- [36] 于守兵, 张朝晖, 徐丛亮. 黄河河口鱼类春季生态需水[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 1-7. (YU Shoubing, ZHANG Zhaoxue, XU Congliang. Spring ecological water requirement for fishes in Yellow River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 1-7. (in Chinese))
- [37] 丁瑞华, 桂林华, 李明, 等. 虎嘉鱼及其保护生物学[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(2): 96-102. (DING Ruihua, GUI Linhua, LI Ming, et al. Protective biology of *Hucho bleekeri* in the upper Changjiang River, China [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 28(2): 96-102. (in Chinese))
- [38] 洪思扬, 王红瑞, 朱中凡, 等. 基于栖息地指标法的生态流量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 168-175. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Research of ecologic flow based on habitat index method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1): 168-175. (in Chinese))
- [39] KSIAZEK L, WOS A, FLOREK J, et al. Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow of Wisloka River, Poland: case study [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2019, 191(4): 2541-25417.
- [40] 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))

(收稿日期: 2020-04-14 编辑: 彭桃英)