

基于底栖动物多样性恢复的减脱水河段生态流量核算

赵伟华, 杜琦, 郭伟杰

(长江科学院流域水环境研究所, 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 鉴于世界范围内生态流量核算方法众多, 不同方法计算获得的生态流量大小也不尽相同, 为了研究我国南方山区中小河流的生态流量大小, 以澜沧江支流景谷河引水式电站形成的减脱水河段为研究区域, 根据底栖动物的丰度以及生物多样性对适宜栖息地水深、流速的需求, 2018年4月和9月, 在景谷河零级和三级电站之间的减脱水河段设置20个采样点, 将底栖动物栖息地类型定义为深潭、深流、浅滩和边滩共计4种生境类型, 采用栖息地模拟法建立了景谷河减脱水过渡区生态流量核算方法。结果显示, 研究河段69.0%的底栖动物种类在边滩中出现, 47.30%在浅滩中出现, 边滩和浅滩是维持底栖动物多样性的最优生境类型。通过模拟13种工况下底栖动物最适栖息地面积的变化情况, 最终确定景谷河减水河段底栖动物最适的生态流量需求为3.0~4.0 m³/s。研究表明, 此方法适用于宽浅型的河道, 获得的生态流量大于常用的水文学方法计算得出的生态流量值, 能切实反映底栖动物栖息地的实际水量需求, 可为以水生生物多样性为保护目标的生态流量核算提供参考。

关键词: 生态流量; 底栖动物; 引水式小水电; 减脱水河段

中图分类号: X835, X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)05-0049-06

小水电站是我国水电能源的重要组成部分, 根据水利部《2018年农村水电年报》, 截至2018年末, 全国共有农村水电站46 515座, 装机容量达到8 043.5万kW, 占全国水电总装机容量的22.8%。根据2003年第一次全国水利普查数据统计, 引水式电站是农村水电站的主要类型, 其数量约占全部农村水电站的80%。小水电对生态环境最主要的影响, 体现在引水式电站运行阶段产生减脱水河段对河道水文过程和水生态系统带来的不利影响(Bragg et al, 2005; 孟艳秋和刘启华, 2012)。自然河流径流部分水量被引走用于发电后, 自引水断面至下游发电后水流汇入河段断面之间导致减水甚至脱水干涸的河段, 形成了山区河流的生态过渡区(王强等, 2013; 徐冉云, 2015); 该过渡区是受引水发电生态影响最大的区域。长时间的低流量或者脱水, 使得河滩裸露、面积减小, 影响底栖生态结构和种类数(赵伟华等, 2015); 云南景谷河减水段底栖动物平均密度和生物量均小于混合段, 减水段底栖动物的生物量从上游至下游递减(郭伟杰等, 2015)。

生态流量是指维持淡水、河口生态系统以及依赖于这些生态系统的人类宜居环境所需的水流数量、过程和质量。底栖动物是河流生态系统中重要的生物类群, 其种类以及生物量的减少, 也将影响到局部生态系统。底栖动物的物种需求往往作为制定生态流量的重要依据, Phelan等(2017)在北卡罗莱纳州建立了评估底栖动物对流量改变的响应方法, 发现底栖动物丰度随着流量减少而持续减少; 此外, 鉴于底栖与流量变化为线性关系, 基于生物变化大小情况来确定生态流量是可行的。底栖动物作为水生生态系统的重要组成部分, 其种类多样、生态幅宽、对不利因素回避能力弱(Barbour et al, 1999); 河道形态(边滩、急流)以及水力形态(流速、水深)的改变, 都会对底栖动物群落结构产生影响(Sundermann et al, 2011)。

目前, 国内大部分小水电站生态流量的确定都是基于水文学的方法(魏浪和陈国柱, 2007; 何月萍和张玉杉, 2013), 如采用多年平均流量的10%为生态流量, 虽然一定程度上能满足河流的生态需求, 但不能真实反映河流中水生生物的实际生活史需求。本文以底栖动物为指示生物, 以云南景谷河为案例, 开展河流生态流量核算方法研究, 旨在探索一种新的基于生物需求的生态流量确定方法, 为小水电生态流量确定提供理论依据。

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0404502)。

作者简介: 赵伟华, 1982年生, 男, 教授级高级工程师, 主要从事水生生态修复研究工作。E-mail: zwh820305zwh@163.com

1 材料和方法

1.1 研究区域

云南景谷河属于澜沧江水系支流,全长85.6 km,上游景谷河电站水库工程坝址处年均径流量 $8.33 \text{ m}^3/\text{s}$ (袁志孝,1990),径流面积 634 km^2 ,天然落差630 m。景谷河从1973年建成二级站至今,整条河流已开发八级梯级电站,皆为引水式电站。零级电站是一狭长形不完全年调节水库,装机容量3 200 kW。三级电站装机容量3 200 kW。河流为卵石底质,齐质性好,底质因子不构成改变底栖生态的影响因子。底栖的种类、生物量特征与不同流量作用下的水深、流速生境有关,且减脱水作用明显,景谷河是研究引水式电站减脱水过渡区生态流量的代表性河流。研究区域设置在景谷河干流零级和三级电站减水段过渡区(图1)。

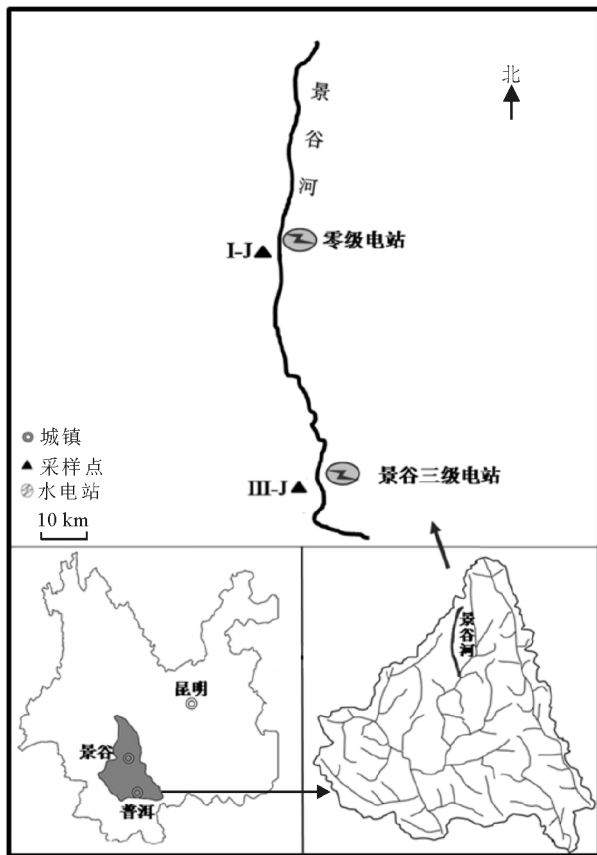


图1 研究区域

Fig.1 Location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 底栖动物采集与分析 2018年4月和9月,在景谷河零级和三级电站之间的减脱水河段设置20个采样点,底栖动物以定性采集为主,使用索伯网(采样面积 0.09 m^2),每个样点采集1~2次。在

水深较大,无法用索伯网采集时,用手抄网进行定性采集。采集的底质经24目铜筛筛洗后,置于白色解剖盘中分拣底栖动物标本,并用10%的福尔马林固定,然后进行种类鉴定和计数,用电子天平称量。底栖动物一般鉴定到属,个别水生昆虫鉴定到科。

1.2.2 河道地形测量方法 本文使用美国 YSI FlowTracker 手持流速流量仪对研究河段流速进行测量,采用一点法测定选择断面的流速,间隔设置为0.5 m,水深测量采用标尺法人工测定,现场用皮尺测量相对坐标,结合断面法和现场拍照技术绘制地形示意图,并按照绘制的水面地形图对模型进行插值补点修正。

1.2.3 适宜栖息地模拟分析 本文采用 River-2D 构建研究河段二维栖息地模型。模拟不同水深和流速在不同流量下的分布状态。本文共模拟了0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.2、3.5、4.0、4.5、7.0、9.0、12.0 m^3/s 共计13种流量下的水深与流速分布。在模拟适宜栖息地面积时,将 River-2D 中模拟的不同流量下流速、水深分布和坐标信息导入 ArcGIS 中。按照栖息地类型的水力条件(流速、水深),分别模拟每种流量下4种栖息地类型(深潭、深流、浅滩、边滩)面积的大小和分布。

1.2.4 模型率定 从 River-2D 中导出采样当日流量下模拟的各记录点水深、流速与当日实测的水深、流速进行对比,以验证模型的可信度。作出所有水深和流速偏差值的累积频率图,统计各个误差范围内的偏差值个数,得到各偏差值所在误差范围对应的累积频率值。通过分析,约83%的水深模拟值的误差范围在 ± 0.26 ,约65%的流速模拟值误差范围在 ± 0.21 。此误差在模型允许范围之内,表明对水深和流速的模拟结果是可信的。

2 结果与分析

2.1 栖息地类型划分

根据景谷河减水河段实测水深和流速特征,依据 Bovee(1982)对小型河流栖息地的研究,建立景谷河减水段底栖动物生境类型划分阈值,将底栖动物栖息地类型定义为深潭、深流、浅滩和边滩共4种生境类型,划分依据为:

- 1) 深潭:底质均为淤泥或泥沙,水深较大,流速几乎为0,部分深潭有沉水植物;
- 2) 浅滩:一般为卵石、砾石底质等,流速较大,水深较浅,一般无沉水植物;
- 3) 边滩:流速、水深都很小的区域,位于河道两

边,底质以泥沙为主,一般有挺水植物分布;

4)深流:流速、水深都较大的区域,底质多为泥沙,分布于河道的中间,由于流速较大,一般底栖动物种类少。

栖息地类型划分的流速为 0.35 m/s,水深为 0.30 m(表 1)。

表 1 底栖动物不同栖息地水深和流速阈值

Tab.1 Water depth and velocity thresholds in different macroinvertebrate habitats

生境类型	深潭	浅滩	深流	边滩
水深/m	>0.30	<0.30	>0.30	<0.30
流速/m·s ⁻¹	<0.35	>0.35	>0.35	<0.35

2.2 不同生境类型中的底栖动物

调查结果表明,景谷河减水河段 20 个样点共采集到底栖动物 47 种,隶属于 20 科 42 属。其中,寡毛类 3 种,占总种数的 4.8%;软体动物 1 种,占 2.4%;水生昆虫 43 种,占 92.8%。可见研究河段底栖动物以水生昆虫为主,尤其以双翅目种类最多。在采集的水生昆虫中,48%的种类为流水性种类,其余为广布性种类。

通过对比不同栖息地底栖动物种类和现存量可以看出(图 2),4 种生境类型中,边滩的底栖动物种类数最多,其次为浅滩,深流区最少。调查所得的 47 种底栖动物中,有 69.0%的种类在边滩中出现,47.30%在浅滩中出现,9.6%在深潭中出现,仅有 3.8%在深流中出现,说明景谷河底栖动物大部分种类出现在边滩和浅滩这两种生境下。由密度分布可以看出(图 3),也是边滩和浅滩的密度最大,深流中最小,说明底栖动物现存量最大的生境类型也是边滩和浅滩。

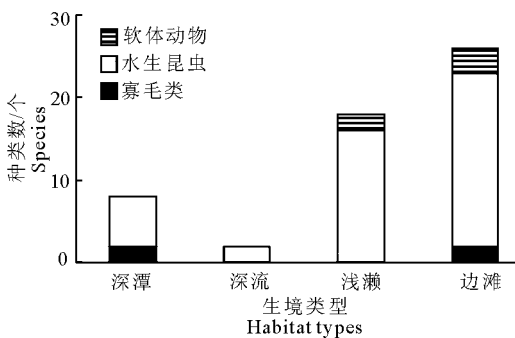


图 2 景谷河不同生境类型底栖动物种类数

Fig.2 Number of macroinvertebrate species in different habitat types of Jinggu River

因此,确定边滩和浅滩对应的水深和流速是山区小水电水库系统生态需水的调控指标。边滩对应

的水深小于 0.30 m,流速小于 0.35 m/s,浅滩对应水深小于 0.30 m,流速大于 0.35 m/s。

2.3 栖息地水力学模拟

本文用水力学软件 River-2D 模拟了水深和流速在不同流量下的分布状态。通过模拟景谷河河段从 0.5 m³/s 到 12.0 m³/s 的 13 种流量,获得了不同流量条件下的水深分布和平均流速分布。图 4-a 显示了测量当日(流量为 3.2 m³/s)水深和流速的模拟结果。图 4-b 显示了在流量为 3.2 m³/s 时研究河段的流速和水深分布。

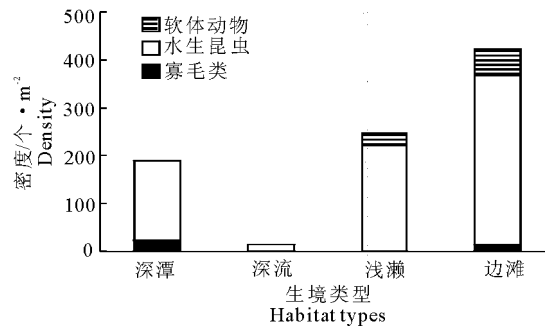


图 3 景谷河不同生境类型底栖动物密度

Fig.3 Density of macroinvertebrate in different habitat types in Jinggu River

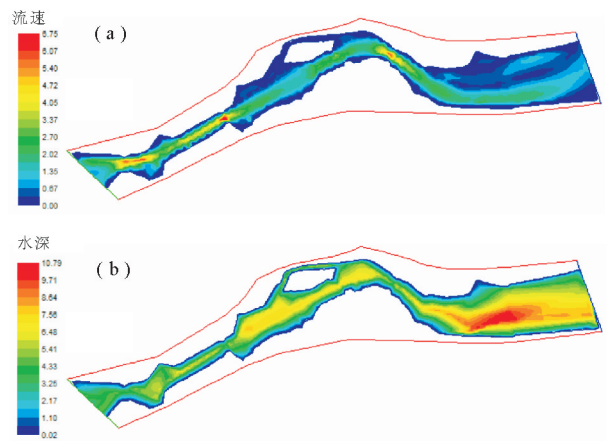


图 4 流量为 3.2 m³/s 时边滩的模拟过程

Fig.4 Simulation of point bars at a flow of 3.2 m³/s

2.4 栖息地模拟

采用 GIS 对不同流量下底栖动物 4 种栖息地大小及其分布进行了模拟。把从 River-2D 中模拟的 13 种流量下流速、水深分布和坐标信息导入 ArcGIS 中。按照某一栖息地类型的水力条件(流速、水深)分别模拟每一流量下 4 种栖息地类型(深潭、深流、浅滩、边滩)面积的大小和分布,显示流量为 3.2 m³/s 时,边滩的模拟过程(图 5)。

首先,按照边滩的水深条件(<0.3 m)进行图层筛选(图 5-a);然后,按照流速(<0.35 m/s)进行图

层筛选(图5-b);最后,将两个图层进行叠加,就是同时满足水深和流速条件的栖息地类型(图5-c)。最终根据所模拟的栖息地类型的图层栅格数和栅格大小,计算出该栖息地类型的面积大小及其分布范围。表2显示了13种流量下不同栖息地类型面积大小。

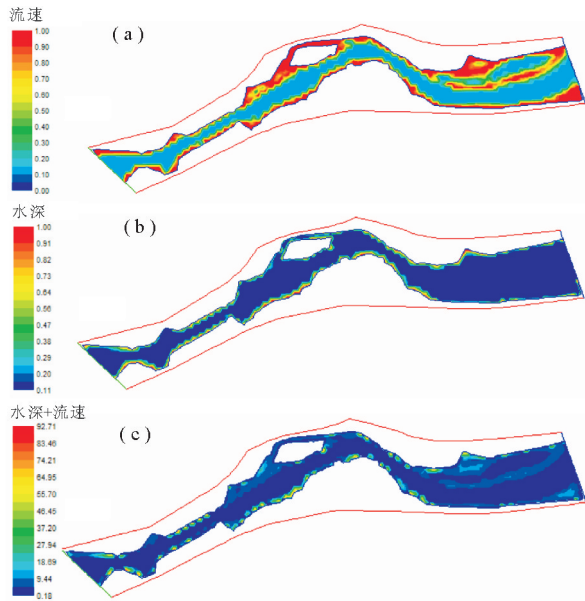


图5 流量为 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时边滩的水力条件变化

Fig.5 Distribution of point bars at a flow of $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$

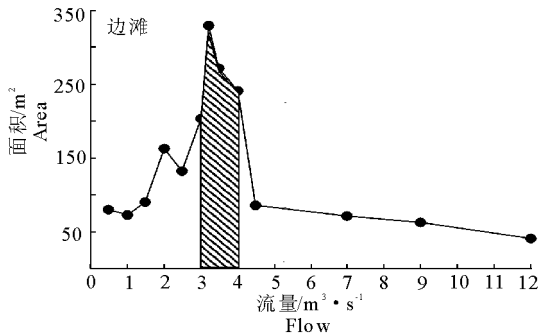


图6 两种类型栖息地面积随流量的变化关系

Fig.6 Variation of habitat area with flow for the two primary habitat types

表2 13种流量下4种栖息地类型面积变化

Tab.2 Changes in the areas of four habitat types under 13 flow conditions

流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	深潭/ m^2	边滩/ m^2	浅滩/ m^2	深流/ m^2
0.5	54.81	79.65	56.48	291.32
1.0	8.68	72.60	32.47	432.83
1.5	8.85	89.37	19.70	511.26
2.0	10.07	163.31	42.70	581.53
2.5	9.00	132.70	95.23	591.96
3.0	9.58	203.86	157.30	658.58
3.2	12.94	330.10	168.73	686.77
3.5	12.84	271.19	261.89	655.86
4.0	16.47	241.32	289.25	818.42
4.5	19.78	86.32	269.70	101.50
7.0	24.04	70.65	220.90	116.08
9.0	24.16	62.13	196.83	123.79
12.0	25.25	40.84	173.18	127.18

2.5 底栖动物生态流量推荐

从图6中可以看出,边滩的生境面积随着流量的增大一直在增加,直到流量为 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,面积达到最大,之后随着流量增加,其面积在减小;对于浅滩,在流量为 $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的面积最大,之后的栖息地面积随着流量的增加而减小。边滩和浅滩是底栖动物的多样性最高的两种栖息地类型。经过综合分析,确定景谷河减水河段底栖动物最适生态流量为 $3.0 \sim 4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 讨论

3.1 栖息地模拟法生态流量与年均流量的关系

目前,在实际工作中,如小水电清理整改中,大部分电站生态流量的核定均采用多年平均流量的10%。景谷河多年平均流量为 $8.33 \text{ m}^3/\text{s}$ (袁志孝, 1990)。本方法计算得出的生态流量 $3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$,为景谷河多年平均流量的36%~48%。比水文学方法计算获得的生态流量值大20%~30%。生态流量不仅包括流量大小,还应包括水文节律。本方法计算获得的生态流量值未考虑河流的丰枯水量变化

及不同类群底栖动物生活史需求,为一种概化的平均生态流量。后续还应根据不同地区、不同河流水量丰枯变化及底栖动物周年内不同生活史需求,探究更精细化的生态流量需求。

3.2 栖息地模拟法适用于宽浅型河段

底栖动物种类繁多,生活史多样化,对生境的需求也是多样化,对流量的需求可能不尽相同,特别是对某一流量组分的需求可能不像鱼类或沿岸带植物那样迫切,难以通过流量恢复法来核算生态需水,因此对底栖动物生态需水的研究宜采用栖息地模拟的方法。采用这种方法是基于这样的假设:保护或维

持了最合适底栖动物生存的栖息地类型,就能使底栖动物保持较高的多样性。至于流量在年内变化的频率及时间,其对底栖动物来说不是最重要的,最重要的是提供稳定且有一定面积的栖息地。但这种方法也有其适用范围,“V”字形河道不适合用本方法。因为流量的增加,对于栖息地面积的增加影响不大,底栖动物多样性在这种河型河流中多样性也不高,对于宽浅型的河道比较合适。

3.3 栖息地模拟法能反映底栖动物的生态需求

栖息地保护是生物多样性保护最有效的方法之一,基于此法则,采用评价适宜栖息地面积大小的 IFIM 方法研究景谷河生态需水是理想的。在大型河流中,水深 5~6 m 是底栖动物分布较多的区域,深泓中心带的冲刷较强、流速高,不利于底栖动物附着,且有机质等底栖动物的饵料缺乏(段学花等, 2007);对于小型河流而言,有效栖息地面积大小则是底栖动物生物量的决定因素,不同流速和水深的栖息地异质性则不同。在景谷河深水区流速较大,由于巨型(直径 0.5~1.0 m)卵石的存在,在卵石上下游形成冲刷深坑,有机质赋存少,底栖动物不适宜在大流速的深水区生存。对于岸边浅水区域而言,由于边缘效应的存在、人类活动干扰以及陆生动物在该区域的活动,对底栖动物的捕食强度较高,较大流速反而能起到保护作用,适宜吸附能力强的干净种类生存。在浅水缓流区,由于树叶、枯草、树枝等有机质覆盖,非喜流性底栖动物易于躲藏,且饵料丰富。因此,种类和生物量较高。

综上所述,通过研究云南景谷河底栖动物的生态流量需求,认为浅水高流速的浅滩和浅水低流速的边滩为底栖动物种类和生物量较多的区域(陈含墨等, 2019),提出了基于底栖动物多样性保护的生态流量核算方法,以期为更多的基于研究河段水生生物实际需求的生态流量核算提供借鉴。

参考文献

陈含墨,渠晓东,王芳,2019. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. 环境科学研究, 32(5): 758 - 765.

段学花,王兆印,田世民,2007. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验[J]. 清华大学学报(自然科学版),

47(9): 1553 - 1556.

郭伟杰,赵伟华,王振华,2015. 梯级引水式水电站对底栖动物群落结构的影响[J]. 长江科学院院报, 32(6): 87 - 93.

何月萍,张玉杉,2013. 水牛家水电站下泄生态流量研究及效果分析[J]. 水电站设计, 29(2): 100 - 104.

孟艳秋,刘启华,2012. 湖南省引水式水电站生态环境的现状思考[J]. 湖南水利水电, (1): 47 - 50.

王强,袁兴中,刘红,等,2013. 引水式小水电对西南山地河流鱼类的影响[J]. 水力发电学报, 32(2): 133 - 138, 158.

魏浪,陈国柱,2007. 善泥坡水电站生态流量的确定及其保障措施[J]. 贵州水力发电, 21(1): 11 - 14.

徐冉云,2015. 农村水电开发对河流生态系统的影响及对策[J]. 小水电, (3): 4 - 7.

袁志孝,1990. 景谷河电站水库工程介绍[J]. 云南水力发电, (4): 43 - 48.

赵伟华,彭增辉,王振华,等,2015. 云南景谷河底栖动物群落结构及小水电站的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 24(2): 310 - 318.

Barbour M, Gerritsen J, Snyder B, et al, 1999. Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish, 2nd edition[M]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency.

Bovee, K D, 1982. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper 12[J/OL]. U.S.D.I. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services. FWS/OBS-82/26. 248 pp. DOI:10.5897/SRE11.355

Bragg O M, Black A R, Duck R W, et al, 2005. Approaching the physical-biological interface in rivers: a review of methods for ecological evaluation of flow regimes[J]. Progress in Physical Geography, 29(4): 506 - 531.

Phelan J, Cuffney T, Patterson L, et al, 2017. Fish and invertebrate flow-biology relationships to support the determination of environmental flows for North Carolina [J]. Journal of the American Water Resources Association, 53(1): 42 - 55.

Sundermann A, Antons C, Cron N, et al, 2011. Hydromorphological restoration of running waters: effects on benthic invertebrate assemblages[J]. Freshwater Biology, 56(8): 1689 - 1702.

(责任编辑 万月华)

Establishing the Ecological Flow of Dewatered River Reaches based on Restoration of Macroinvertebrates Diversity

ZHAO Wei-hua, DU Qi, GUO Wei-jie

(Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei Province Key Lab of Watershed Water Resource and Eco-Environmental Science, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: At present, there are many methods used around the world for establishing the ecological flow, and the flow obtained varies with method. In this study, we explored ecological flow accounting for small and medium-sized rivers in the mountainous areas of southern China, based on habitat requirements for macroinvertebrates. The objective was to provide a reference for setting the ecological flow of small hydro-power stations. The Jinggu River, a tributary of Lancang River with several reaches dewatered by power station diversions, was selected for a case study. The habitat simulation method used to establish the ecological flow provides a water depth and flow suitable for maintaining macroinvertebrate abundance and biodiversity. Water depth and velocity, and the area and distribution of four habitat types, were simulated under 13 flow conditions. Macroinvertebrate sampling was carried out in April and September of 2018. Of all the macroinvertebrate species observed, 69.0% occurred at point bars and 47.3% in riffles. Thus, point bars and riffles are the optimal habitat types for maintaining macroinvertebrate diversity. Changes in these two habitats were simulated under the 13 flow conditions, and the optimal ecological flow for macroinvertebrates in the reduced flow sections of Jinggu River was 3.0–4.0 m³/s. This method is suitable for wide and shallow rivers, while it gives an ecological flow higher than that calculated by the commonly used hydrological method, it reflects the actual habitat requirements for maintaining the macroinvertebrate community. This article provides a reference for establishing the ecological flow using aquatic biodiversity as the protection objective.

Key words: ecological flow; macroinvertebrate; small diversion-type hydropower station; dewatered river reaches

作者职称更正说明

应作者要求,《水利渔业》2007年第6期发表的论文《6-苜氨基嘌呤对雨生红球藻中虾青素积累的影响》,作者高政权、孟春晓的职称均更正为“讲师”。本刊已联系中国知网,对该论文的网络版进行了全文替换。特此说明。