

文章编号:0559-9350(2013)05-0505-10

中型山区河流水电站下游的鱼类生态需水量计算

卢红伟, 李嘉, 李永

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:为更好地对河流水电开发后的鱼类进行保护,探讨中型山区河流水电站下游的鱼类生态需水量计算。参照大型河流鱼类水力生境参数标准,根据中型山区河流的特点,得到中型山区河流鱼类水力生境参数的参考标准。选取有代表性的四川中型山区河流杂谷脑河进行鱼类生境原型观测,原型观测结果证实了该参考标准能够满足杂谷脑河鱼类对生境的实际需求。基于所得到的参考标准,应用生态水力学法对杂谷脑河红叶二级、理县以及甘堡3座电站减水河段的鱼类生态需水量进行计算分析,得到3座电站的生态需水量推荐值。通过分析可知,所得到的生态需水量推荐值占年均天然流量以及设计引用流量的比例都不高,在3座电站的运行实践中,具有可操作性。

关键词:中型山区河流;鱼类;生态需水量;水力生境参数标准;生态水力学法;杂谷脑河

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

山区河流水电工程的运行过程中,鱼类生态需水量是需要遵守的一个重要约束条件。当前确定鱼类生态需水量的方法有:7Q10法^[1]、增量法、Tennant法^[2-4]、湿周法等水文和水力学衍生方法^[5-6]。生态水力学法作为其中一种新的、已逐渐开始广泛应用的方法,能预测水力生境参数如何随流量变化而变化^[7],并通过水力生境指标体系及其标准值估算最小流量^[8-9]。在理论上,由于生态水力学法能模拟鱼类水力生境参数随流量的变化情况,因此,非常适合于考虑鱼类生境实际需求的鱼类生态需水量确定^[10]。但生态水力学法在实际应用时,需要有鱼类水力生境参数标准作为判断依据,而已有的鱼类水力生境参数标准,由于适用范围的限制,往往会影响到生态水力学法的应用效果。目前在鱼类水力生境参数标准方面,仅有针对大型河流的鱼类水力生境参数标准,该标准无法考虑到每条河流特别是中小型河流的鱼类对生境的实际需求,因此,应用生态水力学法时,在引用鱼类水力生境参数标准前,需根据每条河流的实际情况,先对该标准进行修订;其次,还需通过鱼类生境的原型观测以证实经修订后的参考标准确实能够满足具体河流鱼类对生境的实际需求。本文对中型山区河流水电站下游的鱼类生态需水量计算进行分析。参考大型河流鱼类水力生境参数标准,得到中型山区河流鱼类水力生境参数参考标准;选取有代表性的四川中型山区河流杂谷脑河,通过鱼类生境原型观测证实了该参考标准能够满足杂谷脑河鱼类对生境的实际需求;应用生态水力学法对杂谷脑河红叶二级、理县以及甘堡3座电站减水河段的鱼类生态需水量进行计算分析,得到3座电站的鱼类生态需水量推荐值;最后通过综合分析可知,所得到的鱼类生态需水量在3座电站的运行实践中具有可操作性。

1 河道生态基流量的生态水力学确定方法

河道生态基流量的生态水力学模型一般包括以下3个模块:(1)原型观测与河道水生生物生境调查,该模块调查分析水生生物生存对水深、流速等水力生境参数的最基本要求;(2)河道水力模拟,利用

收稿日期:2012-11-26

基金项目:四川省科技厅科技支撑资助项目(2012SZ0044)

作者简介:卢红伟(1962-),男,湖北人,博士生,教授级高级工程师,主要从事水资源规划与环境保护研究。

E-mail:luhongweiscu2012@163.com

水力学模型对研究河段进行一维、二维、三维水力模拟，计算不同流量时研究河段内各水力生境参数值的变化情况，并分析上述2个模块，制定水力生境指标体系；(3)生态需水量确定，依据水力生境指标体系，结合河道的来水过程、当地的社会经济发展状况及政策综合确定河道生态基流量^[11]。

生态水力学法假设水深、流速、湿周、水面宽、过水断面面积、水面面积与水温是流量变化对物种数量和分布造成影响的主要水力生境参数。在生态水力学法的河道水力模拟计算中，常采用HEC-RAS计算软件包。HEC-RAS适用于河道稳定和非稳定流一维水力计算，其控制方程为圣维南方程组：

连续方程：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{L_q}{B} \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left[\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right] = 0 \quad (2)$$

式中： Q 、 Z 分别为待求的流量和水位； A 、 B 分别为断面过水面积和河宽； K 为流量模数， $K=A \times R^{2/3}/n$ ， R 为断面水力半径， n 为糙率； L_q 为旁侧入流。

本文选取河道生态基流量的生态水力学法对中型山区河流水电站下游的鱼类生态需水量进行分析计算。

2 大型河流鱼类水力生境参数标准的引用修订

目前已有大型河流鱼类水力生境参数标准^[11]，具体如表1所示。

表1 大型河流鱼类水力生境参数标准

鱼类水力生境参数	最低标准	累计河段长度的百分比
最大水深	鱼类体长的2~3倍	95%
平均水深/m	≥0.3	95%
平均速度/(m/s)	≥0.3	95%
水面宽度/m	≥30	95%
湿周率	≥50%	95%
过水断面面积/m ²	≥30	95%
水域水面面积	≥70%	
水温	适合鱼类生存、繁殖	

根据“《水电水利建设项目生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)》的函”(环评函[2006]4号文)，生态水力学法“适用于大中型河流内的水生生物生态流量的计算。对中型河流，上述标准适当降低”。根据以上原则，参考大型河流鱼类水力生境参数标准，考虑中型山区河流水面较窄、流量较小、水深较浅、急缓流交替频繁等特点，修订得到中型山区河流鱼类水力生境参数的参考标准如表2所示。

表2 中型山区河流鱼类水力生境参数参考标准

鱼类水力生境参数	最低标准	累计河段长段的百分比
最大水深	鱼类体长的2~3倍	95%
平均水深/m	≥0.3	95%
平均速度/(m/s)	≥0.3	当枯水期100%能满足时，减水时达95%；当枯期不能满足时，不考虑此项
湿周率	≥50%	95%
水域水面面积	≥70%	
水温	适合鱼类生存、繁殖	

由于天然情况下中型山区河流普遍水面宽 $\leq 30\text{m}$ ，过水面积 $\leq 30\text{m}^2$ ，而鱼类仍能存活且保持一定的资源量，因此，在表2中，没有保留大型河流鱼类水力生境参数标准中的水面宽 $\geq 30\text{m}$ 和过水断面面积 $\geq 30\text{m}^2$ 这两项参数限制。

3 杂谷脑河原型观测及鱼类水力生境参数值确定

杂谷脑河位于四川境内，属长江二级支流，是岷江第二大支流，具有典型山区河流特征，分布有四川地区典型的水生生物群落。发源于理县境内鹧鸪山南麓的红水沟，在汶川县威州镇与岷江汇合。流域面积 $4\,632\text{km}^2$ ，干流长 168km ，天然落差 $3\,092\text{m}$ ，平均比降 18.4% ，河口多年平均流量 $112\text{m}^3/\text{s}$ ，原天然河道水面宽度 $24\sim 46\text{m}$ ，属山区中型河流。杂谷脑河自上至下已建引水式电站有红叶二级、理县、甘堡、薛城、下庄以及桑坪。

3.1 原型观测 确定鮡科、裂腹鱼亚科中的石爬鮡、裂腹鱼作为衡量杂谷脑河鱼类生境质量的指示物种，对其生境进行原型观测，主要原因如下：(1)石爬鮡、裂腹鱼在四川境内山区河流广泛分布，是四川山区主要经济鱼类，在渔获物中所占比例非常高，具有一定代表性。(2)经文献分析及向鱼类专家咨询，发现石爬鮡、裂腹鱼的繁殖习性跟水文情势联系较密切，对水深、流速有一定要求，受河道减水影响较大。(3)石爬鮡、裂腹鱼属四川省省级保护鱼类，为长江上游特有鱼类，具有保护意义。反映鱼类水力生境参数包括：水温、水深、流速、底质、溶解氧、透明度、pH值等。考虑杂谷脑河主要为引水式水电开发，主要改变河流的水文情势，对水深、流速、水文过程等产生影响，而水温、底质、溶解氧、透明度、pH值等指标相对变化较小。因此，选取水深、流速、水面宽、过水断面面积等作为鱼类水力生境参数。沿杂谷脑河干流由上至下共设置15个观测断面。在各个观测断面对指示物种进行生境原型观测时，首先测量采样河段上、下游控制断面的流速、流量、水深、断面尺寸等参数，然后在采样河段进行鱼类捕捞采样，当获得渔获物时，还要对渔获物位置附近的流速、水深等参数进行测量。上、下游控制断面及渔获物位置的水力参数测量方案为：各断面分别设置3~4条垂线，每条垂线的测点在水面线下5~10cm位置，最后取断面平均。对渔获物现场测量体长、体重，并判断年龄。杂谷脑河各电站地理位置及原型观测重要节点如图1所示。

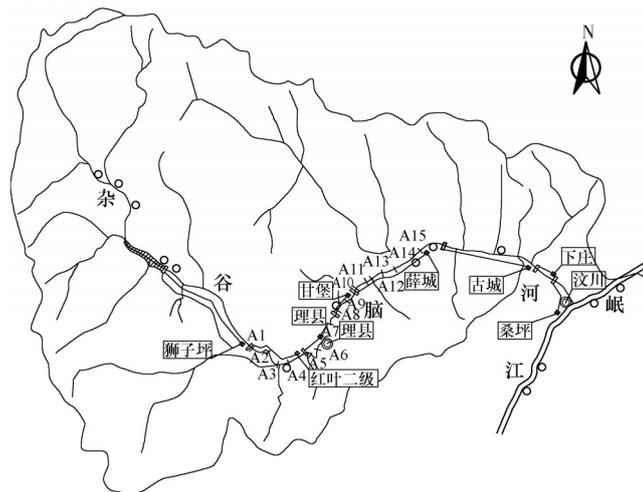


图1 杂谷脑各电站地理位置及原型观测重要节点

杂谷脑河渔获区段鱼类水力生境参数如表3、表4所示。

3.2 鱼类水力生境参数值确定 根据表3、表4，得到杂谷脑河石爬鮡、齐口裂腹鱼成鱼在观测条件下可生存的水力生境参数值如表5所示。由于本次观测渔获物样本较少，所提取的水力生境参数值精度不高，今后随着观测频次的增加，精度也会同时提高。

表3 石爬鮡杂谷脑河渔获区段的水力生境参数

体重/g	全长/cm	捕获地对应断面	流量/(m ³ /s)	流速/(m/s)	平均水深/m	最大水深/m	过水断面面积/(m ²)	水面宽度/m
4.6	11.2	对比河段						
15.7	13.4	A2—A4	2.67~5.58	0.08~0.29	0.33~0.61	0.52~0.94	4.58~10.99	13.94~17.93
16.1	14.6	A5—厂房汇口	0.82~0.97	0.14~0.34	0.23~0.27	0.44~0.55	2.01~2.39	7.8~25.9
13.2	11.7	A12—A13	1.08	0.18~0.22	0.38~0.39	0.56~0.58	4.94~6.02	13.1~15.6
18.4	16.2	A12—A13	1.08	0.18~0.22	0.38~0.39	0.56~0.58	4.94~6.02	13.1~15.6
22.1	17.9	对比河段						

注：因不能确定石爬鮡的年龄，因此表3中无年龄项。

表4 齐口裂腹鱼杂谷脑河渔获区段的水力生境参数

体重/g	全长/cm	年龄/a	捕获地对应断面	流量/(m ³ /s)	流速/(m/s)	平均水深/m	最大水深/m	过水断面面积/m ²	水面宽度/m
267.0	32.4	7	A12—A13	1.08	0.18~0.22	0.38~0.39	0.56~0.58	4.94~6.02	13.1~15.6
312.1	36.4	14	A12—A13	1.08	0.18~0.22	0.38~0.39	0.56~0.58	4.94~6.02	13.1~15.6

表5 杂谷脑河可供石爬鮡、齐口裂腹鱼成鱼生存的水力生境参数值

鱼类名称	平均水深的最小值/m	最大水深的最小值/m	平均流速的最小值/(m/s)	水面宽度/m	过水断面面积/m ²
石爬鮡	0.23	0.44	0.14	7.8	2.01
齐口裂腹鱼	0.38	0.56	0.18	13.1	2.94

将表5与表2中的中型河流的关键鱼类水力生境参数参考标准对比，比较结果为：平均水深参数基本相同，而对平均流速参数，表2中的参考标准要高，因此，表2中的参考标准适宜于杂谷脑河鱼类生境，可作为杂谷脑河计算鱼类生态需水量的参考依据。

4 杂谷脑河三电站鱼类生态需水量计算

选取杂谷脑河上的红叶二级、理县、甘堡三电站，采用HEC-RAS计算软件包对其减水河段鱼类水力生境参数进行模拟，并依据表2中的中型山区河流鱼类水力生境参数参考标准，得到3座电站的鱼类生态需水量推荐值，最后将所得到的鱼类生态需水量推荐值与年均天然流量以及设计引用流量进行比较，分析所得到的鱼类生态需水量的可操作性。红叶二级、理县、甘堡3座电站的地理位置如图1所示，其特征参数如表6所示。

表6 红叶二级、理县、甘堡3座电站特征参数

参数	红叶二级	理县	甘堡
装机容量/万kW	9	3.3	3.05
引水线路长/km	7.82	2.21	2.42
闸厂址间减脱水河道长/km	11	5	3.90
设计引用流量/(m ³ /s)	56.7	54.5	51.40

4.1 工况设置 共设置1个实测工况与10个模拟工况。实测工况如实反映现场水文情势和生境特征，可为模拟工况提供可对比的基础资料；模拟工况模拟不同减水程度水文情势和生境特征，以研

表7 工况设置情况

工况	说明	工况	说明
实测工况	现场实测	模拟工况6	闸址下泄多年平均流量的15%
模拟工况1	闸址下泄枯水期多年平均流量的5%	模拟工况7	闸址下泄多年平均流量的20%
模拟工况2	闸址下泄枯水期多年平均流量的10%	模拟工况8	闸址下泄多年平均流量的25%
模拟工况3	闸址下泄多年平均流量的5%	模拟工况9	闸址下泄多年平均流量的30%
模拟工况4	闸址下泄多年平均流量的10%	模拟工况10	闸址下泄枯水期多年平均流量的100%
模拟工况5	闸址下泄多年平均流量的12.5%		

究不同流量情况下河道水力生境参数的变化规律。工况设置情况如表7所示。

4.2 红叶二级电站鱼类生态需水量确定 红叶二级电站为低闸引水式，闸址位于理县朴头乡新店子村，厂址位于黑土坡附近成阿公路210km里程桩处。电站闸址多年平均流量 $41.7\text{m}^3/\text{s}$ ，枯期平均流量 $16.8\text{m}^3/\text{s}$ ，闸址多年月平均流量如表8。

表8 红叶二级电站闸址多年月平均流量

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年平均流量/(m^3/s)	15.6	13.8	13.1	19.7	37.6	63.5	71.5	60.6	89.4	62.4	32.8	20.2

经多次现场考察，结合河段地形地貌特点和鱼类生境特征，共设置6个断面，其中断面1、2如图2所示。

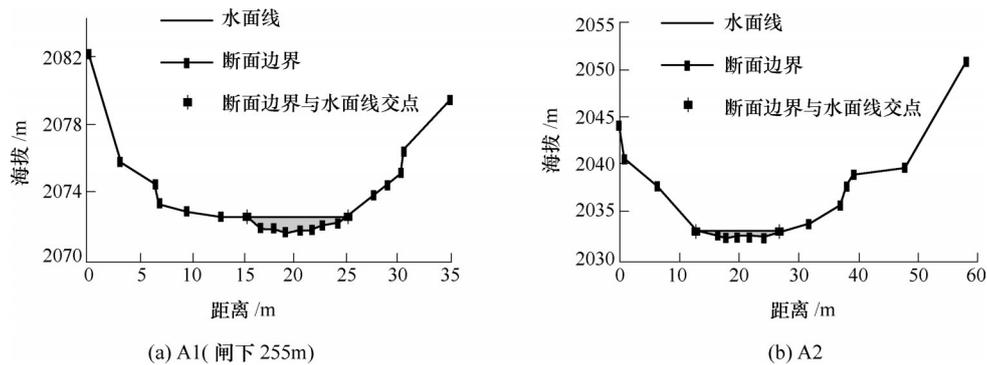


图2 红叶二级原型观测 A1、A2 断面

对研究河段布设的断面和区间汇流进行流量测量，结果如表9。

表9 红叶二级电站干流及支沟实测流量

	干流断面				支沟	
	A1	A2	A3	A4	毕棚沟	朴头沟
距离闸址距离/km	0.36	2.67	5.58	7.59	4.7	6.37
流量/(m^3/s)	0.34	0.35	2.93	4.68	2.24	0.34

将流量实测数据作为实测工况，对实测工况进行水位模拟，将模拟结果与实测值比较。经比较可知，水位计算值与实测值差异较小。表10、表11为实测及模拟工况4下的各断面水力生境参数计算结果。

表10 实测工况研究河段水力生境参数计算值

断面名称	流量/(m^3/s)	流速/(m/s)	过水断面面积/ m^2	顶宽/m	弗劳德数	最大水深/m	平均水深/m	水域水面面积/ m^2	过水断面面积占枯期比值	水面宽度占枯期比值
A1	0.34	0.1	5.3	9.8	0.04	0.89	0.54	27.5	0.06	0.35
A2	0.35	0.1	4.6	13.9	0.06	0.52	0.33	38.1	0.08	0.51
毕棚沟汇口	2.59	0.2	11.0	17.9	0.08	0.94	0.61	9.2	0.24	0.61
A3	2.59	0.3	10.3	17.5	0.12	0.90	0.58	22.8	0.26	0.60
朴头沟汇口	2.93	0.3	10.0	22.2	0.14	0.82	0.45	18.0	0.26	0.66
A4	2.93	0.3	11.4	25.2	0.14	0.71	0.45		0.30	0.73

参照表2中的鱼类水力生境参数参考标准对各工况的水力生境参数达标情况进行分析，如表12所示。

依据表2，由表12可得到红叶二级电站的鱼类生态需水量推荐值为 $1.68\text{m}^3/\text{s}$ (枯期平均流量的10%)。

4.3 理县电站鱼类生态需水量确定 理县电站采用低闸引水式开发，闸址位于理县县城上游6.5km，厂址在理县县城上游1.5km处。经多次现场考察，结合河段地形地貌特点和鱼类生境特征，

表 11 模拟工况 4(年均 10%)研究河段水力生境参数计算值

断面名称	流量 /(m^3/s)	流速 /(m/s)	过水断面面积/ m^2	顶宽/ m	弗劳德数	最大水深/ m	平均水深/ m	水域水面面积/ m^2	过水断面面积占枯期比值	水面宽度占枯期比值
A1	4.17	0.11	23.8	20.3	0.03	2.0	1.2	48.0	0.46	0.84
A2	4.18	0.19	22.2	21.3	0.06	1.6	1.0	52.1	0.38	0.78
毕棚沟汇口	6.42	0.30	21.7	22.3	0.09	1.5	1.0	11.4	0.47	0.76
A3	6.42	0.36	18.1	21.6	0.13	1.3	0.8	27.9	0.46	0.74
朴头沟汇口	6.76	0.36	19.0	26.9	0.14	1.2	0.7	21.0	0.49	0.80
A4	6.76	0.36	18.7	28.5	0.14	1.0	0.7		0.49	0.83

表 12 红叶二级电站减水河段各工况水力生境参数达标情况分析

生境参数	指标	最大水深	平均水深	平均速度	水面宽度	湿周率	过水断面面积	水域水面面积	水温
标准	最低标准 累计河段长百分比	鱼体长的 2~3 倍	$\geq 0.3m$	$\geq 0.3m/s$	$\geq 30m$	$\geq 50\%$	$\geq 30m^2$	$\geq 70\%$	适合鱼类生存、繁殖
实测工况	实测($0.34m^3/s$)	58%	100%	0%	0%	72%	0%	56%	符合
达标情况 (模拟工况)	枯期多年平均流量的 5% ($0.84m^3/s$)	97%	100%	0%	0%	100%	0%	64%	符合
	枯水期多年平均流量 10% ($1.68m^3/s$)	100%	100%	28%	0%	100%	0%	70%	符合
	多年平均流量的 5% ($2.09m^3/s$)	100%	100%	29%	0%	100%	0%	72%	符合
	多年平均流量的 10% ($4.17m^3/s$)	100%	100%	34%	0%	100%	0%	79%	符合
	多年平均流量的 12.5% ($5.21m^3/s$)	100%	100%	71%	0%	100%	0%	81%	符合
	多年平均流量的 15% ($6.26m^3/s$)	100%	100%	74%	0%	100%	0%	83%	符合
	多年平均流量的 20% ($8.34m^3/s$)	100%	100%	80%	5%	100%	64%	87%	符合
	多年平均流量的 25% ($10.43m^3/s$)	100%	100%	86%	14%	100%	69%	91%	符合
	多年平均流量的 30% ($12.51m^3/s$)	100%	100%	92%	17%	100%	100%	94%	符合
推荐工况	枯水期多年平均流量 10% ($1.68m^3/s$)	100%	100%	28%	0%	100%	0%	70%	

说明：(1)本河段鱼类体形较小，较大体长仅有 25cm，最大水深设置为 0.75m；(2)本河段天然枯期不能 100% 满足标准限值，平均速度不作为指标；(3)本河段是中型山区河流，不考虑水面宽度和过水断面面积两项指标；(4)本河段工程为低闸引水，电站运行前后水温变幅小，适合鱼类生存、繁殖。

表 13 理县电站断面布置

断面名称	距闸址距离/ km	断面区间距离/ km	站点标识
一颗印沟汇口	0.66	0.97	
A5	1.63	1.05	11
日足沟汇口	2.68	2.62	10.71
A6	5.30		10

布设 2 个断面，如表 13 所示。

理县电站闸址多年平均流量为 $62.7m^3/s$ ，枯期平均流量为 $25.3m^3/s$ 。闸址多年月平均流量如表 14。

区间河段内有一颗印沟、日足沟入汇。2009 年 4 月，对减水河段布设的大断面和区间汇流进行了流量测量，测量结果如表 15 所示。

表 14 理县电站闸址年均、月均流量统计

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年平均流量/ (m^3/s)	21.4	18.7	18.1	25.8	71.8	130.4	133.4	93.3	98.7	71.8	40.7	27.9

表 15 理县电站干流及支沟实测流量统计表

	干流断面		支沟	
	A5	A6	一颗印沟	日足沟
距离闸址距离/ km	0.36	2.67	0.66	2.68
流量/ (m^3/s)	1.63	5.30	0.31	0.15

将流量实测数据作为实测工况，对实测工况进行水位模拟，将模拟结果与实测值比较。经比较可知，水位计算值与实测值差异较小。在此基础上，对各模拟工况的各断面水力生境参数进行计算。参照表2中的鱼类水力生境参数参考标准对各工况的水力生境参数达标情况进行分析，如表16所示。

表16 理县电站减水河段水力生境参数标准及达标情况分析

生境参数	指标	最大水深	平均水深	平均速度	水面宽度	湿周率	过水断面面积	水域水面面积	水温
标准	最低标准	鱼类体长的2~3倍	≥0.3m	≥0.3m/s	≥30m	≥50%	≥30m ²	≥70%	适合鱼类生存、繁殖
	累计河段长百分比	95%	95%	95%	95%	95%	95%		
实测工况	实测(0.31m ³ /s)	100%	0%	66%	0%	3%	0%	29%	符合
	枯水期多年平均流量的5%(1.27m ³ /s)	100%	52%	29%	6%	29%	0%	45%	符合
	枯水期多年平均流量的10%(2.53m ³ /s)	100%	95%	29%	47%	61%	0%	58%	符合
	多年平均流量的5%(3.14m ³ /s)	100%	100%	100%	73%	87%	0%	64%	符合
	多年平均流量的10%(6.27m ³ /s)	100%	100%	100%	88%	100%	0%	78%	符合
达标情况 (模拟工况)	多年平均流量的12.5%(7.84m ³ /s)	100%	100%	100%	91%	100%	0%	83%	符合
	多年平均流量的15%(9.41m ³ /s)	100%	100%	100%	93%	100%	0%	85%	符合
	多年平均流量的20%(12.54m ³ /s)	100%	100%	100%	100%	100%	77%	90%	符合
	多年平均流量的25%(15.68m ³ /s)	100%	100%	100%	100%	100%	84%	94%	符合
	多年平均流量的30%(18.81m ³ /s)	100%	100%	100%	100%	100%	89%	99%	符合
	枯水期多年平均流量(25.3m ³ /s)	100%	100%	100%	100%	100%	96%	100%	符合
推荐工况	多年平均流量的6.6%(4.15m ³ /s)	95%	100%	100%	82%	95%	0%	70%	

说明：(1)本河段鱼类体形较小，较大体长仅有25cm，最大水深设置为0.75m；(2)本河段是中型山区河流，不考虑水面宽度和过水断面面积两项指标；(3)本河段工程为低闸引水，电站运行前后水温变幅小，适合鱼类生存、繁殖。

依据表2，由表16可得到理县电站的鱼类生态需水量推荐值为6.27m³/s(多年平均流量的10%)。

4.4 甘堡电站鱼类生态需水量确定 甘堡电站采用低闸无压引水式开发，电站闸址位于理县县城下游9km。经多次现场考察，结合河段地形地貌特点和鱼类生境特征，布设2个断面。闸址多年平均流量为68.7m³/s，枯期平均流量为28m³/s。区间河段有日落沟入汇。对减水河段布设的大断面和区间汇流进行流量测量，闸址多年月平均流量如表17，测量结果如表18。

表17 甘堡水电站闸址年均、月均流量统计

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年平均流量(m ³ /s)	23.5	23.5	20.5	19.8	78.7	143.0	146.2	102.2	108.2	78.7	44.6	30.5

表18 甘堡水电站干流及支沟实测流量统计

项目	干流断面		支沟
	A8	A9	日落沟
距离闸址距离/km	0.36	2.67	7.49
流量/(m ³ /s)	16.8	16.81	

将流量实测数据作为实测工况，对实测工况进行水位模拟，将模拟结果与实测值比较。经比较可知，水位计算值与实测值差异较小。在此基础上，对各模拟工况的各断面水力生境参数进行计算。参照表2中的鱼类水力生境参数参考标准对各工况的水力生境参数达标情况进行分析，如表19所示。

依据表2，由表19可得到甘堡电站的鱼类生态需水量推荐值为6.87m³/s(多年平均流量的10%)。

4.5 可操作性分析 将红叶二级、理县、甘堡3座电站的闸址天然流量与所得到的鱼类生态需水量推荐值进行比较，具体如表20—22所示。

将红叶二级、理县、甘堡三电站的设计引用流量与所得到的鱼类生态需水量推荐值进行比较，具体如表23所示。

表19 甘堡电站减水河段各工况水力生境参数达标情况分析

生境参数	指标	最大水深	平均水深	平均速度	水面宽度	湿周率	过水断面面积	水域水面面积	水温
标准	最低标准 累计河段长百分比	鱼体长的2~3倍 95%	≥0.3m 95%	≥0.3m/s 95%	≥30m 95%	≥50% 95%	≥30m ² 95%	≥70% 95%	适合鱼类 生存、繁殖
达标情况 (模拟工况)	枯水期多年平均流量的5%(1.4m ³ /s)	100%	67%	91%	0%	0%	0%	38%	符合
	枯水期多年平均流量的10%(2.8m ³ /s)	100%	89%	100%	0%	100%	0%	51%	符合
	多年平均流量的5%(3.44m ³ /s)	100%	95%	100%	0%	100%	0%	55%	符合
	多年平均流量的10%(6.87m ³ /s)	100%	100%	100%	0%	100%	0%	70%	符合
	多年平均流量的12.5%(8.59m ³ /s)	100%	100%	100%	0%	100%	0%	76%	符合
	多年平均流量的15%(10.31m ³ /s)	100%	100%	100%	0%	100%	0%	81%	符合
	多年平均流量的20%(13.74m ³ /s)	100%	100%	100%	0%	100%	0%	89%	符合
	多年平均流量的25%(17.18m ³ /s)	100%	100%	100%	2%	100%	11%	92%	符合
	多年平均流量的30%(20.61m ³ /s)	100%	100%	100%	17%	100%	34%	95%	符合
	枯水期多年平均流量(28m ³ /s)	100%	100%	100%	39%	100%	68%	100%	符合
推荐工况	多年平均流量的10%(6.87m ³ /s)	100%	100%	100%	0%	100%	0%	70%	

说明：(1)本河段鱼类体形较小，较大体长仅有25cm，最大水深设置为0.75m；(2)本河段是中型山区河流，不考虑水面宽度和过水断面面积两项指标；(3)本河段工程为低闸引水，电站运行前后水温变幅小，适合鱼类生存、繁殖。

表20 红叶二级电站月均闸址天然流量与鱼类生态需水量推荐值对比

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
天然/(m ³ /s)	15.6	13.8	13.1	19.7	37.6	63.5	71.5	60.6	89.4	62.4	32.8	20.2	41.7
推荐/(m ³ /s)	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
比值	0.11	0.12	0.13	0.09	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05	0.08	0.04

表21 理县电站月均闸址天然流量与鱼类生态需水量推荐值对比

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
天然/(m ³ /s)	21.4	18.7	18.1	25.8	71.8	130.4	133.4	93.3	98.7	71.8	40.7	27.9	62.7
推荐/(m ³ /s)	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27
比值	0.29	0.34	0.35	0.24	0.09	0.05	0.05	0.07	0.06	0.09	0.15	0.22	0.10

表22 甘堡电站月均闸址天然流量与鱼类生态需水量推荐值对比

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
天然/(m ³ /s)	23.5	20.5	19.8	28.3	78.7	143.0	146.2	102.2	108.2	78.7	44.6	30.5	68.7
推荐/(m ³ /s)	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87
比值	0.29	0.34	0.35	0.24	0.09	0.05	0.05	0.07	0.06	0.09	0.15	0.23	0.10

由表20—22可知，从年均情况来看，红叶二级、理县、甘堡3座电站的鱼类生态需水量推荐值分别仅占闸址天然流量的4%、10%、10%；又由表23可知，从设计引用流量情况来看，红叶二级、理县、甘堡3座电站的鱼类生态需水量推荐值分别也仅占设计引用流量的3%、12%、13%。因此，所得到的鱼类生态需水量实施难度不大，具有可操作性。

表23 红叶二级、理县、甘堡3座电站设计引用流量与鱼类生态需水量推荐值对比

	红叶二级	理县	甘堡
设计引用/(m ³ /s)	56.7	54.5	51.4
推荐/(m ³ /s)	1.68	6.27	6.87
比值	0.03	0.12	0.13

5 分析与讨论

(1)由于天然情况下中型山区河流普遍水面宽≤30m，过水断面面积≤30m²，而鱼类仍能存活且

保持一定的资源量,表明大型河流鱼类水力生境参数标准中的水面宽度指标失效,因此,在修订中型山区河流鱼类水力生境参数的参考标准时,推荐取消水面宽 $\geq 30\text{m}$ 和过水断面面积 $\geq 30\text{m}^2$ 这两项参数限制。

(2)鉴于天然中型山区河流急缓流交替,部分河流并不能100%满足枯期天然流速 $\geq 0.3\text{m/s}$,表明大型河流鱼类水力生境参数标准中的平均流速指标所规定的95%达标率不符合中型山区河流的特点,因此,建议分情况限定,计算枯期天然流速 $\geq 0.3\text{m/s}$ 能100%满足时,沿用大型河流鱼类生境水力参数标准中对流速的要求;当枯期天然流速 $\geq 0.3\text{m/s}$ 不能100%满足时,平均流速不作为限制参数。

(3)在推荐的鱼类生态需水量工况下,在红叶二级、理县、甘堡3座电站减水河段,对表2中的鱼类水力生境参数限制参考标准,3座电站均能达标,例如,最大水深均大于鱼类体长的2~3倍,平均水深均大于0.3m,水域水面面积均大于70%,湿周率均大于50%,水温均适合鱼类生存、繁殖。

(4)在推荐的鱼类生态需水量工况下,在红叶二级、理县、甘堡3座电站减水河段,对表2鱼类水力生境参数选择性限制参考标准中平均速度一项,理县、甘堡电站均能达标,红叶二级电站虽然不能达标,但由于该电站在天然枯期不能100%满足平均速度 $\geq 0.3\text{m/s}$ 的标准限值,故平均速度可不作为该电站确定鱼类生态需水量的限制参数。

(5)由红叶二级、理县、甘堡3座电站减水河段鱼类水力生境参数的沿程变化模拟结果可知,在推荐的鱼类生态需水量工况下,鱼类水力生境参数的沿程变化存在以下共性:由于断面形态不一,且坡降时陡时缓,减水河段沿程的水力参数值变幅较大;在地形坡降小、相对较宽阔处,由于过水断面面积和水面宽度相对较大,流速相对较缓;在地形坡降陡、相对较狭窄处,由于过水断面面积和水面宽度相对较小,流速相对较急。由于具有以上共性,因此,在推荐的鱼类生态需水量工况下,3座电站减水河段都能基本保持天然河道急缓流交替分布的特点,具有多样性的鱼类生境。综合在推荐鱼类生态需水量工况下、表2中鱼类水力生境限制参数的参考标准都能满足的结果可知,红叶二级、理县、甘堡3座电站的推荐鱼类生态需水量能够满足鱼类生境的实际需求。

6 结语

根据中型山区河流特点,在原型观测的基础上,对大型河流鱼类水力生境参数标准进行修订,得到中型山区河流鱼类水力生境参数的参考标准。特定山区河流的原型观测结果验证了中型山区河流鱼类水力生境参数的参考标准在该山区河流中应用的适宜性。基于修订并进行验证后的参考标准,应用生态水力学法对特定山区河流的鱼类生境进行数值模拟,确定了该山区河流鱼类生态需水量的推荐值。综合原型观测及生态水力学数值模拟方法所确定的特定山区河流鱼类生态需水量的推荐值,由于充分考虑了该山区河流鱼类对生境的实际需求,因此,推荐值具有较高的合理性。特定山区河流鱼类生态需水量的推荐值的获取方法也可作为水生态环境影响的评价方法。在未来的研究中,应对中型山区河流的不同特征河段,如急流、浅滩、深潭等河段,进行系统的鱼类生境原型观测与数值模拟等研究;还应进一步对水面宽、平均流速等中型山区河流水力生境指标进行研究,分析其对鱼类生境的影响并确定指标阈值,以建立更切合中型山区河流鱼类生境实际的水力生境参数标准,从而使所确定的中型山区河流鱼类生态需水量更加合理。

参 考 文 献:

- [1] Armstrong J D, Kemp P S, Kennedy G J A, et al. Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in river and streams[J]. Fisheries Research, 2003, 62: 143-170.
- [2] 郭利丹,夏自强,林虹,等.生态径流评价中的Tennant法应用[J].生态学报,2009,29(4):1787-1792.
- [3] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources[C]//Orshorn JF; Allman C H. Proceedings of symposium and specialty conference on instream flow needs II. Maryland

- Bethesda: American Fisheries Society, 1976: 359-373 .
- [4] Mosely M P . The effect of changing discharge on channel morphology and instream uses and in a braided river, Ohau River, New Zealand[J] . Water Resources Researches, 1982(18): 800-812 .
- [5] 杨志峰, 于世伟, 陈贺, 等 . 基于栖息地突变分析的汛期生态需水阈值模型[J] . 水科学进展, 2010, 21(4): 567-574 .
- [6] 李建, 夏自强 . 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J] . 水利学报, 2011, 42(6): 678-684 .
- [7] 刘晓燕, 连煜, 可素娟 . 黄河河口生态需水分析[J] . 水利学报, 2009, 40(8): 957-961 .
- [8] 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 .
- [9] 郝增超, 尚松浩 . 基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J] . 水利学报, 2008, 39(5): 557-560 .
- [10] 班璇 . 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J] . 水利学报, 2011, 42(1): 47-55 .
- [11] 环评函(2006)4号 . 水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)[S] . 北京: 国家环境保护总局环境工程评估中心, 2006 .

Calculation on ecological water requirements in medium mountainous rivers downstream of hydropower station

LU Hong-wei, LI Jia, LI Yong

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To protect fishes after hydropower development on rivers, calculation on the ecological water requirements of fishes in downstream reach of hydropower station in medium mountainous rivers was discussed. With reference to the standard of hydraulic habitat parameter for fishes in large rivers, and according to the characteristics of medium mountainous rivers, the reference standard of hydraulic habitat parameters for fishes in medium mountainous rivers were obtained. The representative medium mountainous river, Zagunao River in Sichuan province, was selected for the prototype observation of fish habitat. The results confirm that this reference standard can meet the actual requirements of fish habitat in the Zagunao River. Based on the obtained reference standards, the ecological hydraulic method was used to calculate and analyze the ecological demand of fishes in the water reducing reaches of Hongye II, Lixian and Ganbao hydropower stations on Zagunao River, and the recommended values of ecological water demand of the three hydropower stations were obtained. The analysis results show that the proportion of the obtained recommended values of ecological water requirements in the annual average natural flow are not high. These values have operability in the operation of the three power stations.

Key words: medium mountainous river; fishes; ecological water demand; hydraulic habitat parameter standard; ecological hydraulic method; Zagunao River

(责任编辑: 韩 昆)