

大渡河干流已建水电站生态基流目标值复核分析

陈在妮¹, 刘宏高², 黄克威³, 李书飞³, 曲田¹, 易燃², 陶江平²

(1. 国能大渡河流域生产指挥中心, 四川 成都 610041;

2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079;

3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 流域水安全保障湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430014)

摘要:以大渡河干流已建水利水电工程为研究对象开展回顾性评价,为推动后续生态基流研究和水资源管理提供参考。研究采用多种水文学方法,包括Tennant法、Texas法、Q90法、多年最小月平均流量法和NGPRP法,计算大渡河干流已建梯级水电站的生态基流目标值。根据计算结果中各控制断面的最小值、最大值和平均值,建立生态基流目标值的参考区间,分别对应底线、优和好的标准线,并对大渡河干流已建梯级水电站生态基流目标进行了回顾性评价。结果表明,大多数断面的现行生态基流目标值均在最大和最小参考值区间范围,设置基本合理。针对不同历史条件下或不同行业领域中存在的生态基流相关概念内涵和适用边界条件的不一致问题,以及拦河工程生态基流调度的实际问题,研究提出生态基流目标体系的双指标控制法,并提出了大渡河干流已建梯级水电站生态基流目标建议值,建议双江口、猴子岩、深溪沟、龚嘴、铜街子水电站的生态基流目标采用日均和瞬时双控值,分别设为121/52、160/78、327/188、366/149和366/236 m³/s,而沙湾和安谷水电站均设为366 m³/s。

关键词:生态基流;回顾性评价;双指标控制法;大渡河

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)01-0050-08

大渡河在我国13大水电开发基地中位列第5名(Tu et al, 2023),水电开发密度大、强度高。这里历史上保存了丰富的生物资源和生物多样性,流域内国家级和省级重点保护物种、濒危物种和特有物种多、占比大,生态系统敏感脆弱。因此,在水电开发背景下解决大渡河流域生态需水问题十分具有挑战性。

为解决这一问题,国内学者进行了不少探索。Chen & Wu(2018)基于2001–2015年大渡河等多个流域的96个水电工程环境影响评价报告,对工程现状、水文特征、下游鱼类状况和生态流量等内容进行统计分析,建议将多年平均流量的17%作为生态流量约束红线。邵甜等(2015)基于IFIM法对大渡河金川段栖息地二维计算发现随流量增大齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)产卵场生境指标均呈先增后

减的变化趋势。洪思扬等(2018)利用栖息地指标法研究了大渡河上游足木足河、大金川、梭磨河和绰斯甲河鱼类不同阶段的最低流量适宜值和最小生态流量。金纯等(2021)结合鱼类繁殖条件需求,利用湿周法、Tennant法、Tessman法、逐月最小径流法等水文水力学法研究大渡河上游生态流量。Yang等(2023b)利用改进的三维鱼类生境评价模型与河流内流量增量法(IFIM)相结合研究安顺场河段流量与齐口裂腹鱼生境指数曲线的关系,确定其适宜流量范围为271.7~489.1 m³/s。Huang等(2023)通过建立多鱼种综合适宜性评价模型,并与二维水动力学模型耦合,揭示了龚嘴水电站下游随着流量从800~2 000 m³/s变化,适宜生境斑块面积从11 424 m²减少到1 268 m²。这些研究成果,为大渡河流域生态流量管理提供了基础支撑。

随着生态流量有关理论实践研究的深入与国家重点河湖生态流量目标确定和保障实施方案的深化落实,以及已建水利水电工程生态流量先行先试方案的实施,大渡河流域的生态流量管理得到政府、企业和公众越来越多的关注和行动支持,并进入良好的发展阶段(张建永等,2023)。同时,相对成熟的生态流量目标确定方法、保障方案和相关技术标准(李志军和汪红,2023),为深化流域生态流量管理提供了初步依据。然而,由于历史原因,大渡河流域各梯级在生态流量相关研究对生态基流概念的规定、目标

收稿日期:2023-11-28

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200304);水利部财政专项水资源管理项目(126202006000190003);长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2020Z02)。

作者简介:陈在妮,1984年生,女,硕士,高级工程师。E-mail:12036139@ceic.com

通信作者:刘宏高,1975年生,男,博士,副研究员。E-mail:155121822@qq.com

确定的标准和方法、边界条件设置等方面存在不一致的问题,导致部分河段生态流量研究和应用脱节,大多数生态流量管理实践仅停留在生态基流水平。

为此,本研究将“生态基流”的定义限定于我国生态流量管理的框架范围内,特指维持河流、湖泊、沼泽等水生生态系统功能不丧失所需要保留的最小流量(水量、水位和水深),是水电开发中水生态环境保护的底线要求。基于这一内涵,本研究以大渡河干流已建水利水电工程为研究对象,以水文站为参照,采用多种水文学方法计算生态基流,并结合现有相关成果开展回顾性评价,提出推荐的生态基流目标值。研究结果对保障大渡河生态流量、维护河流健康具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域

大渡河发源于青海阿尼玛卿山系,为岷江的最大一级支流、长江二级支流,流域地处青藏高原东南边缘向四川盆地西部的过渡地带,位于 $99^{\circ}42' \sim 103^{\circ}48'E$ 和 $28^{\circ}15' \sim 33^{\circ}33'N$,面积 7.74万 km^2 (不含青衣江)。大渡河具有丰富的水能资源和生物资源(Wu et al, 2016),干流全长 $1\,155 \text{ km}$,天然落差 $4\,175 \text{ m}$,平均比降约 3.6% ,河口多年平均流量 $1\,570 \text{ m}^3/\text{s}$ 。干流下尔呷以下河段规划采用28级梯级开发方案。截至2023年底,大渡河干流有14座水电站投产发电,6座水电站在建,其余水电站正在开展前期工作(Zhou et al, 2021)。流域分布有鱼类7目23科125种,其中包括国家I级重点保护鱼类1种,国家II级重点保护鱼类12种,四川省级重点保护鱼类共12种。此外,还有5种鱼类被列入中国《生物多样性红色名录》的极危等级(CR),11种鱼类被列入濒危等级(EN),43种鱼类为长江上游特有鱼类。重点保护物种、濒危物种和特有物种总计有49种。

选择大渡河干流为研究区域,以干流在建的大型水电站双江口水电站和已建的猴子岩、长河坝、黄金坪、泸定、大岗山、龙头石、瀑布沟、深溪沟、枕头坝一级、沙坪二级、龚嘴、铜街子、沙湾和安谷水电站等14座大型水电站为研究对象。选择双江口水电站主要基于研究区域的代表性和完整性。

设置6个控制断面作为参照,各控制断面及参照河段分别是双江口坝下(干流~双江口坝下)、大金(干流~大金水文站)、泸定二(干流~泸定水文站)、石棉(干流~石棉水文站)、峨边(干流~峨边水文站)、沙湾(福禄镇)(干流~沙湾(福禄镇)水文站)。

1.2 数据资料

数据资料主要包括长江水利委员会水文局提供的水电站、水文站的设计参数,1959–2021年逐月平均流量数据,以及保证率分别为50%典型年、90%典型年和典型连续枯水3年的逐日平均流量整编数据。水文数据由长江水利委员会水文局插补、延长、还原和整编并通过可靠性、一致性和代表性审查。

研究区域主要水电站和参照水文站的基本情况见表1,其中与生态基流研究密切关系的有多年平均流量、与下游水位衔接、调节性能和开发方式。

1.3 研究方法

1.3.1 水文趋势检测 为明确水文趋势变化及生态基流计算方法的适用性,分别采用Mann-Kendall法(MK)、Pettitt法、Buishand U test法(BUT)、Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)法进行水文趋势及突变点检测,综合评估水文变化趋势(Daba et al, 2020)。MK法用于检测数据中的趋势性变化,而不假设数据的分布情况。该方法基于数据点的顺序关系,通过比较数据点之间的大小关系来判断序列中是否存在趋势。Pettitt能够确定在时间序列中是否存在显著的突变点,即数据发生突然变化的位置。该检验基于对时间序列的累积和或累积差异的分析,通过比较不同时间点的值来检测是否存在明显的结构性变化。BUT基于序列的极值(例如最大值或最小值)来判断是否存在结构性的改变。该测试通过计算序列中不同区间的极值,并使用非参数统计方法来评估这些极值是否在统计上显著,从而确定序列是否存在突变。SNHT法的主要目的是确定序列中是否存在结构性的变化,如趋势、周期性或突变。

1.3.2 生态基流计算 生态流量的评估方法有200多种,常用方法主要包括水文法、水力-栖息地法和整体法等3类(李强等, 2023)。实践中选择一般因应用目的、尺度范围、工作周期、成本预算、预期成果、数据支持等具体情况而定(The European Communities, 2015)。本研究结合大渡河生态基流回顾性评价研究基础和需求,为克服采用单一方法的局限性,综合采用了Tennant法、Texas法、Q90法、多年最小月平均流量法和NGPRP(northern great plains resource program)法(Yue et al, 2018)。Tennant法也叫蒙大拿法,是最常用的生态流量计算方法之一,一般采用多年平均流量的10%~30%作为生态基流。Texas法一般取50%保证率的月平均流量的30%~40%。Q90法通过各年月平均流量最小值法选样作频率分析,取90%保

表 1 双江口以下已建水电站和参照水文站的基本情况

Tab. 1 Basic information of the existing hydropower plants and referenced hydrological stations below Shuangjiangkou Dam

序号	断面名称	与河口距离/km	控制流域面积/km ²	多年平均流量/m ³ ·s ⁻¹	与下游水位衔接	调节性能	开发方式
1	双江口	650	39330	502	不完全	年	坝式
2	大金水文站	609	40484	524			
3	丹巴水文站	528	42923	561			
4	猴子岩	468	54036	773	否	季	坝式
5	长河坝	423	56648	821	不完全	季	坝式
6	黄金坪	407	56942	847	否	日	坝式
7	泸定	375	58943	881	否	日	坝式
8	泸定(二)水文站	372	58943	889			
9	大岗山	314	62727	1010	是	日	坝式
10	龙头石	294	63040	1020	是	日	坝式
11	石棉水文站	259	65946	1130			
12	瀑布沟	194	68512	1230	否	不完全年	坝式
13	深溪沟	177	72900	1350	不完全	日	坝式
14	枕头坝一级	152	73057	1360	是	日	坝式
15	沙坪水文站	142	73339	1370			
16	沙坪二级	129	73632	1390	否	日	坝式
17	龚嘴	93	76130	1470	不完全	日	坝式
18	铜街子	65	76383	1470	不完全	日	坝式
19	沙湾	50	76479	1490	否	无	混合式
20	沙湾(福禄镇)水文站	27	76452	1490			
21	安谷	15	76717	1490		日	混合式

证率设计值作为生态基流。多年最小月流量法取多年最小月平均流量值作为生态基流。NGPRP法将系列年份划分为枯水年、平水年、丰水年，并取平水年组 90% 保证率月平均流量作为生态流量。

1.3.3 生态基流目标回顾性评价 收集梳理工程相关资料,包括工程项目可行性研究和初步设计、环境影响评价、水资源论证、取水许可以及工程所在河湖的江河流域水量分配方案、生态流量保障实施方案及水量调度方案等成果及其审批文件。分析其生态基流计算方法和结果合理性,并利用本研究计算结果的最大值和最小值构成参考区间,将平均值作为推荐参考值进行对比分析。回顾性评价过程中重点关注生态基流目标成果缺乏一致性和尚未确定生态基流目标的梯级水电站。

1.3.4 生态基流目标值确定 对尚未确定生态基流目标的断面,推荐采用本研究计算结果的平均值。对已具有生态基流目标且符合计算结果区间范围的断面,推荐沿用现行目标值;对不符合的断面,推荐

采用计算结果的平均值。提出推荐值时采用以下原则:(1)注重现行有关成果的延续性及成果之间的一致性;(2)重点关注生态基流目标成果缺乏一致性和尚未确定生态基流目标的梯级水电站;(3)充分考虑各断面调度运行实际,充分考虑可行性;(4)对于推荐生态基流目标值较高、调度运行实际中难以满足或经济社会效益受损明显的情况,在满足与下游断面水位衔接的条件下,可考虑采用“日均流量/瞬时流量”双指标控制法,即下泄的生态基流需同时满足日均流量目标和瞬时流量目标。

2 结果与分析

2.1 水文趋势

通过 MK、Pettitt、BUT、SNHT 法进行水文趋势及突变点检测的结果综合分析表明,双江口以下 15 个水电站(表 2)和丹巴等 6 个水文站(表 3)1959–2021 年径流序列的变化趋势和突变性不显著,径流观测序列较接近天然来流,因而本研究拟采用的水文学方法具有适用性。

2.2 生态基流

基于大渡河双江口及以下已建水电站、主要水文站1959-2021年逐月平均流量数据和Tennant法(采用多年平均流量的10%基准)、Texas法(采用Q50值的35%基准)、Q90和多年最小月平均流量法,以及采用保证率分别为50%的典型年逐日平均流量数据和NGPRP法计算的生态基流结果如表4。其中,Tennant法(10%)计算结果相对最低,NGPRP法相对最高,其余介于两者之间。

表2 双江口以下已建水电站1959-2021年径流序列的变化趋势检验

Tab. 2 Variation trend tests for annual runoff from existing hydropower plants below Shuangjiangkou Dam (1959-2021)

断面名称	整体趋势	整体变化角度	突变点
双江口	大波动小幅下降	-2.07	-
猴子岩	大波动小幅上升	7.32	2012年,2021年
长河坝	大波动大幅上升	10.14	2012年,2021年
黄金坪	大波动大幅上升	10.12	2012年,2021年
泸定	大波动大幅上升	10.01	2012年,2021年
大岗山	大波动小幅上升	7.72	2012年,2021年
龙头石	大波动小幅上升	7.72	2012年,2021年
瀑布沟	大波动小幅上升	5.1	1988年,2018年
深溪沟	大波动小幅上升	4.34	1988年,2018年
枕头坝一级	大波动小幅上升	4.37	1988年,2018年
沙坪二级	大波动小幅上升	4.48	1988年,2018年
龚嘴	大波动小幅上升	4.69	1988年,2018年
铜街子	大波动小幅上升	4.69	1988年,2018年
沙湾	大波动小幅上升	4.69	1988年,2018年
安谷	大波动小幅上升	4.69	1988年,2018年

表3 主要水文站1959-2021年径流序列的变化趋势检验

Tab. 3 Variation trend tests for annual runoff from the primary hydrological stations below Shuangjiangkou Dam (1959-2021)

断面名称	整体趋势	整体变化角度	突变点	突变点
大金	大波动小幅下降	-0.06	-	-
丹巴	大波动小幅上升	7.6	2	2012年,2021年
泸定(二)	大波动小幅上升	2.67	-	-
石棉	大波动大幅下降	-13.51	1	1966年
沙坪	大波动小幅上升	3.88	2	1988年,2018年
沙湾(福祿镇)	大波动小幅上升	2.37	3	1973年,1981年,2009年

表4 生态基流计算结果

m³/s

Tab. 4 Results for each method of calculating ecological base flow

序号	断面名称	Tennant法(10%)	Texas法(35%)	Q90法	多年最小月平均流量法	NGPRP法
1	双江口	50	122	103	121	129
2	大金水文站	52	127	107	126	134
3	丹巴水文站	77	192	161	184	201
4	猴子岩	77	195	165	189	206
5	长河坝	82	212	183	213	237
6	黄金坪	85	213	184	214	238
7	泸定	88	221	189	221	247
8	泸定(二)水文站	89	221	184	219	247
9	大岗山	101	250	229	265	294
10	龙头石	101	309	230	266	296
11	石棉水文站	113	252	286	334	362
12	瀑布沟	123	315	302	347	377
13	深溪沟	135	349	332	377	411
14	枕头坝一级	136	345	335	380	414
15	沙坪水文站	137	351	359	387	443
16	沙坪二级	139	355	345	389	422
17	龚嘴	147	375	373	415	449
18	铜街子	147	377	374	417	451
19	沙湾	147	382	375	417	451
20	沙湾(福祿镇)水文站	149	383	357	436	451
21	安谷	149	377	379	422	457

2.3 生态基流目标回顾性评价

2.3.1 现行生态基流目标 对大渡河流域现行生态基流、生态流量、最小下泄流量等进行了梳理(表5),其生态基流目标确定主要考虑以下几个方面:一是综合考虑了“三生”用水需求;二是上中下游依据的主线各有侧重,上游主线是保护濒危、珍稀和特有鱼类及其生境,中游主要围绕泸定断面景观用水需求,而下游考虑的焦点是航运生产用水;三是大多数水电站都在原计算结果的基础上,结合机组基荷发电流量值进行了调整。

2.3.2 生态基流目标合理性评价 为了综合处理不同方法计算结果的差异,取计算最大值、最小值和平均值设置3条参考线(图1)。结果表明,大多数断面的现行生态基流目标值均在最大和最小参考值区间范围,目标值设置基本合理;其中泸定以上(除猴子岩)、瀑布沟以下断面的现行生态基流与计算值平均参考线吻合度较好,目标值设置合理。猴子岩和龙头石水电站生态基流目标值分别为38.7 m³/s和50 m³/s,明显低于最小值参考线,且与上下游不协调。由于沙湾和安谷水电站生态基流目标值为15 m³/s和150 m³/s,这仅是针对坝下短距离减水河段的目标值。实际上,发电尾水汇入后实施的最小下泄流量分别为390 m³/s和400 m³/s。

表 5 大渡河干流现行生态基流目标统计

Tab.5 Statistics for current ecological base flow targets for Dadu River

序号	断面名称	环评批复 EF	流域综合规划 EF	岷江水量分配方案 MinF	水资源论证及取水许可 MinF	133(运行期)/52(停工期)	四川省“一站一策”重点河湖生态流量保障目标 EF	MinF	2022~2023 年水量调度计划 EF	2022~2023 年水量调度计划 MinF	推荐值	m ³ /s
1	双江口	121							52	52	121(日均)/52	
2	大金水文站			52								
3	丹巴水文站	38.7			160			78		160	160(日均)/78	
4	猴子岩										166.5(在黄金坪库水位高于 1473m 时按日均泄放)	
5	长河坝	166.5			166.5			166.5			168(厂房尾水日均)/84(坝址瞬时)	
6	黄金坪	84			84(瞬时)/168(日均)			84			168(厂房尾水日均)/84(坝址瞬时)	
7	泸定	184			184			184			184	
8	泸定(二)水文站											
9	大岗山	165.4			165.4			165.4(日均)		165.4(日均)	165.4(日均)	
10	龙头石	50			102			102			165.4(日均)/102(瞬时)	
11	石棉水文站				165.4(日均)/102(瞬时)							
12	瀑布沟	327			188/327(日均), 尼日河 10			188		327(日均)/188(瞬时)	327(日均)/188(瞬时), 尼日河 3	
13	深溪沟	327			327(日均)/当枕头坝一级水电站库水位低于 620m 时还应满足瞬时 188						327(日均)/当枕头坝一级水电站库水位低于 620m 时还应满足瞬时 188	
14	枕头坝一级	327			327					327	327(枕头坝二级建成前按瞬时泄放,建成后按日均泄放)	
15	沙坪水文站											
16	沙坪二级	345			345(明确生态流量为 140)					345	345	
17	龚嘴				345(日均)/铜街子上游水位低于 471m 时满足瞬时 149					345(日均)/铜街子上游水位低于 471m 时满足瞬时 149	366(日均)当铜街子上游水位低于 469.8m 时还应满足瞬时 149	
18	铜街子				345(日均)/236(瞬时)					345(日均)/236(瞬时)	366(日均,当沙湾上游水位低于 430.47m 时还应满足瞬时 236)	
19	沙湾	15			390(发电尾水渠 373+坝下老河道减水河段 17)			390(发电尾水渠 373+坝下老河道减水河段 17)				
20	沙湾(福祿镇)水文站							366				
21	安谷	150			400(电站尾水)/150(坝下瞬时)					400(电站尾水)/150(坝下瞬时)	电站尾水渠出口汇合处 366(其中坝下按瞬时 150 泄放)	

注: EF 为生态流量, MinF 为最小下泄流量, 凡未作特别标注的值均指瞬时值。
Notes: EF - ecological flow, MinF - minimum flow, All values not specifically marked refer to instantaneous values.

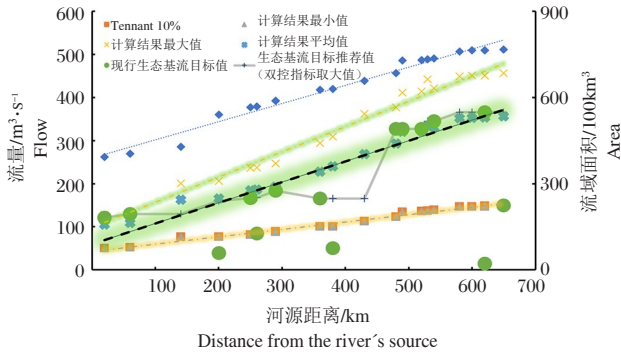


图1 大渡河生态基流现行目标值、目标建议值和计算值的比较分析

Fig. 1 Comparative analysis of the current, recommended, and calculated target values for the ecological base flow in Dadu River

2.4 生态基流目标值建议

基于大渡河生态基流现行目标值和计算值的回顾性评价分析(图1),并综合考虑表1中列出与下游水位衔接、调节性能和开发方式,提出如下生态基流目标值建议:各控制断面中,石棉、泸定(二)和沙湾(福禄镇)生态基流值分别为165.4、184和366 m³/s。

双江口及以下15个梯级电站中,双江口水电站生态流量建议调整为121 m³/s(日均)/52 m³/s(瞬时)双控,猴子岩水电站生态流量建议调整为160 m³/s(日均)/78 m³/s(瞬时)双控,深溪沟水电站生态流量建议调整为327 m³/s(日均,当枕头坝一级水电站库水位低于619.3 m时还应满足瞬时188 m³/s),龚嘴水电站生态流量建议调整为366 m³/s(日均,当铜街子上游水位低于469.8 m时还应满足瞬时149 m³/s),铜街子水电站生态流量建议调整为366 m³/s(日均,当沙湾上游水位低于430.47 m时还应满足瞬时236 m³/s),沙湾水电站生态流量建议调整为366 m³/s(其中坝下老河道减水河段17 m³/s),安谷水电站生态流量建议调整为366 m³/s(尾水渠出口汇合处,其中坝下按瞬时150 m³/s泄放)。其余梯级电站生态流量建议维持原成果。

图2表明本次提出的生态基流目标建议值与计算值平均值具有很好的相关性。虽然图中泸定、大岗山和龙头石等3个点略微偏离曲线,但可利用瀑布沟年调节性能得到修正。

3 讨论

3.1 多种水文法的综合应用

生态流量实践中,由于应用目的、尺度范围、工作周期、成本预算、预期成果、数据支持等要求不同,

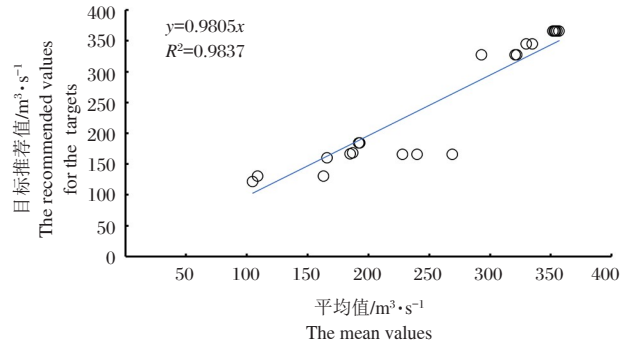


图2 生态基流目标推荐值与计算结果平均值关系
Fig. 2 Correlation between the recommended values for ecological base flow targets and the mean values of the calculated ecological base flow

往往需要综合采用多种水文法、水力-栖息地法和整体法(The European Communities, 2015)。例如,在流域规划中,或研究尺度大、工作周期短、成本预算有限、预期成果精度要求不高以及数据支持不足等情况下,一般采取水文法;否则需增加水力-栖息地法和整体法作为支撑。本研究旨在对大渡河流域的生态基流目标回顾性评价,受工作周期、成本预算和数据可获得性等条件限制,依据这一原则选择了水文法,但不足之处是缺乏生态学依据以及对生态与水文物理逻辑关系的认识。为此,研究综合应用Tennant法、Texas法、Q90法、多年最小月平均流量法和NGPRP法等,取计算最小值、最大值和平均值设置3条参考线,在实践中一定程度上弥补了采用单一水文学方法的不足。生态基流目标值在区间范围内即可视为合理,在平均值参考线以上则为良好,这与Chen & Wu(2018)的结论基本一致。

3.2 双指标控制法的探索

在研究大渡河各梯级水电站和水文站生态基流管理实践时,我们发现不同历史时期、不同生态保护目标要求和不同行业管理差异,导致生态基流、生态流量和最小下泄流量等概念的内涵在学术领域甚至不同行业之间存在不一致的问题,造成研究与管理、不同行业之间存在壁垒(王中根等,2020)。例如,关于生态基流的学术术语有枯水流量、最小可接受流量、河道内最小流量、基本生态流量、生态可接受流量和环境流量等等,其中“流量”一词又常因研究需要被改为“需水”“用水”“水位”或“水量”。在我国生态环境管理中,生态基流、生态流量和最小下泄流量的概念均有使用,其目的通常是满足下游生态、生活和生产需要;而水利管理中的生态基流则仅限于应保留在河道内以满足生态需水的部分。因此,如果

仅采用单一瞬时流量值作为目标值,可能会影响水利水电航运等工程的预期调节性能和经济社会效益,甚至可能导致工程重大变更(Yang et al, 2023a)。本研究提出在充分梳理有关概念及内涵的基础上,结合上下游梯级水位、流量衔接关系分析采用双指标控制的方法,同时从日均流量和瞬时流量加以限制,为解决这些问题提供了新的方案。

3.3 存在的不足与下一步研究方向

大渡河流域生态流量管理仍面临一些挑战:一是敏感生态流量研究刚起步,需要开展大量现场工作、采集生物数据,并综合利用水力-栖息地法和整体法(王浩和胡鹏, 2022);二是气候变化和人类活动加剧了生态流量危机,特别需要重点考虑极端气候现象(Zhang et al, 2022)、规划水电站陆续建设运行(Biswas, 2023)和一系列大规模调水计划的影响(Fan et al, 2023)。这些重大科学问题和关键技术在本研究中均未得到体现,需要持续深入、多学科、多方法和多尺度地开展研究。

参考文献

洪思扬,王红瑞,朱中凡,等,2018. 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, 27(1): 168-175.

金纯,姜翠玲,吴为,2021. 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, 41(2): 8-14.

李强,王俏俏,陈红丽,等,2023. 生态流量方法应用现状研究[J/OL]. 生态学报. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202210303078>.

李志军,汪红,2023. 长江流域河湖生态流量监督管理标准体系研究[J/OL]. 水利水电快报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1142.TV.20231107.1330.006.html>.

邵甜,王玉蓉,徐爽,2015. 流量变化与齐口裂腹鱼产卵场栖息地生境指标的响应关系[J]. 长江流域资源与环境, 24(S1): 85-91.

王浩,胡鹏,2022. 基于二元视角的河湖生态环境复苏与生态流量保障路径[J]. 中国水利, (7): 11-15.

王中根,赵玲玲,陈庆伟,等,2020. 关于生态流量的概念解析[J]. 中国水利, (15): 29-32.

张建永,黄锦辉,孙翀,等,2023. 已建水利水电工程生态流量核定与保障思路研究[J]. 水利规划与设计, (8): 1-4.

Biswas A K, 2023. Hydropower in the energy transition and managing extreme hydrological events in China[J]. Hydro-power & Dams, (5): 92-98.

Chen A, Wu M, 2018. Practice on ecological flow and adaptive management of hydropower engineering projects in China from 2001 to 2015[J]. Water Policy, 20(2): 336-354.

Daba M H, Ayele G T, You S, 2020. Long-term homogeneity and trends of hydroclimatic variables in Upper Awash River Basin, Ethiopia[J]. Advances in Meteorology, 2020: 1-21.

Fan D, Zeng S, Du H, et al, 2023. Projected flow regimes and biodiversity changes under climate change in the planning western route source areas of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Ecological Indicators, 154: 110827.

Huang Y, Wang X, Li H, et al, 2023. Research on a Multi-Species Combined Habitat Suitability Assessment Method for Various Fish Species[J]. Sustainability, 15(20): 14801.

The European Communities, 2015. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive (Guidance Document No. 31, 2015)[R].

Tu Y, Tao C, Zhong Q, et al, 2023. Intelligent operation and management in the Dadu River Basin[J]. River, 2(1): 30-38.

Wu Y, Wang W, Wang G, 2016. Detecting variation trends of temperature and precipitation for the Dadu River Basin, China[J]. Advances in Meteorology, 2016: 1-12.

Yang S, Wei Y, Chen J, et al, 2023a. Multi-Objective Optimization and Coordination of Power Generation, Ecological Needs, and Carbon Emissions in Reservoir Operation[J]. Water Resources Management. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03657-z>.

Yang S, Zhang Z, Wang Y, et al, 2023b. An improved 3D fish habitat assessment model based on the graph theory algorithm[J]. Ecological Indicators, 148: 110022.

Yue S, Li H, Cheng B, et al, 2018. The value of environmental base flow in water-scarce basins: a case study of Wei River Basin, Northwest China[J]. Water, 10(7): 848.

Zhang Y, Ya X, Wang R, et al, 2022. Assessing and mapping human well-being for sustainable development amid drought and flood hazards: Dadu River Basin of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 29(60): 90719-90737.

Zhou X, Fan S, Sun H, et al, 2021. Practices of environmental protection, technological innovation, economic promotion and social equity in hydropower development: A case study of cascade hydropower exploitation in China's Dadu River basin[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 23: 1-15.

Assessment of Ecological Base Flow Targets for Cascaded Hydropower Plants on Dadu River

CHEN Zai-ni¹, LIU Hong-gao², HUANG Ke-wei³, LI Shu-fei³, QU Tian¹, YI Ran², TAO Jiang-ping²

- (1. Dadu River Basin Production Command Center, CHN Energy, Chengdu 610041, P.R. China;
2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China;
3. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, P.R. China)

Abstract: Ecological flow is crucial for maintaining the structure and function of aquatic ecosystems in rivers and lakes, and the ecological base flow has been recognized as the minimum required to maintain the ecological function of aquatic ecosystems. The Dadu River basin is important for both hydropower development and biodiversity conservation in China and it is therefore important to conduct regular assessments of ecological base flow targets. In this study, five methods were used to calculate target values of ecological base flow for the cascaded hydropower plants on Dadu River, including Tennant, Texas, Q90, multi-year average monthly minimum flow, and the Northern Great Plains Resource Program (NGPRP). A reference range of ecological base flow targets was established based on the minimum, maximum and average values of each river reach, in order to meet the respective targets of bottom line, good status line and moderate status line for ecological base flow. The retrospective assessment of ecological base flow targets in Dadu River was then carried out using the three-line range system. Results show that the current ecological base flow is suitable in most control sections. Controversies about the connotations and applicable boundary conditions for ecological base flow resulting from different historical scenarios and industries make it difficult to regulate ecological base flow for hydraulic projects. We thus provide a double-indexed control method for meeting ecological base flow targets for cascaded hydropower plants on Dadu River. It is recommended that the ecological base flow targets for Shuangjiangkou, Houziyan, Shenxigou, Gongzui and Tongjiezi hydropower stations are set at daily and instantaneous dual control values of 121/52, 160/78, 327/188, 366/149 and 366/236 m³/s respectively, while Shawan and Angu hydropower stations are both set at 366 m³/s, respectively. Our study provides an effective method for retrospective evaluation of ecological base flow targets at the watershed scale, and guidance for future ecological base flow research and management.

Key words: ecological base flow; retrospective assessment; double-indexed control method; Dadu River