

金沙江下游大坝建设对纵向连通性的影响研究

侯轶群, 邹曦, 陈小娟, 金瑶, 杨志, 刘宏高

(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)

摘要:金沙江下游生态系统的复杂多样性使其成为众多重点保护、濒危、珍稀和特有鱼类等集中分布的水生生物多样性中心,但近年来因高密度、高强度梯级水电站工程建设的阻隔影响而明显衰退。为采取有效措施恢复连通性以减缓不利影响,以流域为单元,基于金沙江下游干流及支流DEM和水库、水电站建设数据,采用树状水系连通性指数方法分析流域内大坝所造成的阻隔影响,并对金沙江下游纵向连通性进行了评价。结果表明当大坝通过能力逐步提升,尤其是提升至0.7后,水系整体连通度呈显著增大趋势,连通性明显向好;金沙江下游水系连通性修复次序建议为,第一期:黑水河、西溪河、牛栏江;第二期:普渡河、西宁河、龙川江、鲹鱼河;远期:横江、普隆河、美姑河、以礼河、勐果河、小江。研究结果可为制定和实施流域鱼类洄游通道恢复工程及行动计划、促进水生生物保护提供基础支撑。

关键词:树状水系;连通性指数DCI;修复次序;金沙江下游

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)01-0026-06

金沙江流域位于我国青藏高原、云贵高原和四川盆地的西部边缘,地处东经 $90^{\circ}23' \sim 104^{\circ}37'$,北纬 $24^{\circ}28' \sim 35^{\circ}46'$,跨越青海、西藏、四川、云南、贵州5个省(自治区),流域面积约50万 km^2 。金沙江源头至宜宾干流全长约3500 km,总落差5100 m,分别占长江干流全长的55.5%和干流总落差的95%。金沙江干流玉树直门达至石鼓为上游,石鼓至雅砻江口为中游,雅砻江口至宜宾为下游。金沙江下游接纳雅砻江后沿途又接纳龙川江、普渡河、牛栏江、横江等支流,至宜宾与左岸支流岷江汇合后称长江。

金沙江下游自然地理环境复杂,水域生态系统多样,孕育了丰富的鱼类物种资源,属江河平原鱼类与青藏高原鱼类的过渡分布水域,共记载鱼类7目22科160种,其中有4目11科66种属国家级和地方级重点保护鱼类、濒危鱼类或长江上游特有鱼类,种类占比非常大。近10多年来,高密度的梯级水电站建设和高强度的水资源开发对水域生态环境造成了不可避免的阻隔影响(杨志等,2017)。

目前,金沙江下游干流建有乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等4座巨型梯级电站,其主要支流龙川

江、勐果河、普隆河、鲹鱼河、普渡河、小江、以礼河、黑水河、西溪河、牛栏江、美姑河、西宁河和横江上建成了近百座梯级水电站。梯级电站建设深刻改变了原有水系的纵向连通性格局,导致流域鱼类资源衰竭,珍稀特有鱼类种类数量显著下降,濒危物种增多,需要重点保护的鱼类种类增加(梁媛等,2023)。梯级水电站工程建设运行对长江上游珍稀、特有鱼类的阻隔影响受到社会广泛关注,亟需采取连通性恢复措施以减缓不利影响(熊美华等,2023)。

围绕水系连通性研究,国外早期代表性理论有河流连续体概念(the River Continuum Concept)、串连非连续体概念(the Serial Discontinuity Concept)、洪水脉冲概念(the Flood Pulse Concept)、潜流廊道概念(the Hyporheic Corridor Concept)(Poole,2002)和四维框架理论(a Four-dimensional Framework)等(Ward,1989),并在欧洲莱茵河流域、美国密西西比河流域、澳大利亚墨累-达令河流域和日本琵琶湖流域等获得了成功应用。国内外学者从数学、水文学、生物学和景观生态学等不同学科视角开展了大量水系连通性研究,形成了水文学法(徐光来等,2012)、景观连接度法(孙鹏等,2016)、基于河段长度(或容积)的河流破碎化指数法(River Fragmentation Index,包括RFIL和RFIV)、加权洄游鱼类生境分布的河流破碎化指数法(Grill et al,2015; Grill et al,2019)、综合指标评价法(夏继红等,2017)、图论法(赵进勇等,2017)和拦河建筑物密度评估法(生态环境部,2021)等评价方法,以及“三流四维连通性生态模型”等数学模型分析方法(董哲

收稿日期:2023-11-05

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3203900)。

作者简介:侯轶群,1986年生,女,副研究员,硕士,从事水生态保护及修复研究。E-mail:greenhan16@163.com

通信作者:刘宏高,1975年生,男,副研究员,博士,从事水利水电开发生态保护研究。E-mail:155121822@qq.com

仁等,2019)。近年来,计算机技术和“3S技术”(遥感 Remote Sensing、全球导航卫星系统 Global Navigation Satellite System 和地理信息系统 Geographic Information System)的快速发展为水系连通性提供了强有力的研究手段。

本文以流域为单元,基于金沙江下游干流及支流数字高程模型(DEM)和水库、水电站建设数据,分析流域内大坝所造成的阻隔影响,并对金沙江下游纵向连通性进行评价,以期为制定和实施流域鱼类洄游通道恢复工程及行动计划、促进水生生物保护提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为乌东德水电站库尾至向家坝水电站坝下的金沙江下游区段干支流水系(图1)。其中,溪洛渡和向家坝水电站分别于2007年和2008年完成截流,2014年蓄水发电;乌东德和白鹤滩水电站分别于2016年和2015年截流,2020年、2021年蓄水发电。本研究以乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝4级水电站所在干流江段为中心,结合该江段支流水系开展纵向连通性研究。

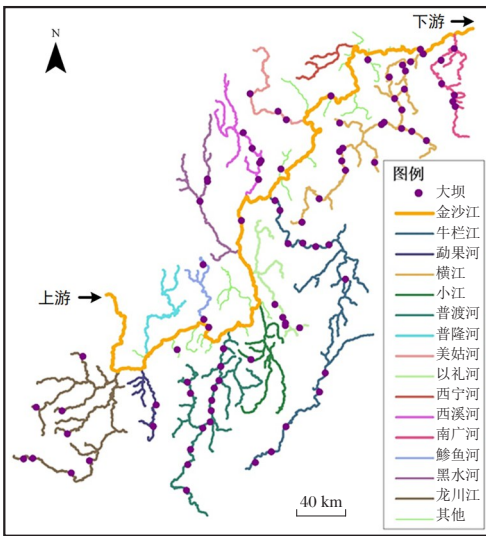


图1 金沙江下游大坝和河网分布

Fig.1 Location of dams and dendritic diagram of the lower Jinsha River network

1.2 数据获取方法

搜集2023年2月的ASTER GDEM 30 M分辨率数字高程数据(30 m空间分辨率),该数据从中科院科学数据中心地理空间数据云网站上下载(<http://www.gscloud.cn/>)。利用ArcGIS软件(v10.8)进行影像拼接等预处理,

生成备选河道信息(王成文等,2021)。通过与GoogleEarth无偏影像、天地图卫星图以及天地图街道图进行对比检核,确定本文用于分析的河网分布数据。

大坝数据主要源于长江水利委员会网信中心水库、水电站数据库和《中国河湖大典》(长江卷)(《中国河湖大典》编纂委员会,2010)、全国第一次水利普查成果(《第一次全国水利普查成果丛书》编委会,2017)以及全球水库和大坝数据库(Global Reservoir and Dam database, GranD v1.3)(Lehner et al,2011),并利用奥维地图软件(OMAP v9.9.0)加载天地图影像和四维卫星影像图进行核实筛查获得。

1.3 研究方法

树状水系连通性指数是根据大坝的数量、可通过能力以及地理位置,定量评价水系的连通性水平。与网状水系不同,树枝状水系中任意两点间的路径是唯一的,整个水系的连通性状况主要取决于河网中任意两点之间大坝的数量、可通过能力以及河段长度。河段是指由于大坝的存在而将河道分成的各个节段。大坝具有相应的可通过能力 p ,可通过能力是指生物体在溯流和降流两个方向通过大坝的能力,取决于其物理、化学、水文学特征以及生物体自身的生物学特征(Cote et al,2009)。本方法假定大坝不占用实际空间,不影响河网的总长度;假定由大坝分割得到的每个河段内部是完全连通的。整个水系的连通性可视作任意两个河段之间连通性的总和,树状水系连通性指数DCI可根据以下公式进行计算(孙鹏等,2016):

$$DCI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(C_{ij} \frac{l_i l_j}{L L} \times 100 \right) \quad (1)$$

式中: l_i 和 l_j 为河段 i 与河段 j 的长度, L 为整个河网的总长度, n 为河网被大坝切割而形成的河段数量。乘以100是为了将DCI的数值调整到0~100之间,其数值越高,则表明河网的连通状况越好。 C_{ij} 为河段 i 与河段 j 之间的连通性,其数值的设定取决于河段 i 与河段 j 之间存在的大坝数量,以及每个大坝的可通过能力。如果河段 i 与河段 j 之间存在 K 个大坝,则 C_{ij} 可以用如下公式计算得到:

$$\begin{cases} C_{ij} = \prod_{k=1}^K p_k \\ p_k = p_k^u p_k^d \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_k 为生物体通过第 k 个大坝的能力,其数值根据从上游至下游的通过能力 p_k^d 和从下游至上游的通过能力 p_k^u 相乘得到。

1.4 数据处理

1.4.1 金沙江下游河段划分 基于金沙江下游 89 座大坝位置以及河流间交汇点信息(图1),将河网划分成了 379 个河段。河段的长度分布情况如图2,绝大多数河段的长度在 50 km 以下,最长河段为 96.4 km,河网总长度为 6 249.1 km。基于上述分析,可获得公式①所述 L 和 l 的数值信息。

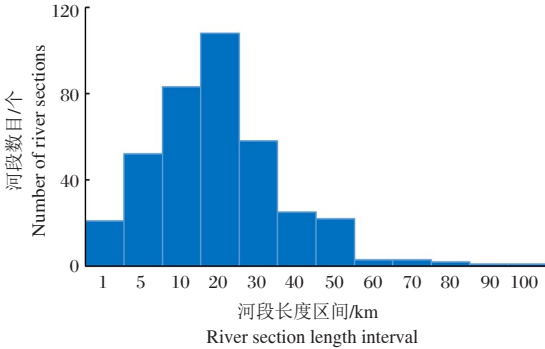


图2 待分析河段的长度分布情况统计

Fig.2 The length distribution of river sections

1.4.2 两个河段间的路径计算 对 379 个河段采用 ArcGIS 软件的网络分析功能,将任意两个河段分别设置为设施点和事件点的方式,计算得到不同河段间合计 143 641 条路径信息。通过对每条路径信息进行缓冲区分析的方式,获取该路径上存在的大坝信息。基于上述分析结果,获得公式②所述不同河段间存在的大坝数量 K ,根据生物体在每个大坝处的通过能力对参数 p 进行设置。

2 结果与分析

2.1 大坝可通过能力对水系连通性的影响

为简化分析过程,本文未细化区分公式②中 p^d 和 p^n 的影响,而是以两者的乘积 p 作为自变量开展后续分析。此外,本文未区分不同大坝可通过能力的差异性。将大坝的可通过能力 p 按照 0.05 的步长从 0 增加到 1,按照公式①、②计算对应的水系连通性指数 DCI,分析大坝可通过能力对金沙江下游树状水系连通性的影响。

由统计结果(图3)可知,随着大坝可通过能力 p 的增加,金沙江下游的水系连通性指数 DCI 整体上呈现逐渐增加的趋势。当 $p < 0.7$ 时,随着可通过能力 p 的增加,金沙江下游 DCI 增加的趋势并不明显,始终在 17 以下。说明对于金沙江下游当前河网而言,当大坝的可通过能力 p 较低时,尽管 p 增加较多,但该地区水系整体的连通性水平并未得到明显改善;而当 $p \geq 0.7$,尤其是当 $p \geq 0.9$ 时,金沙江下游的水系连通

性指数 DCI 显著提升,即当该地区大坝的可通过能力 p 较高时, p 的微小变化会对整个水系的连通性水平产生非常明显的影响。

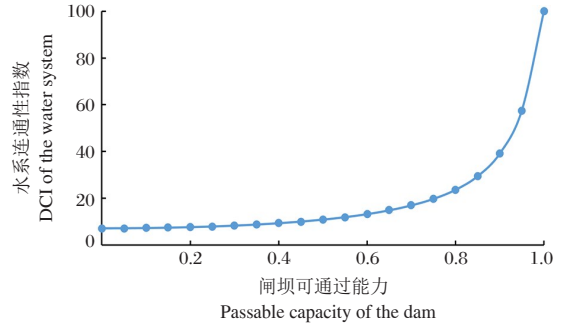


图3 金沙江下游水系连通性指数 DCI 随大坝可通过能力的变化情况

Fig.3 Changes in the downstream DCI for the Jinsha River with the passing capacity of gate dams

2.2 不同支流上大坝建设对水系连通性的影响

进一步分析 14 条支流大坝建设对金沙江下游水系连通性指数的影响,以图3所示金沙江下游水系连通性指数 DCI 为参考基准,通过将各支流上所有大坝可通过能力 p 设置为 1.0 的方式,模拟该支流连通性全面修复后(即该支流通过拆坝、修建过鱼设施等方式实现 100% 连通)整个金沙江下游水系连通性指数的增幅(Δ DCI)。

如图4所示,若对普渡河和牛栏江连通性全面修复,金沙江下游水系的连通性指数增幅最大。其中,当大坝可通过能力 $p \leq 0.4$ 时, Δ DCI 增幅较缓;当 p 处于 0.4~0.9 时, Δ DCI 随着 p 增大显著增加,分别由 4.6 增至 8.0、2.8 增至 9.2,当 p 值为 0.9 左右时 Δ DCI 达到峰值。

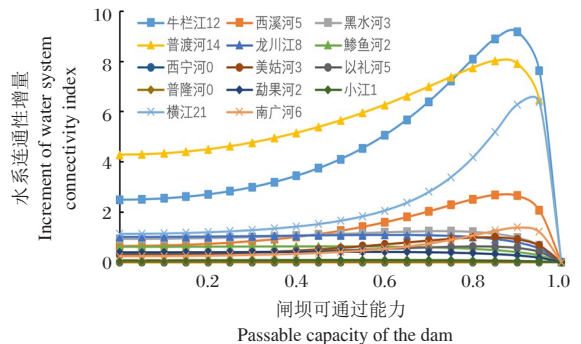


图4 金沙江下游不同支流连通性修复对整体水系连通性产生的增量(Δ DCI)

The legend gives tributary names and number of dams
Fig.4 Increments of overall water system connectivity (Δ DCI) with connectivity restoration of different tributaries in the lower Jinsha River

此外,横江和西溪河的连通性修复也可取得较大的连通增量,其他10条支流的连通性修复则对整体增量贡献值较小。值得注意的是,目前正在开展连通性修复的黑水河尽管大坝数量较少(3个),但对整体连通性修复的增量大于比其大坝数量多的龙川江和以礼河。

3 讨论

3.1 金沙江下游连通性

金沙江下游河段梯级电站开发任务以发电为主,并有防洪、拦沙、航运、灌溉等综合效益,工程发电效益巨大,社会效益显著,梯级电站发电每年可节约原煤约7500万t,具有显著的环境效益。但是,金沙江下游地区生态环境脆弱,梯级电站建设将不可避免地流域连通性和区域生态环境造成负面影响,特别是对国家级和省级重点保护鱼类、濒危鱼类和珍稀特有鱼类及其栖息生境。恢复水生生物栖息地的连通性是目前学界广泛认同的水生生物多样性保护中最重要、最紧迫和最有效的手段之一。通过恢复金沙江下游干支流的连通性,可以在一定程度上恢复干支流之间的水文联系和相互作用,以及生物群落的交流和迁徙,并减缓人类活动的影响。

针对金沙江下游干流有乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝4座巨型梯级水电站、支流累计近百座梯级水电站分布的情况,本研究分别以干流和各支流流域为研究单元,建立树型水系的连通性模型,定量分析了连通性指数与大坝可通过能力的相关性。研究结果表明(图3),若所有大坝均无上下行洄游通道,水系的连通性指数非常低,破碎化严重,对于不同生活史阶段需要在水域间洄游的鱼类造成重大影响,物种严重衰退。当大坝通过能力逐步提升,尤其是升至0.7后,水系整体连通度将呈显著增大趋势,连通性明显向好。为此,通过修建过鱼设施、梯级联合生态调度等综合措施,在鱼类关键生活史阶段提升鱼类的大坝通过能力,可以有效提升水系整体连通度,对金沙江具有长、短距离洄游习性的鱼类产生积极的生态增益。

3.2 金沙江下游支流连通性恢复次序

目前,在水生态影响减缓措施中,支流因同干流水系连通、鱼类种类组成相似度高,成为大型工程重要的替代生境,如黑水河是金沙江下游白鹤滩库区干流鱼类的重要替代生境和优先保护支流(张雄等,2014)。

本研究分析了14条支流大坝建设对金沙江下游水系连通性指数的影响,普渡河、牛栏江、横江和西溪河连通性修复可对水系连通性产生较大增量。张雄等(2014)通过选取河段级别、河宽、比降、海拔、弯曲度、植被等河流自然环境指数,得出西宁河和牛栏江的栖息地质量均非常好;西溪河、黑水河、以礼河、勐果河、普渡河、美姑河、普隆河的栖息地质量较好。牛栏江从连通性恢复需求、栖息地质量评价两方面都是应重点关注的支流,且其特有鱼类种类分布数相较最多,在今后的流域洄游通道恢复系统中应予以重视。普渡河同牛栏江一样,也是连通性修复可带来较大增益的支流,其栖息地质量评价为较好,且有昆明裂腹鱼等特有鱼类分布,其连通性修复需求也较高。横江阻隔工程最多,修复难度大,且连通性恢复增量不及水坝数量远小于其的牛栏江和普渡河,其连通性恢复措施可在中远期实施。西溪河栖息地质量好,连通性修复增量较大,且水坝数量较少,建议制定适宜的连通性保护方案。除此之外,尽管目前黑水河仅有3座梯级,但其对整体连通性修复的增量大于比其大坝数量多的支流。据报道,原黑水河第四级老木河水坝已根据环评批复进行了拆除(何术锋等,2021),第三级的松新水坝修建了鱼道(石小涛等,2023)。根据环审[2023]111号批复要求:加快推进黑水河鱼类栖息地保护第二阶段措施落实,有序实施松新、苏家湾、公德房等水电站退出拆除工作,同步开展生境修复(中华人民共和国生态环境部,2023)。黑水河的连通性恢复有望第一个落实,后期可持续开展栖息地保护效果跟踪监测与评估,动态评估水系连通性,为流域连通性决策系统提供科学依据。

综上所述,根据本文研究,金沙江下游水系连通性修复次序建议如下,第一期:黑水河、西溪河、牛栏江;第二期:普渡河、西宁河、龙川江、鲮鱼河;远期:横江、普隆河、美姑河、以礼河、勐果河、小江。

当前世界范围内,连通性修复已成为河流生态系统补偿措施的重要内容。对于水能资源丰富的金沙江下游水系,破碎化程度严重,连通性指数低,同时又分布有种类丰富的土著鱼种,资源衰退形势严峻,亟需采取相应的补偿措施。本文通过构建金沙江下游树型连通性模型,定量分析通过大坝能力与连通性指数的相关关系,提出支流恢复次序建议,为金沙江下游水生态保护决策提供技术支撑。

参考文献

- 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会,2017. 水利工程基本情况普查报告[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 董哲仁,赵进勇,张晶,2019. 3流4D连通性生态模型[J]. 水利水电技术,50(6):134-141.
- 何术锋,唐磊,王骏,等,2021. 水坝拆除对黑水河鱼类群落结构和空间分布的影响[J]. 生态学报,41(9):3525-3534.
- 梁媛,崔磊,文典,等,2023. 水电开发前后金沙江中游鱼类资源演变研究[J]. 水力发电,49(9):6-11.
- 生态环境部,2021. 规划环境影响评价技术导则 流域综合规划: HJ1218-2021[S].
- 石小涛,白天翔,许家炜,等,2023. 金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估[J]. 湖泊科学,35(3):972-984.
- 孙鹏,王琳,王晋,等,2016. 大坝对河流栖息地连通性的影响研究[J]. 中国农村水利水电,(2):53-56.
- 王成文,李英,黄小琴,等,2021. 基于 GIS 和 DEM 数据的流域水系提取与优化分析[J]. 中国农村水利水电,(2):37-42.
- 夏继红,陈永明,周子晔,等,2017. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展,28(5):780-787.
- 熊美华,邵科,李伟涛,等,2023. 圆口铜鱼资源变化及物种保护研究进展[J]. 人民长江,54(3):63-71.
- 徐光来,许有鹏,王柳艳,2012. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,23(6):776-781.
- 杨志,唐会元,龚云,等,2017. 向家坝和溪洛渡蓄水对圆口铜鱼不同年龄个体下行移动的影响[J]. 四川动物, 36(2):1-8.
- 张雄,刘飞,林鹏程,等,2014. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J]. 长江流域资源与环境,23(4):496-503.
- 赵进勇,董哲仁,杨晓敏,等,2017. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志,38(5):1-6.
- 《中国河湖大典》编纂委员会,2010. 中国河湖大典(长江卷下)[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 中华人民共和国生态环境部,2023-10-07. 关于金沙江乌东德水电站控制运行水位重大变动环境影响报告书的批复:环审[2023]111号[A/OL]. [2023-10-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk11/202310/t20231008_1042561.html.
- Cote D, Kehler D, Bourne C, et al, 2009. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks[J]. Landscape Ecology, 24(1):101-113.
- Grill G, Lehner B, Lumsdon A E, et al, 2015. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales[J]. Environmental Research Letters, 10(1):015001.
- Grill G, Lehner B, Thieme M, et al, 2019. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 569(7755):215-221.
- Lehner B, Liermann C, Revenga C, et al, 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 9(9):494-502.
- Poole G C, 2002. Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum[J]. Freshwater Biology, 47(4):641-660.
- Ward J, 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems [J]. Journal of the North American Benthological Society, 8(1):2-8.

(责任编辑 熊美华)

Impact of Dam Construction on the Longitudinal Connectivity of the Lower Jinsha River

HOU Yi-qun, ZOU Xi, CHEN Xiao-juan, JIN Yao, YANG Zhi, LIU Hong-gao

(Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, P.R. China)

Abstract: The complex, diverse ecosystem of the lower Jinsha River makes it a center of aquatic biodiversity, inhabited by numerous protected, endangered, rare and endemic fish species. However, ecosystem health in the lower Jinsha River has significantly deteriorated in recent years due to fragmentation by high-density, high-intensity cascaded hydropower stations. In this study, the main stem and the tributaries of the lower Jinsha River were treated as individual watershed units, and we constructed a dendritic diagram of watershed unit connectivity, analyzed the effects of fragmentation caused by dams within the watersheds, and quantitatively assessed the longitudinal connectivity of the lower Jinsha River using the dendritic connectivity index (DCI). The study was based on digital elevation models (DEM) of the main stem and tributaries of the lower Jinsha River, along with data on reservoirs and hydropower station construction. Results show that dam passage capacity in the lower Jinsha River gradually increased, and the connectivity index of the lower Jinsha River trended upward as the passable capacity of the dams increased. More specifically, when the DCI reached 0.7, the overall connectivity of the watershed improved significantly. We then further analyzed the relationship of the watershed connectivity index in the lower Jinsha River with dam construction on the 14 tributaries and, based on the results, we recommend a three-phase sequence of watershed restoration: Phase 1 would restore watershed connectivity among the rivers most influencing watershed connectivity, including Heishui River, Xixi River, Niulan River; in Phase 2, connectivity of rivers with less influence would be restored, including Pudu River, Xining River, Longchuan River and Shenyu River; Phase 3 would involve longer term connectivity restoration of rivers of least influence, including Henghe River, Pulong River, Meigu River, Yili River, Mengguo River and Xiaojiang River. Our research provides base data to support planning and implementation for an effective connectivity restoration effort and the preservation of aquatic biodiversity.

Key words: dendritic river systems; dendritic connectivity index; restoration sequencing; Jinsha River