

# 四川省水电开发基地水电开发程度评估

罗 涵<sup>1,2</sup>, 巨 莉<sup>3</sup>, 罗茂盛<sup>3</sup>, 唐云逸<sup>4</sup>, 黄艳艳<sup>1,2</sup>, 赵曦琳<sup>5</sup>, 卢喜平<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程大学软件工程学院, 四川 成都 610225;  
2. 四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 四川 成都 610225; 3. 四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072;  
4. 四川省水土保持生态环境监测总站, 四川 成都 610041; 5. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

**摘要:**以四川省雅砻江流域和大渡河流域两个重要水电开发基地为例,采用水利水电统计数据,在流域分割的基础上,结合上下游空间关系和流域水电开发指标总体水平,利用空间自相关分析方法,构建了水电开发程度综合评估体系;基于流域水电开发规划情况、土壤侵蚀、地质灾害、水质监测和鱼类资源等数据,分析评估了不同水电开发程度对流域生态环境的影响。结果表明:水电开发密度、水电开发强度等指标具有明显的空间异质性和局部聚集性,其中水电开发强度、流域装机容量与流域库区的土地利用类型变化呈现显著的相关性;不同水电开发程度等级的水电开发指标呈现显著的差异性,证明了该水电开发程度综合评估体系的合理性。

**关键词:**水电开发程度;评估体系;生态环境;流域管理;雅砻江流域;大渡河流域

**中图分类号:**TV213.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2023)01-0071-10

**Hydropower development degree evaluation of Sichuan hydropower development base**//LUO Han<sup>1,2</sup>, JU Li<sup>3</sup>, LU Maosheng<sup>3</sup>, TANG Yunyi<sup>4</sup>, HUANG Yanyan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xilin<sup>5</sup>, LU Xiping<sup>3</sup> (1. School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Sichuan Province Informatization Application Support Software Engineering Technology Research Center, Chengdu 610225, China; 3. Sichuan Research Institute of Water Conservancy, Chengdu 610072, China; 4. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Sichuan Province, Chengdu 610041, China; 5. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The two important hydropower development bases in Sichuan, the Yalong River Basin and Dadu River Basin, were taken as examples to construct a comprehensive evaluation system for the degree of hydropower development, in which the spatial cluster analysis method was adopted using the statistical data of water resources and hydropower. The spatial relations between upstream and downstream and the overall level of watershed hydropower development indicators were combined based on watershed segmentation. The impacts of different hydropower development degree on ecological environment were analyzed considering the data of development plans, soil erosion, geological hazards, water quality monitoring and fishery resources. The results show that the spatial heterogeneity and local agglomeration of indicators, such as hydropower development density and hydropower development intensity, are obvious. The hydropower development intensity and the total installed capacity of the basin show a significant correlation with the change of the land use type in the reservoir area. The hydropower development indicators of different grades also show significant differences, indicating the rationality of comprehensive evaluation system for hydropower development.

**Key words:** hydropower development degree; evaluation system; ecological environment; watershed management; Yalong River Basin; Dadu River Basin

水电开发是实现节能减排战略、保障能源安全的重要举措之一<sup>[1]</sup>。水电工程的建设和运行会改变河流和陆地生态系统的结构和功能,从而引发各种生态环境效应<sup>[2]</sup>。目前围绕水电开发生态环境效应与保护问题已经开展了大量且深入的研究,但

随着水电开发向河流上游,尤其是向西南山区等生态脆弱区发展,新的挑战不断出现;已建水电工程随着运行时间增长,生态环境累积效应和前期未知生态环境问题逐步凸显<sup>[3]</sup>。在此背景下,利用易获取的数据定量评估水电开发程度是很有必要的。

**基金项目:**四川省科技计划项目(2020YFS0032);成都水生态文明建设研究重点基地资助项目(SST2019-2020-17);成都信息工程大学科研基金(KYTZ202162);四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心开放课题(2021RJGC-Y02,2021RJGC-Y03)

**作者简介:**罗涵(1988—),女,讲师,博士,主要从事生态环境遥感监测和空间数据挖掘研究。E-mail:luohan@cuit.edu.cn

**通信作者:**巨莉(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail:juli\_scsllx@126.com

装机容量、年发电量以及库容等指标常被用于不同空间尺度(区域、流域、库区等)的水电开发特点分析<sup>[4]</sup>、水能资源评估<sup>[1,5]</sup>、水电开发潜力估算<sup>[6-8]</sup>以及水电产业发展水平评价<sup>[9-10]</sup>等研究。但水电开发产生的生态环境效应评估鲜少采用这些指标,更多采用流域径流量<sup>[11-12]</sup>、生境格局<sup>[13-15]</sup>、生源物质<sup>[3]</sup>、植被指数<sup>[16-17]</sup>、水生生物种群结构<sup>[15,18-19]</sup>等生境、生物相关指数。近年来,部分研究开始从生态系统服务角度<sup>[20-21]</sup>评估水电开发对河流和陆地生态系统的影响。这些指标通常难以剔除气候变化、农业活动或城镇化等因素的影响<sup>[12]</sup>。此外,径流量、水生生物种群结构、流域水质等指标通常为点状采样数据,难以体现空间异质性且相对较难获取,增加了对区域尺度下水电开发对生态环境影响进行定量建模的难度。此外,量化表述上下游的相互影响关系以及梯级水库建设运行对生态系统的累积影响也是评估水电开发对生态环境影响的关键<sup>[3,22-23]</sup>。目前大多数研究<sup>[24-26]</sup>从生境、生物相关指数的时空分布、变化与演替等角度,探讨上游水电开发对下游生态环境的影响和梯级水库的累积生态效应。因此,利用易获取的水利统计数据 and 自然环境数据,基于流域尺度,构建水电开发程度指标,对水电开发程度进行综合的定量评估,有助于水利工程对生态环境影响的模型构建、生态环境调控措施优化等相关研究的开展。

四川省水能资源丰富,全省水能资源理论蕴藏量 1.43 亿 kW,仅次于西藏,技术可开发量 1.03 亿 kW,经济可开发量 7611.2 万 kW,均居全国首位<sup>[27]</sup>。其中,位于四川省境内的雅砻江和大渡河流域(以下简称两江流域)水能资源约占全省的二分之一,属于我国十三大水电开发基地之一。经历了 20 多年的规划和建设,两江流域的水电工程为西部大开发和西电东送能源战略作出了巨大贡献<sup>[28]</sup>,但流域内还有许多电站处于未建和规划状态,并且多集中在生态脆弱的流域上游。已有研究发现,两江流域的水电工程开发对鱼类种群<sup>[29]</sup>、水质<sup>[30-31]</sup>等产生了重要影响。因此,综合评估两江流域水电开发程度,对管理水电工程的建设、降低水电开发对生态环境的影响具有重大意义。

本文收集了四川省两江流域的水利水电相关统计数据,考虑上游和下游、支流和干流的空间关系,选取易操作且合理的综合性水电开发程度指标,并利用差异性和相关性分析验证指标的合理性,结合流域地质灾害、水土流失等生态环境问题,分析未来的水电工程建设和运行中,水电开发对流域生态环境的潜在影响,以期对流域的生态环境保护措施制

定提供辅助信息和决策依据。

## 1 研究区概况

两江流域位于长江上游,介于东经 97°21′~105°21′、北纬 26°01′~34°08′之间,总面积约 20 万 km<sup>2</sup>(图 1)。流域地形复杂,海拔高差明显,包含川西北高原、横断山脉、四川盆地等多个地理单元。

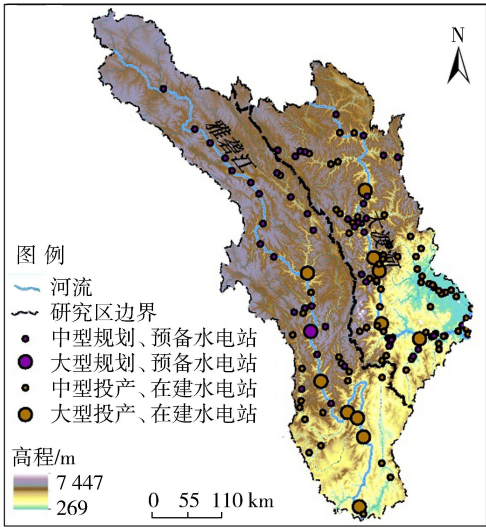


图 1 研究区域概况

两江流域内支流密布,雅砻江较大的支流有鲜水河、理塘河、安宁河等,大渡河较大的支流有绰斯甲河、梭磨河、小金川、尼日河、青衣江等,两江均流经甘孜、凉山两州,最终雅砻江于攀枝花市东区注入金沙江,大渡河在乐山市汇入岷江。两江流域鱼类资源丰富,据调查统计,雅砻江共有鱼类 75 种<sup>[32-33]</sup>,大渡河共有鱼类 116 种,隶属 8 目 19 科 77 属<sup>[34]</sup>。其中,大渡河流域分布有国家Ⅱ级保护鱼类 2 种,省级保护鱼类 11 种,长江上游特有鱼类 38 种,经济鱼类 63 种<sup>[35]</sup>。

雅砻江和大渡河流域均是重要的水电开发基地,已建大型水电站均集中在两江流域下游(图 1)。雅砻江干流和一级支流已建、在建和规划中型以上电站共计 48 座,其中,规划 23 座梯级水电站,装机容量 2560 万 kW。大渡河干流和一级支流已建、在建和规划中型以上电站共计 89 座,其中,规划 28 座梯级水电站,装机容量 2170 万 kW。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

以两江流域的干流和一级支流的水电站为对象,基于全球大坝地理数据库<sup>[36]</sup>,结合流域内各类规划报告等资料,收集整理研究区内已建、在建、规划、预备的大中型(装机容量大于 5 万 kW)水电站的经纬度信息、隶属流域、工程状态、装机容量、年发

电量和正常蓄水位等信息。

数字高程数据采用 30 m 空间分辨率的 ASTER GDEM, 本文选用的是 ASTER GDEM V2 版, 数据下载于国家科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/>)。土壤侵蚀强度数据是基于 2019 年基础地理数据并参照《水土保持监测技术规程》计算获得。土地利用/覆盖情况采用 2020 年和 2005 年数据, 空间分辨率为 1 km; 地质灾害点空间分布数据为 2019 年数据, 均下载自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。流域水环境相关数据通过整理近期相关文献和报告中水质监测指标和鱼类资源数据, 最终获得 2020 年 9 月采样的大渡河干流 20 个水质监测断面的 7 个水质监测指标(包括氨氮、氟化物、化学需氧量、总磷、粪大肠菌群、高锰酸钾指数和五日生化需氧量)<sup>[31]</sup>和 2004—2019 年间 19 个水电站鱼类资源分布的数据<sup>[34-35, 37]</sup>, 采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和《地表水环境质量评价办法》进行评价。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 子流域划分

在 ArcGIS 中的水文模块中, 在尽可能保证两江干流和主要子流域的完整性的基础上, 基于上一级子流域结果, 结合单元内人类活动和自然生态条件对水文过程的截断影响, 将一级子流域单元再划分为二级子流域。最终共计 73 个子流域(图 2), 其中面积最大为 7 057 km<sup>2</sup>, 面积最小为 910 km<sup>2</sup>。

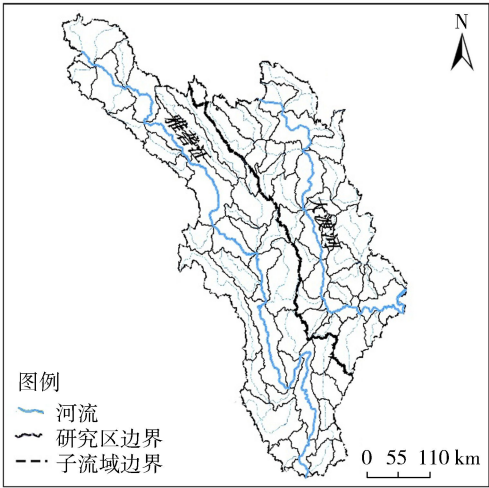


图2 研究区子流域划分

### 2.2.2 水电开发指标

水电开发程度主要基于装机容量和年发电量计算<sup>[3]</sup>。依据装机容量计算水电开发程度具有简便易行的优点, 但很难准确反映水电开发实际情况<sup>[38]</sup>。依据年发电量计算水电开发程度能较科学地反映水能的实际利用率, 但年发电量数据具有不易获取、易受河流流量变化影响的特点<sup>[39]</sup>。本文参

考文献[4, 40], 引入水电开发密度、水电开发强度指标, 用于综合量化流域的水电开发程度。流域水电开发密度表示单位长度(100 km)河段的水电站个数, 流域水电开发强度表示单位面积内的水电装机容量。

### 2.2.3 统计分析方法

为了揭示水电开发指标的空间聚集特性, 基于流域干流和支流、上游和下游的关系, 采用 R 软件和 ArcGIS 软件构建空间权重矩阵以及空间自相关理论, 对水电开发程度进行集聚性分析:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X}) (n - 1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j - \bar{X})^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X}) \quad (2)$$

$$Z_{I_i} = \frac{I_i - E(I_i)}{\sqrt{V(I_i)}} \quad (3)$$

式中:  $I$  为全局莫兰指数, 取值范围为  $[-1, 1]$ , 当  $I > 0$ , 即空间相关性为正向, 且越接近 1, 空间差异越显著, 当  $I < 0$ , 则与之相反, 当  $I = 0$ , 无空间相关性;  $n$  为子流域个数;  $w_{ij}$  为各流域之间的空间权重, 表示研究区子流域间的空间关系, 采用 Queen 权重定义, 即流域有公共边或者公共点, 则判断两个流域间存在空间联系;  $X_i$  为第  $i$  个流域的属性值;  $X_j$  为第  $j$  个流域的属性值;  $\bar{X}$  为  $n$  个二级子流域水电开发程度指标的平均值;  $I_i$  为局部莫兰指数;  $Z_{I_i}$  为统计数量;  $E(I_i)$  为  $I_i$  的均值;  $V(I_i)$  为  $I_i$  的方差。采用随机化计算  $p$  值, 当  $p < 0.05$  且  $Z_{I_i} > 1.96$  时, 表示存在局部正相关; 当  $p < 0.05$  且  $Z_{I_i} < -1.96$  时, 存在局部负相关, 结合  $I_i$ , 判断流域单元为高值聚集区(HH)、低值聚集区(LL)、高低值区(HL)、低高值区(LH)和非显著区域<sup>[41]</sup>。

采用皮尔逊相关系数检验水电开发单个指标与水库土地类型变化比例的相关性, 验证单一水电开发指标在评估水电开发生态环境影响的效果; 利用 Kruskal-Wallis H 检验(对秩次的单因素方差分析)和综合评估结果的效果检验不同水电开发程度子流域的水电开发指标是否存在差异。

## 3 结果与分析

### 3.1 水电开发指标空间分异性

研究区内已建和在建中型和大型水电站共计 88 座, 分布在 43 个子流域。大渡河流域的水电站数量、装机容量、水电开发密度和开发强度都大于雅

砦江。

各子流域的已建和在建的水电站数量和装机容量见表1和图3(a)(b)。已建和在建水电站主要分布在大渡河下游,包括下游干流(16座)和支流青衣江(16座)、南桠河(3座)、金汤河(3座)、革斯扎河(3座)、田湾沟(3座);雅砻江的已建水电站主要分布在支流九龙河(4座)和木里河(3座)。大型水电站主要集中在雅砻江的下游干流和大渡河的中下游干流。

表1 研究区水电开发指标统计

| 流域  | 干支流 | 小流域<br>数量/个 | 水电站<br>数量/座 | 装机容量/<br>万 kW | 开发<br>密度/座 | 开发强度/<br>(kW·km <sup>-2</sup> ) |
|-----|-----|-------------|-------------|---------------|------------|---------------------------------|
| 大渡河 | 干流  | 7           | 22          | 1 747         | 0.61       | 1 108                           |
|     | 支流  | 27          | 41          | 550           | 0.96       | 110                             |
| 雅砻江 | 干流  | 11          | 9           | 1 881         | 0.26       | 869                             |
|     | 支流  | 28          | 16          | 197           | 0.19       | 33                              |

流域水电开发密度和开发强度见表1和图3(c)(d)。开发密度、水电开发强度空间分布基本与水电站数量、装机容量一致,但水电开发密度和开发强度的空间异质性大于水电站数量和装机容量,尤其是在两江流域的中上游。大渡河两个指标均高于雅砻江。大渡河流域支流(0.88座)的水电开发密度高于干流(0.62座),且分布较零散,主要分布在中下游支流,金汤河、青衣江、革斯扎河、瓦斯沟和官庙河;雅砻江干流和支流的水电开发密度差异不大,分布较集中,主要集中在木里河、九龙河、卧罗河以及干流的中下游。开发强度较大的区域主要集中在雅砻江和大渡河的中下游干流(干流开发强度分别为869 kW/km<sup>2</sup>和1 108 kW/km<sup>2</sup>)以及雅砻江的支流木里河和大渡河的支流南桠河。

3.2 水电开发指标空间集聚性

为探索各开发程度指标的空间集聚效应,基于流域上下游和干流支流的邻接关系,利用R软件建立空间关系矩阵和空间权重,通过全局和局部空间自相关分析揭示水电开发程度指标的空间分布集聚

性特征。由全局空间自相关分析结果(表2)可知,全局莫兰指数均大于0,水电开发程度指标均存在正向空间集聚性。其中水电站数量和开发密度均呈现显著的正向空间集聚性,即如果某一个子流域的水电开发程度较高,则该子流域相邻的上下游流域通常也具有较高的水电开发程度。

表2 全局空间自相关分析结果

| 指标    | Z    | p    | 全局莫兰指数 |
|-------|------|------|--------|
| 水电站数量 | 5.16 | 0.00 | 0.35   |
| 装机容量  | 1.29 | 0.10 | 0.08   |
| 开发密度  | 2.95 | 0.00 | 0.20   |
| 开发强度  | 0.18 | 0.43 | 0.00   |

为探讨各指标的空间相关性类型及分布状态,进行局部空间自相关分析,获得显著性水平图(图4)。从局部相关性的角度分析,水电站数量高值聚集区集中在大渡河下游干流和支流青衣江、尼日河和官渡河,低高值区集中在大渡河中游支流;水电开发密度的空间集聚性与水电站数量的空间分布基本一致;装机容量的高值聚集区主要分布在雅砻江中下游干流(锦屏水电站段)和支流九龙河,低高值区分布在两江流域中下游的各支流(卧罗河、安宁河、安顺河、田螺沟、流沙河和青衣江);水电开发强度的高值聚集区位于雅砻江中游干流(卧罗河以上)、雅砻江支流霍曲和大渡河支流青衣江流域;4个指标的低值聚集区均分布在雅砻江上游。

3.3 水电开发程度划分

通过上述分析,可以看出水电站数量、装机容量、开发密度和开发强度空间分布基本一致,但局部存在差异。基于单一指标的水电开发程度评估容易忽视个别子流域的水电开发综合情况,结合4个指标及其空间集聚性特征建立水电开发程度综合评估体系(详见表3):以流域内是否有在建或已建水电站作为水电工程开发区和水电工程影响区的分类因子;基于空间自相关分析结果,将高值聚集区和高低值区作为开发影响程度重要因子,将低高值区作为

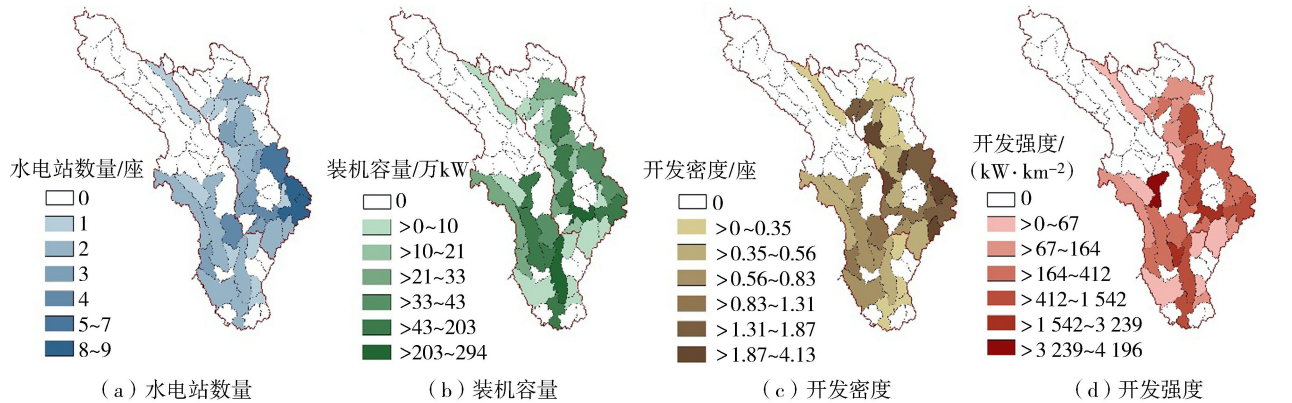


图3 研究区子流域水电开发指标空间分布

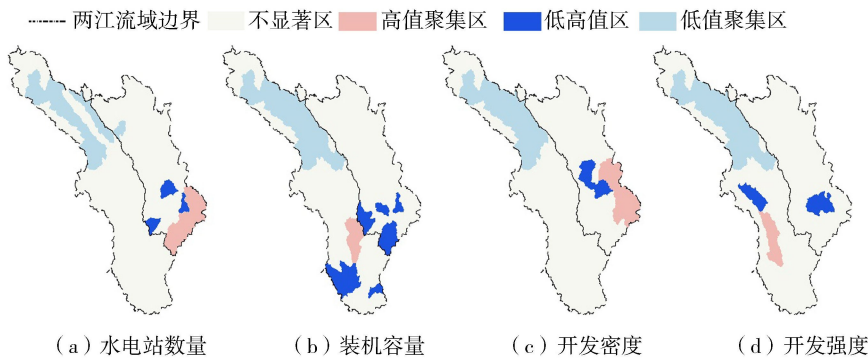


图 4 研究区水电开发指标局部自相关显著性分析

表 3 水电开发程度划分体系

| 划分标准          | 开发区 |   |   |   | 影响区 |   |
|---------------|-----|---|---|---|-----|---|
|               | 极高  | 高 | 中 | 低 | 高   | 低 |
| 有已建或在建水电站     | 是   | 是 | 是 | 是 | 是   | 否 |
| 包含高值聚集区或高低值区  | 是   | 否 | 否 | 否 | 否   | 否 |
| 包含低高值区        |     | 是 | 否 | 是 | 是   |   |
| 水电开发指标高于中位数   | 是   | 是 | 是 | 否 | 否   | 否 |
| 水电开发指标高于三四分位数 | 是   | 是 | 否 | 否 | 否   | 否 |

次要影响因子;为防止个别流域的单一开发指标过高被忽略,将水电开发指标高于三四分位数和中位数的指标也作为开发影响程度因子,即样本中数值由小到大排列后第 75% 和 50% 的数。最终获得两江流域综合水电开发程度空间分布图(图 5)和统计表(表 4)。

水电工程开发区分为极高、高、中、低 4 个程度,水电工程影响区分为高和低两个程度,共计 6 个程度。其中,水电工程开发区按照流域水电站装机容量

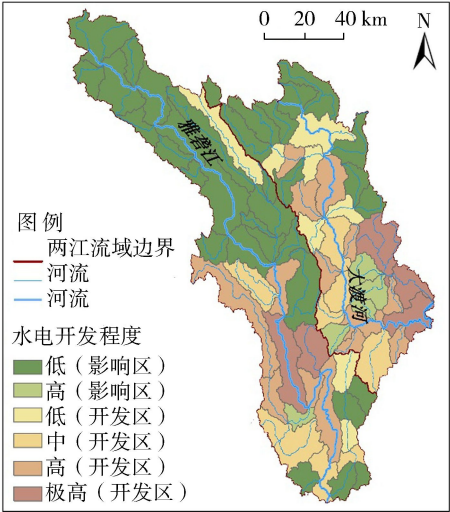


图 5 研究区水电开发程度空间分布

量、水电站数量、水电开发密度、水电开发强度以及聚集性等指标从高到低排列;水电工程高程度影响区定义为无已建和在建水电工程,位于水电开发高

表 4 研究区不同水电开发程度相关指标统计

| 流域  | 干支流 | 开发程度    | 开发密度/座 | 开发强度/<br>(kW · km <sup>-2</sup> ) | 装机容量/万 kW | 水电站数量/座 | 小流域数量/个 |
|-----|-----|---------|--------|-----------------------------------|-----------|---------|---------|
| 大渡河 | 干流  | 低(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 1       |
|     |     | 低(开发区)  | 0.28   | 142                               | 60        | 2       | 1       |
|     |     | 中(开发区)  | 0.41   | 994                               | 518       | 5       | 2       |
|     |     | 高(开发区)  | 0.70   | 2319                              | 818       | 6       | 2       |
|     |     | 极高(开发区) | 1.76   | 987                               | 351       | 9       | 1       |
|     | 支流  | 低(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 8       |
|     |     | 高(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 4       |
|     |     | 低(开发区)  | 0.61   | 107                               | 68        | 5       | 4       |
|     |     | 中(开发区)  | 0.76   | 159                               | 57        | 5       | 2       |
|     |     | 高(开发区)  | 2.33   | 248                               | 242       | 15      | 7       |
|     |     | 极高(开发区) | 2.78   | 247                               | 184       | 16      | 2       |
| 雅砻江 | 干流  | 低(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 6       |
|     |     | 中(开发区)  | 0.26   | 1542                              | 390       | 2       | 1       |
|     |     | 高(开发区)  | 0.60   | 2552                              | 1187      | 5       | 3       |
|     |     | 极高(开发区) | 0.74   | 365                               | 210       | 2       | 1       |
|     | 支流  | 低(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 18      |
|     |     | 高(影响区)  | 0      | 0                                 | 0         | 0       | 1       |
|     |     | 低(开发区)  | 0.29   | 34                                | 21        | 3       | 3       |
|     |     | 中(开发区)  | 0.53   | 68                                | 49        | 4       | 3       |
|     |     | 高(开发区)  | 0.86   | 172                               | 127       | 5       | 2       |
|     |     | 极高(开发区) | 1.08   | 261                               | 94        | 4       | 1       |

值聚集区上下游的流域,属于受到其他流域水电开发影响的区域。

雅砻江流域的水电开发程度在上下游呈现较显著的差异性和局部的聚集性。雅砻江流域上游(庆达河和鲜水河汇入口以上)流域基本属于低程度影响区,除鲜水河上游有少量已建水电站,属于低程度开发区;雅砻江中下游开发程度明显强于上游,其中极高和高程度开发区主要集中在两河口以下的干流和支流木里河、九龙河;中程度开发区主要为支流霍曲、卧罗河、安宁河部分区域,以及下游干流。

相较于雅砻江流域,大渡河流域水电开发程度的空间差异性更明显。大渡河流域极高程度开发区集中在干流下游和支流青衣江的干流区域;高程度开发区分布在极高程度开发区域的上游以及支流金汤河、瓦斯沟、革斯扎河、绰斯甲河等区域;中程度开发区主要分布在支流尼日河和田湾沟,以及东谷河以下田湾沟以上的干流区域。相较于雅砻江流域,大渡河流域的低程度影响区较少,主要分布在上游的各支流。

## 4 讨论

### 4.1 水电开发程度综合评估体系适用性验证

#### 4.1.1 单一指标的验证

土地利用类型的时空变化能够直接反映水电开发的生态环境影响<sup>[15]</sup>。两江流域的水电工程于2005年左右开始动工,调查发现,从2005年到2020年,水库面积从900 km<sup>2</sup>(占总面积的8%)上升到1150 km<sup>2</sup>(占总面积的10%)。结合2005年和2020年土地利用转移矩阵的结果,发现有24%的水库区域由耕地转化而来,其次为林地(19%)、草地(16%)和城镇居民用地(1%)。

两江流域内73个子流域水库面积变化的比例与开发强度的相关系数为0.39,呈极显著相关性( $p<0.01$ ),与装机容量的相关系数为0.41( $p<0.01$ ),与开发密度的相关系数为0.03( $p=0.8$ ),与水电站数量的相关系数为0.1( $p=0.42$ )。通常,水电站库容、装机容量越大,受影响的土地面积越大。分析发现水电开发强度、装机容量与大型水电站建设和影响范围显著相关,证明流域装机容量和开发强度能较好地反映大型水电站对陆地生态系统的影响。

水电开发密度和水电站数量能辅助反映水电站对河流生态系统的影响。Yun等<sup>[42]</sup>通过VIC水文模型发现水电站数量与流域径流有显著相关性。陈求稳等<sup>[3]</sup>发现水电工程通过拦截改变河流自然水文情势,影响关键生源要素循环、河流底栖动物群落结构及分布以及鱼类的洄游。过密的水电工程开发

必然会对水生态环境造成影响。此外,水电开发密度和水电数量、水电开发强度和装机容量具有空间一致性,也存在局部的空间差异性。因此,融合4个指标构建水电开发程度综合评估体系能有效凸显水电工程开发的各类生态环境影响。

#### 4.1.2 水电开发程度结果的差异性检验

为了进一步说明该综合评估体系的合理性,通过Kruskal-Wallis H检验,发现装机容量、水电站数量、水电开发密度和水电开发强度在开发区的4个水电开发程度中呈现显著的差异性( $p<0.05$ ),证明在水电开发区,各项指标的差异性明显。

通过单一的水电开发指标,无法对水电开发影响区进行程度划分。采用空间聚集性的统计分析结果进行划分,能有效地考虑水电开发过程中流域之间的累积生态环境影响。

### 4.2 基于不同水电开发程度的流域管理建议

#### 4.2.1 流域水电开发建设管理

根据统计的已建、在建、规划和预备的水电工程情况,分析两江流域的水电开发规划建设情况(表5)。大渡河的已建、在建水电工程规模占比略高于雅砻江,其中干流已建、在建规模占比明显高于支流,下一步两江流域的水电工程建设将由大渡河转移到雅砻江,由流域的下游向中上游转移,尤其是雅砻江的中上游干流。

表5 两江流域水电开发规划情况

| 流域  | 干支流 | 规划装机容量/万kW | 已建、在建规模占比/% | 开发密度变化/座 | 开发强度变化/(kW·km <sup>-2</sup> ) |
|-----|-----|------------|-------------|----------|-------------------------------|
| 大渡河 | 干流  | 2170       | 81          | 0.29     | 254                           |
|     | 支流  | 717        | 77          | 0.36     | 35                            |
| 雅砻江 | 干流  | 2560       | 73          | 0.64     | 174                           |
|     | 支流  | 396        | 50          | 0.10     | 9                             |

结合现阶段的水电开发程度划分结果,分析未来水电工程建设和规划情况(表6)。雅砻江干流的极高程度开发区和低程度影响区都是下一步水电开发的重点区域,水电开发强度和水电开发密度均明显增加。雅砻江干流的高程度开发区和大渡河流域干流的高程度开发区,水电开发强度增长幅度较大。大渡河支流的高程度开发区、低程度开发区和中程度开发区,开发密度提升明显。以上区域都属于未来的重点工程开发区,接下来的水利工程建设中,都应考虑结合已建水电工程的情况,注意降低工程对生态环境的影响。

在水电工程建设过程中,地表扰动会造成水土流失,不同水电开发程度的水土流失面积比例见表6。两江流域的水土流失面积比例最高的为大渡河干流的极高程度开发区和雅砻江干流的中程度开发区,其次为大渡河支流中程度开发区、高程度影响

表 6 两江流域干流与支流不同水电开发程度的情况统计

| 流域干支流 | 开发程度 | 水土流失面积比例/% | 地质灾害点数量/个 | 开发密度/座 | 开发强度/(kW·km <sup>-2</sup> ) |
|-------|------|------------|-----------|--------|-----------------------------|
| 大渡河   | 干流   | 低(影响区)     | 2.20      | 0      | 0                           |
|       |      | 低(开发区)     | 2.27      | 43     | 0.28                        |
|       |      | 中(开发区)     | 28.03     | 170    | 0.10                        |
|       |      | 高(开发区)     | 19.45     | 626    | 0.51                        |
|       | 支流   | 极高(开发区)    | 38.02     | 205    | 0.39                        |
|       |      | 低(影响区)     | 7.06      | 360    | 0.27                        |
|       |      | 高(影响区)     | 35.18     | 639    | 0                           |
|       |      | 低(开发区)     | 9.86      | 280    | 0.45                        |
|       |      | 中(开发区)     | 34.43     | 169    | 0.28                        |
|       |      | 高(开发区)     | 24.39     | 338    | 0.83                        |
|       |      | 极高(开发区)    | 22.89     | 1219   | 0                           |
|       | 干流   | 低(影响区)     | 7.77      | 178    | 0.71                        |
|       |      | 中(开发区)     | 37.89     | 126    | 0                           |
|       |      | 高(开发区)     | 25.33     | 247    | 0.12                        |
|       |      | 极高(开发区)    | 25.66     | 43     | 1.11                        |
| 雅砻江   | 支流   | 低(影响区)     | 15.92     | 621    | 0.08                        |
|       |      | 高(影响区)     | 14.93     | 41     | 0                           |
|       |      | 低(开发区)     | 17.11     | 131    | 0.06                        |
|       |      | 中(开发区)     | 19.93     | 193    | 0.28                        |
|       | 干流   | 高(开发区)     | 19.32     | 37     | 0.12                        |
|       |      | 极高(开发区)    | 31.85     | 56     | 0.27                        |
|       |      | 低(影响区)     | 7.77      | 178    | 0.71                        |
|       |      | 中(开发区)     | 37.89     | 126    | 0                           |

区、雅砻江支流的极高程度开发区和大渡河干流的中程度开发区。在以上区域接下来的水电开发工作需要更加注意水电开发过程中的水土保持措施,尽可能减小水电工程对陆地和河流生态系统的扰动。此外,大渡河支流中程度开发区属于规划的水电工程建设重点区域,在该区域中的工程建设更应注意水土保持措施的落实。

4.2.2 流域水电工程运行管理

a. 水生态环境监测与保护。水电工程运行使天然河流从急流型向静水型转变,流速减缓,水域面积增加,水体更新周期和污染物在库区停留时间变长。由于数据获取的局限性,基于文献中收集整理的丰水期大渡河 20 个水质监测断面数据,其中低程度开发区 1 个,中程度开发区 3 个,高程度开发区 4 个,极高程度开发区 12 个,基本呈现从上游向下游开发程度从低到极高依次分布,所有断面水质类别均达到Ⅲ类以上,其中Ⅱ类水质基本分布在低开发区(足木足河断面)、中开发区(猴子岩和大岗山)、高开发区(瀑布沟)和极高开发区(龚嘴坝)。在 21 个指标中,水质指标的超标主要集中在极高开发区(深溪沟、枕头坝、沙坪、龚嘴坝和铜街子)和中开发区(猴子岩)的粪大肠菌群以及五日生化需氧量。大渡河干流总体水质状况为优,但在下游的极高水电开发区需加强对水质的监测。水电工程运行会造成上下游间的物理和生物隔断;水电工程蓄水会改变河流原始流态,改变河流水动力特征和水温条件,

引发水生态环境变化,进而影响鱼类的生存、发展、演化。以大渡河干流为例(图 6),大渡河干流上游、中游、下游分布的国家级省级重点保护鱼类种类稳定,但是长江上游特有鱼类数量分布呈现出从上游到中游逐步增加趋势,下游区域由于龚嘴坝的建设,造成鱼类洄游通道受阻,使得下游区域鱼类种数低于中游区域。并且,相较于上下游龚嘴坝区的水质指标也出现较明显的超标。因此,在水电开发运行过程中,大渡河干流下游的极高程度开发区需要加强对鱼类保护的工程措施有效性的监测。

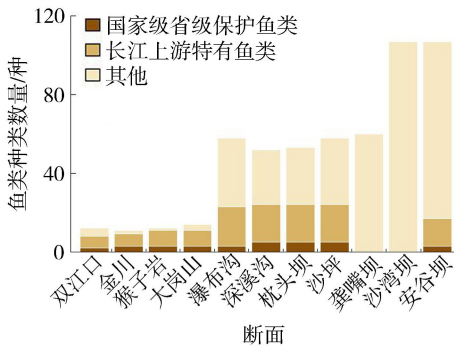


图 6 大渡河干流不同水电开发程度鱼类资源分布情况

b. 地质灾害防范。四川是全国地质灾害最为严重的省份之一,两江地区位于川西北高原,属于典型的山区,地质灾害频发,泥石流夹带大量的泥砂石进入河流和库区,对流域水环境带来巨大的不利影响。表 6 列举了不同水电开发程度的地质灾害点的数量。大渡河支流的高影响区和雅砻江支流的低影响区虽然没有水电工程,但是该区域上下游的水电工程较多,并且属于地质灾害严重和水土流失严重的区域。因此,在该区域上下游的水电工程建设过程中,更需要关注水电工程对陆地和河流生态系统的累积影响。大渡河干流的高程度开发区,地质灾害较为严重,同时也是规划中水电开发重点区域,在水电工程运行和建设中需要注意生态环境的影响,还需多考虑地质灾害的影响。

5 结 论

a. 两江流域水电站数量、装机容量、水电开发密度、水电开发强度 4 个指标具有明显的空间分异性。大渡河的 4 个指标值都大于雅砻江,且集中在大渡河流域的中下游。

b. 两江流域水电站数量和开发密度全局莫兰指数的 Z 值大于 1.96,呈现显著的正向空间聚集性( $p<0.05$ )。其中,高值聚集区、高低值区、低高值区主要位于两江流域的中下游,低值聚集区位于流域的上游。

c. 两江流域的装机容量和水电开发强度与流域 2005—2020 年期间土地利用类型中的水库面积增长比例呈显著正相关关系,说明装机容量和水电开发强度指标能表征大型水电站的建设对陆地生态系统的影响。

d. 利用水电站装机容量、水电站数量、水电开发密度、水电开发强度 4 个指标,结合流域上下游间的空间关系,构建流域水电开发程度综合评估体系,将区域划分为开发区(极高、高、中、低)和影响区(高、低)。通过 Kruskal-Wallis H 检验,对比不同开发程度的子流域各项水电开发指标的差异性,发现 4 个水电开发指标呈现显著的差异性( $p<0.05$ ),说明基于 4 个指标的水电开发程度综合评估体系在两江流域中应用是合理的。

e. 结合划分结果,发现两江流域未来的水电开发重点区域将集中在雅砻江干流的极高程度开发区、高程度开发区、低程度影响区,大渡河支流的高程度开发区、低程度开发区和中程度开发区,大渡河干流的高程度开发区和中程度开发区。其中大渡河支流中程度开发区和高程度开发区,在开发建设过程中需注意水土保持措施的实施。

f. 以大渡河干流流域为例,流域水质综合为优,且有稳定的国家省级保护鱼类和长江上游特有鱼类,但在龚嘴等极高程度开发区,存在粪大肠菌群和五日生化需氧量水质指标相对Ⅱ类水质标准超标的情况,以及长江特有鱼类突然减少的现象。因此,在大渡河干流极高程度开发区水电运行过程中,需注意对水生态环境和鱼类资源的监测保护。

参考文献:

[ 1 ] 徐志,马静,贾金生,等. 水能资源开发利用程度国际比较[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):63-67. (XU Zhi,MA Jing,JIA Jinsheng,et al. International comparison of hydropower resources development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (1):63-67. (in Chinese))

[ 2 ] 宋鑫,贝耀平,袁丙青,等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):204-211. (SONG Xin, BEI Yaoping, YUAN Bingqing, et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 204-211. (in Chinese))

[ 3 ] 陈求稳,张建云,莫康乐,等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展,2020,31(5):793-810. (CHEN Qiuwen,ZHANG Jianyun,MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-

environment and adaptive managements[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):793-810. (in Chinese))

[ 4 ] 李明,傅斌,王玉宽,等. 岷江上游水电开发特点及其空间格局分析[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(1):74-80. (LI Ming, FU Bin, WANG Yukuan, et al. Characteristics and spatial patterns of hydropower development in the upper Minjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015, 24(1):74-80. (in Chinese))

[ 5 ] 钱玉杰. 我国水电的地理分布及开发利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.

[ 6 ] PALOMINO CUYA D G,BRANDIMARTE L,POPESCU I, et al. A GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata Basin under global changes[J]. Renewable Energy,2013,50:103-114.

[ 7 ] 杨子儒,李诚康,周兴波. 2021 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):39-44. (YANG Ziru,LI Chengkang,ZHOU Xingbo. Global hydropower development status and potential analysis in 2021[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):39-44. (in Chinese))

[ 8 ] 周兴波,杜效鹄. 2018 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23. (ZHOU Xingbo, DU Xiaohu. Development status and potential analysis of global hydropower in 2018 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):18-23. (in Chinese))

[ 9 ] QIAO Haijuan, HUANG Zhou, CHEN Weiyi, et al. Development of small hydropower in China 1990-2015: province-domain patterns of temporal-spatial evolution [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy,2019, 11(5):055903.

[ 10 ] 乔海娟,黄洲,张丛林,等. 中国省域农村水电发展水平评价及空间格局演变研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(8):204-210. (QIAO Haijuan, HUANG Zhou, ZHANG Conglin,et al. Research on the development level evaluation and spatial pattern evolution of rural hydropower of Chinese provinces[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(8):204-210. (in Chinese))

[ 11 ] 吉小盼,谭平,刘园,等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5):8-14. (in Chinese))

[ 12 ] WU Yuyang,FANG Hongwei,HUANG Lei,et al. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River[J]. Journal of Hydrology,2020, 582:124500.

[ 13 ] WU Yuyang, HUANG Lei, ZHAO Chenwei, et al. Integrating hydrological, landscape ecological, and

- economic assessment during hydropower exploitation in the upper Yangtze River [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145496.
- [14] ZHANG Qian, CHEN Chenglong, WANG Jinzhu, et al. The spatial granularity effect, changing landscape patterns, and suitable landscape metrics in the Three Gorges Reservoir Area, 1995-2015 [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106259.
- [15] DORBER M, ARVESEN A, GERNAAT D, et al. Controlling biodiversity impacts of future global hydropower reservoirs by strategic site selection [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21777.
- [16] 龚围, 李丽, 柳钦火, 等. “一带一路”区域水电站工程生态环境影响遥感监测[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(7): 1424-1436. (GONG Wei, LI Li, LIU Qinhua, et al. Monitoring and analyzing ecosystem impact on hydropower projects by remote sensing in the Belt and Road region [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(7): 1424-1436. (in Chinese))
- [17] OUYANG Wei, WAN Xinyue, XU Yi, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134782.
- [18] MAO Xufeng, WEI Xiaoyan, ENGEL B, et al. Biological response to 5 years of operations of cascade rubber dams in a plateau urban river, China [J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(8): 1201-1211.
- [19] 杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 三峡水库 175m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5064-5075. (YANG Zhi, TANG Huiyuan, ZHU Di, et al. Spatiotemporal patterns of fish community structures in the Three Gorges Reservoir and its upstream during the 175-m-deep impoundment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5064-5075. (in Chinese))
- [20] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: a case study in the mainstream of the Wujiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176. (in Chinese))
- [21] 廖文婷, 邓红兵, 李若男, 等. 长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素: 基于子流域尺度分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 412-420. (LIAO Wenting, DENG Hongbing, LI Ruonan, et al. Spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting them in the Yangtze River Basin: sub-watershed scale analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 412-420.)
- [22] 纪道斌, 龙良红, 徐慧, 等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 7-14. (JI Daobin, LONG Lianghong, XU Hui, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 7-14. (in Chinese))
- [23] 李哲, 陈永柏, 李翀, 等. 河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 675-686. (LI Zhe, CHEN Yongbai, LI Chong, et al. Advances of eco-environmental effects and adaptive management in river cascading development [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 675-686. (in Chinese))
- [24] PAL S, SARDA R. Damming effects on the degree of hydrological alteration and stability of wetland in lower Atreyee River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106542.
- [25] TRANMER A W, WEIGEL D, MARTI C L, et al. Coupled reservoir-river systems: lessons from an integrated aquatic ecosystem assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110107.
- [26] 魏念, 张燕, 吴凡, 等. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8): 1858-1869. (WEI Nian, ZHANG Yan, WU Fan, et al. Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1858-1869. (in Chinese))
- [27] 四川省人民政府. 《四川省人民政府关于印发四川省“十三五”能源发展规划的通知》解读二 [EB/OL]. (2017-03-07). <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/13298/13301/2017/3/7/10416483.shtml>.
- [28] 邹执寰. 四川省重点流域水电开发的区域经济发展综合影响分析 [D]. 成都: 四川省社会科学院, 2015.
- [29] 李婷, 唐磊, 王丽, 等. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响: 以溪洛渡至向家坝河段为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1473-1485. (LI Ting, TANG Lei, WANG Li, et al. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1473-1485. (in Chinese))
- [30] 李卫明, 艾志强, 刘德富, 等. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 957-964. (LI Weiming, AI Zhiqiang, LIU Defu, et al. Research on river eco-health based on hydropower cascade development [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(6): 957-964. (in Chinese))
- [31] 高建, 姚福明, 雷晓辉, 等. 水电梯级开发背景下大渡河干流水质评价及水质分布特征研究[J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(10): 133-145. (GAO Jian, YAO Fuming, LEI Xiaohui, et al. Study on water quality evaluation and water quality distribution characteristics of

main stream of Daduhe River under background of cascade hydropower development [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 ( 10 ): 133-145. ( in Chinese )

[32] 刘猛,张逸譔,刘园,等. 雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[ J ]. 淡水渔业,2022,52(2): 22-33. ( LIU Meng, ZHANG Yixuan, LIU Yuan, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River[ J ]. Freshwater Fisheries,2022,52(2):22-33. ( in Chinese ) )

[33] 邓嘉俊,王小东,同琳钿,等. 雅砻江中游支流力丘河鱼类资源现状[ J ]. 四川动物,2022,41(4):444-453. ( DENG Jiajun, WANG Xiaodong, TONG Lintian, et al. Fish diversity and spatial pattern in the Liqiu River, a tributary of the middle Yalong River[ J ]. Sichuan Journal of Zoology,2022,41(4):444-453. ( in Chinese ) )

[34] 陈帮富,王东胜,张迪,等. 流域水电开发水生生态及鱼类保护实践:以大渡河流域为例[ J ]. 水利水电技术(中英文),2022,53(增刊1):347-357. ( CHEN Bangfu, WANG Dongsheng, ZHANG Di, et al. Conservation of aquatic ecosystems and fish species during hydropower development in the river basin: case study for the Dadu River Basin [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(Sup1):347-357. ( in Chinese ) )

[35] 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 ) )

[36] MULLIGAN M, VAN SOESBERGEN A, SÁENZ L. GOODD, a global dataset of more than 38, 000 georeferenced dams[ J ]. Scientific Data,2020,7(1):31.

[37] 何斌,颜涛,黄颖颖,等. 大渡河上游鱼类资源现状[ J ]. 淡水渔业,2021,51(1):38-45. ( HE Bin, YAN Tao, HUANG Yingying, et al. Analysis of fish resources status in the upper reaches of the Dadu River[ J ]. Freshwater Fisheries,2021,51(1):38-45. ( in Chinese ) )

[38] 水博. 应该如何表述我国的水电开发程度? [ J ]. 中国三峡,2009(3):5-10. ( SHUI Bo. How should we express the degree of hydropower development in our country? [ J ]. China Three Gorges,2009(3):5-10. ( in Chinese ) )

[39] 纪国强,张先平,黄建和. 水能资源健康可开发利用率初探[ J ]. 人民长江,2007,38(11):113-114. ( JI Guoqiang, ZHANG Xianping, HUANG Jianhe. Preliminary study on healthy developable ratio of water energy [ J ]. Yangtze River,2007,38(11):113-114. ( in Chinese ) )

[40] 仇欣,肖晋宇,吴佳玮,等. 全球水能资源评估模型与方法研究[ J ]. 水力发电,2021,47(5):106-111. ( QIU Xin, XIAO Jinyu, WU Jiawei, et al. Research on evaluation model and methodology of global hydropower resources [ J ]. Water Power,2021,47(5):106-111. ( in Chinese ) )

[41] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [ J ]. Geographical Analysis,1995,27(2):93-115.

[42] YUN Xiaobo, TANG Qiuhong, WANG Jie, et al. Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin [ J ]. Journal of Hydrology,2020,590:125472.

( 收稿日期:2022-03-20 编辑:俞云利 )

+++++

( 上接第 49 页 )

[27] 朱洪涛,高学平,刘殷竹. 进/出水口出流扩散脉动流速规律试验研究[ J ]. 水力发电学报,2022,41(7):129-139. ( ZHU Hongtao, GAO Xueping, LIU Yinzhu. Experimental study of velocity fluctuations in inlet/outlet under outflow diffusion [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(7):129-139. ( in Chinese ) )

[28] 叶长亮,王福军,李怀成,等. 双进口两级双吸离心泵过渡流道压力脉动特性研究[ J ]. 农业机械学报,2017,48(2):126-134. ( YE Changliang, WANG Fujun, LI Huaicheng, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation and vibration characteristics of a double suction centrifugal pumping system [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):126-134. ( in Chinese ) )

[29] 陈会向. 贯流式水轮机甩负荷过渡过程水力特性数值模拟与试验研究[ D ]. 南京:河海大学,2019.

[30] SALEHI S, NILSSON H, LILLBERG E, et al. An in-depth numerical analysis of transient flow field in a Francis turbine during shutdown [ J ]. Renewable Energy, 2021, 179: 2322-2347.

[31] 李航,沈振中,马保泰,等. 某泵站厂房振源识别与振动成因[ J ]. 南水北调与水利科技,2020,18(5):151-156. ( LI Hang, SHEN Zhenzhong, MA Baotai, et al. Identification of vibration source and causes of vibration in a pumping station building [ J ]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(5):151-156. ( in Chinese ) )

[32] 徐用良,覃大清,赵越,等. 混流式水轮机尾水管压力脉动换算初探[ J ]. 水力发电学报,2016,35(1):87-94. ( XU Yongliang, QIN Daqing, ZHAO Yue, et al. Exploratory analysis on pressure fluctuation conversion in Francis turbine draft tubes [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(1):87-94. ( in Chinese ) )

[33] 唐拥军. 混流式水轮机原模型压力脉动相似分析[ J ]. 大电机技术,2015(4):47-51. ( TANG Yongjun. Similarity analysis of water pressure pulsation of francis turbine between prototype and model [ J ]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2015(4):47-51. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2022-01-25 编辑:刘晓艳 )