

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.015

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.015

张家铮,朱大明,王德智,等.金沙江中游水电站对植被时空变化的影响[J].水土保持学报,2025,39(1):326-337.

ZHANG Jiazheng, ZHU Daming, WANG Dezhi, et al. Effects of hydropower station on the temporal and spatial changes of vegetation in the middle reaches of the Jinsha River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 326-337.

金沙江中游水电站对植被时空变化的影响

张家铮^{1,2}, 朱大明¹, 王德智^{2,3}, 戴祚敏^{1,2}

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2.中国科学院武汉植物园, 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室,

武汉 430074; 3.中国科学院丹江口湿地生态系统野外科学观测研究站, 武汉 430074)

摘要:[目的] 探究水电站群对植被时空变化的影响, 阐明植被变化对水电站建设和气候因子的响应关系, 为区域可持续发展和水电站可持续运营提供可靠的科学依据。[方法] 利用归一化植被指数(NDVI)来反映植被变化, 以谷歌地球引擎(GEE)为运算平台, 耦合 ModTrendr 算法、Theil Sen-MK、贡献度分析、偏相关分析方法探究 2000—2022 年金沙江中游水电站对植被时空变化的影响, 并分析气候在其中的效应。[结果] 1) 负向突变集中于 2011—2014 年, 突变区域集中于集水区。正向突变集中于 2015 年和 2017 年, 突变区域集中于河岸 5 km 缓冲区范围内。植被产生积极响应的时间为蓄水后 1~4 a, 突变强度沿河岸向外逐渐减弱; 2) 各水电站周边植被 NDVI 整体呈上升趋势(0.000 2~0.002 8/a), 在建设前、建设中、运营后呈升(平缓)-降-升趋势; 3) 区域植被变化主要受到人类活动(水电站建设)与气候变化的共同作用, 可解释度达 69.12%, 人类活动的贡献度远高于气候变化的贡献度。4) 温度、降水与 NDVI 偏相关系数分别为 -0.28 和 -0.29, 温度、降水在水电站不同阶段偏相关系数差别较大, 表明水电站影响区域气候。[结论] 水电站在修建期间对植被造成消极影响, 运营后对植被产生积极影响, 水电站建设对植被的影响高于气候变化的影响, 且水电站的修建可能影响局部气候, 温度和降水与植被 NDVI 整体相关性降低。

关键词: 金沙江中游; 水电站; GEE; 时空格局分布; ModTrendr; 贡献度; 气候响应

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0326-12

Effects of Hydropower Station on the Temporal and Spatial Changes of Vegetation in the Middle Reaches of the Jinsha River

ZHANG Jiazheng^{1,2}, ZHU Daming¹, WANG Dezhi^{2,3}, DAI Zuomin^{1,2}

(1.College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China; 2.Key Laboratory of Aquatic Plants and Watershed Ecology, Wuhan

Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3.Danjiangkou Wetland

Ecosystem Field Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of hydropower stations on the temporal and spatial changes of vegetation, clarify the response relationship of vegetation changes to hydropower station construction and climate factors, and provide a reliable scientific basis for regional sustainable development and sustainable operation of hydropower stations. [Methods] Normalized vegetation index (NDVI) was used to reflect the vegetation change. Google Earth Engine (GEE) was used as the computing platform, coupled with ModTrendr algorithm, Theil Sen-MK, contribution degree analysis and partial correlation analysis methods to explore the effects of hydropower stations in the middle reaches of the Jinsha River on the spatial and temporal changes of vegetation during 2000—2022, and the effects of climate it were analyzed. [Results] 1) The negative mutations were concentrated from 2011 to 2014, and the mutation area was concentrated in the

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2024-08-14

录用日期: 2024-09-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-25

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(32030069); 国家自然科学基金青年基金项目(32101525)

第一作者: 张家铮(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态遥感研究。E-mail: 2263591693@qq.com

通信作者: 王德智(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生态遥感研究。E-mail: wangdezhi@wbgcas.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

catchment area. The forward mutation was concentrated in 2015 and 2017, and the mutation area was concentrated within the 5 km buffer zone of the riverbank. The time for vegetation to produce positive response was 1—4 years after the water was impounded, and the mutation intensity gradually weakened along the riverbank. 2) The vegetation NDVI around each hydropower station presented an overall upward trend ($0.000\ 2-0.002\ 8/a$), and an upward (gentle)-downward-upward trend before, during and after hydropower station construction. 3) Regional vegetation change was mainly caused by the joint action of human activities (hydropower station construction) and climate change, and the explanation degree was 69.12%. The contribution of human activities was much higher than that of climate change. 4) The partial correlation coefficients of temperature, precipitation and NDVI were -0.28 and -0.29 , respectively. The partial correlation coefficients of temperature and precipitation differed greatly in different stages of hydropower stations, indicating that hydropower stations would affect regional climate. [Conclusion] Hydropower stations have a negative impact on vegetation during construction and a positive impact on vegetation after operation. The impact of hydropower station construction on vegetation is higher than that of climate change, and the construction of hydropower stations may affect local climate, leading to a decrease in the overall correlation between temperature and precipitation and vegetation NDVI.

Keywords: the middle reaches of the Jinsha River; hydropower station; GEE; spatial and temporal pattern distribution; ModTrendr; contribution degree; climate response

Received: 2024-07-17

Revised: 2024-08-14

Accepted: 2024-09-30

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

水电站的建设对于促进经济发展、能源的可持续性发展具有重要意义。为实现能源的可持续发展和缓解全球气候变化,世界各国开展许多大型水电开发项目^[1]。目前,水电已经占全球电力总量的 17%,是世界上最大的可再生能源^[2]。水电站在兴建和运营也带来一系列生态环境问题,其中,最显著的就有对周边植被产生一定的影响^[3]。植被覆盖变化被认为是衡量陆地生态系统状态最重要的指标之一,NDVI 是有效反映植被的生长状况和空间分布的关键指标,被广泛应用于评价水电开发对河岸植被的影响^[4]。近年来,随着水电开发进程的加快,其引起的植被覆盖变化及其对陆地生态系统影响的问题受到广泛关注^[5]。为实现流域环境可持续性与水电开发的协同,深入研究水电站对周边及流域植被的影响显得尤为重要,要发展可持续的水利工程项目,有必要对植被动态变化进行监测、检测和评估。

已有研究^[6]主要集中于分析流域植被覆盖的变化,未能分析水电站建设对植被带来的影响,对水电站的关联探讨不足。且多数研究仅关注单个水电站,如于江等^[7]对洛溪渡水库周边植被的时空演变进行探讨,但是,对水电站群的联合影响并未得到关注。利用时序遥感数据和方法量化中国西部地区水电站密集流域的干扰特征(如干扰斑块大小和严重程度)的研究仍然缺乏,水电站对植被影响的时空格局也存在很大的不确定性。针对水库库区的植被覆盖研究

多聚焦于区域整体植被覆盖度或植被面积的变化规律^[8]。在分析水电开发对陆地植被的影响时,以往研究^[9]集中于检测和评估气候因子和人类活动对自然系统的影响,但对植被动态的贡献没有得到准确的区分和量化。气候对植被动态变化同样具有较大的影响,但未能得到更好的说明。因此,研究植被动态对气候因子的响应对于理解陆地生态系统,特别是对金沙江中游独特的地理区域具有重要意义。

近 20 a,基于长时序的森林损失变化检测算法得到迅速发展,如 LandTrendr 算法^[10]、BFAST 算法^[11]、CCDC 算法^[12]等。其中,LandTrendr 算法能够同步检测变化趋势和扰动事件,可以更全面地检出突变时间与突变程度。本文选用该算法结合时序遥感分析水电站在不同阶段对植被产生的影响。由于研究区地处中国西部,地形起伏较大,在 LandTrendr 算法中,Landsat 数据集在不同时期影像很难无缝地合成,导致变化检测结果存在大量条带现象,因此,本文在原有基础上,改用 MODIS 数据集利用 ModTrendr 算法进行分析检测。由于 ModTrendr 方法只能监测 NDVI 的突变,不能反映 NDVI 的梯度变化,本文引入 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 来检测区域 NDVI 的梯度变化。同时,利用贡献度分析法与偏相关方法区分主要气候变化与人类活动的影响。已有研究^[13-14]表明,水库对植被的影响集中于库区 5 km 缓冲区内,对已建成 6 大水电站局部的分析探讨沿用

该结论。

金沙江中游(龙盘水电站至银江水电站段)地处中国西部,是水电开发重点区域,也是中国长江流域重要的生态屏障,在推动区域能源可持续发展、促进生态文明建设方面发挥着关键作用。随着工业化的快速发展,水电开发对地表植被及环境的影响日益凸显。目前,针对金沙江研究的主要集中于地质灾害的检测^[15]及动植物种群的研究^[16],水电开发对周边植被影响的研究较少。金沙江水电开发的影响范围及程度讨论不足,缺少水电开发影响的量化分析。此外,基于长时间序列的金沙江水电站建设前后的植被动态变化规律与气候的响应关系还有待探讨。鉴于此,本文以金沙江中游为研究对象,探讨 2000—2022 年流域水电站群对植被时空格局变化的影响,同时,量化水电站建设与主要气候变化对植被的贡献度,分析水电站不同建设阶段植被与气候的响应关系,建立水电开发对植被影响的研究体系,为区域植被可持续发展和水电站可持续运营提供可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于金沙江中游龙盘水电站至银江水电站段(25°13′58″~27°52′10″N,99°50′01″~101°55′05″E)(图 1)。西至云南省丽江市玉龙纳西族自治县,北至云南省丽江市北边界,东至四川省攀枝花市,南至云南省大理白族自治州最南端,研究区面积 28 235 km²,干流长 66.03 km。地貌类型复杂,属低纬度高海拔地区,地形起伏较大,区域内落差近 4 500 m。全年季节性气候差异明显,气候类型丰富多样,年温差小、日温差大、干湿季节分明、气温随地势高低垂直变化异常明显。该流域水电站密布,包括在建规划共 10 个水电站(已建成运营 6 个,建设中 2 个,规划中 2 个),已建成水电站的详细信息见表 1。

1.2 数据源与数据预处理

本文研究采用 MODIS 的 MOD13Q1 数据的 NDVI 产品,空间分辨率 250 m,时间跨度为 2000—2022 年。高程数据采用空间分辨率为 30 m 的 SRTM(shuttle radar topography mission)数据(<http://srtm.csi.cgiar.org>)。

气温数据采用 MODIS 的 MOD11A1 产品,降水数据采用美国地质调查局(united states geological survey, USGS)的 CHIRPS 产品,空间分辨率 1 km。气候数据皆经过重采样处理,统一空间分辨率为 1 km。土地利用数据选用 YANG 等^[17]的土地覆盖数据集(China land cover dataset, CLDC),空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

2000—2022 年,研究区包括在建规划共 10 个水

电站(已建成运营 6 个,建设中 2 个,规划中 2 个),因本文旨在对水电站建设前-建设中-建设后 3 个时间段的影响进行对比分析,建设中的水电站不能进行该工作,且本文分析尺度集中于流域周边,如果没有蓄水,对流域周边植被影响很小。因此,选用已建成的 6 个水电站进行探讨。

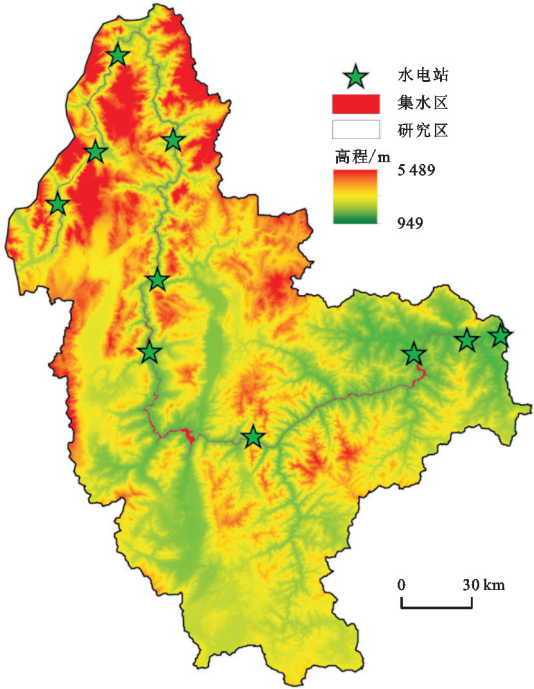


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location map of the study area

表 1 水电站信息

Table 1 Information of hydropower stations

水电站	建设时间/年	正常蓄水位/m	总库容/亿 m ³
观音岩	2007—2015	1 134	20.72
鲁地拉	2007—2014	1 223	17.18
龙开口	2007—2014	1 298	5.07
金安桥	2005—2011	1 418	9.13
阿海	2008—2013	1 504	8.82
梨园	2008—2018	1 618	8.05

1.3.1 时间序列分割算法(ModTrendr) ModTrendr 算法通过评估像元光谱时间序列来监测植被突变是否发生,核心为时序分割,即获取单个像元 NDVI 值在整个研究时间段内的变化特征,与 LandTrendr 算法相似。主要包括时序轨迹提取及噪声消除、时序轨迹分割、时序轨迹拟合、模型简化与光谱滤波 5 个阶段。ModTrendr 算法已被广泛用来检测植被的扰动^[18]。本文利用其来监测水电站流域周边的植被突变情况。

本研究基于 GEE 平台实现 ModTrendr 算法对 NDVI 时间序列的分割与拟合^[19],再以类似区域研

究^[20]参数为依据,结合金沙江中游实际情况,经过多次调整,选用适合区域研究的参数(表 2)。同时,检测结果存在着较多零散的干扰区域,为保证试验精

度,对变化检测结果进行过滤,筛选 NDVI 变化强度高于 0.2 的栅格点,便于对水电站影响进行分析。图 2 为 ModTrendr 算法示意图。

表 2 ModTrendr 算法参数设置

Table 2 ModTrendr algorithm parameter settings

类型	参数	值	类型	参数	值	类型	参数	值
分割	光谱指数	NDVI	分割	恢复阈值	0.25	过滤	过滤年份	2000—2022
	最大分割段数	6.0		最大拟合 p 值	0.05		变化强度	>0.2
	顶点阈值	0.9		最优模型比例	0.75		持续时间	<22.0
	潜在顶点数量	3.0		最小观测数量	6.00		变化前光谱值	>0.4
	是否阻止年度恢复	True						

1.3.2 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 检验 利用 Theil-Sen Median 趋势分析方法逐像元分析 2000—2022 年金沙江中游植被变化趋势,并通过 Mann-Kendall 检验对变化趋势进行显著性检验。该方法在生态领域被广泛使用^[21]。

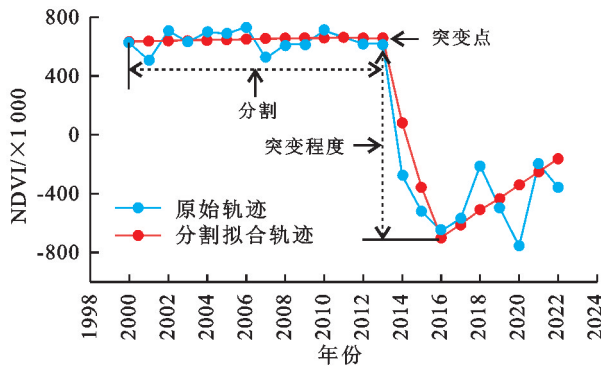


图 2 ModTrendr 算法示意

Fig.2 Schematic diagram of the ModTrendr algorithm

Theil-Sen Median 趋势度(ρ)计算公式为:

$$\rho = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad 1 \leq i < j \leq n \quad (1)$$

式中: ρ 为所有数据对斜率的中值,当 $\rho > 0$ 时植被变化呈上升趋势,当 $\rho < 0$ 时,植被变化呈下降趋势;Median 表示取中值; x_i 和 x_j 分别为 NDVI 时间序列中第 i 或 j 年的数据。Mann-Kendall 检验公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{Q-1}{\sqrt{\text{Var}(Q)}} & Q > 0 \\ 0 & Q = 0 \\ \frac{Q+1}{\sqrt{\text{Var}(Q)}} & Q < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:sign 为符号函数; Q 为统计检验量; n 为研究总年数; $\text{Var}(Q)$ 为方差; x_i 、 x_j 为时间序列数据,在给定的 α 显著性水平下,若 $Z < Z_{\alpha/2}$,则表示通过相应置

信度的显著性检验。

1.3.3 贡献度分析 本文采用一元线性回归计算区域植被 NDVI 的年际变化趋势,斜率计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i} \quad (5)$$

式中:slope 为一元线性回归方程的斜率; i 为时间,取值为 1 到 n ;NDVI _{i} 为第 i 年的平均 NDVI。当斜率大于 0 时,说明植被 NDVI 增加,反之则减少。斜率绝对值越大,则说明植被 NDVI 变化越快。

大量研究^[22]表明,水电站周边植被 NDVI 主要受到人类活动与主要气候因素(温度、降水)的影响,本文建立多元回归模型。利用模型计算出 NDVI 的预测值,即气候因子的贡献部分。一般情况下,真实值与预测值间的差值可看作是人类活动的贡献部分,相关研究^[23-24]表明,该区域适用线性回归分析,计算公式为:

$$\text{NDVI}_{\text{CC}} = a \times T + b \times P + c \quad (6)$$

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI}_{\text{OBS}} + \text{NDVI}_{\text{CC}} \quad (7)$$

式中:NDVI_{CC} 为基于回归模型的 NDVI 预测值;NDVI_{OBS} 为基于遥感影像的 NDVI 真实值; a 、 b 和 c 为模型参数; T 和 P 为平均气温和累计降水量;NDVI_{HA} 为残差。

公式(5)计算可得到金沙江中游 2000—2022 年的 NDVI_{CC} 和 NDVI_{HA} 的线性趋势率,分别代表在气候变化和人类活动影响下的 NDVI 变化趋势。趋势率为正表示气候变化或人类活动可促进植被 NDVI 的增加;反之,导致植被 NDVI 下降。本文对研究区 NDVI 变化的主要驱动因素划分及贡献度计算见表 3(HA 为人类活动,CC 为气候变化, S 为斜率)。人类活动对植被 NDVI 变化的贡献度用 $S_{\text{HA}}/S_{\text{OBS}}$ 表示,气候变化对植被 NDVI 变化的贡献度用 $S_{\text{CC}}/S_{\text{OBS}}$ 表示。

1.3.4 偏相关分析 偏相关分析可剔除其余因子的影响,单独分析单一因子与 NDVI 的相关程度。常用于分析植被和气候因子间的关联^[25]。在本文中通过偏相关分析方法来分析温度及降水对金沙江中游植被变化的影响,及其与水电站影响的响应关系,计

算公式为：

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (8)$$

式中： x 、 y 、 z 分别为 NDVI、气温和降水； $r_{xy,z}$ 为去除 z 后 x 与 y 的偏相关系数； r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为 NDVI 与气温、NDVI 与降水、气温与降水时间的相关系数； $r_{xy,z}$ 取值 $-1\sim 1$ ，越接近 1，表明正相关越强，反之表明负相关越强。

表 3 驱动因素判定及贡献度计算方法

Table 3 Determination of the driving factors and calculation method of the contribution degree

NDVI 趋势	驱动 因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率/%	
		S_{CC}	S_{HA}	气候变化	人类活动
>0	CC、HA	>0	>0	S_{CC}/S_{OBS}	S_{HA}/S_{OBS}
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC、HA	<0	<0	S_{CC}/S_{OBS}	S_{HA}/S_{OBS}
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

采用 T 检验法对偏相关系数进行显著性检验^[26]，计算公式为：

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1-r_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (9)$$

式中： n 为样本数量； m 为自变量数目。

2 结果与分析

2.1 植被扰动变化监测

本研究对 ModTrendr 算法提取结果进行综合精度评估，以栅格像元为单位，选取检测结果中扰动与非扰动点各 200 个，利用 400 个验证样点生成混淆矩阵。通过对比遥感影像，计算得到总体精度、Kappa 系数、生产者精度与用户精度。总体精度为 89.50%，Kappa 系数为 0.79。生产者精度与用户精度均高于 80%（表 4）。对于各个年份的评估，除个别年份精度稍低外，其他年份均高于 80%。

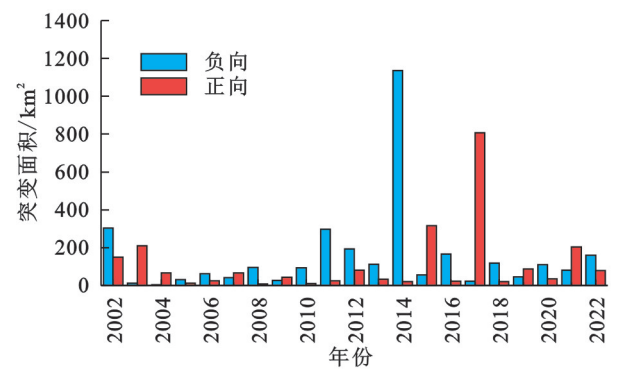
表 4 ModTrendr 算法精度评定

Table 4 Accuracy evaluation of the ModTrendr algorithm

类别	变化像元	稳定像元	像元总数	用户精度/%
变化像元	165	35	200	82.50
稳定像元	7	193	200	97.50
像元总数	172	228	400	
生产者精度/%	95.93	84.65		
总体精度/%		89.50	Kappa 系数	0.79

为探究 NDVI 突变点与水电站建设的相关性，根据 ModTrendr 算法，对金沙江中游流域 2000—2022 年植被扰动时间及程度进行提取。负向突变面积 2 409.56 km²，正向突变面积 2 460.13 km²。突变

时间分布格局见图 3、图 4。研究区负向突变集中于各水电站建设期间（2011—2014 年），多个水电站在 2014 年蓄水，包括观音岩、鲁地拉等集水面积较大的水电站，因此，在 2014 年突变面积出现明显的高峰，突变原因为水电站蓄水直接导致上游植被被淹没。正向突变高度集中于 2015 年和 2017 年，该现象表明，水电站的截流蓄水对水电站流域周边的植被带来积极影响，植被正向响应时间为水电站蓄水后 1~4 a。经分析，既定方法监测的重大突变时间与统计年鉴中记录的时间一致，该环节不仅是对水电站引起的突变进行分析，同样是对检测结果的反向验证。



注：ModTrendr 算法首年数据对分析存在干扰，因此剔除。

图 3 2002—2022 年扰动面积变化趋势

Fig.3 Variation trend of the disturbed area from 2002 to 2022

植被 NDVI 突变程度分布格局见图 4。负向突变区域集中于集水区及垂直河岸 0~10 km，突变程度为 0.2~1.0，其中，负向突变值高于 0.5 的区域集中于水电站上游集水区。水电站截流蓄水，直接致使上游两岸植被被淹没，从而导致 NDVI 负向突变值较高。正向突变区域集中于垂直河岸 0~8 km，正向突变程度为 0.2~0.6，突变程度相对较低。水电站截流虽提供给周边植被大量生长所需的水源，但植被生长是较为漫长的过程，在短期内对植被不造成高强度正向突变，因此，正向突变强度比负向突变的强度低。正向突变与负向突变强度沿河岸向外逐渐减弱，呈外溢效应（影响呈向外扩散的趋势）。且由图 5 可知，干扰强度较高区域即干扰情况密集处。

2.2 植被时间变化特征

各水电站在建设前、建设中、运营后 NDVI 变化趋势见图 6。2000—2022 年各水电站区域植被 NDVI 整体呈上升趋势（0.000 2~0.002 8/a）。水电站建设前 NDVI 增长缓慢，在建设中 NDVI 呈明显下降趋势（-0.008 3~-0.002 7/a），运营后 NDVI 呈增长趋势，且增长速率（0.001 3~0.008 6/a）远高于建设前（-0.001 0~0.002 8/a），该现象说明，水电站的建设造成植被破坏，而水电站的运营有利于植被的增长，水电站运营蓄水给周边植被提供大量生长所需的水源。

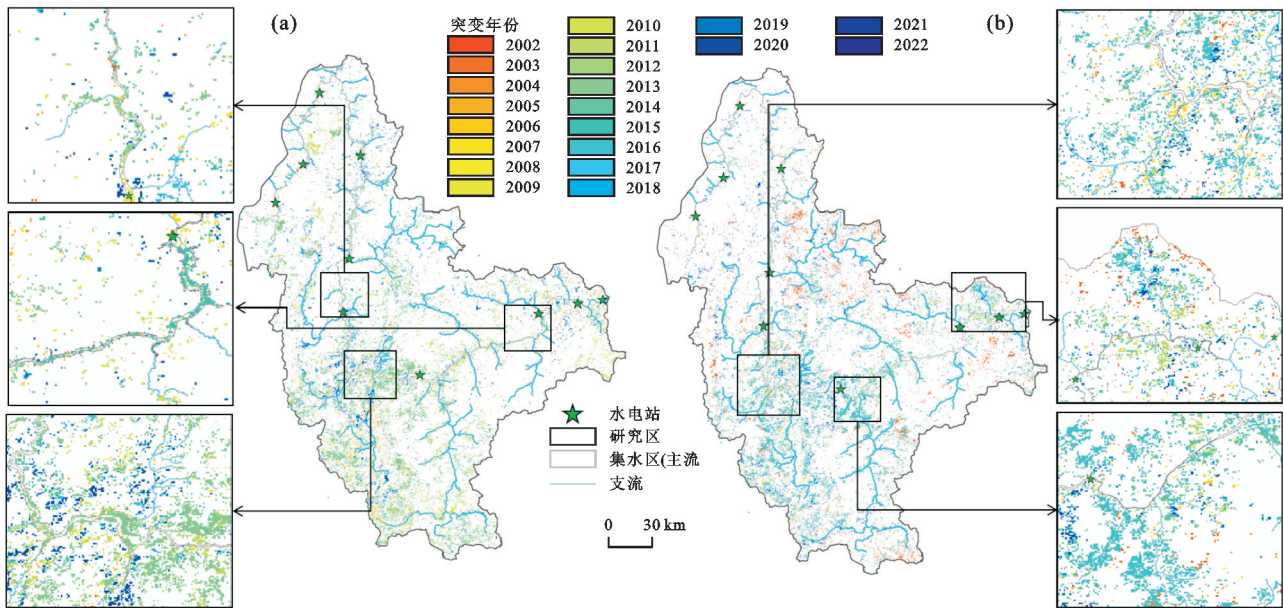


图 4 2002—2022 年植被突变年份分布格局

Fig.4 Year distribution pattern of vegetation mutation from 2002 to 2022

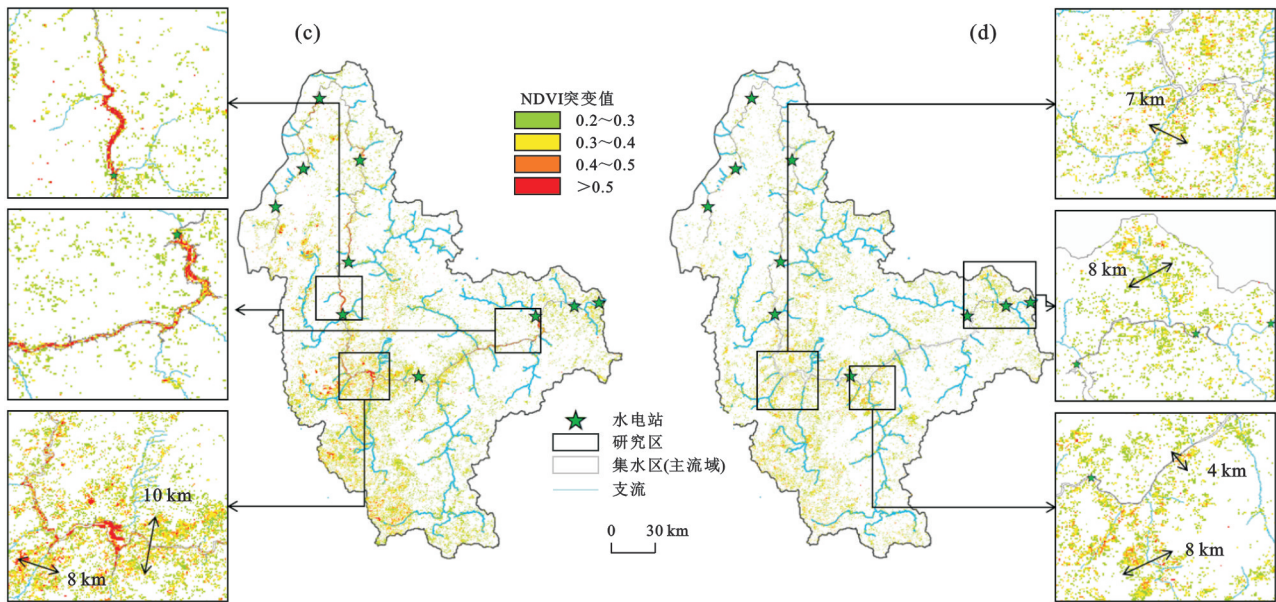


图 5 2002—2022 年植被突变程度分布格局

Fig.5 Distribution pattern of vegetation mutation degree from 2002 to 2022

经查统计年鉴,该区域在水电站建设前并无大型的人类活动。因此,水电站建设前,可认为气候是植被生长的主导因素,该阶段植被生长缓慢且自然。水电站运营后,可认为植被生长受到水电站与气候的共同作用。而 6 大水电站运营后植被 NDVI 增长率均远高于建设前。可推断,水电站运营高于气候对周边植被带来的影响。

2.3 植被空间变化特征

将水电站建设前、建设中、运营后 NDVI 空间格局分布进行对比分析(图 7),各水电站 NDVI 变化分布格局一致,以观音岩水电站为例,NDVI 下降区域集中于上游集水区,NDVI 上升的区域集中于河岸 5 km 缓冲区。

研究区 2000—2022 年 NDVI 趋势变化结果见图 8。

显著退化占总面积 2.85%,轻微退化占 17.16%,保持稳定占 0.01%,轻微改善占 44.60%,显著改善占 25.37%。显著退化的区域主要集中于水电站上游集水区,结合历史遥感影像分析,退化原因是水电站截流蓄水直接导致上游植被被淹,从而造成植被退化。显著改善区域集中于上游集水区两岸及下游区域。

2.4 植被 NDVI 的驱动力及贡献度

为进一步量化人类活动与主要气候因素对植被 NDVI 的影响,本文分析金沙江中游植被驱动因素(图 9)。经查统计年鉴,该区域在 2000—2022 年,除水电站建设外并无大型的人类活动,因此,该区域的人类活动主要为水电站的开发。研究区有 84.86%的区域 NDVI 呈增长趋势,其中,人类活动与气候因素共同作用区域占比为

60.64%,广泛分布于集水区外的区域。NDVI 呈减少趋势的区域占比为 15.14%,人类活动与气候因素共同作用区域占比 8.47%,集中分布于水电站上游集水区 5 km 缓冲

区内,原因是水电站上游的蓄水致使大量植被被淹,直接导致植被 NDVI 下降。总体上,人类活动与气候变化的共同作用是金沙江中游植被变化的主要原因。

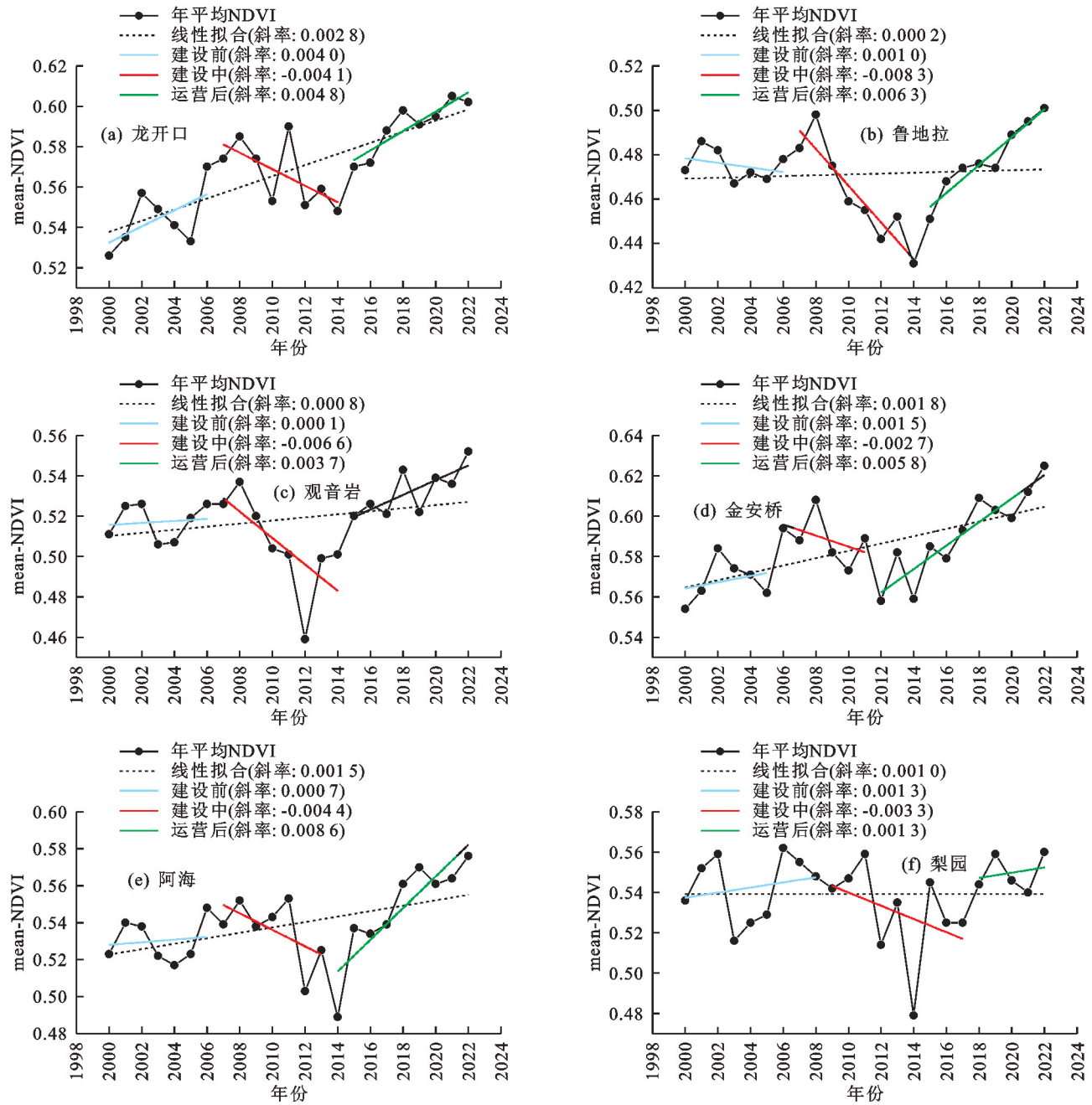


图 6 水电站各阶段 NDVI 变化趋势

Fig. 6 Change trends of NDVI of each stage of hydropower stations

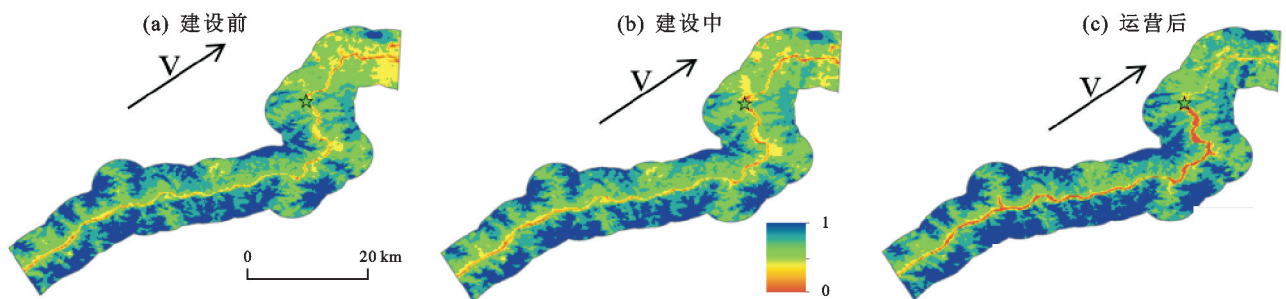


图 7 观音岩水电站 NDVI 空间分布格局

Fig.7 Spatial pattern distribution of NDVI of Guanyinyan Hydropower Station

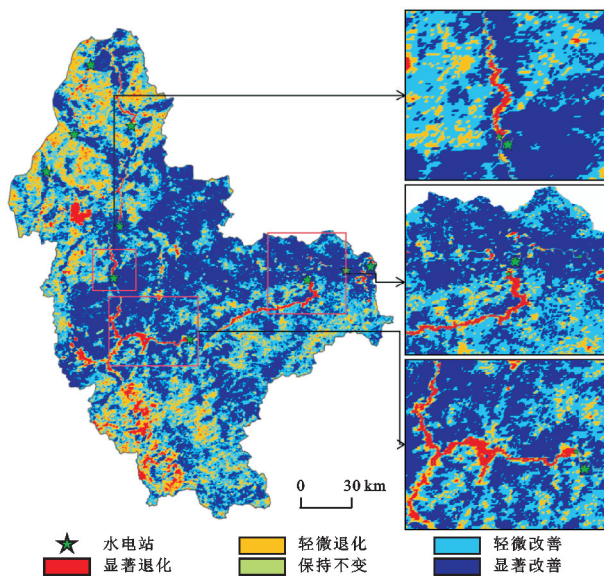


图 8 2000—2022 年植被变化趋势分布格局

Fig.8 Distribution pattern of vegetation change trend during 2000—2022

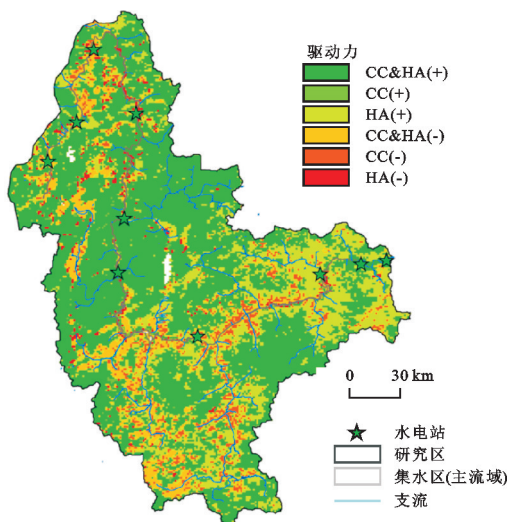


图 9 2000—2022 年植被变化驱动因素格局分布

Fig.9 Distribution of driving factors of vegetation change during 2000—2022

对人类活动与气候因素的影响进行等级划分,分析气候变化和人类活动对研究区植被的贡献度(图 10、表 5)。人类活动因素对植被造成消极影响比例为 16.44%,主要集中在水电站上游流域集水区两岸 0~1 km 缓冲区内。造成该现象的主要原因为水电站的蓄水导致上游植被破坏。人类活动因素对植被造成积极影响比例为 83.56%,广泛分布于金沙江中游区域,原因为水电站运营蓄水提供支流充足的水源,而该区域支流密布,上游蓄水提供给周边植被生长充足的水源,从而促进植被的生长,该结果与前文分析相呼应。气候因素对植被贡献度较小,−20%~20%贡献度占比为 54.03%。同时,人类活动(50.96%)对植被的高贡献度(80%~100%)比例显著高于气候因素(2.79%)。综合表明,2000—2022 年研究区主要受到人类活动(水电站建设)与气候因素共同作用,人类活动对植被的贡献度高于气候因素。

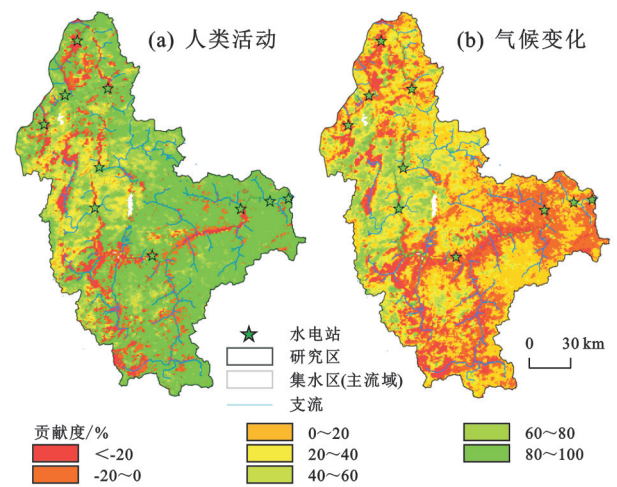


图 10 2000—2022 年气候变化和人类活动对区域植被变化的贡献率分布格局

Fig.10 Contribution patterns of climate change and human activities to regional vegetation change during 2000—2022

表 5 人类活动与气候因素对植被 NDVI 变化贡献度等级分布影响

Table 5 Distribution of contribution degrees of human activities and climate factors to NDVI change

影响 因素	贡献度等级占比/%						
	<−20%	−20%~0	0~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	80%~100%
人类活动	8.72	7.72	1.19	5.22	10.07	16.12	50.96
气候变化	12.06	25.98	28.05	16.12	9.78	5.22	2.79

2.5 植被对主要气候因子的响应

2.5.1 植被与主要气候因子的响应 本文探讨 2000—2022 年金沙江中游区域水电站不同阶段周边植被 NDVI 与平均温度、年降水的偏相关系数,挖掘水电站建设不同阶段对局部气候是否造成影响,分析通过 $p<0.05$ 的检验,偏相关结果见图 11。温度偏相关系数平均值为−0.28,正相关占比 16.13%,正相

关区域集中于上游集水区,研究区域地处中国西南方,海拔较高,温度较低,而集水区水源充足,此时更高的温度、充足的热量可能促进其新陈代谢及光合作用,从而促进植被生长。降水偏相关系数平均值为−0.29,正相关占比 32.10%,正相关区域主要集中于蓄水区周边及支流密集区,该区域集水区及支流水量主要受到水电站蓄水及泄洪的影响,进而对植被产生影响,因此

该区域对降水因子敏感。同时,温度、降水是影响植被生长常规且较为重要的因素,该研究区阳光充足、降水充沛,但温度、降水因素偏相关系数较低,说明影响该区域植被生长的主要因素并非温度、降水因素,人类活动(包括水电开发)可能是该区域的主导因素。

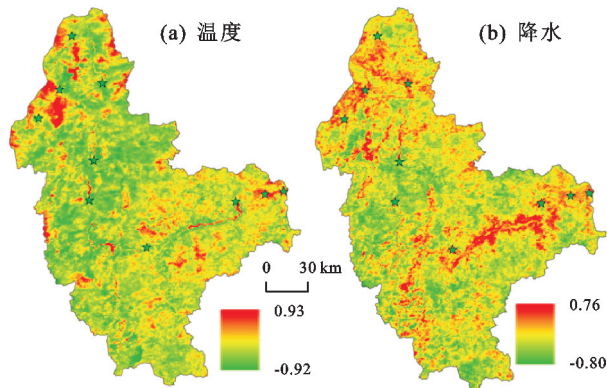


图 11 气候与植被 NDVI 偏相关分布格局

Fig.11 Distribution pattern of partial correlation between climate and vegetation NDVI

2.5.2 水电站不同阶段植被与主要气候因子的响应

各水电站在不同的阶段,温度、降水与 NDVI 的偏相关系数均发生较大的变化(表 6)。各水电站在建设阶段,温度、降水与 NDVI 偏相关系数整体呈下降

趋势,说明在水电站建设期间,温度与降水对植被的影响减弱,此时,人类活动(水电开发)占据主导因素。该现象间接表明水电站的建设改变区域气候。

在所分析的 6 大水电站中,龙开口、金安桥、阿海、梨园水电站两侧地势较高,径流相对较小,在不同的阶段具有相似的变化趋势及分布特征。温度、降水与 NDVI 偏相关系数在建设中与运营后的变化趋势一致(下降-缓慢上升)。与龙开口、金安桥、阿海水电站不同的是,梨园水电站降水与 NDVI 的偏相关系数在运营后仍然出现大幅度下降(0.31~0.01~-0.42)。值得注意的是,观音岩与鲁地拉水电站在运营后降水与 NDVI 偏相关系数同样出现大幅度下降,但该现象的原因为观音岩与鲁地拉水电站所处位置相对平坦,集水面积较大,蓄水量远高于其他水电站,有着充足的水源,因此,降水与 NDVI 的相关性降低。同时,相比观音岩、鲁地拉、龙开口水电站(0.13~0.56),金安桥、阿海、梨园水电站温度整体幅度下降较大(0.57~0.74),该现象的原因是金安桥、阿海、梨园水电站所处区域海拔更高,气温较低,河流径流量较小,因此,对外界环境的变化更为敏感。

表 6 水电站不同阶段温度、降水偏相关系数

Table 6 Partial correlation coefficients of temperature and precipitation at different stages of hydropower stations

建设阶段	观音岩		鲁地拉		龙开口		金安桥		阿海		梨园	
	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水
建设前	-0.11	0.10	-0.29	0.04	-0.23	-0.39	0.16	0.05	0.01	0.02	0.34	0.31
建设中	-0.67	0.20	-0.49	0.03	-0.36	-0.42	-0.52	-0.17	-0.56	-0.23	-0.40	0.01
运营后	-0.39	-0.21	-0.43	-0.34	-0.20	-0.30	-0.49	0.17	-0.55	0.28	0.28	-0.42

3 讨论

3.1 数据与结果的合理性及原因分析

本文基于 MODIS 时间序列光学影像,利用 ModT-rendr 算法对水电站建设导致的周边植被的突变进行提取分析。同时,也对 Landsat 影像采用同样方法进行最优合成,但是经过对比试验,合成影像出现条带,导致变化检测结果存在大量条带现象,对结果造成较大影响。可能是因为金沙江中游地处中国西部,海拔较高,地形起伏较大,导致不同时期影像很难无缝地合成。因此,本文采用 MODIS 数据集进行分析。

针对流域水电站群长时间遥感序列监测的需求,首次探讨金沙江中游水电站群对植被的扰动,推断出金沙江中段水电站的影响范围,并建立区域植被扰动数据库。在时间尺度上,修建期间,各个水电站上游流域周边植被蓄水被淹,年平均 NDVI 值产生明显的下降。水库修建完成后,上游蓄水提供周边植被所需的大量水源,周边植被年平均 NDVI 值呈可观上涨趋势,呈现“高-低-高”现象。说明水电站的影响高

于气候的影响,为验证该结论,本文对二者间的贡献度进行量化,在 5 km 缓冲区内或者整个研究区,水电站的贡献度均远高于气候的贡献度。在空间尺度上,发生显著退化的区域主要集中于流域及城市扩张区。流域周边为大量显著改善区域,水电站上游水库的蓄水对周边的植被产生积极影响,与已有研究^[27]结果一致。本研究通过对金沙江中游 6 大水电站的研究发现,梯级水电站的发展影响植被动态,而植被动态因坝而异,不同的水电站及地势对植被产生的影响存在差异。研究得到前人^[28]成果支持,上游河岸植被的分布范围受到大坝特性(如大坝高度、大坝距离)与地势的强烈影响。本文通过对植被 NDVI 与温度、降水因子的相关性分析发现,在水电站建设阶段,温度与降水整体发生较大幅度的变化,说明水电站的建设会改变局部气候,该结论与已有研究^[29]结果一致。有研究^[13-14]表明,水电站集水区影响范围为河岸 5 km 缓冲区,本文研究同样沿用该结论。目

前,对水电站的影响范围并没有统一的界定,因此,本文在分析前,根据流域的缓冲区范围与显著退化的面积建立回归模型。结果显示在 5 km 处回归曲线趋向平缓。对植被突变范围的分析结果显示,主要突变集中于垂直河流 0~10 km 内,该结果同样是对影响范围的反向验证。

3.2 水电站对不同土地类型的影响

本文也分析 2000 年、2005 年、2010 年、2014 年、2018 年、2022 年 6 期土地利用变化,探讨水电站建设对土地利用类型的影响(图 12)。各水电站土地利用类型变化相似,以观音岩水电站为例,在水电站建设期间,各个水电站在 5 km 缓冲区内森林、草地、灌木、裸地面积都发生不同程度减少。其中,裸地面积几乎完全被其他土地类型所替代,水域面积显著增加,各水电站区域水域面积增长近 2~3 倍。同时,充足的水源提供给农作物生长的条件,农田的面积显著增加。水域面积增加直接导致不同利用类型土地被淹没,同时提供给周边植被充足的水源。

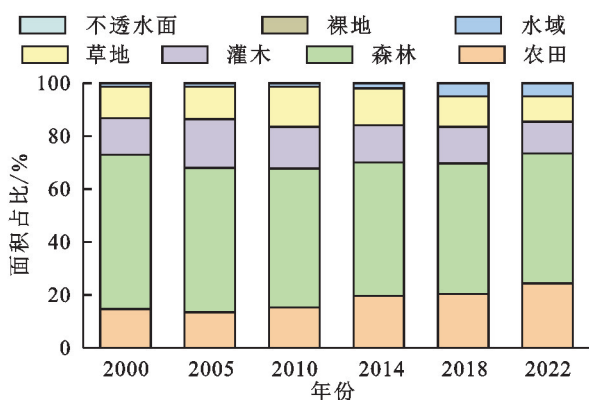


图 12 音岩水电站 6 期土地类型占比及变化

Fig.12 Land type proportion and change of Phase 6 of Guanyinyan Hydropower Station

3.3 展望与不足

本文研究发现,水电站建设在短期内对植被有一定的消极影响,而水电站建设运营后对周边的区域产生积极的影响,对改善当地生态环境具有一定的作用。但建设期间对周边植被的破坏不容忽视,在水电开发过程中必须重视对陆地植被的保护。比如,在水电站选址和规划阶段,应考虑植被的保护和恢复,尽量减少对植被的侵害。同时,损害最为严重的区域为水电站上游水库河岸 0~1 km 缓冲区内,应该加强对该区域的防护,且应建立相关的法律和政策保护水库周边地区,以帮助缓解大坝引起的植被群落退化。金沙江中游人类活动(水电开发)对植被的贡献度高于气候变化,且水电站的建成运营对气候也造成影响。对此应建立定期监测和评估制度,对水电站建设

后植被恢复情况进行监测,及时发现问题并采取措施进行修复和改进,确保植被得到有效保护和管理。梨园水电站在运营后降水与 NDVI 的偏相关系数仍然发生较大幅度下降,该现象的原因为水电站的蓄水提供给周边植被生长所需的水源,因此对降水的敏感性降低。且该水电站所处海拔相对较高,河岸两侧地势起伏更大,水电站建成运营后,水源相对充足,此时地形因素可能成为该区域植被生长的重要因素之一。因此,水电站建设也应注重地形因素带来的影响。此外,本文所建立的方法也可应用于其他相关水利工程的监测,该工作为工程建设生态影响评价提供重要的理论和技术支持。

通过分析金沙江中游水电站对植被的扰动发现,观音岩与鲁地拉水电站对植被的影响较大,二者蓄水量、蓄水面积高于其他 4 个水电站,所处区域地形相对平坦。地形、海拔的不同,其蓄水面积有较大的差异,对植被也存在不同的影响,本文未对地形效应进行分析,是今后需要改进之处。同时,MODIS 产品虽更适用于该区域植被扰动的分析,但 MODIS 影像空间分辨率较低,在观测地表细节的时候可能存在不足,是今后需要深入探讨之处。

4 结论

1)负向突变集中于 2011—2014 年,突变区域主要集中于垂直于河流 0~10 km。正向突变集中于 2015 年、2017 年,植被产生积极响应的时间为水电站蓄水后 1~4 a,突变区域主要集中于垂直河岸 0~8 km。突变强度沿河岸向外逐渐减弱。

2)各水电站整体呈上升趋势(0.000 2~0.002 8/a)。在建设前、建设中、运营后主要呈升(平缓)-降-升趋势。运营后上升率(0.001 3~0.008 6/a)高于建设前(-0.001 0~0.002 8/a)。

3)显著退化占总面积的 2.85%,轻微退化占 17.16%,保持稳定占 0.01%,轻微改善占 44.60%,显著改善占 25.37%。显著退化的区域主要集中于水电站上游集水区,显著改善的区域集中于上游集水区两岸及下游区域。

4)研究区主要受到人类活动(水电站建设)与气候因素共同作用,占比 69.12%,人类活动(水电站建设)对植被的贡献度高于气候因素。

5)温度、降水与 NDVI 的偏相关系数分别为-0.28、-0.29。温度、降水在水电站不同阶段偏相关系数差别较大。水电站在建设期间,温度与降水对植被的影响减弱。水电站运营对植被的影响高于气候的影响。

参考文献:

[1] LI Y Y, CUI Q, LI C H, et al. An improved multi-objective

- tive optimization model for supporting reservoir operation of China's South-to-North Water Diversion Project[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 970-981.
- [2] XU R R, ZENG Z Z, PAN M, et al. A global-scale framework for hydropower development incorporating strict environmental constraints[J]. *Nature Water*, 2023, 1: 113-122.
- [3] WANG W Q, WANG H M, LIU G, et al. Analysis of the trade-off between hydroelectricity generation and ecological protection from the perspective of eco-efficiency in Southwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: e115063.
- [4] ZHANG S N, YE L P, HUANG C Q, et al. Evolution of vegetation dynamics and its response to climate in ecologically fragile regions from 1982 to 2020: A case study of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Catena*, 2022, 219: e106601.
- [5] YAO T C, LU H W, FENG W, et al. Evaporation abrupt changes in the Qinghai-Tibet Plateau during the last half-century[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: e20181.
- [6] 钟旭珍, 王金亮, 邓云程, 等. 怒江-萨尔温江流域植被覆盖时空变化趋势及驱动力[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10182-10201.
- ZHONG X Z, WANG J L, DENG Y C, et al. Spatio-temporal variation and driving forces of vegetation cover in the Nujiang-Salween River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10182-10201.
- [7] 于江, 刘佳丽, 张茜或. 溪洛渡库区植被覆盖变化研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(S2): 46-50.
- YU J, LIU J L, ZHANG Q Y. Study on vegetation cover change in Xiluodu Reservoir area[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(S2): 46-50.
- [8] 张晓虹, 何有华, 胡彦婷. 干旱风沙区水库边缘植被-风力侵蚀的变化及成因[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 1-7.
- ZHANG X H, HE Y H, HU Y T. Evolution and causes of vegetation and wind erosion at reservoir edge in arid sand-storm area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 1-7.
- [9] QU S, WANG L C, LIN A W, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River Basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 438-450.
- [10] KENNEDY R E, YANG Z Q, COHEN W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr-Temporal segmentation algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897-2910.
- [11] DEVRIES B, DECUYPER M, VERBESSELT J, et al. Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 320-334.
- [12] ZHU Z, WOODCOCK C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144: 152-171.
- [13] OUYANG W, HAO F H, ZHAO C, et al. Vegetation response to 30 years hydropower cascade exploitation in upper stream of Yellow River[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1928-1941.
- [14] LIU Y L, LU H W, TIAN P P, et al. Evaluating the effects of dams and meteorological variables on riparian vegetation NDVI in the Tibetan Plateau[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 831: e154933.
- [15] 杨云建, 周学钺, 何中海, 等. 多时相数字孪生滑坡变形监测方法与应用研究: 以金沙江白格滑坡为例[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 132-143.
- YANG Y J, ZHOU X C, HE Z G, et al. Research on multi-temporal digital twin landslide deformation monitoring method and application: A case study of Baige landslide in Jinshajiang River[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 2019, 51(2): 132-143.
- [16] 杨红义, 韩瑞. 基于 Vortex 模型分析金沙江水电开发对圆口铜鱼种群生存力的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3984-3998.
- YANG H Y, HAN R. Effect of the Jinsha River hydropower development on population viability of *Coreius guichenoti* based on the Vortex model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3984-3998.
- [17] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [18] 殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于 Landsat 时序影像和 LandTrendr 算法的森林保护区植被扰动研究: 以陕西柴松和太白山保护区为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7343-7352.
- YIN Q D, LIU C X, TIAN Y. Detecting dynamics of vegetation disturbance in forest natural reserve using Landsat imagery and LandTrendr algorithm: The case of Chaisong and Taibaishan Natural Reserves in Shaanxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7343-7352.
- [19] KENNEDY R E, YANG Z Q, GORELICK N, et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on google earth engine[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): e691.
- [20] 王塞, 王思诗, 樊风雷. 基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域 NDVI(1985—2018)变化模式研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6863-6871.
- WANG S, WANG S S, FAN F L. Change patterns of

- NDVI(1985—2018) in the Yarlung Zangbo River Basin of China based on time series segmentation algorithm [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6863-6871.
- [21] 陈元鹏, 周旭, 陈妍, 等. 融合时序遥感分析的国土空间生态保护修复关键区识别[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 161-170.
- CHEN Y P, ZHOU X, CHEN Y, et al. Identification of key areas for ecological protection and restoration in national land space by integrating time-series remote sensing analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 161-170.
- [22] WANG F, GE Q S, WANG S W, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(22): 8923-8938.
- [23] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- JIN K, WANG F, HAN J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974.
- [24] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 气候变化与人类活动在四川植被覆盖度变化中的相对作用[J]. *西部林业科学*, 2022, 51(6): 8-16.
- ZHU L F, XIE S Y, YANG H, et al. Relative effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in Sichuan[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, 51(6): 8-16.
- [25] 吴瀚, 白洁, 李均力, 等. 新疆地区植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(1): 41-55.
- WU H, BAI J, LI J L, et al. Study of spatio-temporal variation in fractional vegetation cover and its influencing factors in Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(1): 41-55.
- [26] ABDUL AZIZ O I, BURN D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/2/3/4): 282-294.
- [27] WAN H, XIE Y L, LI B, et al. An integrated method to identify and evaluate the impact of hydropower development on terrestrial ecosystem [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 99: e107042.
- [28] YI Y J, ZHOU Y, SONG J, et al. The effects of cascade dam construction and operation on riparian vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 131: e103206.
- [29] YANG Y, WANG Y H, CONG N, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on riparian vegetation in the Yangtze River Basin under climate change[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 912: e169415.
- (上接第 325 页)
- [20] 王亚蕊, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6928-6938.
- WANG Y R, WANG Y H, YU P T, et al. Simulated responses of evapotranspiration and runoff to changes in the leaf area index of a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6928-6938.
- [21] 于晗. 土壤水分运移模拟研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(2): 108-110.
- YU H. Research progress in simulation of soil water transport[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(2): 108-110.
- [22] WANG J X, GAO X D, ZHOU Y Q, et al. Impact of conservation practices on soil hydrothermal properties and crop water use efficiency in a dry agricultural region of the Tibetan Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: e104619.
- [23] BAI X, JIA X X, ZHAO C L, et al. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's Loess Plateau: Regional modeling [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 320: e107608.
- [24] ZHU W, ZHAO D H, DI N, et al. Matching root water uptake patterns to fine root and soil water distributions [J]. *Plant and Soil*, 2024, 495(1): 499-516.