

基于 Sentinel-2 影像的平寨水库水体透明度遥感反演

温朝程^{1,2,3}, 周忠发^{1,2,3}, 李永柳^{1,2,3}, 孔杰^{1,2,3}, 谢江婷^{1,2,3}

(1.贵州师范大学 地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001; 2.国家喀斯特石漠化
工程技术研究中心 贵州 贵阳 550001; 3.贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 研究水体透明度的变化规律及其空间分异驱动因素, 为管理湖库及恢复湖库生态系统提供科学依据。[方法] 基于 2020 年 5 月 18 日, 8 月 26 日, 11 月 14 日的 Sentinel-2 MSI 卫星影像及准同步实测透明度数据构建平寨水库透明度遥感反演模型, 利用地理探测器定量分析影响透明度空间分异的驱动因素。[结果] ①平寨水库水体透明度与 Sentinel-2 MSI 的 B_3 波段最为敏感, 利用波段组合 $B_3 \times B_4$ 作为最佳敏感因子构建出的透明度反演模型具有较高的精度 ($R^2 = 0.81$, $RMSE = 0.11$ m, $MRE = 16.91\%$)。②平寨水库水体透明度呈现出中心库区高而各支流上游低, 近水体两岸低的空间分布趋势, 且水体透明度 11 月 > 8 月 > 5 月。[结论] 总悬浮物、叶绿素 a 及总有机碳含量是平寨水库水体透明度空间分异的主要因素。总磷、总氮、水温及风速通过影响水体中的总悬浮物、叶绿素 a 及总有机碳含量进而影响水体透明度空间分布。

关键词: 水体透明度; Sentinel-2 MSI; 遥感反演; 地理探测器; 平寨水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0158-09

中图分类号: P461+.3

文献参数: 温朝程, 周忠发, 李永柳, 等. 基于 Sentinel-2 影像的平寨水库水体透明度遥感反演[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1):158-166. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.019; Wen Chaocheng, Zhou Zhongfa, Li Yongliu, et al. Remote sensing retrieval of water transparency for Pingzhai reservoir based on Sentinel-2 images [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1):158-166.

Remote Sensing Retrieval of Water Transparency for Pingzhai Reservoir Based on Sentinel-2 Images

Wen Chaocheng^{1,2,3}, Zhou Zhongfa^{1,2,3}, Li Yongliu^{1,2,3}, Kong Jie^{1,2,3}, Xie Jiangting^{1,2,3}

(1.School of Geography and Environmental Sciences/School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2.State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3.The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The variation rule of water transparency and the driving factors of its spatial differentiation were analyzed in order to provide a scientific basis for the management of lake reservoirs and the restoration of lake reservoir ecosystems. [Methods] A remote sensing inversion model of water transparency in Pingzhai reservoir was constructed based on sentinel-2 MSI satellite images and quasi-synchronous measured transparency data collected on May 18, August 26, and November 14, 2020. We quantitatively analyzed the drivers affecting spatial differentiation of water transparency using the GeoDetector package in R. [Results] ① The water transparency of Pingzhai reservoir was most sensitive to the B_3 band of Sentinel-2 MSI, and the transparency inversion model constructed by using the band combination $B_3 \times B_4$ as the most sensitive factor had high accuracy ($R^2 = 0.81$, $RMSE = 0.11$ m, $MRE = 16.91\%$). ② The water transparency of Pingzhai reservoir showed a spatial distribution trend of high in the central reservoir area, low in the upstream region of each tributary, and low on both sides of the near water body. Water transparency was greatest in November

收稿日期: 2022-05-25

修回日期: 2022-07-08

资助项目: 国家自然科学基金委员会—贵州喀斯特科学研究中心项目“喀斯特筑坝河流水安全评估与调控对策”(U1612441); 国家自然科学基金地区基金项目“岩溶洞穴系统外源酸对碳汇效应影响机制研究”(42161048); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y154)。

第一作者: 温朝程(1994—), 男(汉族), 贵州省盘州市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统与水环境遥感研究。Email: 2115890256@qq.com。
通信作者: 周忠发(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 教授, 博导, 主要从事喀斯特生态环境、地理信息系统与遥感研究。Email: fa6897@163.com。

followed by August and then May. [Conclusion] The contents of total suspended solids, chlorophyll a, and total organic carbon were the main factors affecting the spatial differentiation of water transparency in Pingzhai reservoir. Total phosphorus, total nitrogen, water temperature, and wind speed affected the spatial distribution of water transparency by affecting the content of total suspended solids, chlorophyll a, and total organic carbon in the water.

Keywords: water transparency; Sentinel-2 MSI; remote sensing retrieved; geodetector; Pingzhai Reservoir

水资源是社会经济发展和人类赖以生存必不可少的物质基础。中国淡水资源禀赋仅占全球的 14%^[1]。由于近年来经济社会的快速发展与工业化、城镇化的推进,导致中国出现严峻的水环境污染问题^[2]。巢湖^[3]、滇池^[4]和太湖^[5]等富营养化湖泊爆发藻华,造成严重的生态环境问题。洪泽湖、鄱阳湖等湖泊由于非法采砂等活动猖獗,导致水体浑浊度显著提高,影响水下光场,破坏鱼类产卵场和底栖动物生境,引起生态系统失衡^[6-7]。湖库作为中国 85% 以上人口的主要饮用水源地^[8],同时是全球气候变化的参与者和区域响应的重要记录器^[9-10]。其水体透明度能直接影响湖库的初级生产力和水生生物的生存,对维持湖库的健康和稳定具有重要意义^[11]。研究湖库水体的透明度变化规律及其成因,有助于更好地制定湖库生态系统恢复策略和管理湖库^[12]。

透明度(Secchi disk depth, SDD)是描述水体光学性质和评估水体富营养化的重要参数之一^[13],它与水体中无机物、有机物、溶解物、颗粒物和浮游植物等组分含量密切相关^[14]。塞克盘法常用来监测水体透明度,该方法操作过程简单,但只能获取监测断面上的水体透明度数据,且费时费力,所测出的点位数据只具有局部代表意义^[15]。遥感技术具有快速、大面积和周期性的特点,能解决塞克盘法因船舶不能到达某些区域而无法监测及测量数据只具有局部代表意义的局限性问题^[16]。目前,国内外学者借助遥感手段获取水体透明度开展了大量研究。如马建行等^[17]基于 HJ-CCD 和 MODIS 数据反演吉林省中西部湖泊水体透明度,分析发现吉林省中西部湖库水体透明度主要受河流携带的泥沙等悬浮物及浮游植物色素等影响。Knight 等^[18]使用 MODIS 影像反演明尼苏达州 12 000 多个湖泊水体透明度,研究表明水体透明度发生变化主要是由于湖泊周边人类活动频繁致使大量营养成分输入及藻类大量繁殖所致。McCullough 等^[19]使用 Landsat TM 数据反演明尼苏达州中小尺度范围内不同营养状态湖泊水体透明度,分析表明叶绿素 a 含量是影响水体透明度的主要因素。刁瑞翔等^[20]利用 GF-1 卫星影像监测岱海水质,结果表明水体透明度与悬浮物空间分布上呈现出相反的趋势。水体透明度的时空分异特征受多种因素

共同作用,如降水量、风速等气象因素^[20],总悬浮物、总有机碳、叶绿素 a 等水质参数^[21-22],同时还受地理位置、入库径流量及人类活动等因素的影响^[23-24]。不同水体的水质参数各不相同,影响透明度的主导因素也不尽相同。如中国华东地区太湖水体透明度空间分布主要受藻类主导和内蒙古自治区岱海水体透明度空间分布主要受有色溶解物主导^[25]。上述研究虽从水质参数气象数据、及人类活动等方面分析影响水体透明度的主要因素,但这些研究难以体现驱动因素对水体透明度空间分异的贡献率。

平寨水库是黔中水利枢纽一期工程唯一水源库。该工程是贵州省首个大型跨地区、跨流域长距离水利调水工程,是贵州省实施西部大开发战略的标志性工程。水库肩负着向六枝特区、普定县、关岭县、平坝县、安顺和贵阳市等周边地区提供饮用水及农田灌溉任务。研究该水库水体透明度变化规律及成因,对于更好的管理水库及保障饮水安全其重要性不言而喻。由于贵州喀斯特山区常伴有阴雨天气,且库区狭长而曲折,使得适合于平寨水库研究的遥感数据源极为缺乏^[26]。Sentinel-2 采用双星系统设计,重访周期为 5 d,其所搭载的 MSI 传感器具有 13 个波段,空间分辨最高为 10 m^[27],能较好地适用于平寨水库透明度遥感反演。

基于此,本文以平寨水库为研究区,利用 Sentinel-2 卫星影像数据与实测透明度数据构建平寨水库透明度反演模型,采用同期水质参数,结合地理探测器分析透明度空间分异的驱动因素,进而定量分析驱动因素对透明空间分异的贡献率。本研究旨在为湖库管理提供决策支持以及后续水体透明度空间分异驱动因素研究提供参考。

1 研究区概况

平寨水库位于贵州省纳雍县、织金县及六枝特区交界的三岔河中游木底河山格镇平寨村附近,地理坐标为 105°17'3"—105°26'44"E, 26°29'33"—26°35'38"N, 由纳雍河(三岔河纳雍段)、水公河、张维河、白水河及扈家河汇流后筑坝而成,坝高 30 m,总库容量 $1.09 \times 10^9 \text{ m}^3$,调节库容 $4.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,正常蓄水位 1 331 m,库区平均水深 50 m。水库流域内地势起伏

较大并发育倾斜构造,库区出露地层和岩性主要为上二叠统大隆组(P_3d)和龙潭组(P_3l)的砂岩和泥岩,下三叠统大冶组(T_1d)、关岭组(T_1g)、夜郎组(T_1y)和永宁镇组(T_1yn)的白云岩和泥灰岩^[28]。平寨水库地处亚热带高原季风气候,年平均气温为 10.3~15.6 °C,年均 5,8,11 月降水量分别为 143.6,314.6,18.5 mm,2020 年 5,8,11 月平均降水量分别为 139.2,337.4,15.3 mm,且 2020 年 5,8,11 月水库平均风速分别为 3.62,1.58,0.76 m/s,降水主要集中在每年的 5—9 月,年均降雨量 1 053.5 mm,植被类型以亚热带常绿阔叶混交林为主。水库流域上游人口密集,社会经济活动频繁并建有大型煤矿企业。

2 材料与方法

2.1 实测数据

本研究于 2020 年 5 月 20—21 日,8 月 26 日和 11 月 10—13 日分 3 次进行野外试验数据收集,采集数据时天气状况良好,天空晴朗无云,采集时间为每个采样日的 9:00—17:00。采样时充分考虑平寨水库形状、船舶行驶能到达的水面区域及水库周边山体在水面阴影的影响,在水库上共布设 46 个采样点并用手持 GPS 仪定位,其中 5,8,11 月采样点个数分别为 8,30,8 个。

在每个采样点,将带有刻度尺的塞克盘垂直放入水中,直到黑白相间的塞克盘在水中下降到“能见”与“不能见”的临界点时记录下塞克盘下降的刻度以获取透明度实测值。在测量获取的 46 组透明度数据中,随机选取 2/3(30 组)用于模型构建,1/3(16 组)用于模型精度验证。测量水体透明度时,利用德国 WTW 公司生产的 Multi 便携式多参数水质分析仪及美国 Kestrel-4500 型便携式气象站野外同步测定水温(WT)和风速(WS)。同时利用 3 个 500 ml 和 1 个 50 ml 聚乙烯瓶在每个采样点水面下 20 cm 处采集水样,将水样密封、冷藏带回实验室测定水质参数。

在实验室中,利用荧光分光法测量叶绿素 a 浓度(Chl-a)。悬浮物(TSS)采用抽滤、灼烧称质量法测定。利用岛津公司生产的 TOC-L CPH/CPN 总有机碳分析仪测取总有机碳(TOC)含量,宽测量范围为 4 $\mu\text{g/L}$ ~30 000 mg/L。总磷(TP)和总氮(TN)使用德国 DeChem-Tech 公司生产的 CleverChem380 型全自动间断化学分析仪测定,其检出限为 0.001 mg/L。

2.2 遥感数据及预处理

本文使用的 2020 年 5 月 18 日,8 月 26 日,11 月 14 日 Sentinel-2 MSI 卫星影像数据来自欧洲委员会和欧洲航天局(<https://scihub.copernicus.eu/>)发布

的经过辐射定标后的 L1 C 级产品,波段参数见表 1。L1 C 级产品是经过正射校正和几何精校正的大气表观反射率产品,并未进行大气校正,采用欧洲航天局发布的 Sen2cor 插件对其进行大气校正。由于 Sentinel-2 各波段空间分辨率不同,无法对经过 Sen2cor 大气校正后的影像进行处理应用,需要将各波段空间分辨率重采样为相同分辨率,采用 SNAP 软件的重采样模块将 Sentinel-2 MSI 影像所有波段空间分辨率重采样为 10 m,导出为 ENVI5.3 能处理的数据格式,并在 ENVI5.3 中合成处理波段数据。

表 1 平寨水库水体透明度 Sentinel-2 MSI 光谱波段参数

Table 1 Water transparency of Pingzhai reservoir
Sentinel-2 MSI spectral band parameters

波段号	波段名称	中心波长/ nm	波宽/ nm	空间分辨率/ m
B ₁	海岸/气溶胶	443.9	27	60
B ₂	蓝	496.9	98	10
B ₃	绿	560.0	45	10
B ₄	红	664.5	38	10
B ₅	植被红边 1	703.9	19	20
B ₆	植被红边 2	740.2	18	20
B ₇	植被红边 3	782.5	28	20
B ₈	近红外(宽)	835.1	145	10
B _{8A}	近红外(窄)	864.8	33	20
B ₉	水蒸气	945.0	26	60
B ₁₀	短波红外—卷云	1 373.5	75	60
B ₁₁	短波红外	1 613.7	143	20
B ₁₂	短波红外	2 202.4	242	20

2.3 研究方法

2.3.1 透明度遥感反演原理 水体的光谱特性主要由水体中的悬浮颗粒物、有色可溶性有机物、无机物、浮游植物以及纯水本身等组分对太阳辐射的吸收和散射决定,同时又受水体各种状态的影响^[29]。而悬浮颗粒物、有色可溶性有机物、浮游植物以及纯水本身对太阳辐射在水下的传输和分布影响最大^[27]。由于纯水对太阳辐射的吸收和散射特性是稳定不变的,不同水体中各组分含量的差异造成了卫星传感器接收到离水辐射的差异^[15]。因此通过遥感定量监测水质参数的关键即分析一定波谱范围内水体组分含量不同对遥感反射率所造成的不同影响^[14]。

2.3.2 透明度模型构建方法 水质遥感反演经验模型是基于统计学的多个自变量对单个因变量反演的方法,主要包括自变量的线性、非线性相关回归^[25]。经验模型通常利用单波段或波段组合与透明度的回归关系来估算水体的透明度,具有波段选择灵活、计

算过程简便、精度高等优点^[10]。因此,本文基于实测透明度与 Sentinel-2 MSI 单波段或波段组合反射率进行相关回归分析,尝试构建平寨水库水体透明度遥感反演模型。

2.3.3 地理探测器 地理探测器是探索空间异质性,揭示其背后驱动因子的一种统计学模型,与传统的模型相比,能够在不基于线性假设和变量共线性的情况下分析变量之间的相互关系^[30]。地理探测器用 q 值度量驱动因子对因变量空间异质性的解释力,其值域为 $[0, 1]$,数值越接近 1 说明驱动因子对因变量空间分异的解释力越强,反之若数值为 0 则驱动因子与自变量不存在任何关系。 q 值计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中: $h=1 \cdots L$ 为透明度 Y 或各水质参数 X 的分类; N_h 和 N 分别为 h 类和所有类别的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是 h 类和所有类别的透明度方差值。

2.3.4 模型精度评价 本文采用平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 对平寨水库水体透明度遥感反演模型精度进行评价,其表达式下:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - G_i|}{G_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - G_i)^2} \quad (3)$$

式中: Y_i 是透明度的模型反演值; G_i 是透明度的现场实测值; n 表示样本总数。

3 结果与分析

3.1 水体透明度敏感波段分析

内陆 2 类水体水色遥感反演通常基于可见光至近红外波段范围内的波段进行反演^[8,10]。Sentinel-2 MSI 共有 13 个不同波长范围的波段,其中 B_8 和 B_{8A} 是中心波长相同而波段范围不同的近红外波段, B_9 波段是水蒸气波段, B_{10} 波段用于大气校正, B_{11} 和 B_{12} 为短波红外波段。因此本文利用 SPSS 22.0 分析了 MSI 的前 8 个波段 ($B_1 - B_8$) 遥感反射率与 30 组水体透明度进行皮尔逊相关性分析(图 1),进而找出平寨水库水体透明度遥感反演敏感波段。

波段反射率与水体透明度呈现出负相关的关系(图 1),皮尔逊相关系数在 -0.288 至 -0.735 之间,这是因为当水体中的悬浮物、有色可溶解性有机物、泥沙等组分含量升高时,水体的透明度就随之降低,其波段反射率就会越高。从气溶胶波段开始,随着波长范围的增加,水体中的悬浮物、浮游植物、有色可溶解性有机物、泥沙等组分在绿光和红光表现出强反

射,之后随着波长范围的增加,其反射率逐渐减小。同时可以看到 MSI 气溶胶波段(B_1)、蓝波段(B_2)、红边 2 波段(B_6)、红边 3 波段(B_7)、近红外波段(B_8)的相关性较小,皮尔逊相关系数分别为 -0.313 , -0.288 , -0.413 , -0.481 , -0.477 , 而绿波段(B_3)、红波段(B_4)、红边 1 波段(B_5)较高,皮尔逊相关系数分别为 -0.735 , -0.608 , -0.592 。

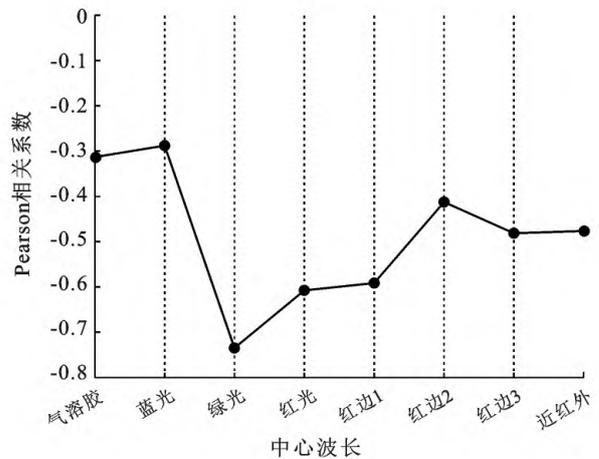


图 1 平寨水库水体透明度 MSI 单波段与实测透明度的相关系数

Fig.1 Correlation coefficient between MSI single band and measured water transparency of Pingzhai reservoir

为找出平寨水库水体透明度最佳反演波段组合、得到更优的反演模型,本文选取实测透明度与 MIS 相关系数最高的 B_3, B_4 及 B_5 波段分别做不同的波段组合,对不同的波段组合结果分别与实测透明度数据进一步做相关分析(分析结果见表 2)。 $B_3 + B_4, B_3 + B_5, B_3 \times B_4, B_3 \times B_5$ 与 SDD 的皮尔逊相关系数均高达 0.8 以上,其中相关性最高的是 $B_3 + B_5$ 和 $B_3 \times B_4$,皮尔逊相关系数分别为 -0.858 和 -0.840 。

表 2 平寨水库水体透明度单波段及波段组合相关分析
Table 2 Single band and band combination correlation analysis of water transparency in Pingzhai reservoir

波段及波段组合	SDD/m	波段及波段组合	SSD/m
B_1	-0.313	$B_4 + B_5$	-0.611
B_2	-0.288	$B_3 - B_4$	-0.533
B_3	-0.735	$B_3 - B_5$	-0.507
B_4	-0.608	$B_4 - B_5$	0.180
B_5	-0.592	$B_3 \times B_4$	-0.840
B_6	-0.413	$B_3 \times B_5$	-0.838
B_7	-0.481	$B_4 \times B_5$	-0.571
B_8	-0.477	B_3 / B_4	0.382
$B_3 + B_4$	-0.834	B_3 / B_5	0.204
$B_3 + B_5$	-0.858	B_4 / B_5	-0.285

3.2 透明度反演模型构建与验证

基于相关分析结果,选取相关性最好的单波段 B_3 及波段组合 $B_3+B_5, B_3 \times B_4$ 作为自变量,试图构建平寨水库水体透明度最优遥感反演模型。根据已有研究^[25],分别对自变量建立指数、线性、对数、二次以及幂函数回归模型(结果见表 3)。由表 3 可以看到,单波段中,效果最好的是二次模型, $R^2=0.75$ 。而

波段组合 B_3+B_5 和 $B_3 \times B_4$ 效果最好的均是幂函数模型,其可决系数 R^2 分别为 0.78, 0.81。基于此,提出平寨水库水体透明度反演模型:

$$f_{SDD}(x) = 0.0876x^{-0.373} \quad (4)$$

式中: $f_{SDD}(x)$ 为平寨水库水体透明度; x 为 Sentinel-2 MSI 的 B_3 和 B_4 波段遥感反射率的乘积, $x = B_3 \times B_4$ 。

表 3 平寨水库水体透明度(SDD)回归模型
Table 3 Regression model of water transparency (SDD) in Pingzhai reservoir

自变量 x	因变量 $f_{SDD}(x)$	模型类型	拟合方程	R^2
B_3	SDD	指数模型	$f_{SDD}(x) = 2,670.9e^{-14.65x}$	0.57
		线性模型	$f_{SDD}(x) = -27.296x + 2,556.1$	0.54
		对数模型	$f_{SDD}(x) = -0.783 \ln(x) - 1,026.4$	0.61
		二次模型	$f_{SDD}(x) = 2,850.8x^2 - 188.15x + 4,697.4$	0.75
		幂函数模型	$f_{SDD}(x) = 0.3916x^{-0.419}$	0.63
B_3+B_5	SDD	指数模型	$f_{SDD}(x) = 3,263.4e^{-15.73x}$	0.76
		线性模型	$f_{SDD}(x) = -28.679x + 2,903.4$	0.74
		对数模型	$f_{SDD}(x) = -1.076 \ln(x) - 1,728.9$	0.77
		二次模型	$f_{SDD}(x) = 763.62x^2 - 86,969x + 3,971.8$	0.77
		幂函数模型	$f_{SDD}(x) = 0.2611x^{-0.586}$	0.78
$B_3 \times B_4$	SDD	指数模型	$f_{SDD}(x) = 2,510.7e^{-107.0x}$	0.75
		线性模型	$f_{SDD}(x) = -1,894.1x + 2,404.1$	0.71
		对数模型	$f_{SDD}(x) = -0.674 \ln(x) - 3,654.1$	0.80
		二次模型	$f_{SDD}(x) = 3,000.006x^2 - 4,314.8x + 2,842.1$	0.79
		幂函数模型	$f_{SDD}(x) = 0.0876x^{-0.373}$	0.81

在用于模型构建的 30 组透明度数据中,除了一个点外,其余的点均在预测带内(图 2a)。同时用于模型精度验证的 16 组实测透明度数据与模型反演出的透明度数据也均在预测带内(图 2b),其中有 9 个点在置信带之内,而且模型反演值与实测透明度值

均分布于 1:1 线附近。16 组透明度数据的平均相对误差(MER)为 16.91%,均方根误差(RMSE)为 0.11 m,这说明波段组合 $B_3 \times B_4$ 构建的幂函数模型具有较高的精度,能精确地反演出平寨水库水体透明度。

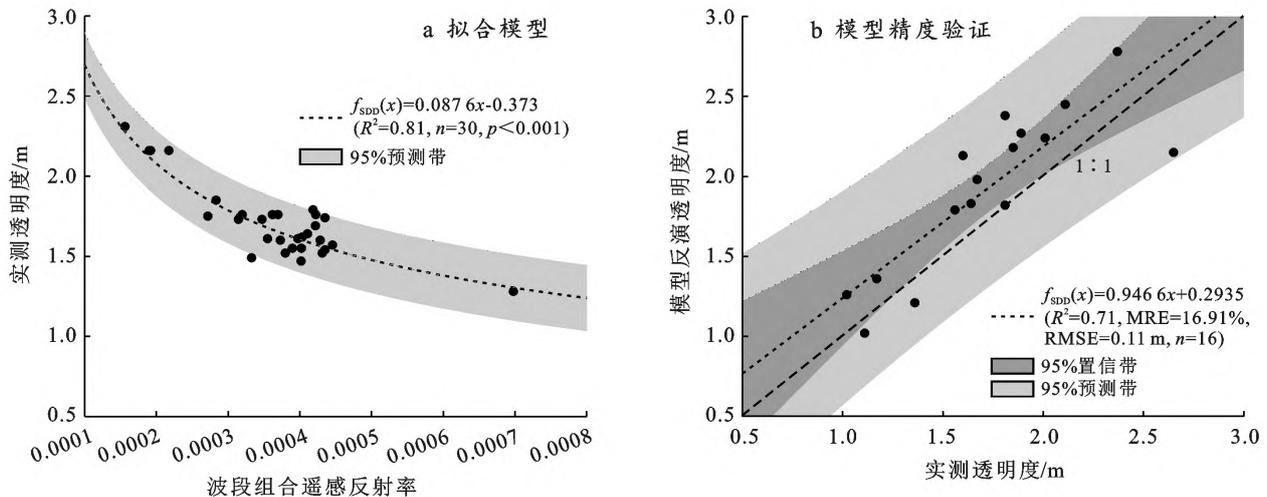


图 2 平寨水库水体透明度拟合模型(a)与精度验证(b)
Fig.2 Fitting model (a) and accuracy verification (b) of water transparency in Pingzhai reservoir

3.3 平寨水库水体透明度空间分布特征

利用遥感数字图像处理软件 ENVI5.3, 结合平寨水库水体透明度反演模型[式(4)], 分别计算经大气校正等预处理后的 3 期 Sentinel-2 MSI 影像(2020 年 5 月 18 日、8 月 26 日以及 11 月 14 日)。并采用地理空间分析软件 ArcGIS 10.2 掩膜工具提取水体, 得到平寨水库 5, 8, 11 月透明度空间分布图(图 3)。

平寨水库 5, 8, 11 月透明度整体上呈现出中心库

区高而各支流上游低、近水体两岸低的空间分布趋势。5 月中部较高, 北部、东部及西部和南部部分区域偏低, 且透明度空间分异明显。8 月西部、南部及北部部分区域较高, 中部及西部偏低。11 月中部和南部较高, 东部、北部及西部偏低。整体上看, 平寨水库水体透明度月季存在较大差异, 5 月水体透明度在 0.29~2.09 m 之间, 8 月水体透明度介于 0.34~2.34 m, 11 月水体透明度范围为 0.28~2.62 m。

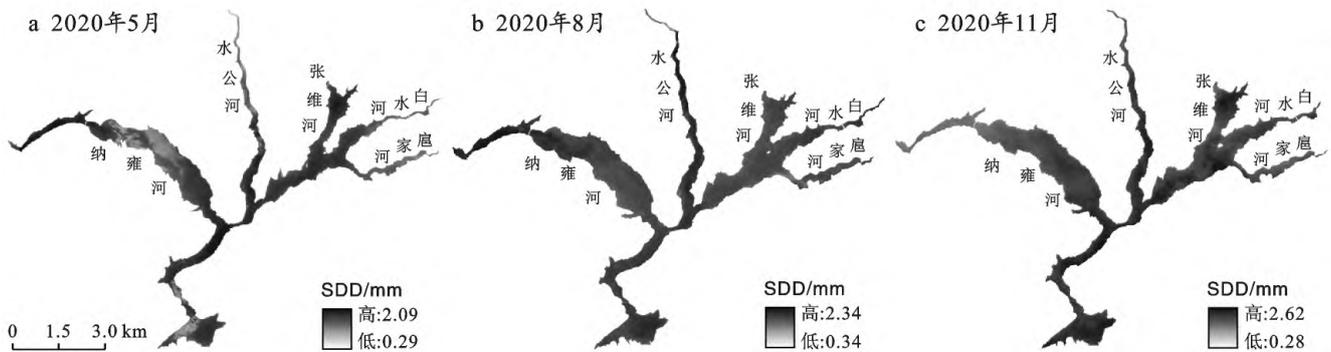


图 3 平寨水库水体透明度(SDD)空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water transparency (SDD) in Pingzhai reservoir

3.4 水体透明度空间分异驱动因素分析

综合考虑水质参数对透明度空间分异的影响, 本文选取 2020 年 5 月 18 日, 8 月 26 日, 11 月 14 日准同步实测 TSS, TOC, Chl-a, WS, WT, TP 及 TN 等 7 项水质参数, 并将各水质参数及透明度调至最适分级, 利用地理探测器中的风险探测定量分析各水质参数对透明度空间分异的影响程度(表 4)。从表中可以看出, 各驱动因子 q 值都比较小, 其贡献率大小顺序为: $\text{TOC} > \text{Chl-a} > \text{TSS} > \text{WT} > \text{WS} > \text{TP} > \text{TN}$, 说明单个驱动因子对平寨水库水体透明度空间分异的解释能力较弱。在单驱动因子中, q 值最大的前 3 个水质参数分别是 TOC, Chl-a, TSS, 其探测结果 q 值分别为 0.479 1, 0.415 7, 0.343 6, 这表明总有机碳、叶绿素 a 及总悬浮物对平寨水库水体透明度空间分异有较大影响。

本文利用地理探测器的交互作用探测识别不同水质参数共同作用时是否会增加或减弱对透明度空间分异的解释力, 以及各水质参数对透明度的影响是相互独立的(表 5)。结合表 4 可知, 各驱动因子交互作用的 q 值均大于单驱动因子的 q 值, 这说明两驱动因子对透明度空间分异的解释力大于单驱动因子, 且两驱动因子交互作用后均增强对透明度空间分异的解释力。在表 5 中交互作用后 q 值大于 0.5 的均包含了 TOC, TSS 及 Chl-a, 分别是 $\text{WT} \cap \text{TOC}$, $\text{WT} \cap \text{TSS}$, $\text{WT} \cap \text{Chl-a}$, $\text{TOC} \cap \text{TSS}$, $\text{TOC} \cap \text{Chl-a}$, $\text{TOC} \cap$

WS , $\text{TSS} \cap \text{Chl-a}$, $\text{Chl-a} \cap \text{WS}$, q 值最小的是 $\text{TP} \cap \text{TN}$ 为 0.327 4, q 值最大的是 $\text{TOC} \cap \text{Chl-a}$ 为 0.679 9。这表明平寨水库水体透明度的空间分异主要受总有机碳、叶绿素 a 及总悬浮物主导, 透明度空间分异是多种驱动因素共同作用的综合。

表 4 平寨水库水体透明度空间分异地理探测器变量和指标

Table 4 Geographic detector variables and indicators for spatial differentiation of water transparency in Pingzhai reservoir

驱动因子	计算方法	分类	单位	q 值
TSS	ArcGIS 空间插值, 栅格统计	13	mg/L	0.365 7
TOC		14	mg/L	0.479 1
Chl-a		11	mg/L	0.415 7
WT		7	°C	0.343 6
WS		5	m/s	0.314 6
TP		13	mg/L	0.270 9
TN		9	mg/L	0.219 4

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文以平寨水库实测透明度与 Sentinel-2 MSI 波段反射率的统计关系, 构建了基于绿波段(B_3)、波段组合($B_3 + B_5$)及($B_3 \times B_4$)的不同形式水体透明度遥感反演模型, 其中精度最高的是基于绿波段与红波

段乘积($B_3 \times B_4$)构建的幂函数模型〔式(4)〕。这与刘翀等^[25]构建的基于绿波段构建的幂函数模型结果基本一致,但其模型中并未包含红波段。这主要是由于地理区位差异造成的。其研究区位于青藏高原,流域内人类活动较弱,水体清澈度高。

本文研究区位于贵州喀斯特高原山区,流域内人类活动频繁,加之流域上游伴有大型煤矿企业,这势必会导致水体组分光学性质的差异。不同水体性质的差异,使得不同光学组合对湖库水体透明度的主导

作用不同,必然会改变水体在不同波段反射率的变化规律^[31],进而造成各研究区拟合模型存在差异。本研究中所构建的幂函数模型还包含了红光波段,这主要是因为红光和近红外的部分波段反射率易受悬浮物影响^[32]。平寨水库水体透明度在一定程度上受悬浮物影响(表 5),在表中与悬浮物交互作用的均具有较高的 q 值。Wu 等^[33]研究表明基于绿波段和红光波段构建的幂函数模型在中国湖泊透明度遥感反演中具有较好的拟合效果。

表 5 平寨水库水体透明度空间分异影响因子的交互作用

Table 5 Interaction of influencing factors on spatial differentiation of water transparency in Pingzhai reservoir

交互作用 q 值(J)	$X_1 + X_2$ 或 $\max(X_1, X_2)$	交互结果	交互作用
WT∩TOC=0.597 8	$\max[\text{WT}(0.343\ 6), \text{TOC}(0.479\ 1)]$	B	双因子增强
WT∩TSS=0.512 4	$\max[\text{WT}(0.343\ 6), \text{TSS}(0.365\ 7)]$	B	双因子增强
WT∩Chl-a=0.546 5	$\max[\text{WT}(0.343\ 6), \text{Chl-a}(0.415\ 7)]$	B	双因子增强
WT∩WS=0.440 8	$\text{WT}(0.343\ 6) + \text{WS}(0.314\ 6)$	R	非线性增强
WT∩TP=0.411 1	$\text{WT}(0.343\ 6) + \text{TP}(0.270\ 9)$	R	非线性增强
WT∩TN=0.371 4	$\text{WT}(0.343\ 6) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强
TOC∩TSS=0.602 1	$\max[\text{TOC}(0.479\ 1), \text{TSS}(0.365\ 7)]$	B	双因子增强
TOC∩Chl-a=0.679 9	$\max[\text{EC}(0.479\ 1), \text{Chl-a}(0.415\ 7)]$	B	双因子增强
TOC∩WS=0.576 8	$\max[\text{TOC}(0.479\ 1), \text{WS}(0.314\ 6)]$	B	双因子增强
TOC∩TP=0.459 3	$\text{TOC}(0.479\ 1) + \text{TP}(0.270\ 9)$	R	非线性增强
TOC∩TN=0.425 1	$\text{TOC}(0.479\ 1) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强
TSS∩Chl-a=0.583 2	$\max[\text{TSS}(0.365\ 7), \text{Chl-a}(0.415\ 7)]$	B	双因子增强
TSS∩WS=0.452 6	$\text{TSS}(0.365\ 7) + \text{WS}(0.314\ 6)$	R	非线性增强
TSS∩TP=0.425 5	$\text{TSS}(0.365\ 7) + \text{TP}(0.270\ 9)$	R	非线性增强
TSS∩TN=0.419 7	$\text{TSS}(0.365\ 7) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强
Chl-a∩WS=0.539 0	$\max[\text{Chl-a}(0.415\ 7), \text{WS}(0.314\ 6)]$	B	双因子增强
Chl-a∩TP=0.438 7	$\text{Chl-a}(0.415\ 7) + \text{TP}(0.270\ 9)$	R	非线性增强
Chl-a∩TN=0.394 2	$\text{Chl-a}(0.415\ 7) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强
WS∩TP=0.396 6	$\text{WS}(0.314\ 6) + \text{TP}(0.270\ 9)$	R	非线性增强
WS∩TN=0.356 2	$\text{WS}(0.314\ 6) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强
TP∩TN=0.327 4	$\text{TP}(0.270\ 9) + \text{TN}(0.219\ 4)$	R	非线性增强

注: B 表示 $J > \max(X_1, X_2)$; R 表示 $J > X_1 + X_2$ 。

在反演出的三景 Sentinel-2 MSI 中(图 3),平寨水库水体透明度呈现出 5 月最低,8 月次之,11 月最高,从 5 月到 11 月水体透明度有逐渐升高的趋势,且升高的趋势很小,这与前人的研究结果基本一致^[20]。如图 3 所示,该水库东部、北部及西部是库区的上游支流,水面狭窄而曲折,水深较浅,水体透明度受地形和降水^[25]影响较大。中部及南部水面开阔,水体较深,影响水体透明度的主要因素有真光层深度^[34]、风速^[20]。5 月农耕活动频繁,农业活动污染及泥沙伴随着降雨汇入到水库内,加之水面开阔的纳雍河段及中心库区风速较大,水底中的泥沙在风浪扰动下极易再悬浮^[35],造成该月水体透明度较低。8 月降水量虽然

用加强,河流中的含沙量会有所增加,但由于库区相较上游河流水面平静,水体受扰动较小,上游河流携带的泥沙入库区后发生沉降,且较大降水汇入到水库后,对影响透明度的各组分起到稀释作用^[20],因此该月透明度相较 5 月有所升高。11 月透明度最高,该月鱼类活动性相对减弱^[36],水面风速较小,水体受外界扰动减弱,水体趋于稳定。同时,本文利用地理探测器定量分析平寨水库水体透明度空间分异驱动因素贡献率大小得出(表 4)及(表 5),水体透明度主要受总有机碳、叶绿素 a 及总悬浮物含量主导,且总有机碳含量对透明度空间分异的解释力 $>$ 叶绿素 a $>$ 总悬浮物,其解释力 q 值分别为 0.479 1, 0.415 7, 0.343 6。这是对现有研究^[12,21-23]关于水质参数分析透

明度空间分异的有力补充。其次,在表 4 中水温、风速、总磷及总氮具有较小的 q 值,这主要是因为风速、水温间接影响水体中的总磷、总氮、叶绿素 a 含量从而影响水体透明度空间分布,同时,风速还影响水体中总有机碳、叶绿素 a 及总悬浮物含量进而引起透明度呈现出空间上的差异^[12,37]。

此外,由于采样日与 Sentinel-2 卫星过境时间没有严格同步,采样点相对较少、3 次采样个数不一致、采样点不能很好的均匀覆盖整个水库,而水质遥感反演经验模型需要大量的星地数据用于模型构建与验证,这可能会影响本文构建的经验模型训练效果;同时,本文利用实测水质参数通过克里金插值法获取空间上连续分布的水质参数数据以分析水体透明度空间分异的驱动因素,这可能会对分析结果产生一定影响。在下一步研究中,亟需加大采样频次、在库区均匀合理布局增设更多的采样点以解决数据量不足及星地数据不同步的问题。

4.2 结论

本文以平寨水库为研究区,基于 2020 年 5 月 18 日、8 月 26 日、11 月 14 日 Sentinel-2 卫星影像数据及准同步实测透明度数据构建了平寨水库透明度遥感反演模型,利用水质参数数据结合地理探测器定量分析了透明度空间分异的驱动因素,这是对现有平寨水库水质参数遥感反演研究的有利补充,同时有助于湖库管理者更好的制定湖库生态系统恢复策略和湖库管理。主要结论如下:

(1) 平寨水库水体透明度与 Sentinel-2 MSI 的绿波段(B_3)最为敏感,其皮尔逊相关系数为 -0.735 ,利用波段组合 $B_3 \times B_4$ 构建的水体透明度反演模型精度最高,相关性系数 R^2 为 0.81 ,平均相对误差(MER)为 16.91% ,均方根误差(RMSE)为 0.11 m 。

(2) 在反演出的三幅影像中,平寨水库水体透明度整体呈现出中心库区高而各支流上游低、近水体两岸低的空间分布趋势;同时水体透明度月季节上存在较大差异,5 月透明度最低,8 月次之,11 月最高,且从 5 月到 11 月有逐渐升高的趋势。

(3) 总有机碳、叶绿素 a、总悬浮物是平寨水库水体透明度空间分异的主要驱动因素,其地理探测器 q 值分别为 $0.479 1, 0.415 7, 0.343 6$;总磷、总氮、水温、风速通过影响水体中的总有机碳、总悬浮物以及叶绿素 a 浓度进而对水体透明度空间分异产生影响。

[参 考 文 献]

[1] Xu Kui, Bin Lingling, Xu Xinyi. Assessment of water resources sustainability in Mainland China in terms of

water intensity and efficiency [J]. *Environmental Management*, 2019,63(3):309-321.

- [2] 刘红光,陈敏,唐志鹏.基于灰水足迹的长江经济带水资源生态补偿标准研究[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(11):2553-2563.
- [3] 刘东,张民,沈明,等.基于遥感藻总量和气象因子的巢湖不同湖区藻华预测[J].*湖泊科学*,2022,34(4):1090-1101.
- [4] 喻臻钰,杨昆,罗毅,等.基于深度神经网络算法的水体透明度反演方法[J].*生态学报*,2021,41(6):2515-2524.
- [5] 苗松,王睿,李建超,等.基于哨兵 3A-OLCI 影像的内陆湖泊藻蓝蛋白浓度反演算法研究[J].*红外与毫米波学报*,2018,37(5):621-630.
- [6] Cao Zhigang, Duan Hongtao, Feng Lian, et al. Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,192:98-113.
- [7] Feng Lian, Hu Chuanmin, Chen Xiaoling, et al. Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: Observations from MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012,117(C7).
- [8] 段洪涛,曹志刚,沈明,等.湖泊遥感研究进展与展望[J].*遥感学报*,2022,26(1):3-18.
- [9] 刘正文,苏雅玲,杨柳.湖沼学是研究内陆水体的多学科整合科学:兼论我国湖沼学发展面临的挑战与机遇[J].*湖泊科学*,2020,32(5):1244-1253.
- [10] 马荣华,唐军武,段洪涛,等.湖泊水色遥感研究进展[J].*湖泊科学*,2009,21(2):143-158.
- [11] Zhou Qichao, Wang Weilu, Huang Licheng, et al. Spatial and temporal variability in water transparency in Yunnan Plateau Lakes, China [J]. *Aquatic Sciences*, 2019,81(2):36.
- [12] 张睿婷,胡昕欣,金睿,等.2019 年苏州市 10 处湿地中水体的透明度及其影响因素研究[J].*湿地科学*,2021,19(3):331-341.
- [13] Zhao Yijun, Zhang Zhizhang, Pang Yong, et al. Water transparency distribution under varied currents in the largest river-connected lake of China [J]. *Water Science & Technology*, 2016,75(2):406-417.
- [14] Lee Zhongping, Shang Shaoling, Hu Chuanmin, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,169:139-149.
- [15] 段洪涛,张柏,宋开山,等.查干湖透明度高光谱估测模型研究[J].*干旱区资源与环境*,2006,20(1):156-160.
- [16] 宋开山,张柏,王宗明,等.半干旱区内陆湖泊透明度高光谱估测模型研究:以松嫩平原查干湖为例[J].*水科学进展*,2006,17(6):790-796.
- [17] 马建行,宋开山,邵田田,等.基于 HJ-CCD 和 MODIS 的吉林省中西部湖泊透明度反演对比[J].*湖泊科学*,2016,28(3):661-668.

- [18] Knight J F, Voth M L. Application of MODIS imagery for intra-annual water clarity assessment of Minnesota Lakes [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(7): 2181-2198.
- [19] McCullough I M, Loftin C S, Sader S A. Combining Lake and watershed characteristics with Landsat TM data for remote estimation of regional lake clarity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 109-115.
- [20] 刁瑞翔, 青松, 越亚嫫, 等. 北方半干旱区典型湖泊: 岱海透明度遥感反演(2013—2020年)[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1072-1087.
- [21] 张晓晶, 李畅游, 贾克力, 等. 乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 879-884.
- [22] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 681-686.
- [23] 王书航, 姜霞, 王雯雯, 等. 蠡湖水体透明度的时空变化及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(7): 688-695.
- [24] 殷子瑶, 江涛, 杨广普, 等. 1986—2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. *海洋科学*, 2020, 44(4): 21-32.
- [25] 刘翀, 朱立平, 王君波, 等. 基于 MODIS 的青藏高原湖泊透明度遥感反演[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 597-609.
- [26] 但雨生, 周忠发, 李韶慧, 等. 基于 Sentinel-2 的平寨水库叶绿素 a 浓度反演[J]. *环境工程*, 2020, 38(3): 180-185.
- [27] 杨雷, 禹定峰, 高靖, 等. Sentinel-2 的胶州湾水体透明度遥感反演[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 515-521.
- [28] 刘贤梅, 周忠发, 张昊天, 等. 平寨水库夏季分层期间水化学及溶解无机碳变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(4): 936-945.
- [29] 禹定峰, 邢前国, 周斌, 等. 基于环境一号卫星的四十里湾透明度遥感反演[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(4): 580-584.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] Gitelson A A, Yacobi Y Z, Schalles J F, et al. Remote estimation of phytoplankton density in productive waters [J]. *Advances in Limnology (Stuttgart)*, 2000, 55: 121-136.
- [32] 徐京萍, 张柏, 蔺钰, 等. 结合高光谱数据反演吉林石头口门水库悬浮物含量和透明度[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 269-274.
- [33] Wu Guofeng, de Leeuw J, Liu Yaolin. Understanding seasonal water clarity dynamics of lake dahuchi from in situ and remote sensing data [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(9): 1849-1861.
- [34] 秦伯强, 张运林, 高光, 等. 湖泊生态恢复的关键因子分析[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 918-924.
- [35] 王超, 张微敏, 王沛芳, 等. 风浪扰动条件下沉水植物对水流结构及底泥再悬浮的影响[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2): 107-111.
- [36] 刘延龙, 张保华, 姚昕, 等. 东平湖水体透明度的遥感反演研究[J]. *测绘科学*, 2018, 43(7): 72-78.
- [37] 周燕, 禹定峰, 刘晓燕, 等. 基于 GOCI 数据的胶州湾水体透明度遥感反演及日变化研究[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(2): 108-115.

(上接第 157 页)

- [18] Bera S, Upadhyay V K, Guru B, et al. Landslide inventory and susceptibility models considering the landslide typology using deep learning: Himalayas, India [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(1): 1257-1289.
- [19] 梁丽萍, 刘延国, 唐自豪, 等. 基于加权信息量的地质灾害易发性评价: 以四川省泸定县为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 176-182.
- [20] 周超, 殷坤龙, 曹颖, 等. 基于集成学习与径向神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 1865-1876.
- [21] 张玘恺, 凌斯祥, 李晓宁, 等. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1595-1610.
- [22] 向喜琼. 区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2005.
- [23] Alvioli M, Marchesini I, Reichenbach P, et al. Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(11): 3975-3991.
- [24] 赵毅斌, 邓必荣, 王玺. 基于 Logistic-信息量耦合模型的地质灾害易发性分区研究: 以赣南地区某重点城镇为例[J]. *地质灾害与环境*, 2021, 32(4): 45-51.
- [25] 张凌凡, 陈忠辉, 周天白, 等. 基于梯度提升决策树的露天矿边坡多源信息融合与稳定性预测[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 173-180.
- [26] Friedman J H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine [J]. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [27] He Xinran, Pan Junfeng, Jin Ou, et al. Practical Lessons from Predicting Clicks on Ads at Facebook[M]. *ACM*, 2014.