

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.002

基于高分一号卫星数据的库区淹没频率分析方法

吴杰¹,董小涛²,张珂^{1,3,4},李曦¹,吴南¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 水利部综合事业局,北京 100032;
3. 长江保护与绿色发展研究院,江苏南京 210098; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室,江苏南京 210098)

摘要: 为分析水库水位变化对消落带生态结构的影响,提高淹没频率计算精度,提出一种基于高分一号卫星数据的淹频率分析方法。该方法通过对高分一号 WFV 影像数据进行预处理并多次迭代提取缓冲区的水体信息,结合地理配准和计算得到淹没频率空间分布特征,通过以此模拟的水体分布结果的精度验证淹没频率的可靠性。三河口水库实例验证结果表明:提出的水库淹没频率分析方法较准确地反映了水体信息的时空变化特征,模拟的水体信息结果总体精度和 Kappa 系数均值分别达到 86.5% 和 73%,较准确地还原了水库蓄水阶段的水体变化,提高了水体淹没频率计算的精度。

关键词: 淹没频率;水位变化;水体提取;遥感影像;高分一号卫星;三河口水库

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)05-0009-06

An analysis method of reservoir inundation frequency based on GF-1 satellite data

WU Jie¹, DONG Xiaotao², ZHANG Ke^{1,3,4}, LI Xi¹, WU Nan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Bureau of Comprehensive Development Ministry of Water Resources, Beijing 100032, China;
3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China;
4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the impacts of water level changes on the ecological structure of water-level-fluctuating zone in the reservoir and improve the accuracy of the calculation of the inundation frequency, an analysis method of inundation frequency is proposed based on GF-1 satellite data. Firstly, the GF-1 WFV satellite imageries are preprocessed and a buffer zone is set up to extract the water body through multiple iterations. Then, the spatial distribution characteristics of the inundation frequency are obtained by geographical registration and inundation frequency calculated from the proposed method. Finally, the reliability of the inundation frequency is verified by the accuracy of water body distribution simulated from the method. The application in Sanhekou Reservoir show that the proposed analysis method of the inundation frequency can accurately reflect the spatiotemporal variation characteristics of the water body information. The overall classification accuracy and Kappa coefficient of simulated water body results reach 86.5% and 73% respectively, which can accurately reproduce the water body changes during the impoundment period of reservoir and improve the accuracy of inundation frequency calculation.

Key words: inundation frequency; water level change; water extraction; remote sensing image; GF-1 satellite; Sanhekou Reservoir

消落带作为一种特殊的湿地生态系统,指由于季节或人为控制因素导致水位消涨而在水库周边形成的陆地和水生生态系统功能相互作用的巨大隔离带,是库区生态保护的重要对象^[1-3]。水位波动是对湖泊生态系统影响最为重要的因素^[4],也是形成消落带的主要原因。与自然形成的河岸带不同,水库消落带的水位变化主要受水库实际调度影响,水库调蓄造成的库区水位周期性波动变化会对消落带的生态结构造成重大影响。目前对消落区的研究主要集中在土地利用变化^[5-6]、消落带分区等方面,对消落带时空变化特征分析

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230202009, B220203051);陕西省水利科技计划项目(2019slkj-B1)

作者简介: 吴杰(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: hhu_wj@hhu.edu.cn

通信作者: 张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn

引用本文: 吴杰,董小涛,张珂,等. 基于高分一号卫星数据的库区淹没频率分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 9-14.
WU Jie, DONG Xiaotao, ZHANG Ke, et al. An analysis method of reservoir inundation frequency based on GF-1 satellite data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 9-14.

的研究较少。

淹没频率作为一项重要的水文特征,反映了空间位置上水体淹没时间的长短及次数,是影响湿地生态系统的重要因素^[7],同时会影响消落带的生态结构和生态类型划分。张丽丽等^[8]通过计算鄱阳湖自然保护区湿地的水深和淹水频率,分析了植被群落对这 2 种水文特征的耐受性和敏感性。许超等^[9]基于 MODIS 遥感数据计算淹没频率,分析其变化;谷娟等^[10]基于混合像元分解模型分析了鄱阳湖的淹没频率变化,探究时间序列上湿地植被特征的空间响应。水位的季节性波动变化导致水库周边形成不同的淹没频率,湿地中的植被也受到不同程度的水淹影响,对水位变化不适应的植被大量消亡,造成该湿地区域植被群落减少,环境的稳定性受到破坏,水土流失、水质恶化等损害生态系统的问题层出不穷。因此,综合分析消落带淹水范围及淹水频率的时空变化特征,加强对消落带水体分布的高精度、高频次监测具有重要意义。

遥感信息技术作为一种可以高效获取、分析及处理空间地理信息的技术手段,已广泛应用于水文领域的趋势变化分析及宏观监测^[11-15]等领域。高分一号卫星由我国自主研发并于 2013 年 4 月发射成功,有效载荷为 2 台 2 m 分辨率全色、1 台 8 m 分辨率多光谱相机(PMS)和 4 台 16 m 分辨率多光谱宽幅相机(WFV),具有高空间分辨率、多相机等特点,满足了我国对高时空分辨率遥感数据的应用需求^[16]。目前常见的遥感影像水体信息提取方法包括单波段阈值法^[17]、多波段谱间关系法^[18]、水体指数法及分类法^[19-20]等。

为研究消落带生态类型划分,本文提出一种线性插值模拟计算水体淹没频率的方法,并结合遥感影像水体信息提取^[21-23]和几何校正^[24-25]技术,分析了三河口水库蓄水阶段的水体时空变化特征,并根据模拟水体的精度反映淹没频率结果的可靠性,以期提高淹没频率计算的可靠性。

1 研究方法

1.1 遥感数据处理及精细配准

本文采用的遥感数据为中国资源卫星网站发布的高分一号卫星 WFV16 m 分辨率遥感影像。在进行后续数据分析及应用前,利用 ENVI 二次开发工具 IDL 批量预处理不同日期遥感影像,步骤包括辐射定标、大气校正^[26]、正射校正等。为了消除因传感器自身因素、大气条件、太阳位置和角度等引起的遥感影像空间位置误差,选取固定的地面建筑物作为参照物进行精细配准,使配准后的影像空间位置差异在误差允许范围内^[24]。根据研究区矢量文件对预处理后的遥感影像进行裁剪得到用于水体提取的源数据。

1.2 最大类间方差迭代水体提取法

最大类间方差法又称为大津法(Otsu),由学者 Otsu^[27]于 1979 年提出,是一种简单可行、应用广泛的图像分割阈值算法。该算法可以找到某一灰度值,即阈值,将图像分为前景和背景。本文根据归一化差分水体指数(normalized difference water index,NDWI)将图像分为水体和非水体。阈值为使前景和背景类间方差最大的灰度值,类间方差越大说明前景与背景灰度值的离散程度越大,同时也说明类内方差越小,即前景和背景内部灰度值离散程度越小,故此时的阈值选取也更加合理。

基于改进的最大类间方差迭代水体提取法^[11],通过迭代不同膨胀算子确定最优提取结果。首先通过经验阈值和边缘检测法初步筛选水体信息并利用连通域标记法去除其他无关水体,然后迭代多个膨胀算子并基于形态学膨胀法建立库区水体的缓冲区,再对缓冲区内区域应用最大类间方差法,根据判断准则自适应地确定水体与非水体的分割阈值。自适应最优阈值选择公式为

$$S_{\min} = \min \{ | S_i - S_{i-1} | \} \quad (i = 1, 2, 3)$$
 (1)

式中: $S_{\min}$ 为最小的水体提取面积差值; S_i 、 S_{i-1} 分别为第 i 次、第 $i-1$ 次迭代得到的水体面积。

1.3 连通域标记法

连通域指的是图像中由相同并且相邻的像素值组成的图像区域。不同的相邻像素点形成不同的区域,这些不同区域代表了不同的连通区域,像素的邻接关系决定了像素与周边的连通关系,通常分为四邻接和八邻接关系^[28]。本文图像为二值图像,最小单位为像素,采用四邻接关系,即考虑像素的上、下、左、右等 4 个方向的连接状态,通过遍历图像,记下每一行或列中团和标记的等价对,并通过等价对对原来的图像进行重新标记,步骤分为横向合并、纵向合并和逆向合并。

通过连通域区域标记算法对各连通水体进行标记,对研究区内不同水体进行区分,选择最大连通域作为库区水体范围,可以有效去除图像中存在的其他水体和噪音。

1.4 水库淹没频率计算方法

水库淹没频率是指某个位置上被水淹的时间与总研究时间的比值。受遥感影像时间分辨率、云体干扰、数据质量等因素干扰,无法获得日尺度的水体时空变化特征。本文选择影像在时间尺度上保证相邻两次日期高分一号卫星数据的水库水体时空变化呈单调变化趋势,对缺少数据的日期,基于线性插值模拟结果构建淹没频率计算公式:

$$P = \sum_j \left[(N_{j-1} + N_j) \Delta T / (2T) \right]$$

(2)

式中: P 为对应像元在研究时间内的淹没频率; N_j 为第 $j+1$ 期影像该位置的水体划分,水体与非水体分别对应为 1、0; ΔT 为两期影像间隔时间; T 为总研究时间。

2 实例验证

2.1 工程概况

引汉济渭工程为陕西省内重大跨流域调水工程,三河口水利枢纽是引汉济渭工程的调蓄中枢,目前已完成水库初期蓄水阶段,消落带正在逐渐形成。三河口水利枢纽位于佛坪县与宁陕县境交界、汉江一级支流子午河中游峡谷段,其坝址位于大河坝乡三河口村下游约 2 km 处。三河口水利枢纽主要由拦河大坝、泄洪放空系统、供水系统和连接洞等水工建筑物组成。

三河口水库回水淹没范围涉及陕西省宁陕县,库区上游左岸有椒溪河、蒲河和汶水河等支流汇入。该水库库容较小,是整个引汉济渭工程中具有较大水量调节能力的核心项目,承担供水、调蓄、发电以及满足下游综合用水要求等多项任务。

根据三河口水库的蓄泄运行规律,水库水位在正常蓄水位 643 m 至库正常运行死水位 558.0 m 之间变动。图 1 展示了三河口水库最大淹没范围 1000 m 缓冲区。

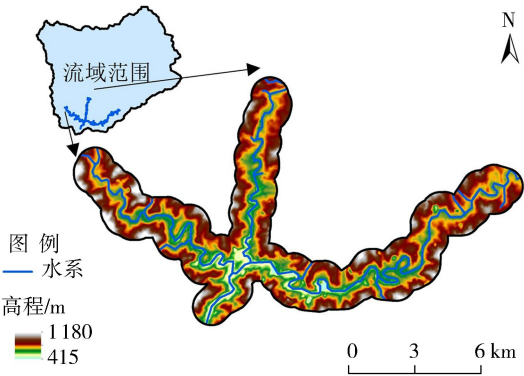


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

2.2 结果与分析

2.2.1 库区水位变化趋势

选取 2020 年 1 月 22 日到 2021 年 11 月 8 日共 25 幅预处理后的高分一号卫星遥感影像,应用 Otsu 法选取阈值得到水体提取结果。自 2020 年 1 月 22 日至 2020 年 2 月 29 日水库始终处于最低水位,2021 年 9 月 8 日后达到最大水位,涨水阶段共历时约 18 月,预计消落带总面积为 13.95 km²。对遥感影像进行目视解译,得到三河口水库水体面积的变化阶段:2020 年 2 月以前,水库维持在死水位不变;2020 年 2 月至 2021 年 2 月,水库水位第一次上涨后维持固定水位,涨落周期为 11 月;2021 年 2—6 月,水库水位在大幅上涨后维持固定水位,涨落周期为 4 月;2021 年 6—10 月水库水位继续上涨至正常蓄水位,之后水位维持在正常蓄水位。

图 2 为时间序列上 Otsu 法提取水体的变化趋势,线性拟合 R^2 达到 0.58468,总体呈现稳步上升趋势。20201129 景影像水体提取结果较相邻日期波动较大,结合目视解译遥感影像发现将大坝周围建筑及山体阴影误分为水体导致水体提取结果较实际结果偏大;20210117、20210605 景影像水体提取结果较周围日期向下波动则是由于受云层影响水体上游末端细小水体未充分提取,导致水体提取结果较实际结果偏小。三河口水库周边存在部分建筑和山体阴影,而 NDWI 指数对山体阴影、建筑物和水体的区分能力较弱,存在将其误分为水体导致部分日期水体面积偏大的情况,呈现为图 2 中蓄水过程线的波动。

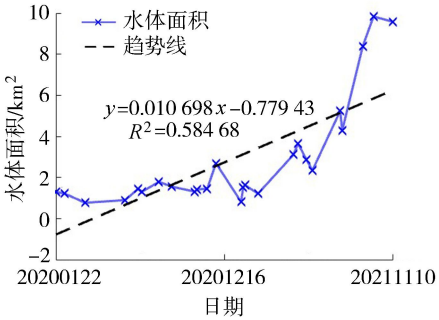


图 2 三河口库区水体面积时间序列

Fig.2 Time series of water body area in Sanhekou Reservoir

由图 3 可知,水体边界整体沿水系扩展,水体面积增加,水位

由 558 m 上涨至 643 m, 落差达 85 m, 符合水库实际调度情况。其中, 20210219 景影像之前库区水体面积变化较小, 存在将坝址、山体阴影错分的现象; 20210219 景影像后随着水库大量蓄水, 水位大幅上升, 水体面积增加, 水体与周边噪音的区分程度较好, 对水体的误提取情况明显减少。

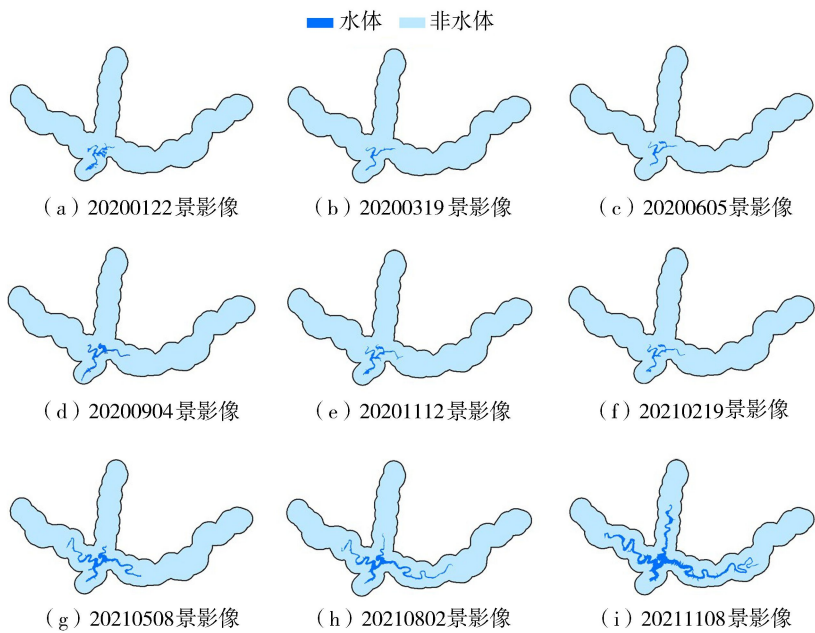


图 3 2020—2022 年三河口库区水体提取结果

Fig.3 Results of extracted water body area of Sanhekou Reservoir from 2020 to 2022

2.2.2 水库空间淹没频率特征

对提取的 2020—2022 年三河口水库水体边界, 在进行大气校正等预处理手段后, 通过精细几何校正使影像之间地物的误差控制在误差允许范围内。将处理后的影像进行叠置分析并按时间序列进行插值处理, 计算年淹没频率。

图 4(a) 为得到的空间上 16 m 分辨率每个像元的淹没频率, 反映了库区空间淹没状态, 淹没程度沿三河口水库三条河流上游向库区逐渐增加, 较真实地反映了库区淹没状态。但永久淹没区较死水位对应的水面面积偏小, 分析误差原因主要为不同遥感影像间空间位置差异。通过人工修正按淹没频率(0, 33.3%]、(33.3%, 66.6%]、(66.6%, 100%)、100% 将三河口水库水位变动区域划分为 4 个淹没等级(图 4(b)): 经常出露、半淹半露、经常淹没和永久淹没。可以看出坝址周围建筑及山体阴影的误分影响了淹没频率的计算。

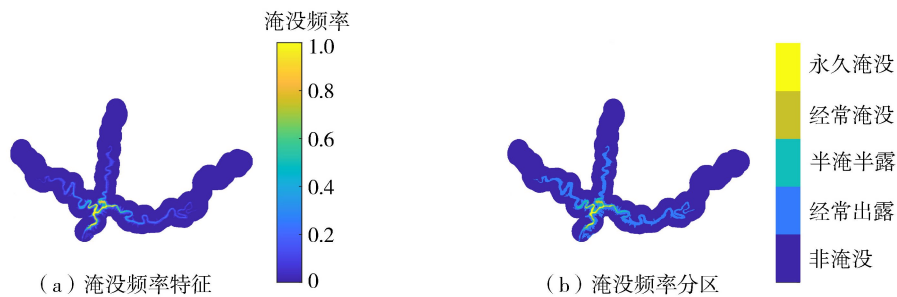


图 4 三河口水库 1000 m 缓冲区内的淹没频率特征及淹没频率分区

Fig.4 Characteristics and zoning of inundation frequency with 1000m buffer zone in Sanhekou Reservoir

从表 1 可以看出淹没频率面积占比随淹没程度的增加逐渐递减, 空间上表现为由内向外递减的趋势。由于研究期限内水库正处于初期蓄水阶段, 淹没频率区间为(0, 33.3%]的区域占比最大, 面积达到 11.72 km², 占淹没区面积的 81.84%, 是淹没区的主体部分; (33.3%, 66.6%]、(66.6%, 100%)、100% 的区域面积分别为 1.55、0.68、0.37 km², 占淹没区面积的 10.82%、4.75%、2.58%。

2.2.3 水库淹没频率可靠性分析

选择存在遥感影像的日期进行验证,基于淹没频率空间特征结果,模拟得到水体分布结果。淹没频率结果的可靠性通过模拟得到的水体分布结果的精度来反映。用于验证的遥感影像需要满足未参与频率计算且处于水库调蓄阶段内。

由图 5 可知,20210312 与 20210323、20210708、20210717 水体提取结果基本一致,说明它们处于水库上涨的同一阶段。结合人工目视解译实际遥感影像,分别选取 100 个水体和非水体像元构建混淆矩阵计算总体精度和 Kappa 系数,结果见表 2。

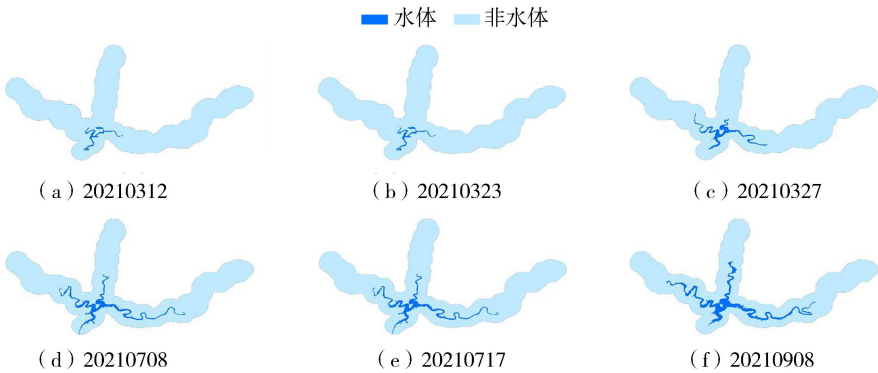


图 5 不同日期模拟水体分布

Fig.5 Simulated water body distribution

由表 2 可知,6 次水体模拟结果的总体精度和 Kappa 系数均值分别达到 86.5% 和 73%,结果较为满意,说明由本文方法得到的淹没频率特征符合该地区的水库调蓄情况,具有较强的可靠性。

3 结 语

本文采用线性插值法计算了不同时段的水淹状态,模拟了蓄水时段的水体变化,结合高分辨率遥感数据,得到库区淹没频率的时空分布特征。根据淹没程度不同分成经常出露、半淹半露、经常淹没、长久淹没 4 种淹没区,空间上呈现为由内向外递减,面积占比分别为 81.84%、10.82%、4.75%、2.58%,在水库进入正常调蓄阶段后,为消落带形成后的生态类型划分提供了借鉴思路。本文选择未参与计算且存在遥感数据的日期对水体模拟结果进行精度验证,总体精度最大值为 90%,最小值为 82%,均值为 86.5%,Kappa 系数最大值为 80%,最小值为 64%,均值为 73%,说明淹没频率时空分布特征可靠性较好。总体上该频率计算方法简单有效,在水库调蓄情况下较为适用,精细化了淹没频率的计算。但强降雨等自然因素的干扰会影响其适用性;水体提取结果的准确性也会影响频率计算的结果;在小型水库由于对几何校正的要求变高也会导致精度的降低,对此在未来的研究中仍需进一步深入探讨。

参考文献:

[1] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,等. 消落带研究进展[J]. 林业科学,2010,46(4):111-119. (CHENG Ruimei,WANG Xiaorong, XIAO Wenfa,et al. Advances in studies on water-level-fluctuation zone [J]. Forestry Science,2010,46(4):111-119. (in Chinese))

[2] 卢彬. 三峡库区消落带生态修复文献综述[J]. 科技创新与应用,2021,11(19):59-61. (LU Bin. Literature review on ecological restoration of fluctuation zone in three gorges reservoir area[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2021,11(19):59-61. (in Chinese))

表 1 缓冲区淹没频率统计

Table 1 Inundation frequency statistics of buffer zone

淹没频率分区	面积/km ²	占研究区比例/%	占淹没区比例/%
0	310.30	95.59	
(0,33.3%]	11.72	3.61	81.84
(33.3%,66.6%]	1.55	0.48	10.82
(66.6%,100%)	0.68	0.21	4.75
100%	0.37	0.11	2.58

表 2 水体模拟结果精度

Table 2 Accuracy of simulated water body results

模拟水体日期	总体精度/%	Kappa 系数/%
2021-03-12	83.5	67
2021-03-23	82.0	64
2021-03-27	90.0	80
2021-07-08	89.0	78
2021-07-17	90.0	80
2021-09-08	84.5	69

- [3] 沈振锋,张开金,夏雪,等.基于文献计量法的三峡库区消落带研究现状及热点分析[J].水生生态学杂志,2021,42(1):26-34. (SHEN Zhenfeng,ZHANG Kaijin,XIA Xue,et al. Bibliometric analysis of the current situation and hot research topics on the water level fluctuation zone (WLFZ) of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Water Ecology, 2021, 42(1): 26-34. (in Chinese))
- [4] 舒薇薇,高耶.湖泊水文情势变化及其生态响应概述[J].湿地科学与管理,2020,16(1):69-73. (SHU Weiwei,GAO Ye. An overview of lake hydrological changes and its ecological responses[J]. Wetland Science and Management,2020,16(1):69-73. (in Chinese))
- [5] 李伟萍,曾源,张磊,等.丹江口水库消落区土地覆被空间格局分析[J].国土资源遥感,2011,91(4):108-114. (LI Weiping,ZENG Yuan,ZHANG Lei,et al. The spatial pattern of landcover in the drawdown area of Danjiangkou Reservoir[J]. Remote Sensing of Land and Resources,2011,91(4):108-114. (in Chinese))
- [6] 叶松,谭德宝,张煜.丹江口水库消落带土地利用现状调查及特点分析[J].长江科学院院报,2016,33(11):17-20. (YE Song,TAN Debao,ZHANG Yu. Investigation and analysis on the characteristics of land-use status of Danjiangkou water level fluctuating zone[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences,2016,33(11):17-20. (in Chinese))
- [7] CASANOVA M T,BROCK M A. How do depth,duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? [J]. Plant Ecology,2000,147(2):237-250.
- [8] 张丽丽,殷峻暹,蒋钟钟,等.鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系[J].水科学进展,2012,23(6):768-775. (ZHANG Lili,YIN Junxian,JIANG Yunzhong,et al. Relationship between hydrological conditions and vegetation communities in Poyang Lake national nature reserve of China[J]. Advances in Water Science,2012,23(6):768-775. (in Chinese))
- [9] 许超,蒋卫国,万立冬,等.基于MODIS时间序列数据的洞庭湖区洪水淹没频率研究[J].灾害学,2016,31(1):96-101. (XU Chao,JIANG Weiguo,WAN Lidong,et al. Research of flood submerged frequency in Dongting Lake region based on time series dataset of MODIS[J]. Disaster Science,2016,31(1):96-101. (in Chinese))
- [10] 谷娟,秦怡,王鑫,等.鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应[J].生态学报,2018,38(21):7718-7726. (GU Juan,QIN Yi,WANG Xin,et al. Changes in inundation frequency in Poyang Lake and the response of wetland vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(21):7718-7726. (in Chinese))
- [11] 范亚洲,张珂,刘林鑫,等.水库水体的最大类间方差迭代遥感提取方法[J].水资源保护,2021,37(3):50-55. (FAN Yazhou,ZHANG Ke,LIU Linxin,et al. Optimal extraction of reservoir water body from remote sensing images based on iterative inter-class variance maximization method[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):50-55. (in Chinese))
- [12] 王焱成,肖飞,冯奇,等.汉江中下游消落区及水域面积时空变化分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2727-2734. (WANG Yicheng,XIAO Fei,FENG Qi,et al. Spatio-temporal changes of the water-level fluctuation zone and inundation areas in middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin,2019,28(11):2727-2734. (in Chinese))
- [13] LI X,ZHANG K,LI X. Responses of vegetation growth to climate change over the Tibetan Plateau from 1982 to 2018[J]. Environmental Research Communications,2022,4(4):45007.
- [14] LI Xi,ZHANG Ke,NIU Jiefan,et al. A machine learning-based dynamic ensemble selection algorithm for microwave retrieval of surface soil freeze/thaw;a case study across China[J]. GIScience & Remote Sensing,2022,59(1):1550-1569.
- [15] 张珂,吴南,徐国鑫,等. GF-1 遥感影像结合等高线消除云层干扰的连续水体重建法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):295-302. (ZHANG Ke,WU Nan,XU Guoxin,et al. An extraction method for continuous water body through cloud interference removal using GF-1 remote sensing and DEM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):295-302. (in Chinese))
- [16] 蔡建楠,何甜辉,黄明智. 高分一、二号卫星遥感数据在生态环境监测中的应用[J]. 环境监控与预警,2018,10(6):12-18. (CAI Jiannan,HE Tianhui,HUANG Mingzhi. The application of GF-1 and GF-2 satellite remote sensing data to ecological environment monitoring[J]. Environmental Monitoring and Early Warning,2018,10(6):12-18. (in Chinese))
- [17] 陆家驹,李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进[J]. 遥感学报,1992(1):17-23. (LU Jiaju,LI Shihong. Improvement of the technique for distinguishing water bodies from TM data[J]. Journal of Remote Sensing,1992(1):17-23. (in Chinese))
- [18] 钟春棋,曾从盛,柳铮铮. 基于谱间特征与比值型指数的水体影像识别分析[J]. 地球信息科学,2008,51(5):663-669. (ZHONG Chunqi,ZENG Congsheng,LIU Zhengzheng. Study on terrestrial water information identified based on the analysis of spectral signature and ratio index[J]. Earth Information Science,2008,51(5):663-669. (in Chinese))
- [19] 陈前,郑利娟,李小娟,等. 基于深度学习的高分遥感影像水体提取模型研究[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(4):43-49. (CHEN Qian,ZHENG Lijuan,LI Xiaojuan,et al. Water body extraction from high-resolution satellite remote sensing images based on deep learning[J]. Geography and Geographic Information Science,2019,35(4):43-49. (in Chinese))

implicit stochastic optimization[J]. Journal of Cleaner Production,2018,195:562-572.

[18] DING Ziyu,WEN Xin,TAN Qiaofeng, et al. A forecast-driven decision-making model for long-term operation of a hydro wind photovoltaic hybrid system[J]. Applied Energy,2021,291(6):116820.

[19] 张曦,康重庆,张宁,等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化,2014(6):6-13. (ZHANG Xi, KANG Chongqing,ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric System,2014(6):6-13. (in Chinese))

[20] HE Yi,GUO Su,ZHOU Jianxu, et al. The quantitative techno-economic comparisons and multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic hybrid power system considering different energy storage technologies[J]. Energy Conversion & Management, 2021,229:113779.

[21] 王静. 梯级电站蓄能控制图研究与应用[J]. 人民黄河,2020,42(2):89-93. (WANG Jing. Research and application of energy storage control chart for cascade hydropower stations[J]. Yellow River,2020,42(2):89-93. (in Chinese))

[22] 谢如昌,纪昌明,王春超,等. 基于改进判别系数法的水库群蓄能调度图绘制[J]. 水力发电学报,2013,39(5):62-64. (XIE Ruchang,JI Changming,WANG Chunchao, et al. Energy storage operation charts of hydropower station reservoir group based on improved discriminate coefficient method[J]. Journal of Hydroelectric Power,2013,39(5):62-64. (in Chinese))

[23] 纪昌明,蒋志强,孙平,等. 基于判别式法及逐步优化算法的梯级蓄能调度图研究[J]. 水力发电学报,2014,33(3):118-125. (JI Changming,JIANG Zhiqiang,SUN Ping, et al. Study on cascade energy storage dispatching figure based on discriminant criterion method and progressive optimality algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Power,2014,33(3):118-125. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-01 编辑:熊水斌)

(上接第 14 页)

[20] 王瑾杰,丁建丽,张成,等. 基于 GF-1 卫星影像的改进 SWI 水体提取方法[J]. 国土资源遥感,2017,29(1):29-35. (WANG Jinjie,DING Jianli,ZHANG Cheng, et al. Method of water information extraction by improved SWI based on GF-1 satellite image [J]. Remote Sensing of Land and Resources,2017,29(1):29-35. (in Chinese))

[21] 栾清华,秦志宇,王东,等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. 水资源保护,2022,38(1):106-116. (LUAN Qinghua,QIN Zhiyu,WANG Dong, et al. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):106-116. (in Chinese))

[22] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):50-57. (ZHU Hui,HE Qisheng,LI Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4):50-57. (in Chinese))

[23] 王波,黄津辉,郭宏伟,等. 基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J]. 水资源保护,2022,38(3):117-124. (WANG Bo, HUANG Jinhui,GUO Hongwei, et al. Progress in research on inland water quality monitoring based on remote sensing[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):117-124. (in Chinese))

[24] 宫兆宁,陈雨竹,赵文慧. 近 35 年官厅水库消落带消涨特征及分区[J]. 生态学报,2017,37(16):5294-5304. (GONG Zhaoning,CHEN Yuzhu,ZHAO Wenhui. Analysis of fluctuation characteristics and subzone in hydro-fluctuation belt in the Guanting Reservoir during 1979-2013[J]. Journal of Ecology,2017,37(16):5294-5304. (in Chinese))

[25] 于博文,田淑芳. “高分一号”卫星数据几何校正研究[J]. 遥感技术与应用,2017,32(1):133-139. (YU Bowen,TIAN Shufang. Retrieval of snow albedo based on muti-source remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(1):133-139. (in Chinese))

[26] 王中挺,李小英,李莘莘,等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正[J]. 遥感学报,2016,20(3):353-360. (WANG Zhongting, LI Xiaoying,LI Xinxin, et al. Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras[J]. Journal of Remote Sensing,2016,20(3):353-360. (in Chinese))

[27] OTSU N. A thresholding selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetic, 1979,9(1):62-66.

[28] 甘晓英,白阳,何晓栋,等. 一种并行二值图像连通域标记算法[J]. 计算机与数字工程,2021,49(5):993-997. (GAN Xiaoying,BAI Yang,HE Xiaodong, et al. A parallel algorithm for connected component labeling in binary images[J]. Computer and Digital Engineering,2021,49(5):993-997. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-18 编辑:刘晓艳)