引文格式：闫戈丁,景海涛,王磊. 小浪底水库水体时空变化特征与驱动因素分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(3): 72-75. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.03.017

小浪底水库水体时空变化特征与驱动因素分析

闫戈丁[1]，景海涛[1]，王　磊[1]
（1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院，河南 焦作 454000）

摘　要：以2018—2021年Sentinel-2遥感影像为数据源，利用Google Earth Engine（GEE）云平台研究小浪底水库月尺度水体面积的时空变化。结果表明，2018—2021年小浪底水库水体面积月际变化波动较大，每年均呈先降后升的趋势，具有显著的季节性变化规律，夏季汛期防洪降低库容，冬季蓄水增加库容保证生产生活用水；小浪底库区存在约85.29 km^2的永久性水体，占总面积的34.84%，出现水陆变化的区域集中于水库边缘区域；气温、降水是水体变化的驱动因素，水体面积与月平均气温、月降水量呈负相关关系。研究结果表明，以GEE云平台为基础的连续时间序列、大范围水体动态变化监测存在可行性。

关键词：水体面积；小浪底水库；时空变化；GEE；驱动因素
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）03-0072-04

Spatio-temporal Change Characteristics and Driving Factor Analysis of Xiaolangdi Reservoir

YAN Geding[1], JING Haitao[1], WANG Lei[1]
(1. School of Surveying and Mapping and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Taking Sentinel-2 remote sensing images from 2018 to 2021 as data source, we used Google Earth Engine (GEE) cloud platform to study the spatio-temporal changes of monthly-scale water body area of Xiaolangdi Reservoir. The results show that from 2018 to 2021 the inter-month change of water body area of Xiaolangdi Reservoir fluctuates greatly, and each year shows a trend of first decreasing and then increasing. The spatio-temporal change shows a significant seasonal change pattern, with flood control reducing the reservoir capacity in summer and water storage increasing the reservoir capacity in winter to ensure production and living water. There are about 85.29 km^2 of permanent water bodies in Xiaolangdi Reservoir, accounting for 34.84%. Temperature and precipitation are the driving factors of water body change, and the water area is negatively correlated with monthly average temperature and precipitation. The results of study indicate the feasibility of continuous time series and largescale monitoring of dynamic changes of water bodies based on the GEE cloud platform.

Key words: water area, Xiaolangdi Reservoir, spatio-temporal change, GEE, driving force

水库是调节水资源时空分布的重要措施，承担着防洪、发电、航运、供水、环境保护等多方面的任务[1-2]。作为衡量水库储水量的一个重要指标，水体面积发生不同程度的扩张或萎缩可能会导致一系列生态环境问题，进而影响经济社会发展[3]，因此监测水库面积尤为重要。遥感技术可快速高效地提取水域和监测水体表面变化，具有宏观、实时和低成本的特点，已被逐渐应用于水体识别与监测领域[4-5]。目前，地表水提取和动态监测的主要方法包括单波段法、水体指数法、谱间关系法、阈值法等[6]，曹荣龙[7]等利用Landsat TM影像构造了修订型归一化水体指数，用于检测密云水库水面面积变化；周晗[8]等基于Sentinel-1/2卫星影像，对比分析了单波段法、水体指数法和监督分类法，得出归一化水体指数（NDWI）法分类精度最高的结论；陆天启[9]等研究松涛水库面积的时序变化发现，水体面积呈先降后升的趋势，并分析了气候因素对水体面积变化的影响。然而，对水库进行长时序以及月度细致时间序列的研究却较少。Google Earth Engine（GEE）是Google提供的对全球尺度地球科学资料（卫星数据）进行在线可视化计算和分析的云平台，可为长时序研究提供解决方案。用户访问并使用云平台可快速、批量处理数量“巨大”的影像，极大地提高了效率[10-11]。本文通过GEE云平台获取Sentinel-2影像并提取小浪底水域面积，分析了水体面积变化的时空特征，进而讨论了影响水体面积变化的驱动力。

收稿日期：2022-08-12。
项目来源：河南省重点研发与推广专项（科技攻关）资助项目（212102310432）。
第一作者简介：闫戈丁（1999—），硕士研究生，主要研究方向为生态环境遥感，E-mail：212104020020@home.hpu.edu.cn。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

小浪底水库位于黄河中游豫、晋两省交界处，库区范围为三门峡水库大坝至小浪底大坝之间的水域范围。水库集水区处于峡谷地段，地势西北高东南低。库区属温带大陆性季风气候，降水量年际变化较大，主要集中于夏、秋两季，冬季雨量稀少。

1.2　数据来源

本文采用GEE平台提供ALOS DSM: Global 30 m数据集和Sentinel系列卫星。Sentinel-2具有赤道5 d重访周期和中纬度地区2~3 d的高重复频率。每颗Sentinel-2卫星都有一个MSI传感器，包括13个光谱波段，波长范围为440~2 200 nm，覆盖从可见光到短波红外，具有10~60 m的3种高空间分辨率[12]。本文采用Sentinel-2 L1C产品10 m、20 m处的两个波段（B3、B11），共选取2018-01-01—2021-12-31的574景遥感影像。为探究气候因素对小浪底水库水体面积变化的影响，本文采用中国1 km分辨率逐月近地表平均气温数据集与中国1 km分辨率逐月降水量数据集，数据来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）[13]。

2　研究方法

2.1　水体指数法

Mcfeeters S K[14]提出NDWI用于水体提取。NDWI利用绿光波段最大化水体的反射率与近红外波段最小化水体反射率的特点，有效提高了水体与非水体像元间的光谱差异；但当研究区域中有城镇时会导致水体提取不精确，误将建筑识别为水体。然而，MNDWI能很大程度地解决该问题[15]，降低建筑物对水体提取的影响，还能区分水体与阴影。MNDWI是目前使用最广泛的水体提取方法之一。本文采用MNDWI从Sentinel-2影像中提取小浪底水库的水域面积，计算公式为：

$$\mathrm{MNDWI}=\frac{\mathrm{Green}-\mathrm{MIR}}{\mathrm{Green}+\mathrm{MIR}}$$

式中，Green、MIR分别为B3、B11波段。

使用水体指数方法的关键在于分割阈值的选择，通常选择0作为阈值来分离水体但不一定是最佳分割。单张影像可反复调试选出最佳阈值，但对于大量时间序列影像的阈值分割，该方式费时费力，因此本文选用Otsu算法计算提取水体的自适应阈值[16]。Otsu算法的基本原理是根据图像的灰度特性将图像分成背景和目标两部分，再通过计算背景和目标之间的类间方差选取阈值，该阈值可将前景和背景最大程度地区分开[17]。

2.2　基于像元的水淹频率

水淹频率对于监测洪水和地表水体的变化趋势具有重要意义，水淹频率大的地区水陆交替频繁；反之，水陆交替发生较少。水淹频率是指每个像元在一定时间内被识别为水体的次数占总观测次数的比例，可反映水体空间分布的变化特征[18]。本文以像元NDWI值是否大于所计算的分割阈值为水体、非水体的判别标准。

2.3　基于GEE的库区水域面积提取

基于GEE提取水体的具体步骤为：①筛选影像并去云处理，在GEE云平台上选取Sentinel-2 L1C产品（Sentinel-2嵌入了具有云掩码信息的位掩码频段，通过该频段进行去云处理），利用Filter方法筛选出2018—2021年小浪底库区的遥感影像，对影像进行去云处理，获取云量小于20%的像素点；②合成月度数据并计算MNDWI，逐月对遥感影像的每个像元取均值，得到月度合成影像，选择B3和B11波段逐像元计算MNDWI；③计算分割阈值和水淹频率，通过Otsu算法计算MNDWI影像的分割阈值，像元值大于阈值的为水体，否则为非水体，利用阈值逐一计算每个像元，像元值大于阈值的定义为1，反之定义为0；④提取水体并计算水体面积，利用分割阈值识别水体与非水体，但有少量山体阴影被识别为水体，利用ALOS卫星的DEM数据对提取的水体进行过滤，剔除坡度大于25°、高程大于300 m的区域，得到较精准的水体分类；⑤统计水体像元总个数，计算水体面积。

3　研究结果与分析

3.1　小浪底水库水体时间变化

2018—2021年月尺度水域面积见图1，可以看出，最大水域面积（234.51 km^2）出现在2018年1月；最小水域面积（83.07 km^2）出现在2021年7月；水库水量和湖泊水量变化十分相似，受季节性影响存在枯水期和丰水期，枯水期出现在7—8月，丰水期出现在12月—次年1月；2018年、2019年水体面积呈“V”型变化，2020年水体面积变化趋于平稳，这与同年气候变化平缓相符，2021年6—7月水体面积有一个剧烈下降，这是由于此时河南多地出现罕见的强降雨，导致水库需要紧急减少库容。

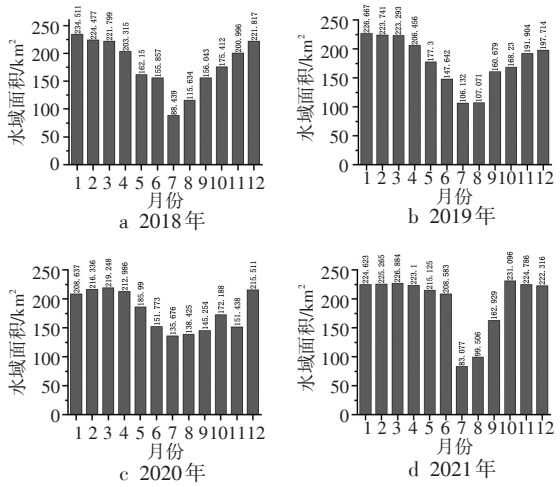


图1 小浪底水库月度水体面积变化

2018—2021年小浪底水库水体面积具有明显的季节波动和月际变化规律（图2），水体面积整年呈先降后升的变化趋势，最大水域面积出现在每年的1—3月，最小水域面积出现在7—8月，8—12月水体面积再次回升。小浪底水库水域面积变化与自然湖泊水域变化呈负相关关系，这是由于夏季多雨水库需提前降低库容来应对防洪压力，冬季少雨水库需蓄水来保证生产生活用水和灌溉。

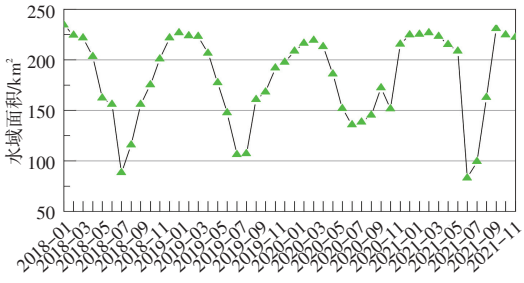


图2 2018—2021年小浪底水库水体面积变化

3.2 小浪底水库水体空间变化

2018—2021年小浪底水库水淹频率分布见图3，可以看出，小浪底水库水淹频率总体呈内高外低的分布格局，水库中心渠道水淹频率最高，边缘水淹频率较低，表明水库中心拥有永久性水体，边缘则有少数期次为水体。本文统计了不同水淹频率下的像元个数，计算得到不同水淹频率的面积及其比例（表1），可以看出，水淹频率较低的区域主要分布在石寺镇、北冶村、西沟村、石井村、大路村、下马新村、古城镇、王茅镇以及莘庄新村附近，其中石寺镇、古城镇、王茅镇和莘庄新村尤为显著，这4个区域中水淹频率为20%~80%的部分均有出现，表明该区域水陆更替频繁，是防范旱涝灾害的重点区域；小浪底水库有34.84%的区域不存在水陆交替，面积约为85.29 km²（F=100%），该区域一直存在水体，说明水库水体变化幅度较大，只有小部分区域为永久性水体，其余部分均存在水陆交替现象，其中约71.57 km²（占比29.23%）的区域属于高水淹频率区，存在居民在河道中进行耕种的现象，应劝导居民避免在该区域进行耕种活动，约66.49 km²（占比27.15%）的区域属于中等水淹频率区（20%< F ≤60%），由于水陆更替不是很频繁这些区域最容易产生松懈心理，因此需要重点监控旱涝灾害。

表1 2018—2021年水淹频率统计表

水淹频率/%	面积/km²	占比/%
(0，20]	21.50	8.78
(20，40]	11.56	4.72
(40，60]	25.048	10.23
(60，80]	29.87	12.2
(80，100]	71.57	29.23
100	85.29	34.84

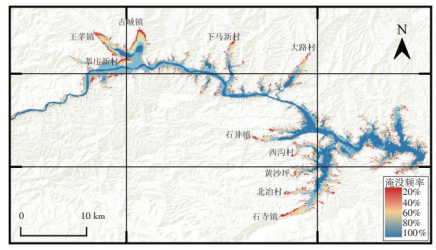


图3 2018—2021年小浪底水库淹没区域分布图

3.3 精度验证

为验证水体分类的准确性，在研究区内随机选取500个样本点进行验证，样本点由Google Earth的高分辨率影像和Sentinel-2影像目视解译生成。由水体分类图的样本数据和目视解译参考数据组成的混淆矩阵用于证明分类准确性[19]。本文选取4张影像进行验证，绘制混淆矩阵，并计算总体精度（OA）和Kappa系数，以定量表示提取精度[20]。结果见表2，可以看出，小浪底区域的平均OA为97.75%，Kappa系数为0.932 5，验证了水域动态检测的可行性和有效性。

表2 水体分类精度

日期	OA	Kappa系数
2018年3月	0.98	0.97
2019年9月	0.98	0.94
2020年8月	0.98	0.94
2021年7月	0.97	0.88

3.4 水体变化驱动力分析

3.4.1 气候因素

气温和降水是可能影响水库水体面积发生变化的因素，气温变化会影响水汽的蒸发循环，降雨则会直接提供水源补充水体。本文利用2018—2020年月平均气温与水域面积进行相关性检验，结果见图4，可以看出，6—8月降水量较多，均超过80 mm；月平均气

温也在6—8月达到最大值（约25℃）。双变量Pearson检验结果显示（图5），平均气温与水域面积之间呈负相关关系（$R=-0.824$，$P<0.01$）；降水量与水域面积之间也呈负相关关系（$R=-0.865$，$P<0.01$），说明降水量与温度对水域面积变化的影响显著，随着月平均气温和降水量的增加，水体面积明显减少，这与水库夏季排洪、冬季蓄水的特点吻合。

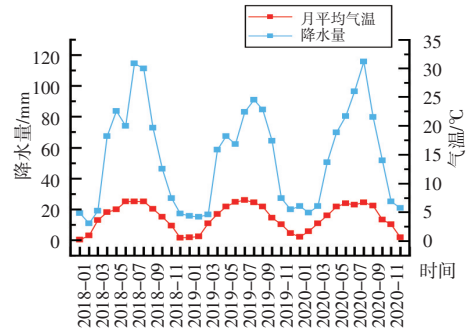


图4　降水量与月平均气温的变化

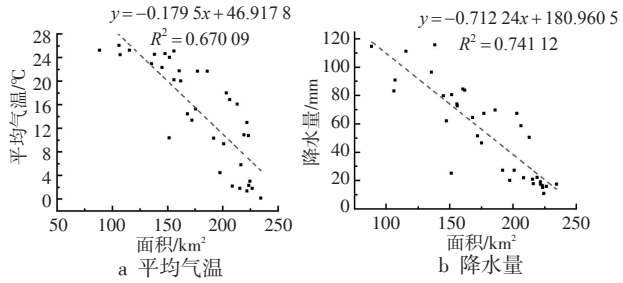


图5　2018—2021年小浪底水库平均气温和降水量变化与水体面积的相关性

3.4.2　人类活动因素

通过查阅资料以及利用Google高分辨率影像调研水库周边用地类型发现，沿水库边缘绝大多数为耕地，耕地面积的扩张导致农忙时期需要用水量增加，与之对应的是河南省农忙季节冬小麦6月下旬—7月上旬；随着库区范围内城镇的发展，建设用地不断扩张加剧了对区域水域面积的占用，同时生产生活需要用水量也在不断加大。通过调查研究还发现，部分工业加工厂设立在库区较近范围内，存在水体污染的隐患。耕地和建设用地的不断扩张导致了一系列问题，如陈村乡、坡头乡、段村乡、南村乡等位于小浪底水库周边的村点出现了崩塌、滑坡、地面塌陷等现象，为今后库区治理工作提供了参考。

4　结　语

本文基于GEE云平台，采用水体指数法对小浪底水库进行水体提取，再利用Sentinel卫星的高重访周期获得了月尺度水体面积数据，结合气候因素，分别从时间和水淹频率方面分析了水体的变化趋势。

1）利用GEE云平台可在线处理经过预处理的遥感数据产品，极大地提高了研究效率，节省了储存空间，且在处理速度上具有量级的提升，可为后续进行大尺度海量数据处理提供有力支撑。

2）小浪底水库水域面积月际波动较大，最大水域面积约为210~230 km²，出现在每年冬季；最小水域面积约为90~100 km²，出现在每年夏季，具有明显的季节性变化特点。水库中央区域水体稳定、边缘区域变化幅度较大，仅有34.84%的水体不存在水陆交替变化。研究库区水淹频率并绘制水淹频率图可为不同区域旱涝防控提供合理参考。

3）水体面积的变化与月平均气温和平均降雨量有显著关系，月平均气温和降水量增加，水体面积减少。小浪底水库区域的降水主要集中在6—9月，形成了7—8月夏汛和9—10月秋汛，水库为保持警戒水位将加大排洪；汛期结束后，为应对冬季枯水期的生产生活和灌溉用水，水库进入蓄水期，水体面积明显增大。

参考文献

[1] 林秋奇，韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报，2001，21(6):1 034-1 040

[2] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学，2010，22(2):151-160

[3] Dai J，Mei Y，Chang C C. Stream，Lake，and Reservoir Management[J]. Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation，2017，89(10):1 517-1 541

[4] 王海波，马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J]. 遥感技术与应用，2009，24(5):674-684

[5] 刘力萌，陈兆宁，季民. 基于Sentinel-2卫星数据的洞庭湖面积变化监测[J]. 地理空间信息，2022，20(7):57-60

[6] 王大钊，王思梦，黄昌. Sentinel-2和Landsat8影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感，2019，31(3):157-165

[7] 曹荣龙，李存军，刘良云，等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学，2008，33(2):158-160

[8] 周晗，叶虎平，魏显虎，等. 基于Sentinel-1/2的水体提取方法对比研究:以斯里兰卡小型水体为例[J]. 中国科学院大学学报，2019，36(6):794-802

[9] 陆天启，邵长高，任旭光，等. 基于GEE平台的1990802学报年松涛水库水体面积时空变化[J]. 科学技术与工程，2021，21(27):11 472-11 479

[10] 郝斌飞，韩旭军，马明国，等. Google Earth Engine在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用，2018，33(4):600-611

（下转第119页）