引文格式：沈金祥,程先锋,孙晓莉,等. 基于时序Sentinel-2的杞麓湖蓝藻水华监测[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 82-85. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.018

基于时序 Sentinel-2 的杞麓湖蓝藻水华监测

沈金祥[1,2]，程先锋[1,2]，孙晓莉[1,2]，杨佳涵[1]，邓　妍[1]，付　宇[1]，施芯燕[1]
（1. 云南国土资源职业学院国土空间信息学院，云南 昆明 652501；2. 云南省教育厅健康地质工程研究中心（培育），云南 昆明 652501）

摘　要：云南高原湖泊由于其独特的自然环境和人类活动，容易受到环境污染并引发严重的环境问题。其中，富营养化导致的蓝藻水华是一种典型的水环境问题。为探索遥感大数据在湖泊蓝藻水华监测方面的巨大潜力，选择水华状况较为显著的杞麓湖作为研究对象，利用时序Sentinel-2多光谱卫星数据，采用NDVI指数模型研究其时空演变特征。结果表明：①该湖泊蓝藻水华的季节性分布不显著，而呈现出更为明显的随机性；②蓝藻水华的变动频率较高；③在某些时段出现较大面积且显著的中度乃至重度水华。遥感大数据在以蓝藻水华为代表的水质状况监测方面能够提供精准的时空动态数据，有效弥补了传统站点监测在空间维度不足，为科学开展湖泊治理提供了数据支撑。

关键词：Sentinel-2；NDVI；蓝藻水华；杞麓湖
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0082-04

Monitoring of Cyanobacterial Bloom in Qilu Lake Based on Time-series Sentinel-2 Data

SHEN Jinxiang[1,2], CHENG Xianfeng[1,2], SUN Xiaoli[1,2], YANG Jiahan[1], DENG Yan[1], FU Yu[1], SHI Xinyan[1]
(1. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, China;
2. Engineering Center of Yunnan Education Department for Health Geological Survey & Evaluation, Kunming 652501, China)

Abstract: Due to its unique natural environment and human activities, lakes on the Yunnan Plateau are prone to environmental pollution, leading to severe environmental issues. Among them, the eutrophication-induced cyanobacterial bloom is a typical water quality problem. To explore the potential of remote sensing big data in monitoring cyanobacterial bloom in lakes, we selected Qilu Lake, where the phenomenon was particularly prominent, as the research subject, and used the time-series Sentinel-2 multi-spectral satellite data and NDVI model to study the spatio-temporal evolution characteristics. The results indicate that ①the seasonal distribution of cyanobacterial bloom in the lake is not significant, showing a more pronounced randomness. ②The frequency of cyanobacterial bloom fluctuations is high. ③During certain periods, there are large and significant occurrences of moderate to severe cyanobacterial blooms. Remote sensing big data, especially when focusing on cyanobacterial blooms as representatives of water quality conditions, can provide accurate spatio-temporal dynamic data. This approach effectively addresses the spatial limitations of traditional station monitoring and provides a data foundation for scientifically conducting lake management.

Key words: Sentinel-2, NDVI, cyanobacterial bloom, Qilu Lake

近年来快速发展的遥感对地观测技术使得地表自然资源与生态环境动态监测得到了空前的发展[1-6]。遥感湖泊监测主要包括面积与水质监测2个方面。首先，遥感能够有效监测水面面积的消长变化，以便做好防汛防旱及水资源规划[7-8]；其次，能够定量探测水域水质状况，作出相应的防范措施[9-10]。相对而言，由于遥感图像上水域较之前其他地物，具有典型的颜色与空间形态特征，较容易进行识别，较多的学者也对其自动提取方法做了很多的研究[11-13]。对于水质监测来说，较之于传统点上的调查监测，遥感在满足大范围水质监测的同时，还可以动态跟踪污染事件的发生、发展，有着常规监测不可比拟的优势。藻类的快速繁殖是引起水质恶化的主要原因，藻密度及叶绿素a浓度是反映藻类生长规模的重要水质指标。当藻密度或叶绿素a浓度达到一定水平后，引发水色发生明显改变，即爆发蓝藻水华，此时该水域已具有基本典型植被特征，较容易通过卫星遥感进行监测[14,17-19]。归一化植被指数{NDVI=($\rho_{NIR}-\rho_R$)/($\rho_{Nir}+\rho_R$)}反映植被的生产力水平，被广泛用于植被信息的监测与识别[20-21]。当水体蓝藻浓度较高时因具备显著植被特征，NDVI也能够用于在蓝藻水华的监测。

为探索遥感大数据在湖泊蓝藻水华监测方面的巨大潜力，本文选取水华状况较为明显的杞麓湖作为研究对象，利用时序哨兵2号多光谱卫星遥感数据，

项目来源：自然资源时空大数据科技创新团队项目（2021KJTD03）。
第一作者简介：沈金祥（1983—），博士，副教授，研究方向为自然资源与生态环境遥感监测应用，E-mail：1345945748@qq.com。

计算时序水华等级数据，分析以蓝藻水华为代表的水质状况时空分布演变特征，以期为相关部门科学制定管理措施提供决策依据，本研究对于建立杞麓湖蓝藻水华监测预警机制具有重要意义。

1　研究区概况

杞麓湖地理坐标为102°43′~102°49′E，24°8′~24°12′N，位于云南省玉溪市通海县坝子之中，因其位于杞山、麓山畔而得名，南距通海县城1.5 km，又名通海[22]。湖泊长轴呈东西向，湖面的高程达海拔2 000 m，是高原断层陷落湖，湖泊的长轴呈东西向。杞麓湖为典型的高原湖泊，是云南九大高原湖泊之一，湖泊最高水位是1 796 m，其水域面积是37.26 km^2，容水量是1.676亿m^3，是通海县重要的水资源，占通海水资源总量的1/2[23]。杞麓湖流域总面积为354.94 hm^2，是一个典型高原湖盆地，中部湖泊，湖周围平坝区主要分布在湖泊的西北南三面。杞麓湖流域是通海县维持社会经济发展的主体，总人口为24.09万人，占通海县全县总人口的93%，灌溉9 667 hm^2的耕地，是滇中经济区和玉溪市生态环境建设、社会经济及文化发展的重要依托和基础[23-24]。湖泊盆地内早晚温差大、四季温差小、雨热同季、干湿季分明，年平均降雨量为900 mm，年均气温为16℃，杞麓湖湖水呈黄绿色，微浑，透明度由50年代的2 m，降至80年代的0.5~1 m，pH值为8.4~8.9，而生化需氧量为1.25~3.69 mg/L，溶解氧下降，总氮0.946~2.092 mg/L，总磷0.081~0.099 mg/L，水质污染以有机污染和氮、磷污染为主。已呈现为富营养型湖泊。年日照时间为2 274 h，降水量主要集中于5-10月[2]。

2　数据与方法

2.1　遥感卫星数据

本研究中所用的Sentinel-2A遥感影像下载于哥白尼数据空间生态系统（https://dataspace.copernicus.eu/）。研究区的数据轨道号为47QRG，数据产品为2A级标准产品，该级产品已经通过了系统性的几何校正和辐射定标、大气校正。数据包括2020—2022三个年度，对云量过多的数据进行了筛选后，共选取了53期有效数据（表1）。

表1　研究区Sentinel-2数据列表

年度（期数）	成像时间（月 日）
2020年度（21期）	20200102、20200107、20200112、20200117、20200122、20200206、20200226、20200302、20200307、20200312、20200317、20200322、20200327、20200401、20200406、20200411、20200416、20200421、20200506、20200511、20200516
2021年度（10期）	20210416、20210511、20210516、20210521、20210705、20210804、20210903、20210913、20210928、20211107
2022年度（22期）	20220126、20220205、20220210、20220215、20220225、20220302、20220307、20220312、20220317、20220416、20220426、20220715、20220730、20220809、20220819、20220918、20221018、20221102、20221107、20221112、20221127、20221207

2.2　数据分析流程

对于下载的哨兵二号影像数据，在矢量化水域边界及浮游植物区域的基础上，计算水域NDVI并进行蓝藻水华分级，最后统计各个时期蓝藻水华分级面积并进行时空变化分析。整体技术流程如图1所示。

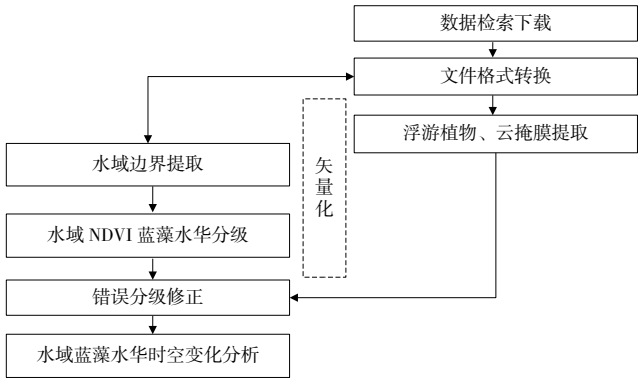


图1　杞麓湖水域监测技术流程

2.3　水域边界提取

因水域区域一方面会有云及云影的遮挡，另一方面有浮游植被覆盖，最后会有水华严重区域，这些复杂的情况导致难以通过NDWI阈值分割、面向对象图像分割等自动化方法完成水域边界的提取。因此，水域边界通过对无云或不影响水域边界判读的少云影像为底图，通过目视解译的方式进行矢量化完成。杞麓湖湖泊水面面积变化并不显著，研究中忽略细微的水面面积变化，选择最近无云影像（2022-11-02）作为底图，在ArcGIS软件平台中进行矢量化来形成湖泊水域边界。

2.4　水域蓝藻水华时空变化分析

利用Sentinel-2的近红外波段、红光波段计算NDVI栅格影像。杞麓湖与地理位置相邻的滇池具有相似的气候条件，均高频率爆发水华，参照文献[25]、[26]针对滇池的NDVI水华分级研究成果，对计算出的NDVI影像进行阈值分割，将水域蓝藻水华等级划分

为4级：NDVI<–0.1为无水华； –0.1≤NDVI<0.2为轻度水华； 0.2≤NDVI<0.4为中度水华； NDVI≥0.4为重度水华。NDVI计算与分级、分级像元的修正均通过ENVI软件波段运算进行处理。

然而，正如前所述，因水域不可避免有少量浮游植物或云、云影的干扰，使得NDVI分级结果不同程度出现错误，为此需要进行错误分级的像元进行修正。可采用目视解译的方法对少量浮游植被、云及云影覆盖区域的水面，通过ArcGIS进行矢量化，再对此区域范围的错误分级像元修正为正确的分级像元。

3 结果与分析

根据2022–11–02获取的无云影像进行矢量化处理得到湖泊边界，将35.87 km²范围的水域作为监测区域，对每个时期的影像计算NDVI并根据表1所列阈值进行蓝藻水华分级后，可以得出，在2020—2022年2 a期间，无水华现象占比最高的为2021–11–07当天的结果，占比96.77%。在2022年1月26日–3月17日期间，轻度水华均达到99%以上，其中2022–03–02，占比高达99.64%。中度水华占比最高的为2022–09–18，占比为3.88%，重度水华占比最高的为2022–07–15，占比0.75%。监测数据表明，杞麓湖以轻度水华为主，中度、重度水华现象不突出。从图2各水华分级变化曲线图可以看出：

1）杞麓湖区域蓝藻水华年度变化与月变化无明显规律性。2020年1–4月，无水华面积占有一定比例，如2020–01–02无水华占比为91.36%，2020–01–07无水华占比为89.71%，2020–01–12无水华占比为89.21%，2020–01–17无水华占比高达93.36%，最为突出。而2022年1–4月则几乎为轻度污染状况。如2020–01–22，无水华占比为53.52%，轻度水华占比为45.95%，无水华面积占比高于轻度水华，而2022–01–26的数据则反映出无水华占比很低，其中无水华占比为2.23%；2020–02–26，无水华占比为14.61%，无水华面积也有一定比例，而2022–02–25数据中发现，无水华占比为0.03%，轻度水华占比为99.61%，中度水华占比为0.25%，重度水华占比为0.11%，几乎为轻度水华。

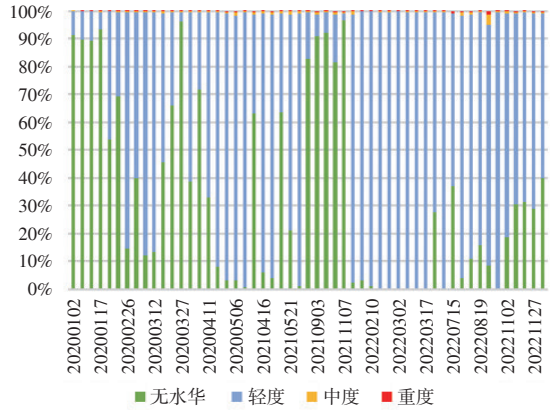


图2 蓝藻水华分级面积构成

2）蓝藻水华变动频率较快。例如，2020–01–03份可以看出，轻度水华的区域分布规模及区域变化均较为显著（图3）。2020–01–02主要为无水华现象突出，无水华占比为91.36%；2020–01–22，轻度水华现象变动频率加快，轻度水华占比由2020–01–02的8.25%变化到45.96%；2020–02–26时，主要体现为轻度水华现象，轻度水华占比为84.64%。水华分布几乎能够在几天内反复变动。

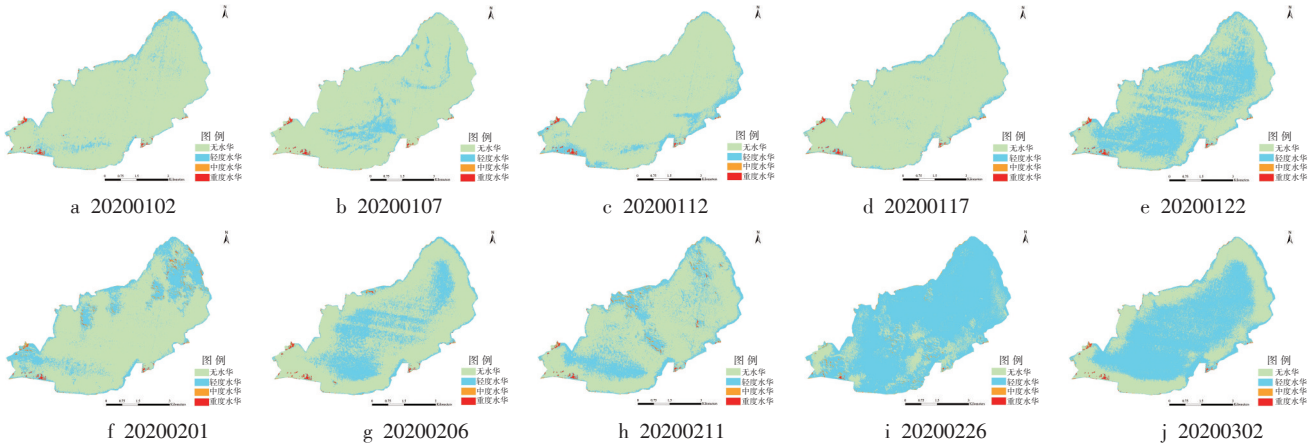
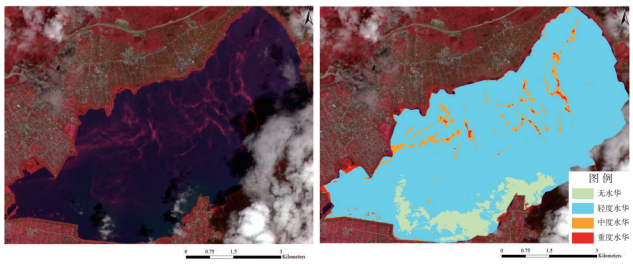


图3 2020年1—3月水华监测结果

3）一些时段出现了较大面积且较为显著的中度乃至重度水华。如2022–09–18监测结果（图4）其中相对于其他月份，中度乃至重度水华现象很明显能在图中看出。



a 10 m标准假彩色合成影像　　b 湖泊水面水华分级分布图

图4　典型水华监测结果（2022-09-18）

4 结 语

根据上述研究结果可得到以下结论：①杞麓湖的蓝藻水华现象以轻度水华为主；②杞麓湖区域蓝藻水华年度与季节性分布均不显著；③蓝藻水华变动频率较快；④3 a中该水域出现了中度及重度水华发生区域。温度及风力的作用可能是影响水华爆发的一些关键因素。在后续研究工作中可整合气象数据，深入分析气象因子对于水华时空变化的影响。

从研究手段上看，针对杞麓湖水域的研究结果表明，遥感大数据在以蓝藻水华为代表的水质状况监测方面能够取得精确的时空动态数据，有效弥补传统站点监测在空间扩展上的不足。为云南“湖泊革命”九大高原湖泊监测提供了有益探索。

参考文献

[1] 唐静秋. 浅析遥感信息技术在自然资源监测监管中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(10):38-40

[2] 李英成,薛艳丽,王广亮,等. 自然资源即时遥感监测技术体系研究[J].地理信息世界,2022,29(5):101-105

[3] 聂国梅. 遥感生态指数构建在自然生态环境监测中的应用:以滁州市为例[J]. 资源信息与工程,2022,37(6):94-97

[4] 徐伟恒,熊源,黄邵东,等. 遥感在生态环境质量监测与评价中的应用现状研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2023,43(2):195-204

[5] Wu T X, Sang S, Wang S D, et al. Remote Densing Assessment and Spatiotemporal Variations Analysis of Ecological Carrying Capacity in the Aral Sea Basin [J]. Science of the Total Environment,2020,735:139 562

[6] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, et al. Detectiing Ecological Changes with a Remote Sensing Based Ecologicalindex (RSEI) Produced Tme Series and Change Vector Analysis [J]. Remote Sensing,2019,11(20):2 345

[7] 马建威,黄诗峰,许宗男. 基于遥感的1973—2015年武汉市湖泊水域面积动态监测与分析研究[J]. 水利学报,2017,48(8):903-913

[8] 肖映辉,王俊琰,詹庆明. 2015—2020年武汉市湖泊面积变化特征和规划应对探索[J]. 测绘地理信息,2023,48(2):92-96

[9] 王思梦,秦伯强. 湖泊水质参数遥感监测研究进展[J]. 环境科学, 2023,44(3):1 228-1 243

[10] 唐中林,朱忠福,李小辉,等. 九寨沟世界自然遗产地湖泊水质参数的高光谱定量反演模型[J]. 应用与环境生物学报,2021,27(5):1 256-1 263

[11] 徐兆丰,袁宇欣,彭浩,等. 一种面向对象的城市湖泊遥感提取指数[J]. 地理空间信息,2022,20(1):85-88

[12] 王鑫蕊,晋锐,林剑,等. Landsat TM/OLI影像结合DEM提取青藏高原湖泊边界的自动算法研究[J]. 遥感技术与应用,2020,35(4):882-892

[13] 王碧晴,王珂,廖伟逸. 遥感图像分割下的青藏高原湖泊提取[J]. 遥感信息,2018,33(1):117-122

[14] 晁明灿. 巢湖叶绿素a浓度遥感反演及蓝藻水华监测研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2021

[15] 周先传,徐升. 巢湖蓝藻水华遥感监测初探[J]. 中国环境监测,2010,26(3):36-39

[16] 张娇,陈莉琼,陈晓玲. 基于FAI方法的洱海蓝藻水华遥感监测[J]. 湖泊科学,2016,28(4):718-725

[17] 唐晓先,沈明,段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布 (2000-2015年)[J]. 湖泊科学,2017,29(2):276-284

[18] 张东彦,尹勋,佘宝,等. 多源卫星遥感数据监测巢湖蓝藻水华暴发研究[J]. 红外与激光工程,2019,48(7):303-314

[19] 何云玲,熊巧利,罗贤,等. 基于NDVI滇池水华特征的时空变化研究[J]. 生态环境学报,2019,28(3):555-563

[20] 孙炼. 基于NDVI的四川省植被变化动态监测及驱动因素分析[J].西南农业学报,2023,36(5):1 082-1 089

[21] 徐洋,杨雅萍,陈晓娜,等. 蒙古高原250 m分辨率植被生长季NDVI年际时空变化数据集(2001—2021年)[J].中国科学数据(中英文网络版),2023,8(1):53-64

[22] 云南地方志,杞麓湖水蓝,蒙古调悠扬:云南九大高原湖泊:杞麓湖美丽云南第三季[EB/OL]. (2023-10-11)[2023-11-27]https://www.sohu.com/a/647100922_120506402

[23] 李子晨,陈俊旭,易琦,等. 抚仙湖、星云湖与杞麓湖营养状态演变及突变分析[J]. 中国环境监测,2020,36(3):105 -113

[24] 李雪. 杞麓湖近年来水环境质量现状、成因及对策分析[J]. 环境科学导刊,2020,39(4):5-10

[25] 胡琳,甘淑,袁希平,等. 基于GF-5的滇池蓝藻水华空间分布特征研究[J]. 激光与红外,2021,51(2):237-243

[26] 谢国清,李蒙,鲁韦坤,等. 滇池蓝藻水华光谱特征、遥感识别及暴发气象条件[J]. 湖泊科学,2010,22(3):327-336