

Analysis of Algae Bloom Change Characteristics in Xingyun Lake by GF-1 Satellite Image

Wei Zhang, Lingshan Yu, Baosen Ni, Quan Wang*, Bin Zhao, Jinli Tang, Shengping Zhao, Min Shang

Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Email: hackerquanw@qq.com, wangquan@yxnu.edu.cn, 1186848924@qq.com

Received: Jan. 28th, 2020; accepted: Feb. 7th, 2020; published: Feb. 14th, 2020

Abstract

Xingyun lake is located in Jiangchuan district, Yuxi city, Yunnan province. It is one of the nine major plateau lakes in Yunnan province. It is very necessary to monitor the high time frequency and high spatial resolution of algae bloom because of the rapid development of algae bloom. Based on the GF-1 WFV image, this study analyzed the characteristics of algae bloom changes in the Xingyun lake from February 2017 to June 2018. The main results of the study showed that the Xingyun lake had algae bloom aggregation most of the time, March-April is the germination period of algal blooms, May-December is the large-scale outbreak of algae blooms, and January-March is the decline period of the following year. The study also observed two rapid declines of algae for less than a week. In addition, there was a significant positive correlation between the algal bloom area and the Maximum NDVI and the Average NDVI, and the pollution index showed a significant positive correlation with the MEAN NDVI mean when the algal bloom area was the largest. This study provides some references for understanding the occurrence and development law of algae bloom in Xingyun lake and then improving the early warning ability.

Keywords

GaoFen-1 WFV, Xingyun Lake, Algae Bloom, Normalized Differential Vegetation Index (NDVI)

基于高分一号卫星影像分析星云湖藻类水华变化特征

张 微, 于凌珊, 倪宝森, 王 泉*, 赵 斌, 汤金丽, 赵盛萍, 尚 敏

*通讯作者。

文章引用: 张微, 于凌珊, 倪宝森, 王泉, 赵斌, 汤金丽, 赵盛萍, 尚敏. 基于高分一号卫星影像分析星云湖藻类水华变化特征[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(2): 42-50. DOI: 10.12677/ag.2020.102006

玉溪师范学院, 云南 玉溪

Email: hackerquanw@qq.com, wangquan@yxnu.edu.cn, 1186848924@qq.com

收稿日期: 2020年1月28日; 录用日期: 2020年2月7日; 发布日期: 2020年2月14日

摘要

星云湖位于云南省玉溪市江川区, 为云南九大高原湖泊之一, 属于富营养化湖泊, 由于藻类水华的发生发展变化很快, 对藻类水华开展高时间频率、高空间分辨率的监测显得非常有必要。本研究基于GF-1 WFV影像, 分析了2017年2月至2018年6月星云湖的藻类水华变化特征, 主要研究结果表明: 星云湖大部分时间都有藻类水华聚集, 3至4月是藻类水华的起始和萌发时期, 5至12月是蓝藻水华的大规模爆发期, 到下一年1至3月是衰退期。本研究还2次观测到了水华的快速衰退, 持续时间仅仅不到一个星期。此外, 藻华面积与NDVI最大值和平均值有显著的正相关, 污染指数与藻华面积最大时的NDVI均值呈显著的正相关。本研究为掌握星云湖藻类水华的发生发展规律, 进而提高预警能力提供了一定的借鉴。

关键词

高分一号WFV, 星云湖, 藻类水华, 归一化植被指数

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

星云湖位于中国云南省玉溪市江川区, 南边是杞麓湖, 北边是抚仙湖, 是由断层形成的湖泊, 总面积为 34.7 km² [1]。星云湖为云南九大高原湖泊之一, 也是一个富营养化的湖泊, 每年都会大面积爆发藻类水华[2]-[6]。藻类在湖面的聚集在空间和时间上变化都非常迅速, 可能会在几天之内大量的形成藻类水华, 藻类聚集的位置可能在一天之内都会有较大的变化, 对于星云湖的水质监测在过去 30 年得到了长足的发展, 以往当地环境监测部门每个月定期采样监测, 到后来发展到设置了自动监测站点, 在时间上更加密集的采样监测, 但是受制于监测点位较少, 目前星云湖的自动监测站只有一个, 无法掌握湖面上藻类水华在空间上的发生、发展的情况。

采用卫星可以实现高时间频率和空间上连续的监测湖泊藻类的动态变化[7]-[12]。常用于湖泊环境监测的卫星有 Landsat 系列, MODIS, 高分一号 GF-1, 环境一号 HJ-1, Sentinel 系列卫星等, 其中 MODIS 属于中分辨率成像光谱仪, 其时间分辨率较高, 但其空间分辨率较低, 对于较小湖泊造成的误差较大, 上述其余几种卫星数据的空间分辨率均在 10~30 米之间, 但是只有国产的高分一号和环境一号卫星的时间分辨率较高, 理论上可以达到 2 天[13]。本研究使用高分一号卫星数据观测星云湖藻类水华爆发情况, 观测时间段为 2017 年 2 月至 2018 年 6 月, 该时间段涵盖了星云湖水华爆发和消亡的整个周期, 提取了藻类水华大量爆发的区域相关遥感信息, 并与同时期水质监测数据做相关分析, 寻找与藻类聚集有关的水质参数因子。本研究将为研究星云湖藻类水华监测及预警提供新的手段, 为湖泊环境管理决策提供依据。

2. 研究方法

2.1. 数据来源

国产高分一号卫星具有较高时空分辨率, WFV 传感器拥有 3 个可见光波段和 1 个近红外波段, 可以有效观测湖泊藻类水华。本研究使用中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>)下载的星云湖区域 16m 分辨率的高分一号 WFV 卫星遥感影像共 32 景, 影像日期包括 2017 年 2 月 4 日到 2018 年 6 月 7 日, 对原始影像的假彩色合成图经过目视判读后, 去除天气状况不好的、湖面上空多云的影像 8 景和无藻的影像 2 景, 最后筛选出藻类水华明显的影像 22 景。由于西南地区云雨天气较多, 如果选取完全无云的影像, 将删除过多的影像, 研究数据将大大减少, 为了获得更多的可供研究的数据, 用于分析的 22 景影像中包含了部分有少量的云覆盖的影像, 见表 1。

Table 1. List of image data for GF-1 in the Xingyun Lake

表 1. 星云湖 GF-1 卫星影像数据列表

影像获取日期	传感器	影像获取日期	传感器
2017/2/4	WFV2	2017/12/21	WFV2
2017/2/16	WFV1	2017/12/25	WFV1
2017/3/22	WFV4	2017/12/29	WFV2
2017/5/1	WFV1	2018/2/16	WFV1
2017/7/26	WFV1	2018/3/9	WFV3
2017/7/27	WFV4	2018/3/13	WFV2
2017/7/30	WFV1	2018/3/25	WFV1
2017/10/28	WFV1	2018/3/29	WFV1
2017/11/5	WFV1	2018/4/23	WFV2
2017/11/10	WFV2	2018/5/21	WFV1
2017/11/14	WFV3	2018/6/7	WFV1

用于高分一号影像预处理正射校正的地形图是 V2 版本的 ASTER GDEM 数据, 其来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

污染指数和营养状态指数来自云南省生态环境厅九大高原湖泊水质监测月报的监测数据。

2.2. 数据预处理

由于水体本身为弱反射体, 其信息更容易受到大气、平台姿态以及仪器设备稳定等方面的影响, 所以在使用遥感影像前, 需对原始遥感影像进行正射校正、辐射定标、大气校正等预处理。其中, 正射校正采用 ENVI5.3.1 软件的 RPC Orthorectification Workflow 批处理工具, 基于 V2 版本的 ASTER GDEM 地形图进行校正, 辐射定标采用 Radiometric Calibration Batch 工具批处理完成, 大气校正采用 FLAASH 工具完成。

本研究使用的软件有: ENVI5.3.1、ArcGIS10.3 和 SPSS24。

2.3. 蓝藻水华区域的提取

在完成所有 GF-1 WFV 影像预处理之后, 本研究首先需要提取星云湖水面区域, 由于星云湖水体区域变化不大, 本研究基于无偏移的谷歌地球影像勾画星云湖水域边界, 由于高分一号影像经过正射校正后依然有一定的位置偏差, 为了确保裁剪后的所有高分一号影像均包含星云湖水体区域, 本研究将水域边界矢量图建立 200 米缓冲区, 然后将其用来裁剪高分一号影像, 得到包含完整湖泊水域和部分水陆交

错带的研究区域。

本研究以 GF-1 卫星遥感影像假彩色合成图中星云湖藻类水华区域为基准, 目视识别呈现粉色的区域就是水华区域, 借助归一化植被指数法(NDVI)对星云湖藻类水华区域特征信息进行提取。

归一化植被指数(NDVI) [3]是反映植被覆盖状况的一种遥感指标, 其数值的大小能指示植被覆盖变化, 是近红外与可见光通道反射率之差与之和的商, 利用 ENVI 中的波段运算工具计算 NDVI 值, 计算公式为 $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$, ρ_{NIR} 是近红外波段所得到的反射率, ρ_R 是红光波段得到的反射率。NDVI 的值在-1 和 1 之间, 像元的 NDVI 值越高, 表明像元内地物的叶绿素含量越高, 对于水体, 也就能指示藻细胞数量越多。

本研究采用经验法取值, 反复调整及试验来确定 NDVI 阈值, 经多次试验发现, NDVI 取值在 0~0.4 之间能较好的获取藻类水华信息。确定合适的 NDVI 阈值对所选图像进行阈值分割, 将归一化植被指数(NDVI)大于阈值的像元判断为藻类水华区域, 相反将小于阈值的像元判断为一般水体, 从而得到藻类水华区域和其他区域的二值图, 输出为二值图之后, 以假彩色影像粉红色区域为判断基准, 与这个二值图的藻华区域进行对比, 如果两者不一致, 就换个阈值再重新分割, 直到基本一致为止, 然后输出这个二值图为 shpfile 矢量图层, 导入 ArcGIS 里面将不属于藻华的区域删除, 尤其是水陆交错带的区域。由于云层的 NDVI 值也很高, 容易在阈值分割的时候被错误划分为藻华区域, 需要人工将其剔除, 形成最终的藻华区域矢量图层。将最终确定的矢量图层作为 ROI 导入到 ENVI 里面计算藻华区域的像元数, NDVI 最大值, 最小值, 平均值, 标准差。

2.4. 数据相关性分析

根据云南省生态环境厅九大高原湖泊水质监测月报的水污染指数、湖泊营养状态指数和通过遥感技术提取的藻类水华覆盖区域内 NDVI 参数和面积参数, 在 SPSS 软件中做皮尔逊相关分析, 找到相关性高的因子, 研究藻华覆盖区域内 NDVI 值、水污染指数、湖泊营养状态指数之间的关系及影响。在数据的选择过程中, 由于九大高原湖泊水质监测月报的数据是一个月一次, 而本研究的遥感数据有部分数据一个月有多次观测, 针对该情况, 我们的遥感数据选择该月份的平均值作为一个参数(如藻华面积平均值, NDVI 均值), 另外再选取该月份的最大值作为另一个参数(如最大 NDVI 均值, 最大爆发面积)。最大 NDVI 均值指当月藻华面积最大的影像中藻华覆盖区域的 NDVI 均值。

3. 结果与讨论

3.1. 遥观测星云湖藻类水华的变化趋势

从图 1 和图 2 可知, 2017 年第一次观测到星云湖藻类爆发的日期在 2 月 4 号, 有藻类大量聚集在北部湖湾, 南部也有少量聚集, 爆发面积达到 6.33 km², 到了 3 月下旬藻类大面积聚集, 出现第一个峰值, 观测到 3 月 22 日藻华面积为 10.06 km², 此后保持相对的稳定, 藻华面积在 8 km² 以下, 在 7 月 27 日到 7 月 30 日之间观察到一个明显的消退过程, 藻类覆盖面积从 3.22 km² 减小到 0.12 km²。此后又开始大量爆发, 10 月 28 日观测到 7.67 km² 藻华覆盖面积。此后, 11 月 5 日到 11 月 14 日之间又观测到连续的消退过程, 藻华面积从 11 月 5 日的 3.06 km² 下降到 11 月 10 日的 1.89 km², 再下降到 11 月 14 日的 0.64 km²。到 12 月, 藻华面积又达到一次高峰, 12 月 21 日观测到超过 15 km² 的藻华面积。此后, 由于气温的下降, 藻类聚集面积和爆发强度有所减小, 逐渐消亡, 2018 年 2 月 16 日观测到仅有 0.13 km² 的藻华覆盖面积。随着春天的到来, 天气逐渐转暖, 藻华覆盖面积从 3 月份开始升高, 在 2018 年的 3 月 9 日出现一个峰值, 藻类聚集面积达到 9.01 km², 与 2017 年 3 月 22 日的 10.06 km² 相差不大, 此后有所消退, 2018 年 6 月 7 日突然爆发, 观测到的蓝藻水华爆发面积已接近 16 km², 大于 2017 年同期观测到的结果。

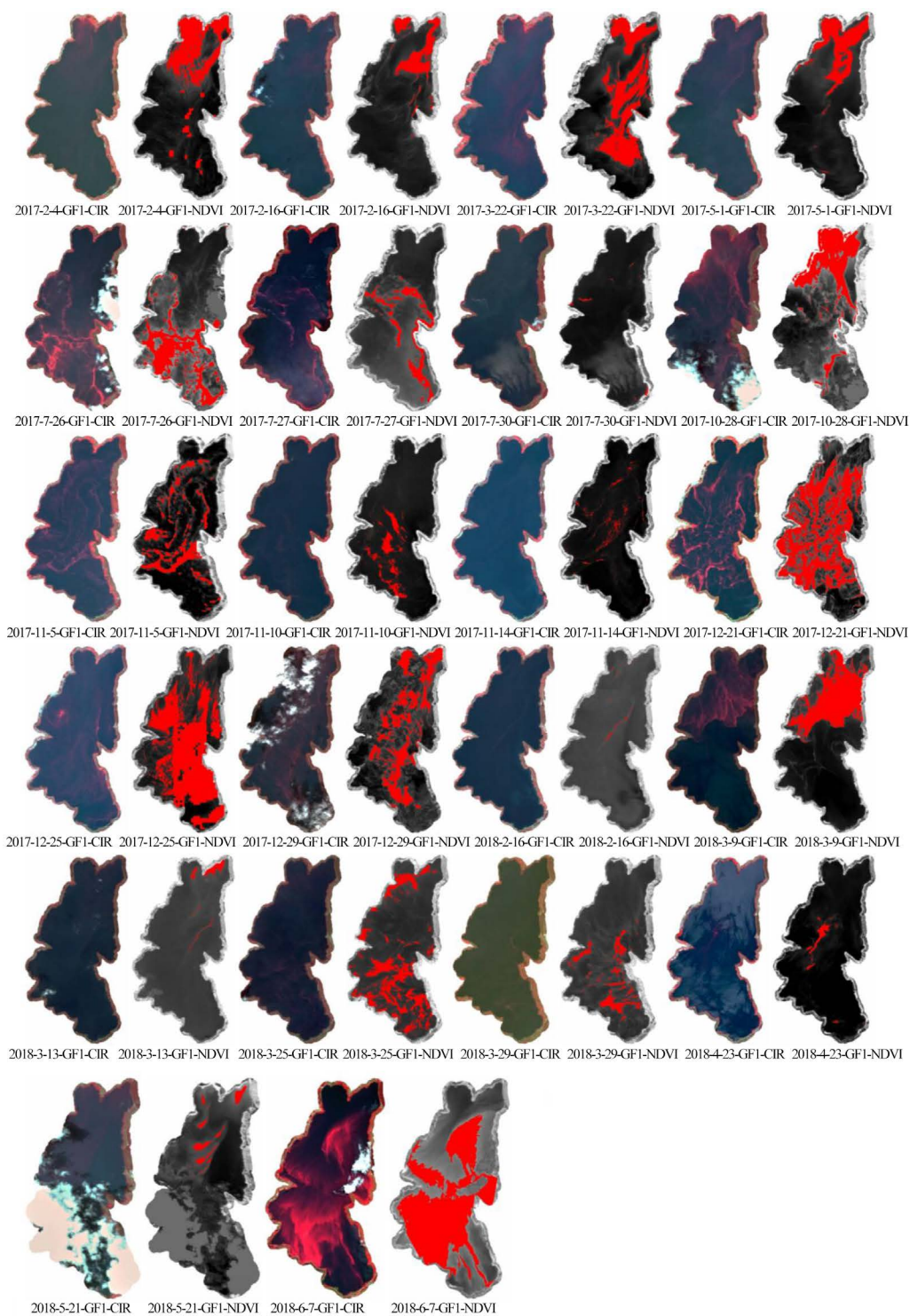


Figure 1. The GF-1 images of the Xingyun lake (the image marked CIR is a pseudo-color gaussian stretch enhancement of the lake after atmospheric correction, and the red part of the image is the area of algae bloom distribution; the map marked NDVI is a visual output of the algae bloom region (in red) of the lake extracted from the NDVI bottom map)

图 1. GF-1 卫星拍摄星云湖遥感影像(标有 CIR 的图是大气校正后假彩色高斯拉伸增强显示的星云湖,图中红色部分即为藻类水华分布区域;标有 NDVI 的图是基于 NDVI 底图提取的星云湖藻类水华区域(用红色表示)的可视化输出)

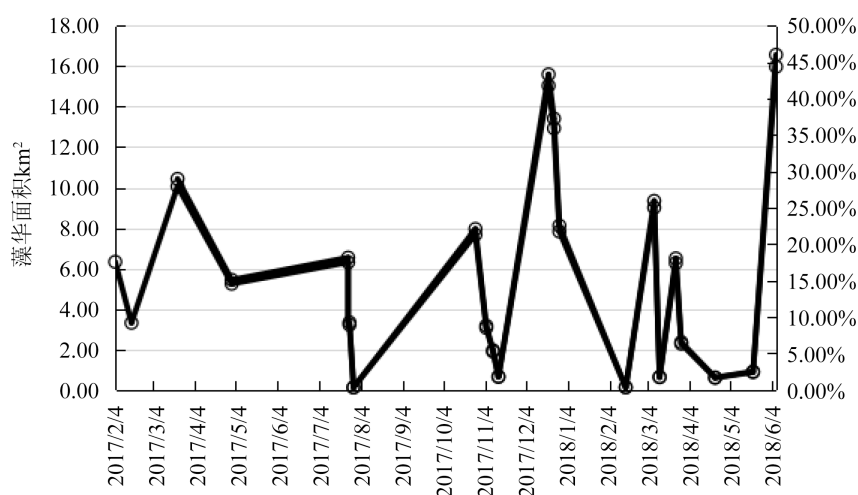


Figure 2. Changes of algae bloom area

图 2. 藻华面积时间变化图

2017年10月28日、2018年4月23日、2018年5月21日附近的藻类水华面积比较小，而从表2可知，这三个日期的遥感影像数据星云湖区域有少量云层覆盖，所以实际藻类覆盖面积可能比折线图中显示的要大。

在22次观测当中，藻类水华聚集面积低于星云湖水体总面积20%的有14次，大多发生在2017年的4月到11月和2018年的1月到5月间，高于20%的有8次，面积最大一次高达水体总面积的46.02%，发生在2018年的6月7日，其次第二个高峰发生在2017年12月21日，其爆发面积占水体总面积的43.32%。

总体而言，星云湖藻类水华主要发生在每年的2~3月以后，一直持续到年底甚至第二年年初，到了1~2月份得到短暂的消退，然后又再次爆发，高峰期主要在每年的5~6月和11~12月，而藻类水华的消退是很迅速的，可能在集中爆发期也会迅速消退然后又再次爆发。

Table 2. Statistics of algae bloom area and NDVI

表 2. 藻华爆发面积和 NDVI 统计数据

日期	藻华覆盖面积(km ²)	NDVI 统计			
		最小值	最大值	平均值	标准偏差 StdDev
2017/2/4	6.33	0.0793	0.8411	0.3596	0.1486
2017/2/16	3.32	0.0472	0.7944	0.1578	0.0727
2017/3/22	10.06	0.0771	0.7881	0.2883	0.0795
2017/5/1	5.25	0.0801	0.6503	0.2021	0.0537
2017/7/26	6.31	0.1436	0.7192	0.5212	0.1112
2017/7/27	3.22	0.2500	0.6631	0.3332	0.0817
2017/7/30	0.12	0.0080	0.4252	0.1764	0.0958
2017/10/28	7.67	0.0936	0.7856	0.4890	0.1070
2017/11/5	3.06	0.0660	0.7069	0.3602	0.1021
2017/11/10	1.89	0.0485	0.5286	0.1006	0.0320
2017/11/14	0.64	0.0810	0.2544	0.1143	0.0172

Continued

2017/12/21	15.04	0.1517	0.8403	0.4827	0.1150
2017/12/25	12.93	0.0444	0.7693	0.1926	0.1006
2017/12/29	7.83	0.1806	0.7018	0.3222	0.0765
2018/2/16	0.13	0.0000	0.0737	0.0104	0.0097
2018/3/9	9.01	0.1825	0.6985	0.3501	0.1203
2018/3/13	0.62	0.0473	0.5174	0.0156	0.0768
2018/3/25	6.27	0.0119	0.5377	0.0738	0.0373
2018/3/29	2.28	0.0368	0.6098	0.1627	0.0512
2018/4/23	0.59	0.1800	0.6614	0.2381	0.0714
2018/5/21	0.87	0.1011	0.3441	0.1990	0.0482
2018/6/7	15.97	0.0675	0.7120	0.5340	0.0990

3.2. 水质指数与遥感参数的相关分析

图 3 显示了 2017 年 2 月到 2018 年 6 月藻类覆盖区域 NDVI、湖泊污染指数和湖泊营养状态指数的变化趋势。从图 3 可知，从 2017 年 2 月开始，NDVI 呈上升的趋势，一直持续到 10 月达到峰值 0.49，之后逐渐减小，到了 2018 年 2 月达到最小值，随后又开始上升，在 2018 年 6 月再次达到峰值，这与藻华面积峰值出现的日期基本一致。

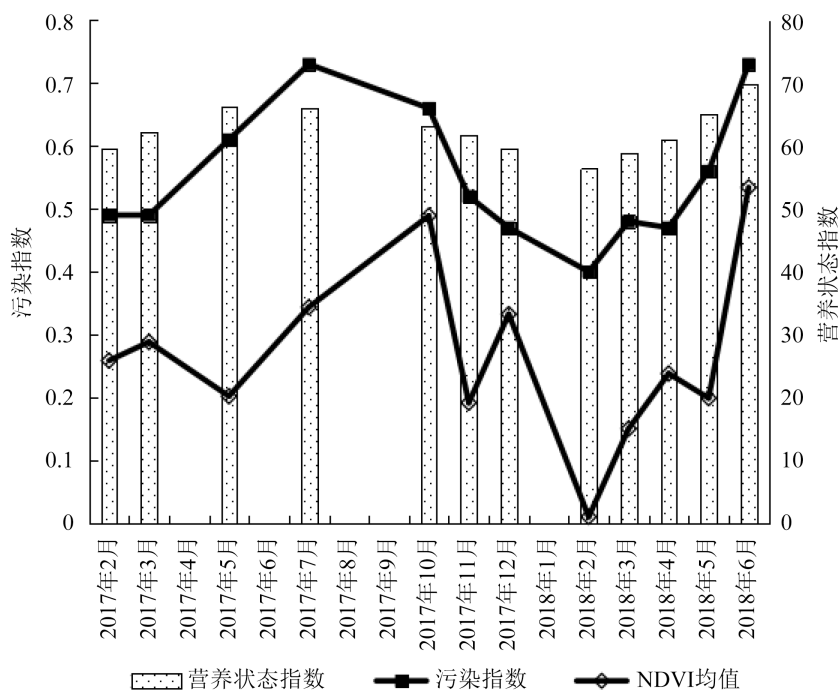


Figure 3. Pollution index, lake nutrient status index and NDVI mean in algae bloom region

图 3. 污染指数、湖泊营养状态指数和藻类覆盖区域内 NDVI 均值

从表 3 可以看出星云湖藻华面积与 NDVI 最大值以及 NDVI 平均值相关性较强，跟 NDVI 最小值基本无关。从表 4 可以看出污染指数与 NDVI 均值和最大 NDVI 均值相关性较强，跟藻华的爆发面积相关

性较差。营养状态指数与 NDVI 均值的相关性较强, 跟其它指标相关性不显著。

Table 3. Pearson correlation analysis between cyanobacteria bloom area and NDVI (N = 22)

表 3. 藻华面积与 NDVI 之间的皮尔逊相关分析(N = 22)

	NDVI 最小值	NDVI 最大值	NDVI 平均值
藻华面积	0.191	0.646**	0.655**

** . 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

Table 4. Pearson correlation analysis between water quality index and remote sensing index (N = 12)

表 4. 水污染指数与遥感指数之间的皮尔逊相关分析(N = 12)

	最大 NDVI 均值	NDVI 均值	面积平均值	最大爆发面积
污染指数	0.644*	0.743**	0.385	0.342
营养状态指数	0.45	0.652*	0.42	0.309

** . 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

4. 结论

本研究使用高分一号卫星 WFV 传感器的数据, 基于 NDVI 阈值分割与人工识别相结合, 获取 2017 年 2 月至 2018 年 6 月间星云湖藻类水华分布的区域, 对其藻华发生发展的时空变化特征做了分析, 并与水质参数做相关分析, 主要得到以下结论:

1) 从 2017 年 2 月到 2018 年 6 月星云湖大部分时间都有藻类水华聚集, 且具有不确定性、不间断性、长期性, 藻类水华的爆发往往会持续发生到下一年; 3 至 4 月是藻类水华的起始和萌发时期, 5 至 12 月是蓝藻水华的大规模爆发期, 到下一年 1 至 3 月是衰退期。

2) 藻华面积与 NDVI 最大值和平均值有显著的正相关, 污染指数与藻华面积最大时的 NDVI 均值呈显著的正相关。

基金项目

云南省地方本科高校(部分)基础研究联合专项项目(编号 2017FH001-100, 2018FH001-067, 2018FD094, 2017FD161)和云南省教育科学规划项目(编号 GJZ171813)联合资助。

参考文献

- [1] 郑田甜, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南星云湖水质变化及其人文因素驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 79-90.
- [2] 冯梅. 星云湖水质评价及富营养成因分析[J]. 环境科学导刊, 2005, 24(s2): 96-99.
- [3] 刘园园. 云南星云湖和程海硅藻群落响应环境变化的长期模式及其异同[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
- [4] 刘园园, 陈光杰, 施海彬, 等. 星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3063-3073.
- [5] 大久保贤治, 熊谷道夫, 坂本充, 等. 两个相连湖泊的微生态系统——云南高原湖泊中浅水的星云湖和深水的抚仙湖研究[J]. 云南地理环境研究, 2002, 14(2): 10-19.
- [6] 张洁, 张志. 基于 modis 数据的云南抚仙湖星云湖水水质污染遥感调查方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 92-96.
- [7] Huang, C.C., Wang, X.L., Yang, H., *et al.* (2014) Satellite Data Regarding the Eutrophication Response to Human Activities in the Plateau Lake Dianchi in China from 1974 to 2009. *Science of the Total Environment*, **485-486**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.031>
- [8] Sheng, H., Liu, H., Wang, C.Y., *et al.* (2012) Analysis of Cyanobacteria Bloom in the Waihai Part of Dianchi Lake,

- China. *Ecological Informatics*, **10**, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.03.007>
- [9] Hu, C.M., Lee, Z.P., Ma, R.H., *et al.* (2010) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Observations of Cyanobacteria Blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **115**, 303-306. <https://doi.org/10.1029/2009JC005511>
- [10] Ma, R.-H., Kong, F.-X., Duan, H.-T., *et al.* (2008) Spatio-Temporal Distribution of Cyanobacteria Blooms Based on Satellite Imageries in Lake Taihu, China. *Journal of Lake Sciences*, **20**, 687-694. <https://doi.org/10.18307/2008.0605>
- [11] Song, K.S., Li, L., Tedesco, L.P., *et al.* (2013) Remote Estimation of Chlorophyll-a in Turbid Inland Waters: Three-Band Model versus GA-PLS Model. *Remote Sensing of Environment*, **136**, 342-357. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.017>
- [12] Zhang, Y.C., Ma, R.H., Duan, H.T., *et al.* (2016) Satellite Analysis to Identify Changes and Drivers of CyanoHABs Dynamics in Lake Taihu. *Water Science & Technology Water Supply*, **16**, 1451-1466. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.074>
- [13] Christopherson, J.B., Chandra, S.N.R. and Quanbeck, J.Q. (2019) 2019 Joint Agency Commercial Imagery Evaluation—Land Remote Sensing Satellite Compendium. U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/cir1455>