

文章编号: 1672-8785(2023)03-0036-06

基于多源卫星数据的淀山湖 富营养化时空分布研究

刘 君¹ 戚浩强¹ 黄 奔¹ 董 蕾^{2,3*}

(1. 上海市水文总站, 上海 200232;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 准确监测蓝藻水华是湖泊富营养化研究的基础, 可为水环境部门的管理和决策提供依据。以淀山湖为研究对象, 利用 Sentinel-2/MSI、Landsat-8/OLI 两种影像数据, 并通过改进的浮游藻类指数(Floating Algae Index, FAI)监测了 2019~2021 年共 21 幅淀山湖区域影像的水华情况, 然后在此基础上分析了淀山湖富营养化的分布规律。结果表明: (1)淀山湖连续三年都有蓝藻水华出现, 存在富营养化情况; (2)每年的 6~9 月份是蓝藻水华的高发期, 湖体富营养化发生的面积较大、频率较高, 2020 年 9 月和 2021 年 8 月爆发水华面积超过 20 km²; (3)水华爆发速度较快, 持续时间较短。

关键词: 淀山湖; 蓝藻水华; 富营养化; Sentinel-2; Landsat-8; 时空分布

中图分类号: X524; X832; X87 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.03.006

Research on Spatiotemporal Distribution of Eutrophication in Dianshan Lake Based on Multi-Source Satellite Data

LIU Jun¹, QI Hao-qiang¹, HUANG Ben¹, DONG Lei^{2,3*}

(1. Shanghai Hydrology Administration, Shanghai 200232, China;

2. Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Accurate monitoring of cyanobacterial blooms is the basis of lake eutrophication research, which can provide a basis for the management and decision-making of water environment departments. In this paper, Dianshan Lake is chosen as the research object, Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI image data are used to monitor a total of 21 algal bloom areas in Dianshan Lake from 2019 to 2021 through the improved floating algae index (FAI). The distribution of eutrophication in Dianshan Lake is also analyzed. The results show that cya-

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 上海市水务局科研项目(沪水科 2021-10); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项项目(CX-363)

作者简介: 刘君(1984-), 男, 上海人, 本科, 主要从事水质检测与分析方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: dl9999dong@163.com

nobacteria blooms and eutrophication have appeared in Dianshan Lake for three consecutive years. The high incidence period of cyanobacteria blooms in this lake is from June to September each year. The area of eutrophication is large and the frequency is high. In September 2020 and August 2021, the bloom area exceeds 20 km². The blooms burst quickly and last for a short time.

Key words: Dianshan Lake; cyanobacterial blooms; eutrophication; Sentinel-2; Landsat-8; spatial-temporal distribution

0 引言

淡水水体是环境必需的可再生资源, 存在于湖泊、河流、地下水中, 对人类的生产生活非常重要。近些年来, 受经济以及一系列人类活动的影响, 湖泊中的氮磷元素迅速增长, 富营养化加剧, 水体质量下降, 部分功能丧失^[1]。其中, 湖泊富营养化是持续引起全球关注并且极具挑战性的主要环境问题之一^[2]。富营养化是水体中营养物质过度富集, 导致有机物(特别是藻类)加速产生的现象^[3]。富营养化造成水质恶化、生物多样性丧失、生态系统失衡, 严重影响周边人类的饮用水安全^[4]。因此, 开展水体的富营养化研究以及蓝藻水华的监测活动至关重要。

准确监测水华是湖泊富营养化研究的基础。水体中水华的群落结构在一定程度上可以反映水体富营养化的情况^[5]。传统的水体富营养化监测大多采用人工采样的方法, 在实验室内实现藻类数量的估计, 进而监测水体的富营养化水平^[1]。这种方法精度较高, 可以很好地应用于面积较小且空间差异不大的水体区域。但是对于大面积的水体, 传统方法费时费力, 不能得到面源信息, 难以进行空间和时间上连续的观测。近几十年来, 遥感事业的高速发展为水环境监测提供了新的选择。由于具有快速、实时、大范围的优势, 遥感数据覆盖范围广且监测周期短, 能够实现空间和时间上的连续观测, 已经得到了广泛应用^[6]。通过利用卫星遥感监测蓝藻水华来指示当前湖泊水体的富营养化状况, 可以为潜在的藻华预警提供科学依据^[7]。

本文基于 2019~2021 年的 Sentinel-2/MSI 和 Landsat-8/OLI 卫星影像数据, 采用 FAI 识别提取淀山湖的蓝藻水华信息, 并分析蓝藻水华的时空分布规律, 旨在为上海市水环境治理提供一些科学数据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

淀山湖(30°59' N~31°16' N, 120°53' E~121°17' E)位于江苏省昆山市与上海市青浦区的交界处, 是上海最大的淡水湖泊, 水域面积接近 60 km²。淀山湖上游承接太湖吴江地区来水, 下泄入黄浦江, 提供了上海市民的生命之水。其水质的好坏直接影响到上海市民的饮用水质量。20 世纪 90 年代, 淀山湖是上海市民的游泳场。随着工业农业迅速发展, 污水不断排入, 磷指标不断升高, 淀山湖呈现出富营养化状态。此后每年均有蓝藻水华现象发生。

1.2 研究数据

本文主要采用的数据是 Sentinel-2/MSI 影像数据。L1C 级数据已经过正射校正、大气表观反射率处理等操作, 再经过简单处理便可得到 L2A 级数据。L2A 级数据已经完成了大气下垫面反射率校正等操作, 是经过辐射校正和大气精校正的大气底层反射率数据。该数据将波段保留为 10 个, 经 Sen2Cor 大气校正后已消除了大部分的大气影响。数据精度得到改善, 基本满足本研究的需求。另外还可根据自身需求利用 SNAP 软件将波段数据重采样至 10 m、20 m 或者 60 m。本文将数据重采样成 10 m 的分辨率。表 1 列出了 Sentinel-2/MSI 的技术参数。

表 1 Sentinel-2/MSI 的技术参数

波段	类型	Sentinel-2A		Sentinel-2B		分辨率/m
		中心波长/nm	波段宽度/nm	中心波长/nm	波段宽度/nm	
1	超蓝(沿海气溶胶)	443.9	20	442.3	20	60
2	蓝光波段	496.6	65	492.1	65	10
3	绿光波段	560	35	559	35	10
4	红光波段	664.5	30	665	30	10
5	植被红边波段	703.9	15	703.8	15	20
6	植被红边波段	740.2	15	739.1	15	20
7	植被红边波段	782.5	20	779.7	20	20
8	近红外波段	835.1	115	833	115	10
8a	近红外波段	864.8	20	864	20	20
9	水蒸气波段	945	20	943.2	20	60
10	短波红外波段	1373.5	30	1376.9	30	60
11	短波红外波段	1613.7	90	1610.4	90	20
12	短波红外波段	2202.4	180	2185.7	180	20

表 2 Landsat8/OLI 的技术参数

波段	类型	波长/ μm	分辨率/m
1	蓝光波段	0.433~0.453	30
2	蓝绿光波段	0.45~0.515	30
3	绿光波段	0.525~0.6	30
4	红光波段	0.63~0.68	30
5	近红外波段	0.845~0.885	30
6	短波近红外波段	1.56~1.66	30
7	短波近红外波段	2.1~2.3	30
8	微米全色波段	0.5~0.68	15
9	短波红外波段	1.36~1.39	30

表 3 时相分布表(单位为幅)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2019 年	1	—	—	—	1	1	1	—	—	—	1	—
2020 年	—	1	—	1	1	—	—	2	2	—	1	—
2021 年	—	1	—	—	1	1	1	1	—	—	1	—

此外,采用部分 Landsat-8 影像作为补充。Landsat-8 卫星上搭载的 OLI 陆地成像仪共有 11 个波段,其光谱特性和 Landsat-7 基本一致。其中,全色波段的空间分辨率为 15 m,剩余波段的空间分辨率均为 30 m。卫星成像幅宽为 185 km $\times$ 185 km,每 16 天可过境一次。表 2 列出了 Landsat 8/OLI 的技术参数。

选择 2019~2021 三年的 Sentinel-2 影像和 Landsat-8 影像作为数据源(共 21 幅)。表 3 为所用数据的时相分布表。

1.3 研究方法

采用水体指数法对研究区域的河道进行水体提取。在 20℃ 以上水温、水体 pH 值偏高、光照度强且时间久的条件下,蓝藻形成气囊浮出水面并且迅速繁殖,产生蓝藻水华,改变了水体在红光、近红外以及短波红外波段的光谱特征。通过光谱仪器感知水体表面的光谱反射率,从而达到识别蓝藻水华的目的^[8]。本次反演采用改进后的 FAI 指数。与 NDVI、RVI、EVI 等方法相比,FAI 对环境条件变化的敏感性更低,其结果具有很好的稳定性。该方法还

可利用近红外波段对复杂大气环境进行校正, 消除部分大气、薄云等的影响, 是一种更为有效的蓝藻监测方法^[9]。

FAI 指数按照式(1)与式(2)进行计算:

$$FAI = \rho_{NIR} - \rho'_{NIR} \quad (1)$$

$$\rho'_{NIR} = \rho_{RED} + (\rho_{SWIR} - \rho_{RED}) \cdot \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED}} \quad (2)$$

式中, ρ_{RED} 为大气校正后红光波段的遥感反射率; ρ_{NIR} 为大气校正后近红外波段的遥感反射率; ρ_{SWIR} 为大气校正后短波红外波段的遥感反射率; λ_{RED} 为红光波段的中心波长; λ_{NIR} 为近红外波段的中心波长; λ_{SWIR} 为短波红外波段的中心波长。

从应用目的来看, 对水华爆发程度的划分至关重要。FAI 是根据藻华的光谱特征提出的, 而蓝藻水华的光谱特征与水体的光谱特征存在明显的差异。因此, 针对水体区域算得的 FAI 值与根据蓝藻水华得到的结果明显不同。这就导致了水华与非水华区域分界处的明显差异。可根据 FAI 图像的像元坡度极值来确定水华阈值。与人工目视解译相比, 该方法具有更高的可靠性。最终依据坡度阈值将蓝藻水华区分成 3 级水华, 从而确定水华发生强度的空间分布差异: (1) $FAI < -0.0037$ (一般水体); (2) $-0.0037 < FAI \leq 0.068$ (轻度富营养化); (3) $0.068 < FAI \leq 0.0853$ (中度富营养化); (4) $FAI > 0.0853$ (重度富营养化)。

2 结果与分析

2.1 淀山湖蓝藻水华发生的时空分布

采用改进的 FAI 所提取的淀山湖 2019~2021 年的蓝藻水华等级分布如图 1 所示。

2.1.1 淀山湖蓝藻水华空间分布

根据统计结果可以看出, 2019~2021 年淀山湖湖体的大部分区域都曾发生过蓝藻水华。其中, 淀山湖湖体中部发生藻华现象明显, 特别是中部偏北位置。在 2020 年 8 月 31 日、2020 年 9 月 5 日、2020 年 9 月 8 日的影像中可以看到明显的水华发生区域。另外, 淀

山湖的南部位置也较易发生水华。2019 年 6 月、7 月以及 2020 年 9 月, 湖体的西南位置发生了小型水华现象。2021 年 8 月 26 日, 湖体的南部和东部位置发生了大型水华现象。

2.1.2 淀山湖蓝藻水华时间分布

在 2019~2021 三年的年际变化中, 2020 年爆发过比较严重的藻华。特别是 2020 年 9 月 5 日, 出现了大面积的重度水华; 2021 年发生的多为轻度水华。通过逐月观察结果图片可以看出, 每年的 6 月、7 月、8 月、9 月都曾发生过蓝藻水华, 而其他月份则基本没有。

2.2 淀山湖蓝藻水华发生规模

根据监测结果所知, 2019~2021 年蓝藻水华现象都发生过。为了更加直观地显示, 统计图像中水华区域面积较多的日期(2019 年 6 月 28 日、2019 年 7 月 23 日、2020 年 8 月 31 日、2020 年 9 月 5 日、2020 年 9 月 8 日、2021 年 8 月 26 日), 并对其水华发生面积作柱状图以显示轻度水华、中度水华和重度水华的发生范围(见图 2)。

统计结果显示, 2019 年发生蓝藻水华的湖体范围比较小, 并且大多是轻度水华; 2020 年 8 月有小范围的湖体发生了轻度水华, 9 月爆发了大范围的水华, 9 月 5 日超过 1/3 水华区域面积(8.5141 km²)发生的是重度水华, 9 月 8 日水华总体面积和重度水华面积都有所下降; 2021 年 8 月 26 日, 发生水华的面积也超过了整个湖体面积的 1/3。

3 结束语

以淀山湖为研究区域, 利用 Sentinel-2/MSI 数据和 Landsat-8/OLI 数据开展了蓝藻水华的时空分布监测, 获得了淀山湖 2019~2021 年相应日期影像的 FAI 结果图。结果显示, 在这三年中, 淀山湖每年都曾发生过蓝藻水华, 其中 2020 年发生过非常严重的蓝藻水华现象; 每年的 6~9 月份是蓝藻水华的高发期, 发生水华的面积较大、频率较高; 根据 2020 年 8~9 月份的研究结果推测, 水华爆发速度较快, 持续时间较短。

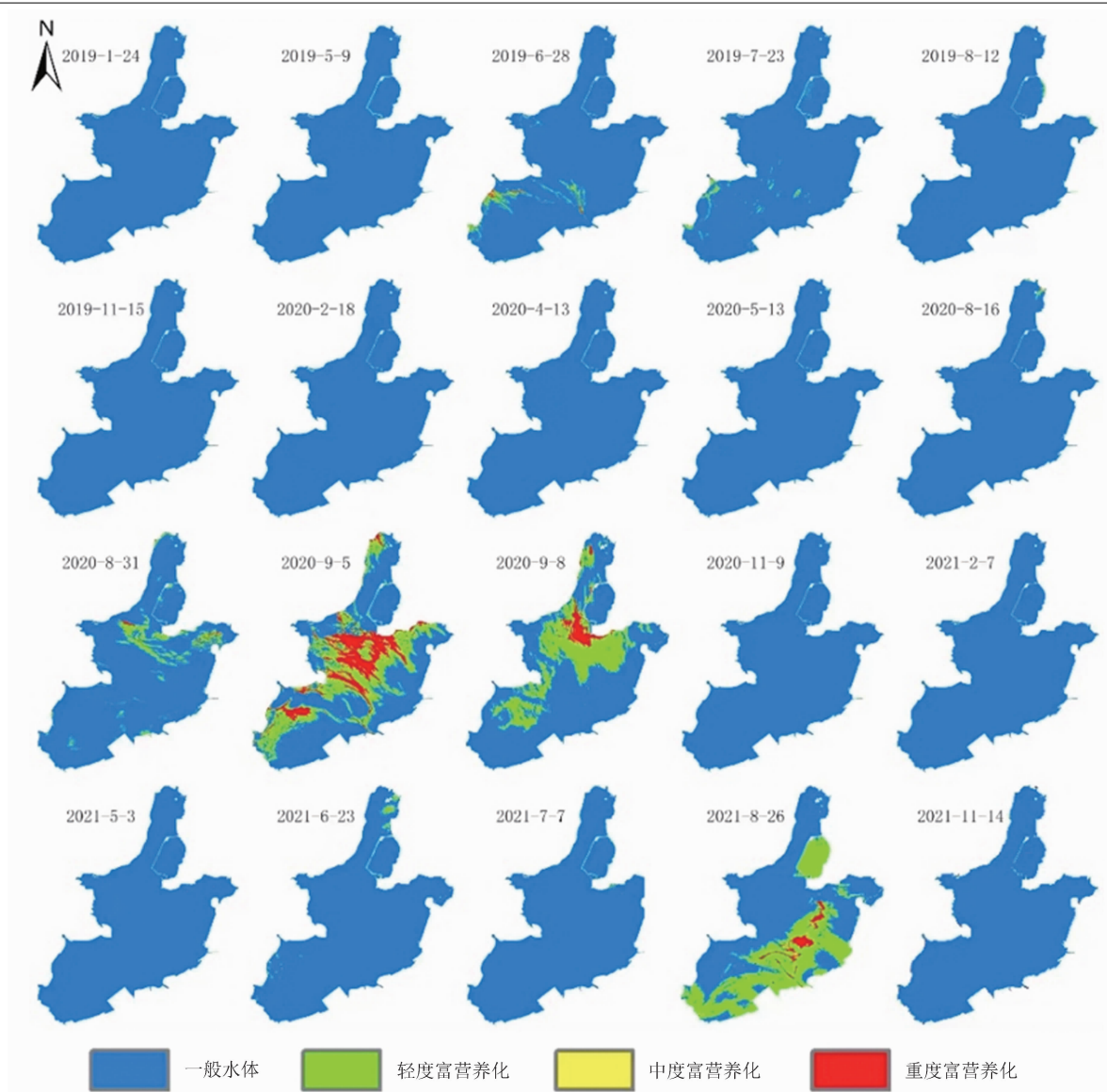


图 1 蓝藻水华分布图

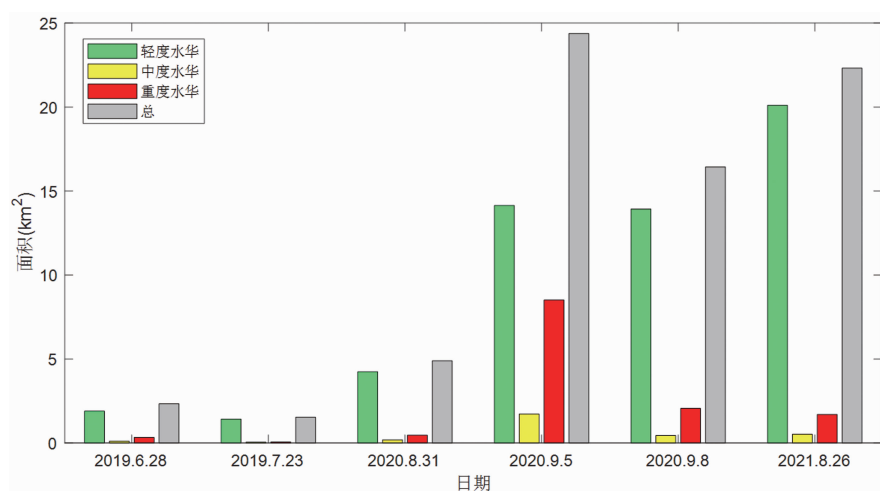


图 2 水华发生面积

本文分析了淀山水华发生的大体规律, 研究结果为水华的发生和预警预报提供了统计基础, 也为上海市水环境治理提供了一些科学数据支持。但是研究也存在一些需要改进的部分, 具体如下: (1) 增加研究日期范围。本文仅选用了2019~2021三年的影像。由于卫星过境周期、云雾等各种因素的影响, 实际可利用的影像非常少, 而对水华的时空分析需要更多时相数据的支持。(2) 增加一些衡量水体富营养化的指标。本文仅利用了改进后的FAI作为监测湖水中蓝藻水华量的标志, 未来可以增加一些水体指数或者总磷、总氮等水体指标来共同监测水体的富营养程度, 从而提高监测精度。

参考文献

- [1] 潘婷, 秦伯强, 丁侃. 湖泊富营养化机理模型研究进展 [J]. *环境监控与预警*, 2022, **14**(3): 1-6.
- [2] 杨小琛, 刘翼翔, 章航滔, 等. 针对湖泊水体富营养化的水质监测预警系统设计 [J]. *海河水利*, 2022, **41**(3): 24-26.
- [3] Wang B, Xin M, Wei Q, et al. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **136**: 394-400.
- [4] 伍名群. 黔东南州水库水体富营养化特征 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **39**(2): 73-80.
- [5] 辛思洁, 叶菁, 王义祥. 浅谈浮游藻类及其在水体富营养化研究中的应用 [J]. *化学工程与装备*, 2018, **43**(8): 272-273.
- [6] 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): 1228-1243.
- [7] Jin Y, Yu R, Zhang Z, et al. Spatiotemporal variability of phytoplankton functional groups in a shallow eutrophic lake from cold, arid regions [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(6): 1-21.
- [8] 刘海秋, 任恒奎, 牛鑫鑫, 等. 基于 Sentinel-2 遥感影像的巢湖蓝藻水华提取方法研究 [J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(1): 146-155.
- [9] 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.