

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.029.

龚铭, 王百群, 赵方凯, 等. 滇池蓝藻水华时空变化特征及环境影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 419-429.

Gong Ming, Wang Baiqun, Zhao Fangkai, et al. Spatiotemporal Variations of Cyanobacteria Blooms in Lake Dianchi and the Relationship with Environmental Factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 419-429.

# 滇池蓝藻水华时空变化特征及环境影响因素

龚 铭<sup>1</sup>, 王百群<sup>3</sup>, 赵方凯<sup>4</sup>, 于 洋<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.云南大学 生态与环境学院, 昆明 650500)

**摘 要:** [目的]明晰滇池流域水体富营养化演变特征和水体综合治理状况及其主要驱动因素, 为滇池流域水污染治理和水生态修复提供科学支撑。[方法]以滇池为研究对象, 采用 Google Earth Engine(GEE)和遥感监测分析 2002—2021 年期间滇池蓝藻水华的时空变化, 并探讨了蓝藻水华与环境因子之间的关系。[结果]2002—2021 年, 滇池蓝藻水华面积变化具有显著的年际特征, 在 2006 年、2013 年和 2016 年出现峰值, 分别为  $1.952 \times 10^7$ ,  $2.010 \times 10^7$ ,  $1.743 \times 10^7$  m<sup>2</sup>; 在 2005 年、2010 年和 2014 年出现谷值, 分别为  $1.243 \times 10^7$ ,  $1.156 \times 10^7$ ,  $1.163 \times 10^7$  m<sup>2</sup>。2016 年后蓝藻水华面积稳定波动, 整体无明显变化趋势, 2021 年面积为  $1.709 \times 10^7$  m<sup>2</sup>。在月份尺度, 蓝藻水华主要发生在 7—12 月, 8 月达到峰值, 11—2 月持续降低, 2 月达谷值。蓝藻水华与气温、降水量之间呈现正相关关系, 与风向呈现显著负相关关系 ( $p < 0.05$ ), 与风向呈现最为密切的显著相关关系 ( $p < 0.05$ ), 受滇池地形等因素影响, 4 种气象因子中风向因子重要性最高, 偏东的风向对滇池蓝藻水华覆盖率具有显著促进作用。[结论]滇池蓝藻整体保持稳定波动无显著演变趋势, 未来滇池水生态修复应深入考量风向、风速对蓝藻爆发的重要驱动作用。

**关键词:** 蓝藻水华; 滇池; Google Earth Engine

**中图分类号:** X87; X524

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)04-0419-11

## Spatiotemporal Variations of Cyanobacteria Blooms in Lake Dianchi and the Relationship with Environmental Factors

Gong Ming<sup>1</sup>, Wang Baiqun<sup>3</sup>, Zhao Fangkai<sup>4</sup>, Yu Yang<sup>1,2</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The objectives of this study are to clarify the evolution characteristics of eutrophication and the status of comprehensive treatment of water in Dianchi Lake as well as the main driving factors, so as to provide scientific support for water pollution control and ecological restoration in Dianchi Lake. [Methods] The Dianchi Lake was taken as the research object. GEE and remote sensing monitoring were used to analyze the spatiotemporal variation of cyanobacteria bloom in Dianchi Lake during 2002—2021 and the relationship between cyanobacteria bloom and environmental factors. [Results] The variation of cyanobacteria bloom area showed significant interannual characteristics during 2002—2021, and the peak values of cyanobacteria bloom area in 2006, 2013 and 2016 were  $1.952 \times 10^7$ ,  $2.010 \times 10^7$  and  $1.743 \times 10^7$  m<sup>2</sup>, respectively. The valley values of cyanobacteria bloom area in 2005, 2010 and 2014 were  $1.243 \times 10^7$  m<sup>2</sup>,  $1.156 \times 10^7$  m<sup>2</sup> and  $1.163 \times 10^7$  m<sup>2</sup>,

收稿日期: 2023-08-25

修回日期: 2023-09-25

资助项目: 中国科协优秀中青青年交流计划项目(2020~2022); 北京林业大学暑期社会实践项目(2023)

第一作者: 龚铭(2003—), 女, 四川巴中人, 梁希水保, 研究方向为流域综合治理。E-mail: kejiuguai@bjfu.edu.cn

通信作者: 于洋(1985—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与流域治理研究。E-mail: yangyu@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

respectively. After 2016, it fluctuated steadily and had no obvious change trend on the whole. In 2021, the area was  $1.709 \times 10^7 \text{ m}^2$ . At the monthly scale, the bloom of cyanobacteria mainly occurred from July to December, and reached its peak in August. It continued to decrease from November to February, and reached its trough in February. Through statistical analysis of the characteristics of cyanobacteria bloom and environmental factors in Dianchi Lake, the results showed that the cyanobacteria bloom had a positive correlation with temperature and precipitation, a significant negative correlation with wind direction ( $p < 0.05$ ), and the closest significant correlation with wind direction ( $p < 0.05$ ). Among the four meteorological factors, the wind direction was the most important, and the easterly wind direction had a significant promoting effect on the coverage of cyanobacteria bloom in Dianchi Lake. [Conclusion] The overall fluctuation of cyanobacteria in Dianchi Lake remained stable without significant evolution trend, and the important driving role of wind direction and wind speed on cyanobacteria outbreak should be further considered in the future in term of water ecological restoration of Dianchi Lake.

**Keywords:** cyanobacterial bloom; Lake Dianchi; Google Earth Engine

随工业化和城市化进程加快,气候变暖和水体富营养化加剧,全球范围内陆水体蓝藻水华爆发频率持续上升<sup>[1]</sup>,湖泊蓝藻水华处于规模扩张、频率增加和持续时间延长的发展趋势<sup>[2]</sup>。因蓝藻的部分种类能产生对人及动物有害的次生代谢产物,释放对水生生物和水生态系统有害的气味和有毒化合物,蓝藻水华形成极大地破坏生态环境平衡,对饮用水安全和人体健康构成严重威胁<sup>[3]</sup>;并且蓝藻水华还影响了水生态系统的功能,降低了水资源的利用潜力。中国淡水湖泊众多,其中太湖、巢湖、滇池均有蓝藻爆发,富营养化形势严峻。

太湖、巢湖、滇池(简称“三湖”)中,滇池作为长江上游生态安全格局的重要组成部分,其水资源、水环境和水生态安全一直是维系区域生态平衡的关键。滇池属宽浅型半封闭高原湖泊,不仅换水周期长、自净能力也差,并且水生态系统退化严重,极易发生蓝藻水华,因此,滇池水污染防治与富营养化控制一直是流域生态修复的核心和重点<sup>[4]</sup>。当前,滇池依旧存在水质不达标,水资源利用效率低和水生态系统脆弱等环境问题<sup>[5]</sup>。如何准确有效地监测蓝藻水华时空分布是研究、预防和管理蓝藻水华的关键。蓝藻水华常呈面状、大范围覆盖等分布特征,运用传统监测手段在估算蓝藻水华分布具有一定局限性,因而,现场调查无法解释蓝藻水华的空间分布。卫星遥感技术具有大范围、连续动态监测蓝藻水华的技术优势,可以有效地监测蓝藻水华分布特征<sup>[6]</sup>,其对内陆湖泊蓝藻水华监测和预警有十分关键的作用。现有研究中,对国内太湖、巢湖、滇池等湖泊蓝藻水华的遥感监测主要是通过解析遥感数据源,然后提取蓝藻光谱特征等信息实现的。张娇等<sup>[7]</sup>基于 Landsat 卫星遥感影像数据利用浮游藻指数(FAI-Floating Algae Index,

FAI)识别提取洱海蓝藻水华信息,研究表明洱海大型水华主要发生于洱海北部和中部区域,大型水华集中发生在 10 月左右;张恒敢等<sup>[8]</sup>以 MODIS 数据产品 MOD13Q1 为数据源,基于增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI),构建从 2000—2016 年太湖水域的 MODIS-EVI 时空数据集,研究获得了太湖水面 EVI 的典型空间分布模式,并证明 MODIS-EVI 经验正交函数分解方法对于获得太湖水面 EVI 的时空分布特征的可用性;Jia 等<sup>[9]</sup>采用谷歌地球引擎 MODIS 对太湖的蓝藻藻华进行长期时空监测,结果表明降低总磷含量同时恢复大型水生植物生态系统是改善与治理的必要策略。然而大量“三湖”富营养化相关研究中,关于滇池的蓝藻水华研究却相对较少,且多集中于水体或沉积物中的营养盐,以及不同湖区有机质时空分布特征等方面;何云玲等<sup>[10]</sup>基于 MODIS 数据,利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),通过分析滇池地区 NDVI 的时空分布规律得出不同等级蓝藻水华在滇池地区的分布面积和“南重北轻”的空间分布规律;梁中耀等<sup>[11]</sup>针对滇池外海 8 个常规监测点位 1999—2009 年 12 个月份的 Chla 的监测数据(滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律)探讨滇池外海晖湾中测点 Chla, TN 和 TP 与蓝藻水华爆发关系,研究表明总氮(TN)浓度总体呈上升趋势,并逐渐成为藻类的限制性营养盐,总磷(TP)浓度为劣 V 类,氨氮在氮元素形态中的主导地位正逐渐减弱;涂家伟等<sup>[12]</sup>针对滇池流域水环境展开调查研究,结果表明,“十三五”期间湖泊整体水质持续恶化趋势得到有效控制,但受年际间水情条件影响,目前滇池草海、外海整体水质类别仍然于 IV—V 类间存在明显波动。

目前在滇池蓝藻水华卫星遥感监测方面仍存在

不足,关于如何有效、长期、连续、大范围地动态监测滇池蓝藻水华并识别环境驱动因素亟待加强。通过前期的文献调研,可知采用 GEE 和遥感技术从流域尺度上监测蓝藻水华时空变化的报道相对较少。基于此,本研究拟采用 GEE 遥感云数据处理方法分析滇池流域蓝藻水华的时空变化特征,探究滇池流域水体富营养化演变特征和水体综合治理状况,为滇池流域水污染治理和水生态修复提供数据支撑。

1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,昆明市主城区南部,处于长江、红河、珠江分水岭地带,属长江流域。滇池湖泊地处 24°48′02″N,102°40′17″E。流域面积 2 920 km<sup>2</sup>,主要入湖河流 35 条,集水面积大于 100 km<sup>2</sup>的 7 条河流分别是盘龙江、宝象河、洛龙河、捞鱼河、晋宁大和、柴河和东大河。20 世纪 80 年代起,滇池流域城市化进程与人口增长迅速,水质曾达劣 V 类,水体富营养化严重,一度沦为中国污染最严重的内陆淡水湖泊之一。自“九五”以来,滇池连续被纳入国家重点流域治理规划。2019 年滇池全湖水质为Ⅳ类,营养状态为轻度富营养,但作为饮用水水源地之一的柴河水库水质仍不达标,超标污染物为总磷。流域水污染主要为城镇生活源、第三产业、工业源、农业农村面源、城市面源和水土流失。

滇池入湖河流虽多达 35 条,但流程短,地下渗漏率高,入湖水量小,自净能力差,水生态系统退化严重。且滇池雨季水质波动,水质环境状况及气候条件易引起蓝藻水华爆发,使得水生态、水安全等受到威胁。本文将滇池分为草海、滇池西、滇池东、滇池南 4 部分进行研究,其中滇池西南岸是我国最大露天磷矿产地,湖水总磷本底值偏高。虽然滇池流域为改善水生态环境已开展了系列水污染治理和生态环境修复工作,但流域水生态系统退化形式依旧严峻。

2 研究方法

2.1 GEE 平台与遥感影像

GEE 是对大量地球科学资料进行在线可视化计算和分析处理的云平台,能够快速方便地调用遥感影像和提取信息,可用于长期、大尺度空间序列的遥感应用<sup>[13]</sup>。本文采用 Jia 等<sup>[9]</sup>开发的 GEE 蓝藻水华自动化监测 App 进行滇池长时间序列蓝藻水华时空信息提取。

遥感影像使用 MOD09GQ 和 MOD09GA 产品。MODIS<sup>[14]</sup>(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)是在没有大气散射或吸收的情况下在地面

测量的,提供了地表光谱反射率的估计值,校正了大气条件,如气体,气溶胶和瑞利散射。MOD09GA 地理分辨率为 1 km,反射率波段空间分辨率为 500 m,提供了 1—7 波段 500 m 反射率值和 1 km 观测、地理定位统计数据。MOD09GQ 提供了 250 m 波段 1, 2 的表面光谱反射率值,旨在与 MOD09GA 一起使用。气象因子数据使用 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasting)中的 ERA5-Land 数据集,空间分辨率为 9 km,提供每小时高分辨率的地表变量信息,是 ERA5 气候再分析的陆地分量的重演。数据信息来源于 USGS 与 ECMWF 网站,数据详情见表 1,其中风向数据是根据 V 型风力分量与 U 型风力分量计算所得。

表 1 本研究所用数据集  
Table 1 Datasets used in this study

产品	波段名称	波长/nm
MOD09GA.006	sur_refl_b01	620~670
	sur_refl_b02	841~876
	sur_refl_b03	459~479
	sur_refl_b04	545~565
	sur_refl_b05	1230~1250
	sur_refl_b06	1628~1652
	sur_refl_b07	2105~2155
MOD09GQ.006	sur_refl_b01	620~670
	sur_refl_b02	841~876
数据集	气象因子	数据类型
ERA5-Land	气温	2 m 气温
	降水量	总降水量
	风向	10 m 水平方向风速分量
		10 m 垂直方向风速分量
	风速	10 m 风速

2.2 蓝藻水华时空特征

FAI 计算使用了 MOD09GQ 中的红、近红外波段和 MOD09GA 的一个短波波段,大气校正则需要 MOD09GA 所有的短波波段,并利用双线性插值法对 MOD09GA 中的 3 个短波波段(sur\_refl\_b05/sur\_refl\_b06/sur\_refl\_b07)进行重采样。由于陆地以及大气中均含有较高的 FAI 值,对计算造成干扰,因此分别使用陆地掩膜、云掩膜进行过滤消除干扰。关于离水反射率校正,在以往内陆水域的研究中通常利用 MODIS Rayleigh 矫正数据进行矫正,但 GEE 中并未嵌入该类数据,因此在本研究采用 Wang 等<sup>[15]</sup>提出的方法反演水体的离水反射率,进行离水反射率矫正。方法假设:NIR-SWIR 最小值中的亮度仅由加性噪声(残余气溶胶散射、水面反射天光和太阳反辉)



组成;加性噪声量对波长不敏感。滇池多悬浮物,属于相对浑浊水域,NIR 波段中的离水信号显著,SWIR 波段悬浮物的反射率下降,而水本身的吸收量迅速上升,因此方法的两则假设适用于滇池地区。方法从所有波段中为每个像素减去 NIR 与 SWIR 波段的最小反射率值,以减少大气校正不足造成的不确定性,再在所得值中放置分母  $\pi$ ,将表面反射率缩放到离水反射率。离水反射矫正后,采用 Hu 等<sup>[16]</sup>利用长期数据的 FAI 梯度直方图统计确定的 FAI 阈值来区分浮动蓝藻像素,并赋值。将上述二值化的 MODIS 日常图像被输入到时间和空间分析中,计算每日蓝藻像元再乘以一个像元面积,即得到每日蓝藻漂浮面积数据。根据遥感水华监测平台中得到的每日数据,计算得到不同时间尺度的面积变化趋势。

滇池蓝藻水华的空间变化特征包括发生频率、开始发生日期、最晚发生日期、持续发生日数。发生频率:合成蓝藻二值化的每日图像,计算每个像素每年的所有值之和,从而获得以像素为基础的年累计蓝藻发生频率。开始发生日期、最晚发生日期、持续发生日数:将儒略历日期信息附加到每个蓝藻二值化图像后,将每年的蓝藻日图像进行二值化,以像素为基础计算每个像素点的最小和最大日期值,即第一次和最后一次漂浮蓝藻出现的日期,通过以像素为基础计算第一次和最后一次漂浮蓝藻出现的日期之差,最终得到每年漂浮蓝藻出现的持续时间。

### 2.3 数据统计分析

Mann-Kendall<sup>[17]</sup>检验是一种非参数检验,优点是不要求样本遵从一定的分布。使用 M-K 算法检验时序数据大致趋势,趋势分为无明显趋势(稳定)、趋势上升、趋势下降。Mann-Kendall 趋势检验可以检验判断长时间序列中存在的变化趋势,判断方法如下:

在 Mann-Kendall 趋势检验,原假设  $H_0$ :没有单调趋势;备择假设  $H_a$ :有单调趋势;

将所得的时间序列数据按照时间序列依次排布为  $X_n = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ;计算所有  $\text{sgn}(x_i - x_j)$  的和  $S$ :

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

其中  $\text{sgn}$  为符号变量,表征每一小段变化的情况:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & x_i - x_j < 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ 1 & x_i - x_j > 0 \end{cases} \quad (2)$$

若  $S$  为正,则随时间序列倾向于增加;若  $S$  为负,则随时间序列倾向于减少。

计算统计变量  $Z$  值:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{var}(S)$ 为  $S$  的方差; $Z_{mk}$ 满足标准正态分布。 $|Z| > 1.64$  时代表  $Z_{mk}$ 通过了 95% 的信度检验,定义为显著的变化。

随机森林<sup>[18]</sup>是一种集成算法,利用 Bootstrap 重采样方法从原始样本中抽取多个样本,并为每个样本生成独立的决策树作为基本单元,处理回归问题、测量各因素的重要性程度和相关度。

在分析环境因子驱动作用时,由于解释变量的共线性普遍存在,难以获取每个解释变量的相对重要性,为解决该难题,本研究使用 Lai 等<sup>[19]</sup>开发的 R 包 `rdacca.hp` 将变差分解和层次分割建立起数学联系,平均分配共同解释的组分继而获取单个解释变量的解释率。R 包 `rdacca.hp` 能运行无解释变量个数限制的变差分解和层次分割以得到单个解释变量的相对重要性。

本文采用 QGIS(QGIS version 3.22.1)和 Rstudio(R version 4.1.2)进行蓝藻水华面积等数据的统计、分析与绘制,其中对于年变化特征采用 Mann-Kendall 趋势检验进行分析,蓝藻水华特征与环境驱动因素之间的关系基于 Rstudio 利用随机森林算法进行显著性分析和重要性评估。

## 3 结果与分析

### 3.1 滇池流域蓝藻水华时间变化特征

蓝藻水华的年际、月际平均日覆盖率特征如图 1 所示。蓝藻水华年际变化波动较大,其中 2013 年蓝藻水华面积最高,为  $2.010 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,2010 年最低,为  $1.156 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。2016 年以后蓝藻水华面积变化趋势较为稳定。月际尺度水华覆盖变化具体表现为:8 月达到峰值  $2.490 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,11—2 月持续降低,2 月达谷值面积为  $7.35 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。

### 3.2 滇池流域蓝藻水华时空动态变化

蓝藻水华年发生频次以及分区年发生频次变化如图 2—3 所示,蓝藻水华发生频次变化趋势不显著( $p > 0.05$ )。具体来说,滇池流域每年发生蓝藻水华的平均次数在 20~30 次稳定波动。其中 2013 年、2019 年发生频次相对较高,2013 年区域平均频次为 32,2019 年为 30;2010 年发生频次相对最低,区域平

均频次为 20。

空间分布上,2002—2021 年草海发生频次始终

最高,其中 2006 年草海发生频次剧烈下跌;外海整体发生频次相近,滇池西相对较高。

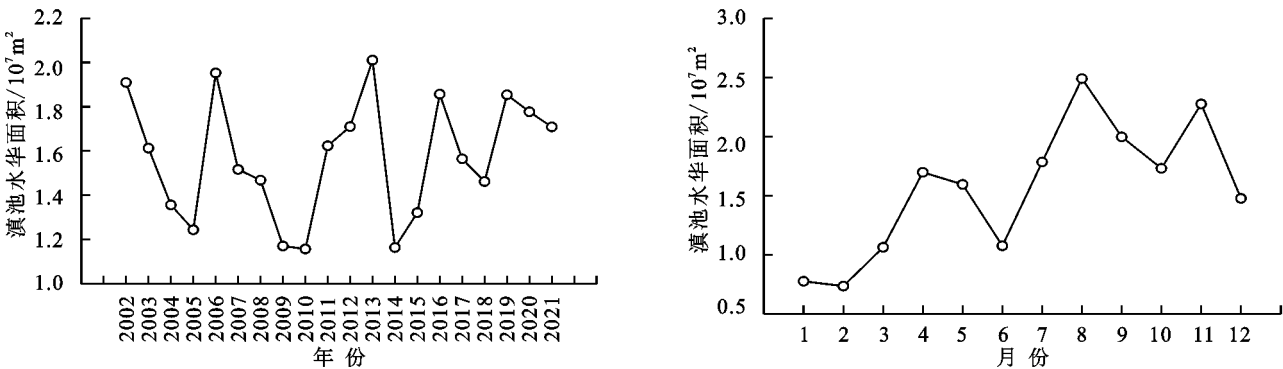


图 1 滇池蓝藻水华面积时间变化特征

Fig. 1 Time variation characteristics of cyanobacteria bloom area in Dianchi Lake

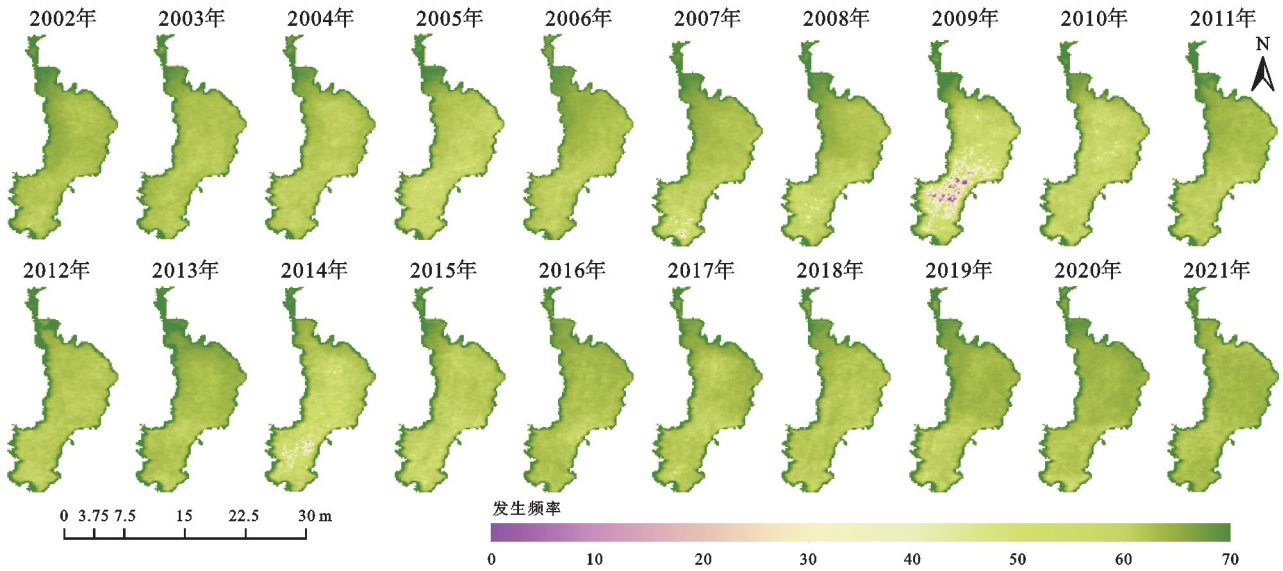


图 2 滇池水华发生频率

Fig. 2 Occurrence frequency of Dianchi Lake bloom

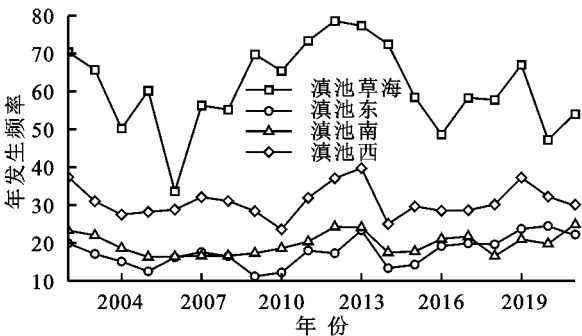


图 3 滇池各区域水华发生频率

Fig. 3 Occurrence frequency of Dianchi Lake bloom by region

蓝藻水华最早出现日期如图 4—5 所示。2002—2021 年最早出现日期多集中于 3 月。2002 年最早出现日期为 1 月 4 日,2003 年推迟至 3 月 17 日。2003—2008 年稳定波动,但 2006 年初始日期异常延迟至 2002—2021 年中最新。2007 年后基本保持稳定;2017—2021 年滇池水华最早发生日期较 2003—2016 年有所提前,多发生于 2 月。

空间分布上,草海蓝藻水华出现最早,滇池西、滇池南、滇池东的最早出现时间相近,滇池东出现最迟。

蓝藻水华最后出现日期如图 6—7 所示,整体无显著变化趋势( $p>0.05$ )。2002 年最后出现日期为 11 月 26 日,2002—2008 年保持稳定波动;2009 年明显提前至 9 月 21 日,2002—2021 年最早;2010—2021 年稳定波动。

空间分布上,总体呈草海蓝藻水华结束最早,滇池西、滇池南、滇池东结束时间相近,滇池东最晚结束,除 2009 年外海地区最后出现日期均异常提前,较草海更早。

蓝藻水华持续发生时间如图 8—9 所示。2002—2021 年,2002 年蓝藻水华持续时间达峰值:329 d。2003—2009 年呈逐渐缩短趋势,其中 2006 年持续时间达到最短(170 d)。2010 年较 2009 年出现明显延长,2010 年后稳定波动,2017 年持续时间于 2010—2021 年相对最长,为 319 d。

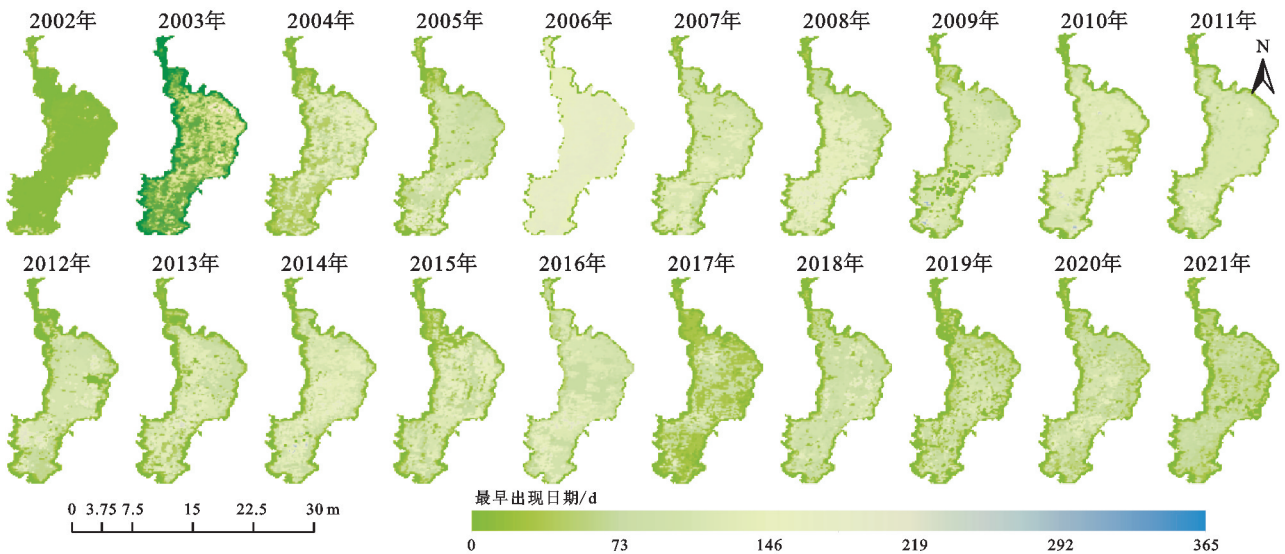


图 4 滇池水华最早发生日期  
Fig. 4 Earliest occurrence date of Dianchi Lake bloom

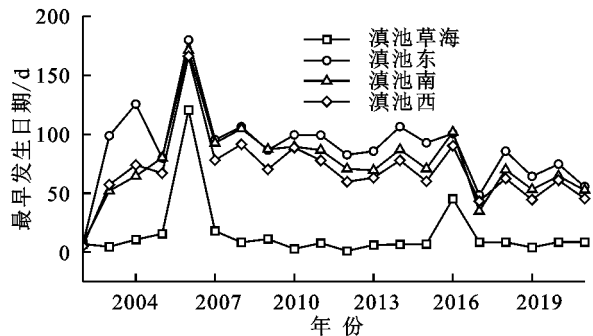


图 5 滇池各区域水华最早发生日期  
Fig. 5 Earliest occurrence date of Dianchi Lake bloom by region

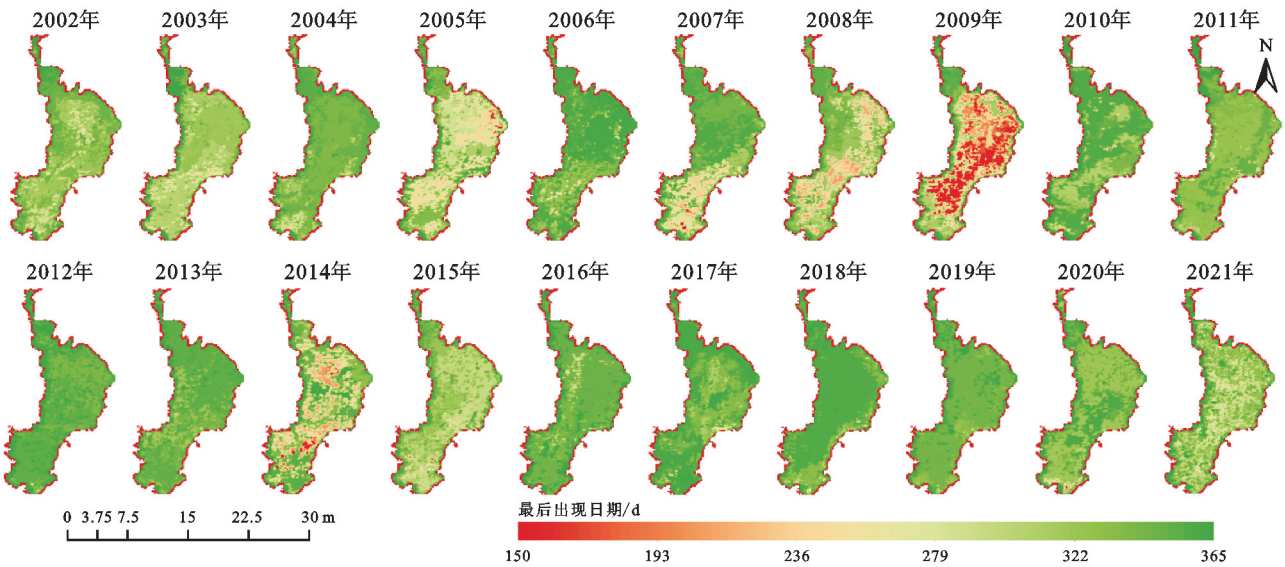


图 6 滇池水华最后出现日期  
Fig. 6 Last occurrence date of Dianchi Lake bloom

3.3.2 降水量 由图 11 可知,降水量多年平均月变化情况为:2—7 月逐渐上升,7 月达最高 243 mm,7—12 月逐步下降;蓝藻平均面积则从 2—4 月呈逐渐增加,4—6 月逐渐下降,6—8 月渐增,8 月达到最

空间分布上,草海、滇池西、滇池南、滇池东的持续时间相近,草海蓝藻水华持续时间最长,滇池东最短。

3.3 蓝藻水华与气象因子的关系

3.3.1 气温 由图 10 可知,2002—2021 年气温多年平均月变化情况为,由 1 月到 6 月逐渐升高,6 月、7 月、8 月温度变化幅度小,8 月后逐渐降低;蓝藻平均面积则从 2 月至 4 月呈逐渐增加,4 月至 6 月逐渐下降,6 月至 8 月渐增,8 月达到最高值  $2.490 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,8 月后波动降低。蓝藻面积与气温存在正相关关系,  $p=0.08697$ ,气温越高,滇池蓝藻水华面积越大。

高值  $2.490 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,8 月后波动降低。6 月、7 月、8 月降水较丰沛且 8 月蓝藻水华面积达峰值,蓝藻面积与降水量存在较为显著的线性正相关关系,  $p<0.05$ 。

3.3.3 风速 由图 12 可知,风速 1—3 月逐升,3—8



月逐渐下降,8月达到最低值,9—3月又逐步上升,3月达到最高,最高风速为2.94 m/s;蓝藻平均面积则从2—4月呈逐渐增加,4—6月逐渐下降,6—8月渐增,8月达到最高值,最高值为 $2.490\times 10^7\text{ m}^2$ ,8月后波动降低。2月、3月风速高,蓝藻水华面积小,7月、8月、9月低风速,蓝藻水华面积大。蓝藻面积与风速存在显著线性负相关关系( $p=0.023$ ),越小的风速,水华面积越大,风速越大蓝藻水华面积越小。

3.3.4 风向 蓝藻水华面积与风向之间的关系如图13所示,风向于1—6月为偏西风,6—8月逐渐转为偏东风,8—12月又逐步转为偏西风;蓝藻平均面积则从2—4月呈逐渐增加,4—6月逐渐下降,6—8月渐增,8月达到最高值,8月后波动降低。8月风向为

东南风,同时滇池蓝藻水华面积达峰值。蓝藻面积与风向存在显著线性相关关系  $p=0.009$ ,风向越偏向东水华面积越大。

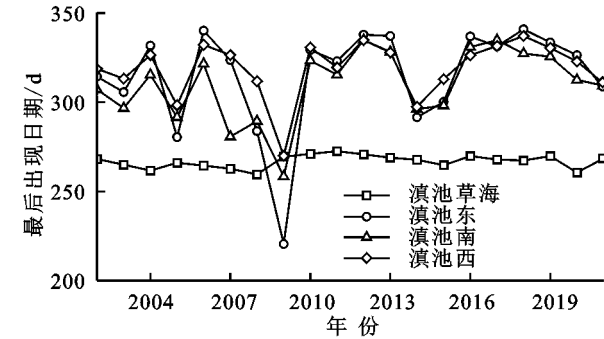


图 7 滇池各区域水华最后出现日期

Fig. 7 Last occurrence date of Dianchi Lake bloom by region

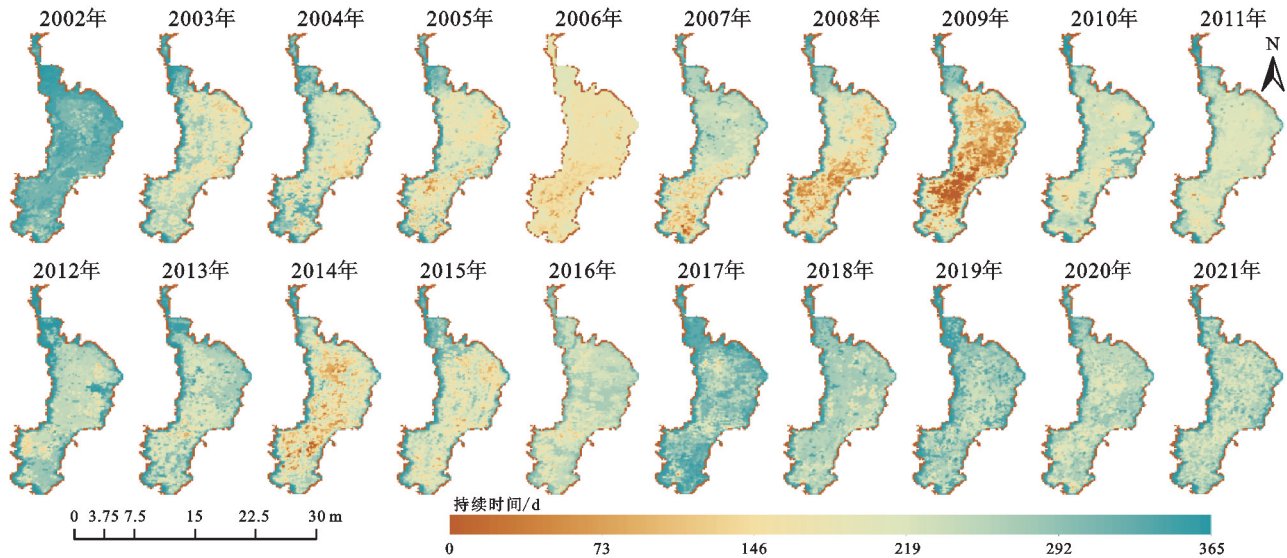


图 8 滇池水华发生持续时间

Fig. 8 Duration of Dianchi Lake bloom occurrence

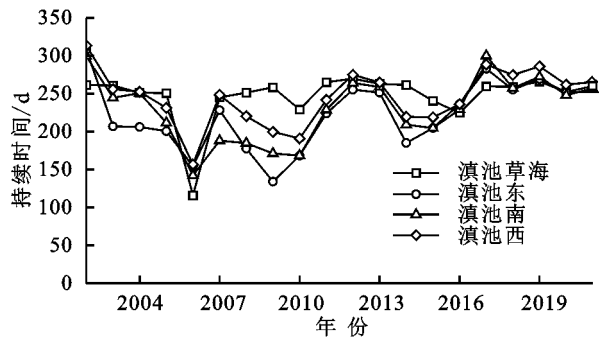


图 9 滇池各区域水华发生持续时间

Fig. 9 Duration of Dianchi Lake bloom occurrence by region

方差分解结果如图14所示,结果表明,风向、风速、气温均具有显著的相关性,重要性排序为风向>气温>风速>降雨,风向是最重要的影响因素。

4 讨论

4.1 滇池蓝藻水华的年际变化

蓝藻水华的年际覆盖率特征为变化波动较大,其

中2013年蓝藻水华面积最高,面积为 $2.010\times 10^7\text{ m}^2$ ,2010年最低,为 $1.156\times 10^7\text{ m}^2$ 。2016年以后蓝藻水华面积变化趋势较为稳定。蓝藻水华时空动态变化为:发生频率于20~30间稳定波动;最早发生日期多集中在2月、3月、4月份,其中2006年发生日期为2017—2021年最晚,2017—2021年滇池水华最早发生日期较2003—2016年又有所提前;最后出现日期集中于12月,2009年的结束日期异常提前;2002—2021年蓝藻水华持续时间多于200~300 d,其中2006年持续时间最短,2010年后稳定波动,但于2017年出现异常延长,该发现与滇池水质相关研究<sup>[20]</sup>中富营养指数于2017年异常升高的变化情况相符。郑丙辉等<sup>[21]</sup>的研究表明,2017年异常的原因是,2017年6—8月降雨量达1999年来最高且截污体系雨季混合污水溢流严重,造成污水处理厂污水收集率下降,进而导致2017年滇池水质异常降低、蓝藻水华持续时间异常延长。

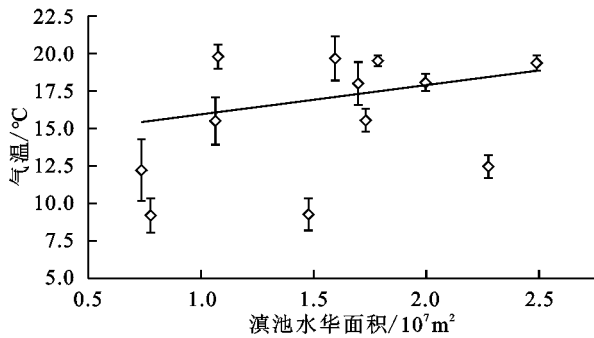


图 10 滇池水华面积与温度之间的关系

Fig. 10 Relation between Dianchi Lake bloom area and temperature

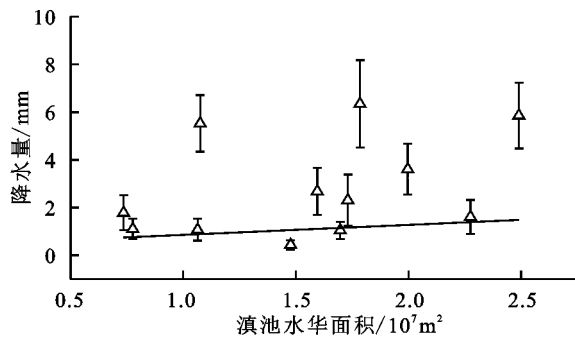
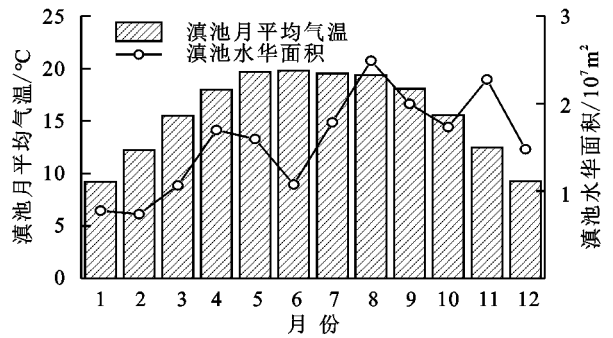


图 11 滇池水华面积与降水之间的关系

Fig. 11 Relationship between Dianchi Lake bloom area and precipitation

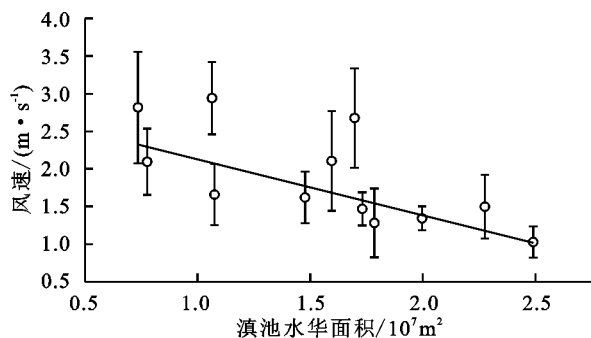
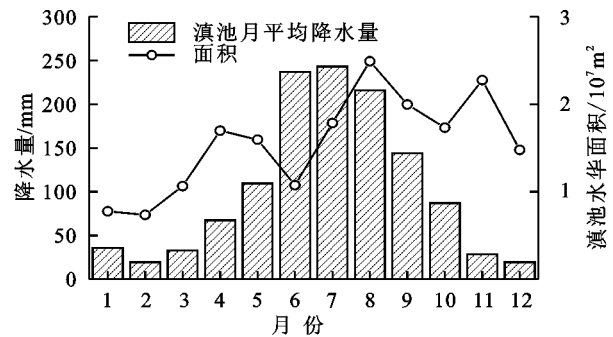


图 12 滇池水华面积与风速之间的关系

Fig. 12 Relation between Dianchi Lake bloom area and wind speed

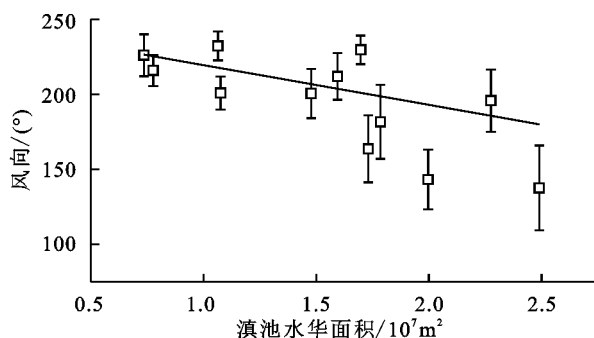
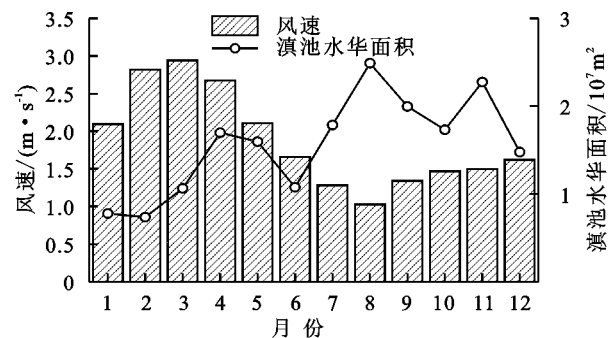
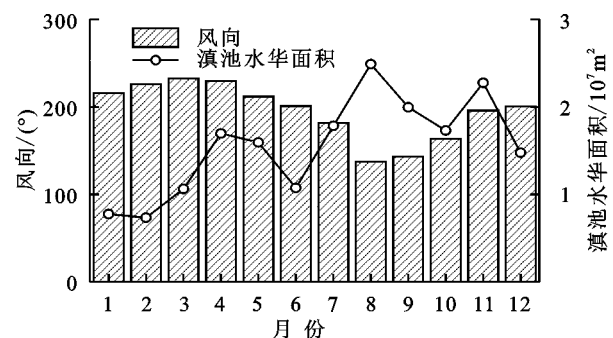


图 13 滇池水华面积与风向之间的关系

Fig. 13 Relation between Dianchi Lake hydration area and wind direction



本文所得蓝藻水华时空动态变化中的最早出现日期以及持续时间与已有研究<sup>[12]</sup>的不同,其中2002年受2001年蓝藻可能持续至2002年的干扰,故最早出现日期难以确定,而其他年份出现冲突的原因可能是学者研究中定义最早出现日期为第一次监测到藻类出现的日

期,而本文定义最早出现日期为滇池湖泊全域蓝藻水华最早出现日期的众数,即定义大多数蓝藻水华首次出现的日期为最早出现日期,继而影响其他动态变化如持续时间等的判断。本研究中的用日期的众数作为最早日期,旨在消除极端值的影响,取得更好的代表性。



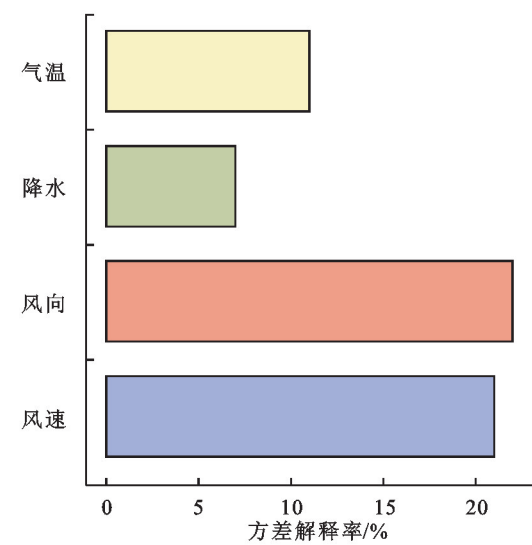


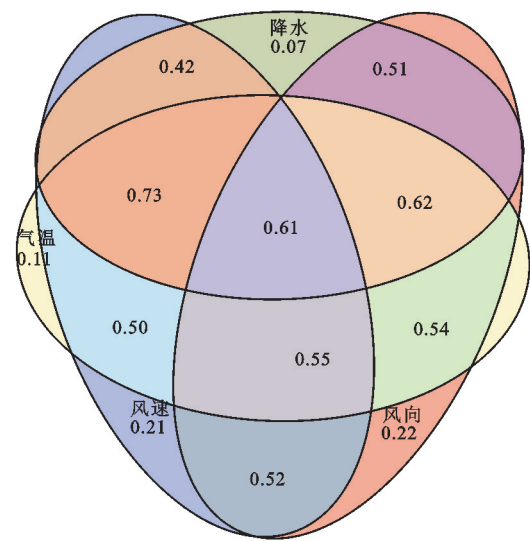
图 14 气候因子对蓝藻水华的影响

Fig. 14 Influence of climate factors on cyanobacteria bloom

4.2 驱动因子

本文通过研究 2002—2021 年的滇池蓝藻水华与气候因子(气温、风速、风向、降水)与滇池蓝藻水华的关系,平均分配共同解释的组分获取单个解释变量的解释率,结果发现影响滇池水华发生的气象因子排序为风向>气温>风速>降水。对湖泊蓝藻水华而言,气温升高通过影响水温、生物群落结构等促进蓝藻对营养盐的利用率提升并减小蓝藻被捕食概率从而使蓝藻水华发生规模、频率与持续时间的增加,对蓝藻水华的发生起到促进作用<sup>[22]</sup>。研究中滇池蓝藻水华月平均面积与滇池月平均 2 m 气温呈显著正相关,与鲁韦坤等<sup>[23]</sup>的结果一致,但在本文研究中,气温是气温、风速、风向、降水中较最风速、降水重要性更高的气象因子,这与李加龙等<sup>[24]</sup>对 2002—2018 年滇池外海蓝藻水华的分析不一致,这可能是基于蓝藻的生理特性,水温升高有利于蓝藻的生长,且近地表气温是水温最重要的驱动因素,随全球变化导致的气温改变促进了水华蓝藻种群优势的更早确立<sup>[25]</sup>,进而滇池蓝藻水华 2018—2021 年的面积较大且气温的重要性增加。

风浪扰动增加水柱中蓝藻颗粒碰撞黏合形成大群体的概率,导致蓝藻细胞团增大,使群体获得更大的浮力,在风浪扰动过后迅速上浮形成表面可见的蓝藻水华,漂浮的蓝藻在湖流的辐合或辐散作用下,发生水平方向的漂移和聚集,最终蓝藻水华爆发<sup>[26]</sup>,因而风速风向对湖泊蓝藻水华面积变化具有重要影响。风速的变化改变了水动力条件影响浮游动物的分布情况进而直接或间接地影响藻类的生长和聚集状态,对蓝藻水华的发生既能起促成作用也能起抑制作用,本文的研究中滇池蓝藻水华月平均面积与滇池月平均风速呈显著负相关且为影响滇池蓝藻水华发生的



重要驱动因子,与以往研究结果相符合<sup>[24]</sup>。

风向能影响蓝藻堆积聚集,影响紊流扰动进而直接影响藻类输移,并通过直接或间接作用影响藻类生长<sup>[27]</sup>。本文的研究中滇池蓝藻水华月平均面积随风向由偏西风转向偏东风增大且风向的相对重要性最高,且滇池蓝藻水华多发生于第三、四季,而第三、四季风向较第一、二季由偏西转为偏东。风向较风速、气温、降水重要性最高的原因可能是风向本身对蓝藻堆积聚集的影响以及滇池四周特殊的地形构造。滇池西部山体环绕,而东部多为较平坦的居民区。在蓝藻水华多发的第三、四季,风向也由偏西转为偏东,驱动气流到达滇池西部,由于西部存在山的地形阻挡使得气流爬升,加剧了气流上升运动并减小水平风速进而有利于蓝藻水华的堆积、聚集、发生。

降雨通常会产生抑制蓝藻水华<sup>[28]</sup>,持续大量的降雨可能对藻类密度有稀释作用,不利于蓝藻成群上浮形成水华。但在本文针对滇池蓝藻面积月变化的研究中,滇池蓝藻水华月平均面积与降水量呈显著正相关,且该结果与以往对滇池的研究结果相符。由于流域上游大小河流均流入滇池,而滇池出水口仅一条,昆明 8 月份多大雨、暴雨,强降水下地表径流将农田、城镇中的污物冲入了滇池,为藻类大量生长提供了物质基础<sup>[29]</sup>。

5 结论

(1) 月际尺度上,第一季蓝藻覆盖率低,2 月起复苏,并于 8 月达峰值,第三季蓝藻覆盖率为四季中最高。(2) 2002—2021 年,滇池蓝藻水华的年际覆盖率与爆发频率持续波动,均无显著变化趋势,发生日期多集中于第一季度的 2 月、3 月,最后发生日期多集中于第四

季度的11月、12月。(3)气象因子中风向、气温、风速、降水均对蓝藻水华有显著驱动作用,且受滇池地形等因素影响,风向因子重要性最高,偏东的风向对滇池蓝藻水华覆盖率具有显著促进作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 宋立荣.蓝藻水华及其次生灾害:现状和发展趋势[C]//中国毒理学会,湖北省科学技术协会.中国毒理学会第七次全国毒理学大会暨第八届湖北科技论坛论文集.武汉:2015.  
Song L R. Cyanobacteria Blooms and Their Secondary Disasters: Status and Development Trend[C]//Chinese Society of Toxicology, Hubei Association for Science and Technology. Proceedings of the 7th National Congress of Toxicology and the 8th Hubei Science and Technology Forum of the Chinese Society of Toxicology. Wuhan: 2015.
- [2] 胡明明,朱喜.中国淡水湖泊蓝藻爆发现状及其治理思路[C]//中国环境科学学会.2014 中国环境科学学会学术年会论文集.成都:2014.  
Hu M M, Zhu X. Status Quo of Cyanobacteria Outbreak in Freshwater Lakes in China and Its Management Ideas[C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the 2014 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences. Chengdu: 2014.
- [3] 李媛.浅析蓝藻水华的危害及防治[J].中国水产,2023(2):65-66.  
Li Y. Analysis on the harm and prevention of cyanobacteria bloom[J]. China Fisheries, 2023(2):65-66.
- [4] 周琼,徐艳波.20 世纪以来滇池生态修复路径初探[J].城市与环境研究,2023,10(1):80-90.  
Zhou Q, Xu Y B. Preliminary study on the ecological restoration path of Dianchi Lake since the 20th century[J]. Urban and Environmental Studies, 2023,10(1):80-90.
- [5] 王海燕,祁昌军.我国湖泊水环境治理效果及对策建议:以太湖和滇池为例[J].绿色科技,2022,24(20):124-130.  
Wang H Y, Qi C J. Effects and countermeasures of lake water environment control in china: Taking Taihu Lake and Dianchi Lake for example[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022,24(20):124-130.
- [6] 尹美琳,张嘉琪,路春晖,等.蓝藻实时监测技术综述[J].价值工程,2019,38(22):208-209.  
Yin M L, Zhang J Q, Lu C H, et al. A review of real-time monitoring techniques for cyanobacteria[J]. Value Engineering, 2019,38(22):208-209.
- [7] 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.  
Zhang J, Chen L Q, Chen X L. Monitoring the cyanobacterial blooms based on remote sensing in Lake Erhai by FAI[J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(4):718-725.
- [8] 张恒敢,顾克军,张斯梅.用经验正交函数提取太湖 MODIS-EVI 时空分布特征[J].生态学杂志,2018,37(12):3802-3808.  
Zhang H G, Gu K J, Zhang S M. Extracting temporal and spatial distribution features of Lake Taihu from MODIS-EVI data by empirical orthogonal function analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(12):3802-3808.
- [9] Jia T X, Zhang X Q, Dong R C. Long-term spatial and temporal monitoring of cyanobacteria blooms using MODIS on Google Earth Engine: A case study in Taihu Lake[J]. Remote Sensing, 2019,11(19):2269.
- [10] 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.  
He Y L, Xiong Q L, Luo X, et al. Study on spatio-temporal changes of water bloom in Dianchi Lake based on NDVI[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019,28(3):555-563.
- [11] 梁中耀,刘永,盛虎,等.滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析[J].环境科学学报,2014,34(3):754-762.  
Liang Z Y, Liu Y, Sheng H, et al. Identification of water quality trends in Lake Dianchi using an integrated STL and RSI approach[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(3):754-762.
- [12] 淦家伟,杨洋,马巍,等.滇池流域水环境承载力及其提升方案研究[J].人民长江,2021,52(8):38-43,49.  
Gan J W, Yang Y, Ma W, et al. Study on water environmental carrying capacity and improvement scheme in Dianchi Lake Basin[J]. Yangtze River, 2021,52(8):38-43,49.
- [13] 田洪阵,魏娜,李欢,等.基于 Google Earth Engine 的国内外研究进展[J].南阳师范学院学报,2022,21(6):41-51.  
Tian H Z, Wei N, Li H, et al. Research progress based on Google Earth Engine at home and abroad[J]. Journal of Nanyang Normal University, 2022,21(6):41-51.
- [14] 周清波,刘佳,王利民,等.EOS-MODIS 卫星数据的农业应用现状及前景分析[J].农业图书情报学刊,2005,17(2):202-205.  
Zhou Q B, Liu J, Wang L M, et al. Current situation and prospect analysis of the application of EOS-MODIS satellite data in agriculture[J]. Journal of Library and Information Sciences in Agriculture, 2005,17(2):202-205.
- [15] Wang S L, Li J S, Zhang B, et al. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016,37(24):6076-6096.

- [16] Hu C M, Lee Z P, Ma R H, et al. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China [J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 2010, 115 (C4):C04002.
- [17] 魏永富, 崔英杰, 吴英杰. 基于 Mann-Kendall 法与草地分类的气候变化特征 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17 (24):1-8.  
Wei Y F, Cui Y J, Wu Y J. Climate change characteristics based on Mann-Kendall method and grassland classification [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17 (24):1-8.
- [18] 杜尚海, 古成科, 张文静. 随机森林理论及其在水文地质领域的研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (9): 4285-4295.  
Du S H, Gu C K, Zhang W J. A review on the progresses in random forests theory and its applications in hydrogeology [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (9): 4285-4295.
- [19] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, et al. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13 (4): 782-788.
- [20] 张卓亚, 刘晨阳, 朱昱泽, 等. 1990—2020 年滇池水质时空变化特征及评价 [J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2023, 43 (4): 141-151.  
Zhang Z Y, Liu C Y, Zhu Y Z, et al. Analysis on temporal and spatial variation of water quality in Dianchi Lake from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2023, 43 (4): 141-151.
- [21] 郑丙辉, 彭嘉玉, 胡小贞, 等. 2017 年滇池外海水质异常下降原因及对策 [J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8 (5): 465-472.  
Zheng B H, Peng J Y, Hu X Z, et al. The cause for abnormal water quality deterioration of Waihai of Dianchi Lake in 2017 and the countermeasures [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8 (5): 465-472.
- [22] 刘雪梅, 章光新. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述 [J]. *水科学进展*, 2022, 33 (2): 316-326.  
Liu X M, Zhang G X. Review on the effects of climate change on cyanobacteria bloom in lakes [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33 (2): 316-326.
- [23] 鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆, 等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2017, 29 (3): 534-545.  
Lu W K, Yu L X, Ou X K, et al. Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29 (3): 534-545.
- [24] 李加龙, 罗纯良, 吕恒, 等. 2002—2018 年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子 [J]. *生态学报*, 2023, 43 (2): 878-891.  
Li J L, Luo C L, Lü H, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi during 2002—2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (2): 878-891.
- [25] Zhang M, Duan H T, Shi X L, et al. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change [J]. *Water Research*, 2012, 46 (2): 442-452.
- [26] Li W, Qin B Q. Dynamics of spatiotemporal heterogeneity of cyanobacterial blooms in large eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2019, 833 (1): 81-93.
- [27] 王文兰. 风向风速对太湖蓝藻暴发影响的数值研究 [C] // 第 26 届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集. 杭州: 2009.  
Wang W L. Numerical Study on the Influence of Wind Direction and Speed on Cyanobacteria Outbreaks in Taihu Lake [C] // Proceedings of the 26th Annual Conference of the Chinese Meteorological Society Disaster Weather Event Warning, Forecasting, Disaster Prevention and Mitigation. Hangzhou: 2009.
- [28] 李飞鹏, 陈蒙蒙, 贾玉宝, 等. 气象因素对封闭浅水湖泊浮游藻类生长和分布影响 [J]. *水生态学杂志*, 2019, 40 (5): 55-62.  
Li F P, Chen M M, Jia Y B, et al. Effects of meteorological factors on growth and distribution of phytoplankton in an enclosed shallow lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40 (5): 55-62.
- [29] 蒋大林. 基于 GIS/RS 的滇池藻类水华时空变化及驱动因子分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.  
Jiang D L. Research on Temporal and Spatial Variation of Algae Blooms and Its Driving Factors in Lake Dianchi Based on GIS/RS [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.