J. Lake Sci.(湖泊科学),2024,**36**(2):377-388
DOI 10.18307/2024.0213

风场对鄱阳湖丰水期表层蓝藻密度的影响*

杨　平[1,2],刘聚涛[1,2**],胡　芳[1,2],温春云[1,2],文　慧[1,2],吴　桨[1,2],付莎莎[1,2],戴国飞[1,2]
(1:江西省水利科学院,南昌 330029)
(2:江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心,南昌 330029)

摘　要: 目前,在风场对蓝藻的影响研究方面,国内针对太湖、滇池、巢湖等浅水湖泊的研究较多,针对鄱阳湖的研究则多集中于蓝藻群落特征及其与营养盐之间的关系。近年来,作为长江流域重要的通江湖泊,处于轻度富营养化状态的鄱阳湖水体蓝藻水华在局部库湾和部分水域出现,风场如何影响鄱阳湖表层蓝藻密度是一个值得探讨的问题。2019－2021年,在鄱阳湖布设13~49个采样点,于平水期、丰水期和枯水期现场采集各个点位表层水样、藻类、风场和流场数据,分析风场对鄱阳湖丰水期表层蓝藻密度的影响。结果表明,2019－2021年鄱阳湖丰水期风速与表层蓝藻密度呈显著正相关性,风场对水体的充分混合及驱动水体形成的风生流是促进蓝藻生长的原因之一。在流速较高(>0.05 m/s)的区域,无论风速高于还是低于临界风速(3~4 m/s),鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受流场的影响更大;在流速较低(<0.05 m/s)的区域,风速在临界风速以下时,鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受风场影响更大。2019－2021年鄱阳湖丰水期蓝藻密度超过水华暴发的阈值,但在高风速高流速的共同作用下未能发生大范围的蓝藻水华,仅能在风速适宜(<3~4 m/s)、流速较低(<0.05 m/s)的内湾、尾闾区等区域发生小面积的蓝藻水华。鄱阳湖丰水期水体处于长江顶托的低流速且微风条件下时,发生大面积蓝藻水华的概率可能会明显上升。
关键词: 鄱阳湖;丰水期;蓝藻;水华;风场

Influence of wind field on surface cyanobacteria density of Lake Poyang in wet season, China*

Yang Ping[1,2], Liu Jutao[1,2**], Hu Fang[1,2], Wen Chunyun[1,2], Wen Hui[1,2], Wu Jiang[1,2], Fu Shasha[1,2] & Dai Guofei[1,2]
(1: *Jiangxi Academy of Water Science and Engineering*, *Nanchang* 330029, *P.R.China*)
(2: *Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin*, *Nanchang* 330029, *P.R.China*)

Abstract: In terms of the study of influence of wind field on cyanobacteria, presently there are many studies on shallow lakes such as Lake Taihu, Lake Dianchi and Lake Chaohu in China, while the research on Lake Poyang focuses on cyanobacteria communities and their relationship with nutrients. In recent years, as an important river-linked lake in the Yangtze River Basin, Lake Poyang has been a state of mild eutrophication, cyanobacteria blooms have appeared in local reservoir bays, and how the wind field affects the surface cyanobacteria density is a question worth exploring. In 2019-2021, 13-49 sampling points were arranged in Lake Poyang, data on surface water quality, algae, flow and wind field were collected during the wet, normal and dry seasons. The influence of the wind field on the density of cyanobacteria on the surface layer during the wet season of Lake Poyang was analyzed. The results showed that, in 2019-2021, the wind speed during the wet season of Lake Poyang showed a significant positive correlation with the surface cyanobacteria, and the full mixing of the water body by the wind field and the aeolian flow were the one of the reason for promoting the growth of cyanobacteria. In areas with high flow velocity (>0.05 m/s), regardless of whether the wind speed

* 2023-07-07 收稿;2023-10-08 收修改稿。
国家自然科学基金项目(42161016, 32160305)、国家重点研发计划项目(2023YFC3209005, 2023YFC3208705)、江西省科技厅项目(20213AAG01012, 20212BBG71002, 2022KSG01004)和江西省水利科技项目(202223YBKT07, 202124ZDKT19, 202224ZDKT22, 202223YBKT11)联合资助。
** 通信作者;E-mail: liujutao126@163.com。

was higher or lower than the critical wind speed (3-4 m/s), the spatial distribution of surface cyanobacteria density was more affected by the flow field. In the area with slow flow velocity (<0.05 m/s), when the wind speed was below the critical wind speed, the spatial distribution of surface cyanobacteria density is more affected by the wind field. In 2019-2021, the density of cyanobacteria in the flood period of Lake Poyang exceeded the threshold of bloom outbreaks, but under the combined action of high wind speed and high flow rate, a large area of cyanobacteria blooms could not occur, and only small areas of cyanobacteria blooms could occur in the inner bay and local area with slow flow velocity (<0.05 m/s) and suitable wind speed (<3-4 m/s). When the water body of Lake Poyang is under the top action of the Yangtze River, and the flow rate and wind speed is slow, the probability of large-scale cyanobacteria blooms will increase greatly.

Keywords: Lake Poyang; wet season; cyanobacteria; algae bloom; wind field

作为中国第一大淡水湖,鄱阳湖已处于轻度富营养状态[1-2],营养盐浓度的增加促进了浮游植物的生长,浮游植物生物量随之上升,蓝藻占浮游植物群落比例有逐年增加的趋势[3-6],丰水期水华蓝藻在多个湖区有分布,主要在内湾及尾闾区生长积累[7],局部形成的肉眼可见水华群体主要集中在都昌县城以南的约20 km^{2}水域[4],部分碟形湖枯水期蓝藻水华程度也较为严重[8]。

在阐明蓝藻生长和水华暴发的驱动因子方面,目前已有研究主要集中在水体营养盐、气象和水文与蓝藻的相互关系等[9-13],其中,气象和水文条件对蓝藻水华暴发起着至关重要的作用,风场是影响蓝藻水华暴发的重要因素之一[14-20]。风产生的风浪和湖流改变了蓝藻的位置,使其积聚形成水华,风浪扰动会促使大量的营养盐从底泥中释放,导致湖泊水体重新分层与混合,增加了藻类可利用的营养盐[21],风力因素可以通过影响湖泊扰动、流速、光照条件、悬浮物浓度、透明度、底泥营养盐释放等因子直接或者间接的影响蓝藻浓度及其分布[22]。目前,国内关于风场对蓝藻的影响研究主要针对太湖、滇池、巢湖等浅水湖泊[20,23-25],针对鄱阳湖的研究则多集中于藻类群落特征及其与营养盐之间的关系[4-7]。

由于鄱阳湖通江湖泊的特性,水体交换时间仅为 10 d 左右[26],远低于太湖(192 d)[27]和滇池(981 d)[28],鄱阳湖水体流速(平均流速 0.17~0.55 m/s)[29]也要明显大于太湖(流速小于 0.1 m/s 的时间占90%)[30-31]和滇池(平均流速 0.002~0.04 m/s)[16,32]。因此,作为长江流域重要的通江湖泊,风场如何影响鄱阳湖表层蓝藻密度是一个值得探讨的问题。本文对 2019-2021 年鄱阳湖水质、藻类、风场及流场情况进行调查和分析,探讨了风场对鄱阳湖丰水期表层蓝藻密度的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江中游南岸,南北长 173 km,东西平均宽 16.9 km,水面面积在 28~3700 km^{2}之间,流域面积 16.2 万 km^2,是我国最大的淡水湖泊。鄱阳湖是典型的通江湖泊,具有过水性、吞吐性、季节性特征,承纳了赣江、抚河、信江、饶河、修水等河流来水,经调蓄后由湖口注入长江。鄱阳湖水位受本流域来水及长江干流水位的双重影响,呈现出丰枯变化显著的水文特征。鄱阳湖水文特征表现为"高水是湖、低水似河"的特点,平水期及枯水期以河相为主,水域面积低,水体呈现为河流特征;丰水期以湖相为主,水域面积广阔,水体呈现为湖泊特征[29]。近几年的鄱阳湖水生态监测结果显示,2019-2021 年鄱阳湖丰水期氮磷比在 0.4~38.2 之间,均值为 10.2,氮磷比小于 29 的比例在 95.3%~100%之间,平均为 97.2%,鄱阳湖丰水期低氮磷比有利于蓝藻在浮游植物种群组成中占据优势[24]。

1.2 采样点布设

根据鄱阳湖地形特点,将鄱阳湖分为入江水道、主湖区和东部湖区 3 个区域,于 2019-2021 年平水期(4 月)、丰水期(8-9 月)、枯水期(12 月),根据鄱阳湖平丰枯水位变化情况布设 13~49 个采样点进行样品采集(图 1),其中鄱阳湖入江水道点位 6 个(1#~6#)、主湖区 36 个(7#~42#)、东部湖区 7 个(43#~49#),因鄱阳湖各个时期采样实时水位有所变化,部分点位因水位太低导致监测船只无法到达,故各个时期实际监测点位数量有所差异,具体监测时期、点位数量和指标情况见表 1。

1.3 样品采集分析方法

监测指标包括水质、藻类(密度、生物量)、风场(风速、风向)和流场(流速、流向),其中水质指标包括

pH、温度、溶解氧、氧化还原电位、电导率、总氮、总磷、氨氮、硝氮、正磷酸盐、叶绿素。使用 YSI 多参数水质仪(YSI EXO, YSI Company, USA)现场测定水体表层 pH、水温、溶解氧等指标。按照《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)规范采集表层水体水质样品,参照《水和废水监测分析方法》(第四版)[33]对总氮、总磷等水质数据进行测定。使用便携式手持风速仪现场采集风速风向指标。使用流速流向仪(HH.ZSX-6 型,潍坊河海水文科技有限公司)现场实时测定水体表层流速、流向。使用25#浮游生物网现场采集藻类定性样品;现场采集 1 L 表层水带回实验室,加入鲁哥试剂固定并沉淀 48 h 后浓缩富集至约 30 mL 得到藻类定量样品,鉴定计数参考《中国淡水藻类:系统、分类及生态》[34]等进行。

1.4 数据处理与统计分析

使用 Excel 2016 进行数据整理和预分析,使用 Canoco 4.5 软件对鄱阳湖水质、风速与蓝藻密度等之间的关系进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),采用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行 Spearman 相关性分析。使用 Arcmap 10.2 软件制作鄱阳湖监测点位图和蓝藻空间分布图,采用 Origin Pro 2021 软件绘制风场流场玫瑰图及其他图形。

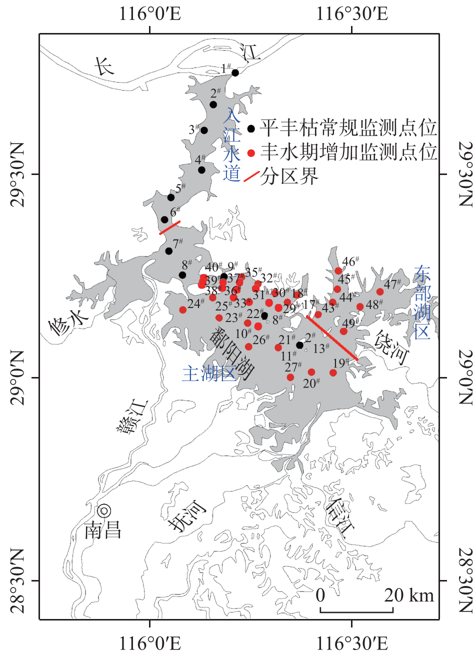


图 1 鄱阳湖采样监测点位布设

Fig.1 The sampling stations of Lake Poyang

表 1 鄱阳湖监测点位和时期情况

Tab.1 Sampling sites and time of Lake Poyang

时间	时期	区域	监测点位数量	监测指标
2019 年 4 月	平水期	入江水道、主湖区	13	水质、藻类、风场、流场
2019 年 8 月	丰水期	入江水道、主湖区、东部湖区	47	
2019 年 12 月	枯水期	入江水道、主湖区	17	
2020 年 4 月	平水期	入江水道、主湖区	16	
2020 年 8 月	丰水期	入江水道、主湖区、东部湖区	49	
2020 年 9 月	丰水期	主湖区	22	
2020 年 12 月	枯水期	入江水道、主湖区	16	
2021 年 8 月	丰水期	入江水道、主湖区、东部湖区	44	

2 结果与分析

2.1 表层蓝藻密度的变化

为了阐明藻类和蓝藻变化趋势,将 2017－2018 年藻类调查数据也纳入分析,采样时期为 2017 年 5、8、12 月,2018 年 5、8、12 月,2017－2021 年鄱阳湖表层藻类密度监测结果如图 2 所示。

1)藻类密度变化趋势。观测期内,2017－2021 年鄱阳湖表层藻类密度变化范围在 $3.9\times10^3 \sim 4.05\times10^7$ cells/L 之间,均值分别为 9.17×10^4、2.19×10^5、1.25×10^6、5.79×10^6、1.79×10^7 cells/L,各年度藻类密度变化规律均表现为丰水期最高,平水期次之,枯水期最低。

2)蓝藻密度年际变化趋势。观测期内,2017－2021 年鄱阳湖表层蓝藻密度变化范围在 $0 \sim 3.2\times10^7$ cells/L 之间,均值分别为 6.33×10^4、1.66×10^5、8.16×10^5、3.27×10^6、1.45×10^7 cells/L。

3)不同水位期蓝藻密度变化趋势。观测期内,2017~2020 年鄱阳湖平水期表层蓝藻密度变化范围在0~

2.2×10^6 cells/L 之间,均值分别为 0.58×10^3、1.52×10^3、1.99×10^5、4.9×10^5 cells/L,蓝藻出现频率分别占 12.5%、37.5%、46.1%、88.2%;2017—2021 年丰水期表层蓝藻密度变化范围在 0~3.02×10^7 cells/L 之间,均值分别为 1.15×10^5、3.27×10^5、1.28×10^6、4.58×10^6、1.45×10^7 cells/L,蓝藻出现频率分别为 64.1%、66.7%、65.9%、100%、100%;2017—2020 年枯水期表层蓝藻密度变化范围在 0~1.59×10^6 cells/L 之间,均值分别为 0.32×10^3、0.92×10^3、1.1×10^3、4.03×10^5 cells/L,蓝藻出现频率分别占 6.2%、12.5%、11.8%、100%。观测期内,2017—2020 年内蓝藻密度特征均表现为丰水期远大于平水期和枯水期($P<0.01$),丰水期蓝藻出现频率最高,平均为 79.3%,平水期和枯水期平均分别为 36.9%、26.1%。

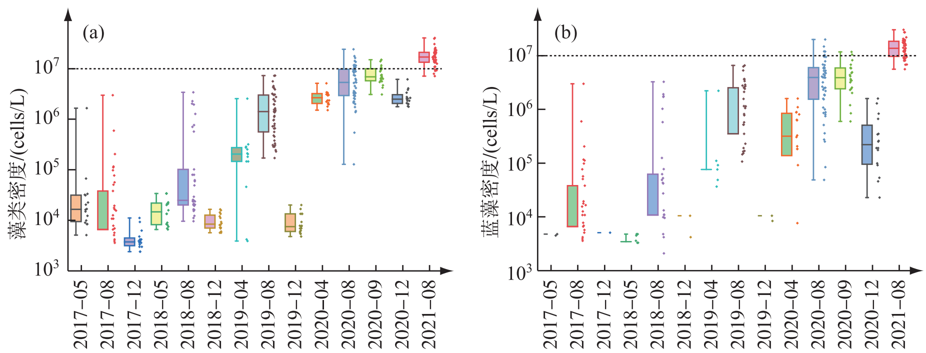


图 2 鄱阳湖 2017—2021 年藻类(a)和蓝藻(b)密度分布情况

Fig.2 Changes in algae(a) and cyanobacteria(b) density in Lake Poyang from 2017 to 2021

2.2 风场的变化

鄱阳湖 2019—2021 年丰水期现场调查风场特征如表 2 和附图 I 所示,由图表可知,风速方面,从年际变化趋势来看,观测期内,2019—2021 年鄱阳湖丰水期全湖风速均值在 1.8~4.4 m/s 之间,年际变化规律为 2021 年>2020 年>2019 年;2019—2020 年丰水期各个区域风速均值变化规律均为入江水道>主湖区>东部湖区,2021 年为东部湖区>入江水道>主湖区。风向方面,2019—2021 年丰水期全湖主导风向分别为 N、W、SSW,2019 及 2021 年各个区域主导风向不一致,2020 年各个区域主导风向以 NE 风向为主。已有研究表明,鄱阳湖全年主导风向以 NE 向为主,6—8 月风向以 SSW 向为主[35],湖区多年平均风速为 3.8 m/s[36]。

表 2 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期现场调查各区域风场特征

Tab.2 On-site wind field data of Lake Poyang during the flood period from 2019 to 2021

时间	时期	入江水道			主湖区			东部湖区			全湖		
		均值/(m/s)	范围/(m/s)	主导风向	均值/(m/s)	范围/(m/s)	主导风向	均值/(m/s)	范围/(m/s)	主导风向	均值/(m/s)	范围/(m/s)	主导风向
2019-08	丰水期	2.4	1.5~3.4	N	1.9	0~3.8	SW、S、NE、N	1.6	0.4~2.6	SSW	1.9	0~3.8	N、SW
2020-08	丰水期	4.7	1.6~6.5	NE、E	3	0~8.8	W、N、NE	2.6	0~5.7	S、NE	3	0~8.8	W、NE
2020-09	丰水期	/	/	/	1.8	0~3.9	W	/	/	/	/	/	/
2021-08	丰水期	4.8	1.9~6.9	W、E	4.1	1.8~5.9	SSW	5.7	5~6.9	ESE	4.4	1.8~6.9	SSW、ESE

2.3 流场的变化

鄱阳湖 2019—2021 年丰水期流场特征如表 3 和附图 II 所示,由图表可知,流向方面,观测期内鄱阳湖入江水道主要流向朝北偏东方向,与入江水道天然流向一致。主湖区流向较为分散,但总体流向朝北、北偏西及西方向,即入江水道方向;东部湖区主要流向朝南偏西方向,与东部湖区所处位置有关,湖流仅能从南偏西方向进入主湖区。流速方面,观测期内鄱阳湖 2019—2021 年全湖流速均值分别为 0.16、0.05、0.14 m/s,流速大于 0.1 m/s 的频率占比为 89.2%。全湖、入江水道、主湖区平均流速规律为 2019 年>2021 年>2020 年,东部湖区平均流速最高的年份为 2021 年,其次为 2019 年和 2020 年。分区域来看,2019—2020 年丰水期流

速均值表现为入江水道>主湖区>东部湖区的特征,2021 年丰水期流速均值表现为入江水道=东部湖区>主湖区。

2019 年 8 月鄱阳湖星子站水位从 16.3 m 下降至 15.57 m,水位下降快,湖流以吞吐流为主,流速最大;受流域超历史大洪水及长江顶托影响,2020 年 8 月湖区水位从 19.00 m 上升至 19.11 m,处于长江顶托的低流速时期,2020 年 9 月水位从 18.56 下降至 18.20 m,水位下降缓慢,流速较小;2021 年 8 月水位从 16.26 m 下降到 15.08 m,水位下降快,流速较快。

表 3 鄱阳湖 2019－2021 年丰水期现场调查各区域流场特征

Tab.3 On-site flow field data of Lake Poyang in flood period of 2019-2021

区域	流场	2019 年丰水期（8 月）	2020 年丰水期（8 月）	2020 年丰水期（9 月）	2021 年丰水期（8 月）
入江水道	流速均值/(m/s)	0.27	0.09	/	0.28
	流速范围/(m/s)	0.15~0.36	0.01~0.18	/	0.21~0.36
	流速中位值/(m/s)	0.28	0.09	/	0.28
	主导流向	SSW、WSW	WSW、SW	/	SSW
主湖区	流速均值/(m/s)	0.16	0.05	0.06	0.09
	流速范围/(m/s)	0.02~0.31	0~0.28	0~0.25	0.006~0.51
	流速中位值/(m/s)	0.16	0.01	0.018	0.06
	主导流向	SSE、ESE	SSW、SSE、ENE	SSW、ENE	NNE、NE、SSW
东部湖区	流速均值/(m/s)	0.09	0.01	/	0.28
	流速范围/(m/s)	0.06~0.13	0-0.05	/	0.21~0.34
	流速中位值/(m/s)	0.08	0.006	/	0.29
	主导流向	NE	NE	/	NNE
全湖	流速均值/(m/s)	0.16	0.05	/	0.14
	流速范围/(m/s)	0.02~0.36	0~0.28	/	0.01~0.51
	流速中位值/(m/s)	0.15	0.05	/	0.08

3 讨论

3.1 风速对丰水期表层蓝藻密度的影响

对鄱阳湖丰水期水质(pH、温度、溶解氧、氧化还原电位、透明度、悬浮物、总氮、硝态氮、氨氮、总磷、磷酸盐、高锰酸盐指数)、风速、流速与藻类密度及生物量的关系进行冗余分析(RDA),同时为了明确蓝藻各个属对风场的响应情况,将鄱阳湖优势蓝藻属纳入了分析,鄱阳湖丰水期优势水华蓝藻属为微囊藻属、长孢藻属、平裂藻属、色球藻属、假鱼腥藻属,出现频率分别为 33.9%、39.3%、26.3%、29.5%、46.9%,分析结果见图 3。

由图 3a 可知,鄱阳湖丰水期蓝藻及水华蓝藻密度与风速、氧化还原电位、总磷、氨氮呈正相关,与流速、硝氮、高锰酸盐指数、正磷酸盐、总氮等因子呈负相关;微囊藻属、平裂藻属、色球藻属等球状蓝藻密度与风速、氧化还原电位、总磷呈正相关,与总氮、氮磷比呈负相关,与流速不呈显著相关(P>0.05)。由图 3b 可知,鄱阳湖丰水期蓝藻及水华蓝藻生物量与风速、总磷、氨氮、氧化还原电位呈正相关性,与总氮和氮磷比呈负相关;微囊藻属、平裂藻属、色球藻属等球状蓝藻与风速、氧化还原电位、总磷呈正相关。

对鄱阳湖丰水期水质、风速、流速与藻类密度进行 Spearman 相关性分析,结果见附表 I,可知鄱阳湖丰水期风速与藻类总密度、蓝藻密度、硅藻密度、水华蓝藻密度、微囊藻属密度、平裂藻属密度、色球藻属密度、假鱼腥藻密度呈极显著正相关(P<0.01),与色球藻属密度呈显著正相关(P<0.05)。流速与绿藻密度、长孢藻属密度呈极显著负相关(P<0.01),与颤藻属呈显著负相关(P<0.05),与其他藻类不呈显著相关。

对不同风速范围鄱阳湖丰水期蓝藻密度占比情况进行统计分析,结果见表 4。当风速在 1~5 m/s 区间时,各风速区间藻类和蓝藻密度超过 $1×10^7$ cells/L 的点位占比逐渐增大,超过 5 m/s 后逐渐减小。风速在

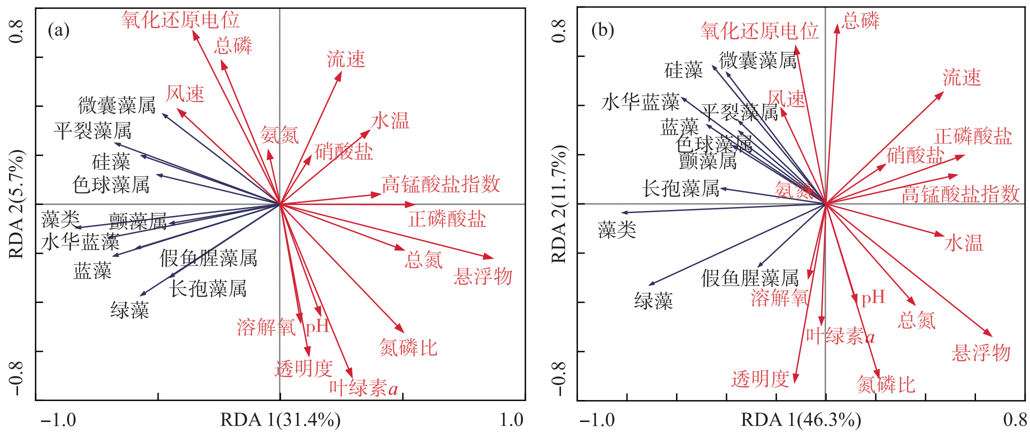


图 3 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期藻类密度(a)、生物量(b)与环境因子等的 RDA 二维排序

Fig.3 Two-dimensional RDA ranking of algae density(a) and biomass(b) and environmental factors in Lake Poyang from 2019 to 2021

4~5 m/s 区间时,藻类和蓝藻密度超过 1×10^7 cells/L 的点位占比最大,其次为 5~6 m/s、3~4 m/s 区间。

表 4 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期不同风速范围藻类与蓝藻密度分布情况

Tab.4 Density distribution of algae and cyanobacteria in Lake Poyang in different wind speed ranges during flood period from 2019 to 2021

风速/(m/s)	点位数	密度>10^7 cells/L 点位数		密度>10^7 cells/L 点位数占比	
		藻类	蓝藻	藻类	蓝藻
0~1	19	7	2	36.8%	10.5%
1~2	29	3	3	10.3%	10.3%
2~3	32	5	1	15.6%	3.1%
3~4	19	9	6	47.4%	31.6%
4~5	18	14	12	77.8%	66.7%
5~6	20	11	8	55.0%	40.0%
>6	14	4	4	28.6%	28.6%

RDA 分析和 Spearman 相关分析结果表明,风速与鄱阳湖丰水期表层蓝藻及主要水华蓝藻密度呈显著正相关性,风速越大表层蓝藻密度越高。对不同风速范围藻类与蓝藻密度分布情况的统计结果也表明,风速在一定范围内升高,蓝藻密度超过 1×10^7 cells/L 的点位数占比也逐渐增高。李春华等的研究结果也显示,太湖湖滨带春夏季风速与藻密度均呈显著正相关[37]。其主要原因是:

一方面,丰水期水体温度和营养盐浓度等水环境因子均适宜蓝藻生长,风场对水体施加剪切力造成水体上下混合、扰动增大,低至中等强度的水体上下扰动可以改善藻类所处水环境中的位置和光能的均匀分布,引起光照辐射的改变,有利于藻类光合作用和能量代谢[38-39]。

另一方面,风场通过驱动湖泊表层水体形成风生流[40],引起水体表层流速变化对藻类生长产生影响。7 月中旬至 9 月底的"湖相"期,在长江顶托作用下,鄱阳湖吞吐流变缓,开阔湖面有利于风生流的形成,流速流向受风的影响相对明显,明显环流区面积可达 600 km^2,其中风生环流比较明显的区域为主湖区和东部湖区。姚静等对鄱阳湖风场影响水动力的模拟研究结果表明,无论哪种风向,3.03 m/s 的定常风模拟下,在湖区中部湖湾及中部西岸,风生流速最大增幅为 2.0~2.5 cm/s,其它大部分湖区流速变幅均在±0.5 cm/s 以内[35]。彭兆亮等对洪泽湖风生流的模拟研究表明,湖面风速为 1 m/s 时,湖区表层水体平均流速为 0.48 cm/s,4 m/s 时上升到 6.55 cm/s,6 m/s 时上升到约 16 cm/s,13 m/s 时到 76.4 cm/s[40]。鄱阳湖 2019—2021

年丰水期平均风速范围在 1.9~4.4 m/s 之间,最大风速 8.8 m/s,仅考虑风场产生的风生流速,水体表层流速应在 7 cm/s 左右,最大不超过 50 cm/s。实际观测中,鄱阳湖丰水期全湖流速均值在 0.05~0.16 m/s 之间,最大值为 0.51 m/s,王婧等的研究也表明鄱阳湖丰水期时,入江水道平均流速在 0.17~0.36 m/s 之间,主湖区平均流速在 0.17~0.25 m/s 之间[29]。因此,鄱阳湖丰水期风场引起的风生流对鄱阳湖水体,尤其是主湖区和东部湖区水体,表层流速的贡献较大。

张海涵等的研究表明流速低的水体适宜蓝藻和绿藻生长,而硅藻适应流速高的水体[39]。张毅敏等的室内模拟实验中,当水体流速为 0.3 m/s 时藻类的密度达到最高,超过该流速后蓝藻密度逐渐下降[41]。藻类生长存在临界流速,当流速低于临界流速时藻类密度随流速增大而升高,超过临界流速时藻类生长受到抑制,铜绿微囊藻临界流速为 0.25~0.3 m/s 之间,丝状藻 *Lyngbya wollei* 完全覆盖水面的流速小于 0.1 m/s[39],项圈藻暴发水华的临界流速为 0.05 m/s[42]。综合以上分析,鄱阳湖 2019－2021 年丰水期大部分区域流速低于蓝藻生长临界流速,此时风场产生的风生流对蓝藻生长具有促进作用。

3.2 风向对丰水期表层蓝藻密度的影响

鄱阳湖丰水期风向对表层蓝藻密度的影响分析结果见图 4~6。由图 4 可知,鄱阳湖 2019 年丰水期(8 月)蓝藻密度最高的区域在东部湖区东岸,其次为主湖区中部。分区域来看,入江水道蓝藻密度分布较为均匀,主湖区中部蓝藻受主导风向 N、NE、SW、S 影响在中部集中,东部湖区蓝藻受 SSW、W 主导风向影响在东岸堆积。

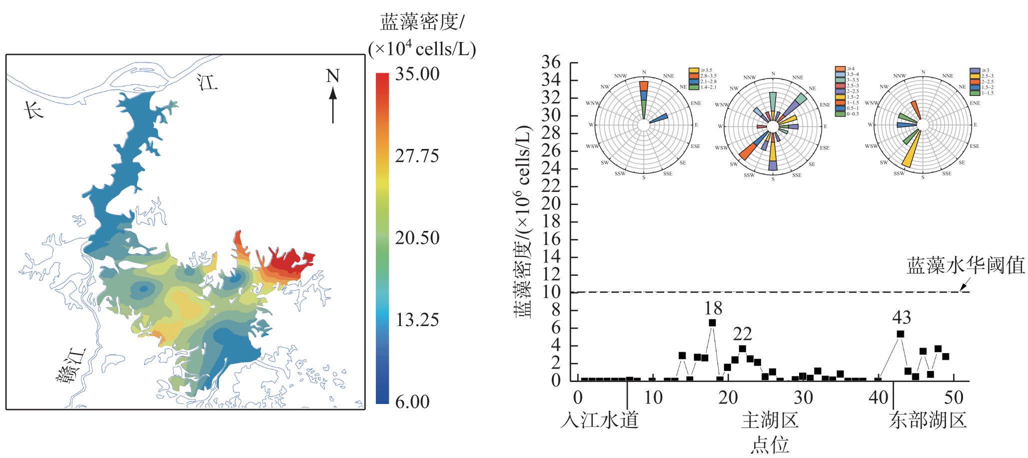


图 4 鄱阳湖 2019 年丰水期(8 月)蓝藻密度空间分布分布与风场对应情况

Fig.4 Cyanobacteria density spatial distribution and wind field correspondence in Lake Poyang in August 2019

由图 5 可知,鄱阳湖 2020 年丰水期(8 月)入江水道、主湖区南部蓝藻密度最高,其次为主湖区中部。分区域来看,入江水道蓝藻密度由南向北逐渐降低,至长江口处密度升高,蓝藻密度受 NE、E 主导风向影响下呈现西高东低的特征;主湖区蓝藻密度在主导风向 N、NW 的下风向堆积,但考虑主湖区由南向北的水流驱动力要大于风速,此时蓝藻分布受风速的影响可能较小;东部湖区蓝藻密度分布特征为东高西低,受风速影响不明显。

由图 6 可知,鄱阳湖 2021 年丰水期(8 月)主湖区西南区域、东部湖区东部区域蓝藻密度最高,分区域来看,入江水道蓝藻密度空间分布特征为南高北低,主湖区蓝藻密度呈现西南区域高、其他区域低的特点,与主导风向 SSW、S、SE 下风向区域堆积的规律不一致。

鄱阳湖 2019－2021 年丰水期表层蓝藻空间分布分析结果表明,湖区表层蓝藻密度的空间分布与风向作用并不完全一致,也即蓝藻并不总是在主导风向的下风向聚集。具体来看,2019 年东部湖区蓝藻空间分布与风场具有一致性,在主导风向的下风向东岸聚集,可能与 2019 年丰水期流速低、风速较低有关,2019 年东

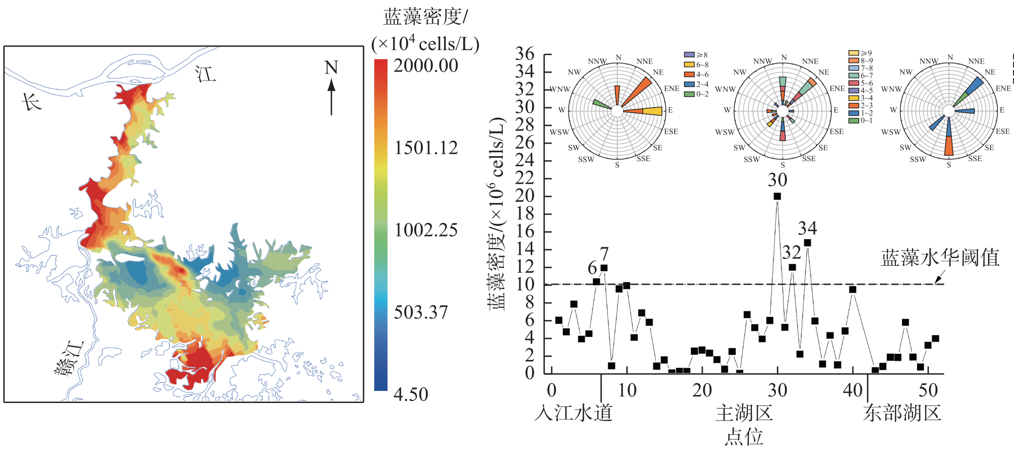


图 5 鄱阳湖 2020 年丰水期(8 月)蓝藻密度分布与风场对应情况

Fig.5 Cyanobacteria density spatial distribution and wind field correspondence in Lake Poyang in August 2020

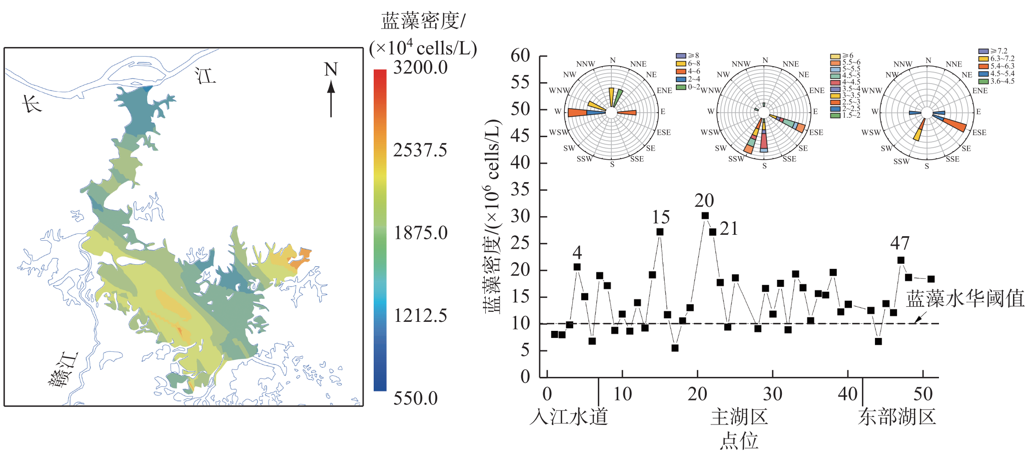


图 6 鄱阳湖 2021 年丰水期(8 月)蓝藻密度空间分布与风场情况

Fig.6 Cyanobacteria density spatial distribution and wind field correspondence in Lake Poyang in August 2021

部湖区平均风速为 1.6 m/s。而太湖的研究表明,当风速低于临界风速(3~4 m/s)时,水体表面藻类顺着风向迅速向迎风岸边漂移,形成藻类大量堆积。当风速超过临界风速时,蓝藻受强烈的紊流作用而难以上浮、已经上浮的受到扰动混合而在垂向较为均匀分布[23, 43],因此该时期风速有利于蓝藻在流速较缓的东部湖区沿主导风向的下风向聚集,导致表层蓝藻密度较高。2020 年丰水期入江水道和主湖区表层蓝藻密度与风场的一致性较好,入江水道和主湖区表层蓝藻由南向北依次从高到低分布,在主导风向的下风向聚集。但经过进一步分析发现,2020 年南昌市赣江和抚河发生严重的蓝藻水华,实地观测和现场采集的藻类数据表明,入江水道南部赣江主支入湖口处水柱中蓝藻颗粒肉眼可见,表层蓝藻密度达到 1.37×10^7 cells/L;主湖区西南部赣江南支、抚河入湖口处表层蓝藻密度分别为 1.96×10^7、2.18×10^7 cells/L。同时,2020 年鄱阳湖丰水期入江水道与主湖区风速均值分别为 4.7、3.0 m/s,超过蓝藻随风向迁移堆积的临界风速,蓝藻趋向于在水柱中垂向均匀混合。因此,2020 年鄱阳湖丰水期入江水道和主湖区表层蓝藻密度分布主要是受流场影响,沿

由南向北流向依次由高向低分布,受风向的影响较小。2021 年丰水期表层蓝藻密度与风向的一致性不强,此时期流速均值在 0.09~0.28 m/s,风速均值在 4.1~5.7 m/s,在该风速范围内表层蓝藻密度在水柱中垂向均匀混合,并沿着流场方向向下游由高到低分布。

综合本小节分析可以发现,在流速较高的区域,无论风速高于还是低于临界风速(3~4 m/s),鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受流场的影响更大;在流速较低的区域,风速在临界风速以下时,鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受风场影响更大。

3.3 风场对丰水期蓝藻水华的影响

余茂蕾等的研究结果表明,风场对太湖表层水体蓝藻水华的空间分布具有决定性影响,较高的风速能够引起蓝藻水华在空间上较高的一致性[44],当风速低于临界风速(3~4 m/s)时,易发生蓝藻水华,当风速超过临界风速时,蓝藻水华现象消失[23,43],Wu 等的研究则表明太湖蓝藻水华消失的临界风速(流速)为 6 m/s (0.057 m/s),此时上层和下层叶绿素浓度比值接近 1,水体蓝藻充分混合[45]。风速是滇池蓝藻水华暴发的主要决定因素之一[46],在具备蓝藻水华发生所需营养盐条件下,滇池蓝藻水华发生频率高低与风速关系最为密切[24]。对巢湖而言,在营养盐充足且温度较为适宜的季节,风速和风向是巢湖蓝藻水华预警的重要因子[25]。胡旻琪等对 2016 年巢湖蓝藻水华的研究结果表明,当风速高于 3 m/s 时,风浪作用使得水体发生扰动,藻类在湖中的水平及垂直分布趋于均一,不再出现藻类聚积现象,从而抑制了水华的形成[47]。

本文尽管未对观测期内的蓝藻水华分布区域和面积作详细调查,但结合野外实地观测和文献结果,鄱阳湖丰水期蓝藻水华主要集中在流速较小的内湾、尾闾区、部分碟形湖及都昌附近水域[4,7-8]。鄱阳湖 2019 年丰水期风速均值较低,处于有利于蓝藻形成水华的风速范围内,但现场调研仅在局部库湾发现有蓝藻堆积,主要原因可能是 2019 年丰水期表层流速范围在 0.02~0.36 m/s 之间,均值为 0.16 m/s,大部分区域流速均超过蓝藻水华消失的流速临界值(0.057 m/s),因此,在全湖蓝藻密度达到水华级别且风速处在适宜形成水华的区间内,并未发生大面积的蓝藻水华。2020 年鄱阳湖丰水期因长江顶托全湖流速处于较低水平,流速范围在 0~0.28 m/s 之间,均值为 0.05 m/s,东部湖区小于 0.05 m/s,但风速均值在 2.6~4 m/s 之间,接近蓝藻水华消失的临界风速,故也未发生较大面积的蓝藻水华。2021 年鄱阳湖丰水期流速和风速均处于高位,流速均值在 0.09~0.28 m/s 之间,均值为 0.14 m/s,风速均值在 4.1~5.7 m/s 之间,均值为 4.4 m/s,两者均已超过蓝藻水华暴发的临界值,因此在全湖蓝藻密度达到水华级别的背景下也未发生大面积的蓝藻水华。上述分析结果提示,当鄱阳湖丰水期水体处于长江顶托的低流速且微风条件下时,鄱阳湖发生大面积蓝藻水华的概率可能明显上升。

4 结论

1)2019－2021 年鄱阳湖丰水期风速与表层蓝藻密度呈显著正相关,风速越大表层蓝藻密度越高,风速在 1~5 m/s 之间时,蓝藻密度超过 1×10^7 cells/L 的点位占比随风速的增大而逐渐升高,风场对水体的充分混合及驱动水体形成的风生流是促进蓝藻生长的原因之一。由于野外实际观测条件限制,本研究观测期内获取的鄱阳湖最大风速为 8.8 m/s,缺乏大风速(>8.8 m/s)条件下鄱阳湖表层蓝藻密度的原位监测数据,因此大风速条件下风场对表层蓝藻密度的影响情况尚有待进一步阐明。

2)2019－2021 年鄱阳湖丰水期流速较高(>0.05 m/s)的区域,无论风速高于还是低于临界风速(3~4 m/s),鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受流场的影响更大;流速较低(<0.05 m/s)的区域,风速低于临界风速以下时鄱阳湖表层蓝藻密度的空间分布受风场影响更大。

3)2019－2021 年鄱阳湖丰水期蓝藻密度超过水华暴发的阈值,但在高风速高流速的共同作用下未能发生大面积的蓝藻水华,仅能在风速适宜(<3~4 m/s)、流速较低(<0.05 m/s)的内湾、尾闾区等区域发生小面积的蓝藻水华。鄱阳湖丰水期水体处于长江顶托的低流速且微风条件下时,发生大面积蓝藻水华的概率可能明显上升。

5 附录

附图Ⅰ、Ⅱ和附表Ⅰ见电子版(DOI: 10.18307/2024.0213)。

6 参考文献

[1] 江西省生态环境厅. 2021 年江西省生态环境状况公报,2022.

[2] Liu JT, Fang SW, Sun JJ. Nutrient zoning of Poyang Lake based on aquatic eco-environment indices. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(1): 61. DOI: 10.1007/s12665-015-4904-7.

[3] Wu Z, Lai X, Zhang L *et al*. Phytoplankton chlorophyll *a* in Lake Poyang and its tributaries during dry, mid-dry and wet seasons: A 4-year study. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2014,(412): 6. DOI: 10.1051/kmae/2013088.

[4] Wu ZS, He H, Cai YJ *et al*. Spatial distribution of chlorophyll *a* and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang: A Yangtze-connected Lake. *Hydrobiologia*, 2014, **732**(1): 61-70. DOI: 10.1007/s10750-014-1844-2.

[5] Wu Z, Cai Y, Liu X *et al*. Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.008.

[6] Wu ZS, Zhang L, Liu BG *et al*. Spatial distribution of chlorophyll *a* in Poyang Lake during wet season and its relationship with environmental factors. *Wetland Science*, 2014, **12**(3): 286-292. [吴召仕, 张路, 刘宝贵等. 鄱阳湖丰水期水体中叶绿素 *a* 含量空间分布及其与环境因子的关系. 湿地科学, 2014, **12**(3): 286-292.]

[7] Qian KM, Liu X, Duan M *et al*. Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 261-267. [钱奎梅, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 261-267.]

[8] Dai GF, Zhang M, Feng ML *et al*. Analysis of cyanobacteria bloom in nanjishan natural reserve in Poyang Lake. *Ecological Science*, 2015, **34**(4): 26-30. [戴国飞, 张萌, 冯明雷等. 鄱阳湖南矶湿地自然保护区蓝藻水华状况与成因分析. 生态科学, 2015, **34**(4): 26-30.]

[9] Nõges T, Nõges P. The effect of extreme water level decrease on hydrochemistry and phytoplankton in a shallow eutrophic lake. Shallow Lakes' 98,1999: 277-283. DOI: 10.1007/978-94-017-2986-4_30.

[10] Havens KE, James RT, East TL *et al*. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution*, 2003, **122**(3): 379-390. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00304-4.

[11] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595. [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.]

[12] Ma JR, Deng JM, Qin BQ *et al*. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 3020-3030. [马健荣, 邓建明, 秦伯强等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. 生态学报, 2013, **33**(10): 3020-3030.]

[13] Wu QL, Xie P, Yang LY *et al*. Ecological consequences of cyanobacetrial blooms in lakes and their countermeasures. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(11): 1115-1123. [吴庆龙, 谢平, 杨柳燕等. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究. 地球科学进展, 2008, **23**(11): 1115-1123.]

[14] Zhang M, Duan HT, Shi XL *et al*. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.013.

[15] Li YX, Rao BQ, Wang ZC *et al*. Spatial-temporal distribution of phytoplankton in bloom-accumulation area in Lake Chaohu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2): 25-31. [李印霞, 饶本强, 汪志聪等. 巢湖藻华易堆积区蓝藻时空分布的研究. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(S2): 25-31.]

[16] Ma W, Pu CS, Luo JC *et al*. Hydrodynamic characteristics of Dianchi Lake and its influence on accumulation of blue-green algae in Dianchi Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(S1): 22-27. [马巍,浦承松,罗佳翠等. 滇池水动力特性及其对北岸蓝藻堆积驱动影响. 水利学报, 2013, **44**(S1): 22-27.]

[17] Wan N, Song LR, Wang RN *et al*. The spatio-temporal distribution of algal biomass in Dianchi Lake and its impact factors. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(2): 184-188. DOI: 10.3724/SP.J.1035.2008.00184. [万能, 宋立荣, 王若南等. 滇池藻类生物量时空分布及其影响因子. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 184-188.]

[18] Zhang H, Huang Y. Character of algae bloom in Chaohu Lake base on NOAA/AVHRR. *China Environmental Science*, 2009, **29**(7): 727-732. [张红, 黄勇. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的巢湖水华规律分析. 中国环境科学, 2009, **29**(7): 727-732.]

[19] Kong FX, Hu WP, Gu XH *et al*. On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2007. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 357-358. DOI:10.18307/2007.0401. [孔繁翔, 胡维平, 谷孝鸿等. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.]

[20] Wang CL, Zhang Y, Zhang NH *et al*. Analysis of meteorological factors of forming feculent and anaerobic water aggregation induced by algal bloom in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 401-408. [王成林,张咏,张宁红等. 太湖藻源性"湖泛"形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, **32**(2): 401-408.]

[21] Li YC, Xie XP, Hang X *et al*. Analysis of wind field features causing cyanobacteria bloom in Taihu Lake combined with remote sensing

methods. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 525-533. [李亚春, 谢小萍, 杭鑫等. 结合卫星遥感技术的太湖蓝藻水华形成风场特征. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 525-533.]

[22] Steinberg CEW, Hartmann HM. Planktonic bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers. *Freshwater Biology*, 1988, **20**(2): 279-287. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1988.tb00452.x.

[23] Zhu W, Chen HM, Wang RC *et al*. Analysis on the reasons for the large bloom area of Lake Taihu in 2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 621-632. DOI:10.18307/2019.0302. [朱伟, 陈怀民, 王若辰等. 2017 年太湖水华面积偏大的原因分析. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 621-632.]

[24] Lu WK, Yu LX, Ou XK *et al*. Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 534-545. DOI:10.18307/2017.0302. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 534-545.]

[25] Jiang CY, TangXX, Wang C *et al*. Influence of meteorological factors on outbreaks of cyanobacterial blooms in water resource region of Chaohu Lake. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(10): 281-286. [蒋晨韵, 唐晓先, 王璨等. 气象因子对巢湖水源地蓝藻水华暴发的影响. 江苏农业科学, 2019, **47**(10): 281-286.]

[26] 朱海虹. 鄱阳湖: 水文・生物・沉积・湿地・开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.

[27] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al*. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI:10.18307/2017.0102. [王冼民, 翟淑华, 张红举等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]

[28] Xu QM, Yang DY, Dong J *et al*. A circulating water project for water environment treatment in Dianchi Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, **15**(1): 116-119. [胥勤勉, 杨达源, 董杰等. 滇池水环境治理的"调水""活水"工程. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(1): 116-119.]

[29] Wang J, Cao WF, Si WW *et al*. Analysis of the characteristics of water current in Poyang Lake. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2003, **29**(2): 105-108. [王婧, 曹卫芳, 司武卫等. 鄱阳湖湖流特征. 南昌工程学院学报, 2003, **29**(2): 105-108.]

[30] Qin BQ, Hu WP, Chen WM *et al*. Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, northern Taihu Lake, China. *J Lake Sci*, 2000, **12**(4): 327-334, 385. DOI: 10.18307/2000.0406. [秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 327-334, 385.]

[31] Ding WH, Qin BQ, Wu TF *et al*. Study on Taihu Lake's wind field and flow field under summer monsoon. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2020, **48**(2): 102-108. [丁文浩, 秦伯强, 吴挺峰等. 夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2020, **48**(2): 102-108.]

[32] Yao YH, Cui SY, Ma W *et al*. Study on hydrodynamic characteristics and water diversion scale from Niulan River to Caohai in Dianchi Lake. *Water Resources and Power*, 2018, **36**(11): 41-45. [姚云辉, 崔松云, 马巍等. 滇池草海水动力特性及牛栏江补水规模适宜性研究. 水电能源科学, 2018, **36**(11): 41-45.]

[33] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[34] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.

[35] Yao J, Zhang Q, Li YL *et al*. The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 225-236. DOI: 10.18307/2016.0126. [姚静, 张奇, 李云良等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 225-236.]

[36] Xiong DG. Analyses of the current of Poyang Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, **22**(3): 200-207. [熊道光. 鄱阳湖湖流特性分析与研究. 海洋与湖沼, 1991, **22**(3): 200-207.]

[37] Li CH, Ye C, Zhang Y *et al*. Temporal and spatial distribution of algal density and its relationship with water quality and wind factor in the littoral zone of Lake Taihu. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(12): 1290-1300. [李春华, 叶春, 张咏等. 太湖湖滨带藻密度与水质、风作用的分布特征及相关关系. 环境科学研究, 2013, **26**(12): 1290-1300.]

[38] Ogilvie BG, Mitchell SF. Does sediment resuspension have persistent effects on phytoplankton? Experimental studies in three shallow lakes. *Freshwater Biology*, 1998, **40**(1): 51-63.

[39] Zhang HH, Wang N, Zong RR *et al*. Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(1): 181-190. [张海涵, 王娜, 宗容容等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展. 环境科学研究, 2022, **35**(1): 181-190.]

[40] Peng ZL, Wang YS, Hu WP *et al*. Responses of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1925-1939. DOI: 10.18307/2021.0626. [彭兆亮, 汪院生, 胡维平等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1925-1939.]

[41] Zhang YM, Zhang YC, Zhang LJ *et al*. The influence of lake hydrodynamics on blue algal growth. *China Environmental Science*, 2007, **27**(5): 707-711. [张毅敏, 张永春, 张龙江等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 707-711.]

[42] Mitrovic SM, Oliver RL, Rees C *et al*. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(1): 164-174.

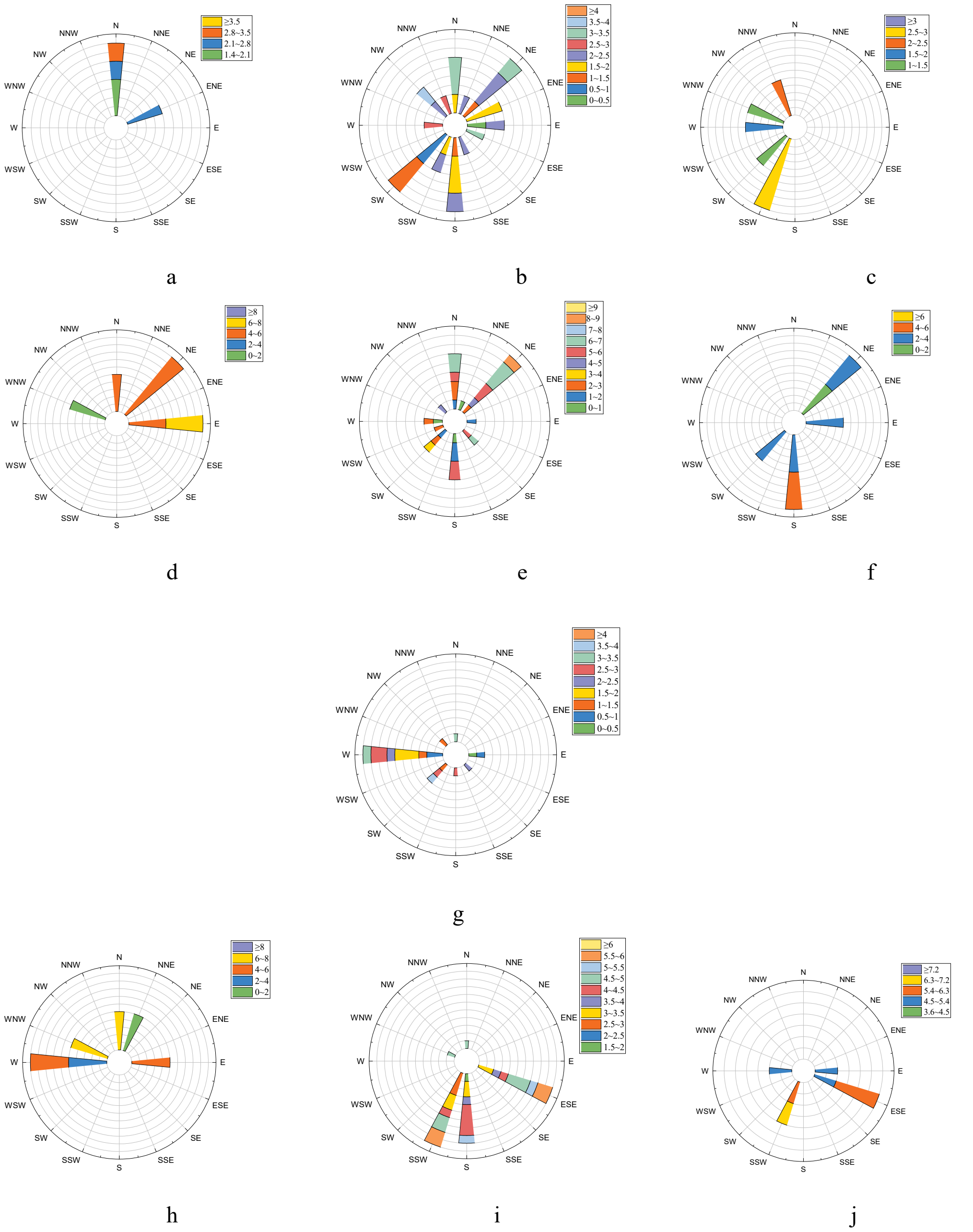
[43] Zhu YC, Cai QM. The dynamic research of the influence of wind field on the migration of algae in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 1997, **9**(2): 152-158. DOI:10.18307/1997.0210. [朱永春,蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 152-158.]

[44] Yu ML, Hong GX, Zhu GW *et al*. Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3519-3529. DOI: 10.13227/j.hjkx.201901184. [余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响. 环境科学, 2019, **40**(8): 3519-3529.]

[45] Wu TF, Qin BQ, Zhu GW *et al*. Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8546-8556. DOI: 10.1007/s11356-013-1812-9.

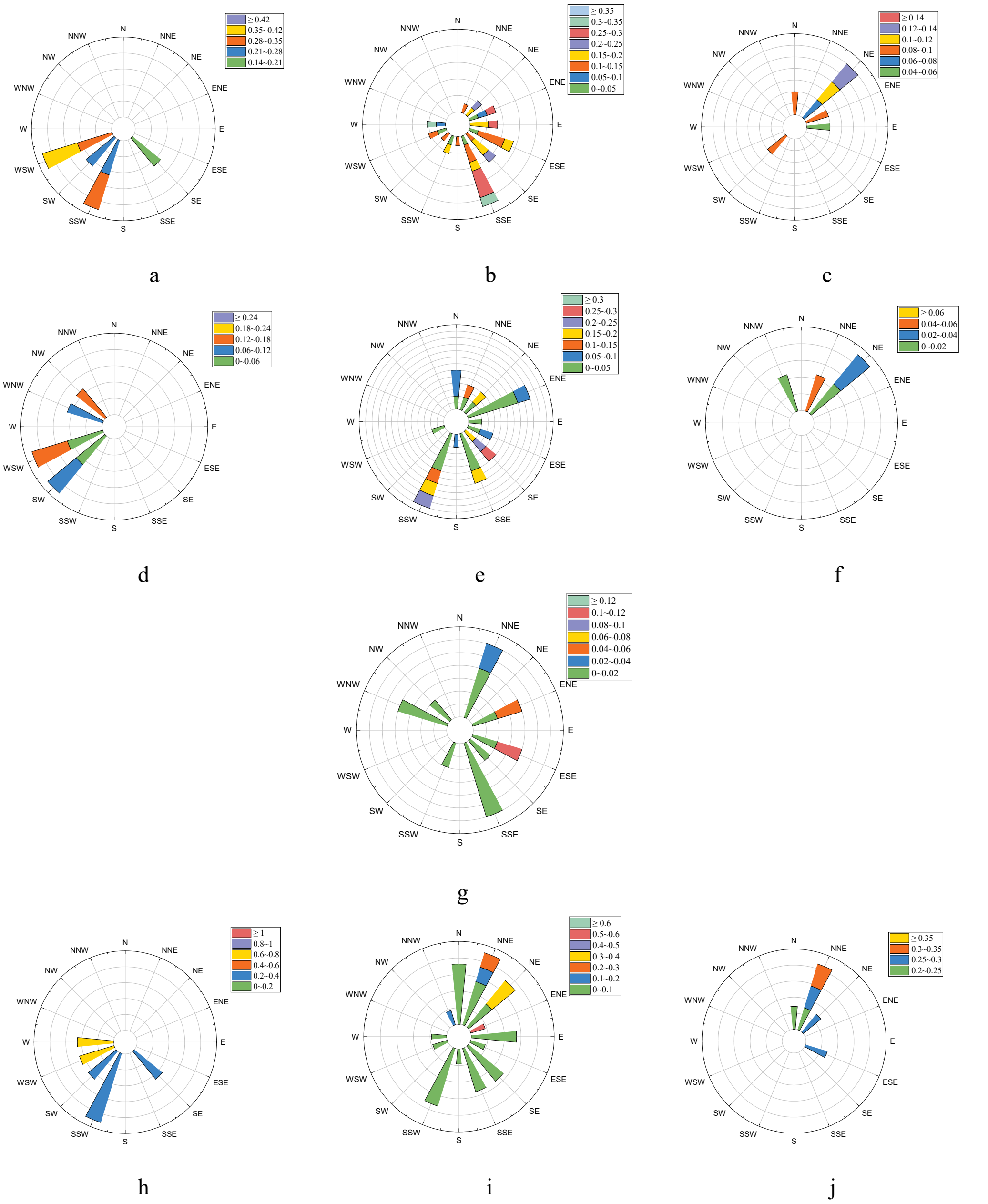
[46] Li JL, Luo CL, Lv H *et al*. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi during 2002-2018. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(2): 878-891. [李加龙, 罗纯良, 吕恒等. 2002—2018 年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子. 生态学报, 2023, **43**(2): 878-891.]

[47] Hu MQ, Zhang YC, Ma RH *et al*. Spatial and temporal dynamics of floating algal blooms in Lake Chaohu in 2016 and their environmental drivers. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4925-4937. DOI: 10.13227/j.hjkx.201801057. [胡旻琪, 张玉超, 马荣华等. 巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析. 环境科学, 2018, **39**(11): 4925-4937.]



附图 I 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期各个区域风场特征玫瑰图（a：2019 年入江水道；b：2019 年主湖区；c：2019 年东部湖区；d：2020 年 8 月入江水道；e：2020 年 8 月主湖区；f：2020 年 8 月东部湖区；g：2020 年 9 月主湖区；h：2021 年入江水道；i：2021 年主湖区；j：2021 年东部湖区）

Attached Fig.I Rose map of wind field characteristics of Lake Poyang during the flood period from 2019 to 2021(a: inlet waterways of 2019; b: main district of 2019; c:estern district of 2019; d: inlet waterways of August 2020; e: main district of August 2020; f :estern district of August 2020; g: main district of September 2020; h: inlet waterways of 2021; i :main district of 2021; j :estern district of 2021)



附图 II 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期各个区域流场特征玫瑰图（a：2019 年入江水道；b：2019 年主湖区；c：2019 年东部湖区；d：2020 年 8 月入江水道；e：2020 年 8 月主湖区；f：2020 年 8 月东部湖区；g：2020 年 9 月主湖区； h：2021 年入江水道；i：2021 年主湖区；j：2021 年东部湖区）

Attached Fig.II Rose map of flow field characteristics of Poyang Lake during the flood period in 2019~2021(a: inlet waterways of 2019; b: main district of 2019; c:estern district of 2019; d: inlet waterways of August 2020; e: main district of August 2020; f :estern district of August 2020; g: main district of September 2020; h: inlet waterways of 2021; i :main district of 2021; j :estern district of 2021)

附表 I 鄱阳湖 2019—2021 年丰水期水环境因子与藻类密度相关性分析

Attached Tab.I Correlation of environment factors and algae density of Poyang Lake in flood period from 2019 to 2021

指标	总藻类	蓝藻	绿藻	硅藻	水华蓝藻	微囊藻属	长孢藻属	平裂藻属	色球藻属	假鱼腥藻属	颤藻属
pH	-0.183*	-0.172*	0.036	-0.286**	-0.191*	-0.243**	0.032	-0.366**	-0.117	-0.046	-0.081
温度	-0.290**	-0.231**	-0.390**	-0.353**	-0.157	-0.013	-0.206*	-0.269**	-0.218**	-0.251**	-0.315**
溶解氧	-0.065	-0.094	0.136	-0.152	-0.119	-0.268**	0.139	-0.246**	-0.025	-0.055	-0.017
总氮	-0.449**	-0.449**	-0.121	-0.501**	-0.445**	-0.372**	-0.181*	-0.442**	-0.352**	-0.221**	-0.221**
总磷	0.133	0.189*	-0.345**	0.348**	0.226**	0.366**	-0.030	0.306**	0.188*	-0.029	0.094
氨氮	-0.043	-0.071	0.054	-0.014	-0.048	0.029	-0.106	0.019	-0.070	0.014	-0.030
硝态氮	-0.158	-0.158	-0.105	-0.151	-0.218**	-0.220**	-0.087	0.068	-0.216**	-0.014	-0.095
正磷酸盐	-0.417**	-0.402**	-0.379**	-0.128	-0.354**	-0.324**	-0.158	-0.264**	-0.242**	-0.389**	-0.199*
高锰酸盐指数	-0.241**	-0.199*	-0.273**	-0.232**	-0.152	-0.115	0.048	-0.186*	-0.227**	-0.215**	-0.187*
悬浮物	-0.701**	-0.682**	-0.409**	-0.521**	-0.662**	-0.522**	-0.360**	-0.601**	-0.478**	-0.406**	-0.421**
透明度	-0.231**	-0.286**	0.309**	-0.401**	-0.259**	-0.367**	0.065	-0.408**	-0.230**	-0.122	-0.123
风速	**0.349****	**0.384****	0.050	**0.331****	**0.360****	**0.428****	0.047	**0.406****	**0.178***	**0.305****	0.150
流速	-0.140	-0.070	**-0.538****	0.128	-0.068	0.107	**-0.310****	0.118	-0.066	-0.110	**-0.209***

注：*代表 P<0.05，**代表 P<0.01。