

鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析

钱奎梅¹,刘霞¹,段明²,陈宇炜^{1*} (1.中国科学院南京地理与湖泊研究所,湖泊与环境国家重点实验室,江苏南京 210008; 2.江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室,江西 南昌 330046)

摘要: 利用鄱阳湖的原位监测数据,分析鄱阳湖水华蓝藻的分布现状及其影响因素,探索鄱阳湖水华蓝藻的源头.研究表明,鄱阳湖浮游植物的优势种为硅藻,蓝藻为鄱阳湖的次级优势种,蓝藻在浮游植物总生物量的比例有逐年增加的趋势.水华蓝藻的主要优势种为鱼腥藻,其次为微囊藻和浮游蓝丝藻. 鄱阳湖蓝藻水华形成初期的基本规律为水华蓝藻在营养盐浓度相对较高且水流较缓的内湾及尾闾区生长分布,在夏秋季水位较高时在水流和风的作用下向主航道输移聚集. 结合鄱阳湖水文特点,主航道的水华蓝藻聚集有可能是上游四个湖区的蓝藻向下游漂移综合作用的结果.研究成果可为控制鄱阳蓝藻水华区域风险灾害提供基础数据.

关键词: 鄱阳湖; 水华蓝藻; 分布

中图分类号: X524,X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)01-0261-07

Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. QIAN Kui-mei¹, LIU Xia¹, DUAN Ming², CHEN Yu-wei^{1*} (1.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Construction Office of Poyang Lake Water Control Project of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China). *China Environmental Science*, 2016,36(1): 261~267

Abstract: The field monitoring data was used to analyze the distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria and explore the source of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. It resulted that diatoms was dominant in Poyang Lake, cyanobacteria was sub-dominant, and there is a rising trend of the proportion of cyanobacteria in the composition of phytoplankton. The dominant species of cyanobacteria were *Anabaena* Sp., *Microcystis* Sp. and *Planktonic Lanssi*. The basic law of the formation of cyanobacterial blooms at the initial stage was that cyanobacteria grow and distributed in the lentic regions with relatively high nutrient concentrations and slow flow, and then transported and gathered in the main channel under stress of flow and wind in summer and autumn in Poyang Lake. Combined with hydrologic characteristics, cyanobacteria aggregates floating in the surface of main channel in Poyang Lake was the combined effects of other four upstream regions. It can provide the basic data and information for the prevention and control of cyanobacteria blooms.

Key words: Poyang Lake; bloom-forming cyanobacteria; distribution

鄱阳湖是中国最大的吞吐性、季节性和通江性淡水湖泊.鄱阳湖上承赣、抚、信、饶、修五河之水,下接长江,水位受“五河”入湖水量和长江水位顶托双重影响,年内水位变幅巨大,最大年变幅为 9.59~15.36m,最小年变幅为 3.80~9.79m,湖水换水速度快,平均换水周期约为 21d.丰水期与枯水期的湖泊面积、容积相差极大.每年 4~7 月,鄱阳湖水位随鄱阳湖水系涨水入湖而上涨,8~9 月因长江涨水顶托或倒灌而维持高水位,10 月开始稳定退水.年最高水位一般出现在 6~7 月(出现在 7 月的占 82.4%),年最低水位一般出现在 12

月至次年 3 月,绝大多数年出现在 12 月至次年 1 月(占 77.5%)^[1].

2007 年,鄱阳湖部分湖区已经出现了明显水华蓝藻聚集现象.2013~2014 年鄱阳湖蓝藻水华分布区域较前几年有大范围增加,在鄱阳湖主航道都昌水域、军山湖、康山湖、撮箕湖、战备湖

收稿日期: 2015-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB417000);国家自然科学基金(41301088);江苏省博士后科研资助计划资助项目(1401158C);江西省水利厅委托项目

* 责任作者, 研究员, ywchen@niglas.ac.cn

等湖区水面均有发现,并且水华蓝藻生物量近期呈增加的趋势.对鄱阳湖浮游植物样品分析发现,硅藻为绝对优势种,生物量占浮游植物总生物量的 50%以上,蓝藻为次级优势种,在夏秋季部分湖区发现水华蓝藻聚集.蓝藻水华的出现,表现现象上是瞬时的“暴发”,但其本质却是藻类生物量在水体中逐渐增加的过程^[2].一般来说,蓝藻在富营养化的封闭水体中较易大量繁殖,由于都昌水域位于主航道,水流速度较快,不利于蓝藻的生长,本文旨在探索都昌水域水华蓝藻的来源,通过对鄱阳湖近几年水华蓝藻生物量的时空变化分析,研究鄱阳湖水华蓝藻的源发地,可为控制鄱阳蓝藻水华区域风险灾害提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于江西省的北部,长江中下游南岸.鄱阳湖形似葫芦,湖体通常以都昌和吴城间的松门山为界,松门山西北为北湖,湖面狭窄,实为一狭长通江通道.松门山东南为南湖,湖面辽阔,是湖区主体.都昌区域位于鄱阳湖通江港道的南北分界附近.鄱阳湖的特点是丰水期鄱阳湖主航道与各个季节性内湖连成大湖面,而水位较低时,鄱阳湖呈现为河道特点,其各个季节性内湖各自成湖,主航道与各个内湖的水系隔离.涨水期湖泊水面呈现北低南高,湖面比降大,湖泊换水较快,湖水在重力作用下较规则地沿主槽方向流动,北部湖域流速大于南部湖域,北部湖域曾实测到最大点流速为 1.48~2.85m/s;南部湖域除主槽流速可达 1.54m/s 外,一般都在 0.3m/s 以内.丰水期湖泊水面总体呈现水平状,此时流速相应较小,一般为 0.10~0.80m/s^[1].

1.2 研究方案及分析方法

在鄱阳湖主航道(PY1-PY24)和已发现蓝藻水华湖区(都昌水域、军山湖、康山湖、撮箕湖、战备湖)设置采样点,采样点平面布置如图 1 所示.监测时间为 2009~2014 年,常规监测设定为每季度一次(1 月、4 月、7 月和 10 月),监测区域包括主航道和已发现蓝藻水华湖区,高频监测设定为水情波动较大时期(5~11 月),每月 2~3 次,监测区

域设定为鄱阳湖主航道.现场原位监测过程中,根据水深情况,分别在各样点的表层、中层和底层采集水样,混合之后作为样品,用 1L 塑料瓶取水样加 10mL 鲁哥氏液固定,回实验室后静置 48h 以上浓缩为 30mL,作为浮游植物定量样品.一部分水样带回实验室,利用 GF/C 玻璃滤膜(Waterman)过滤之后,按照湖泊富营养化调查规范^[3]进行测定总氮、总磷、叶绿素 a、氨氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、正磷酸盐磷($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)等指标.采样同时利用 YSI 6600V2 多参数水质监测仪测定透明度、水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率、pH 值、光合有效辐射(PAR)等指标.

各种统计学检验均采用 SPSS 17.0 统计软件完成,绘图使用 SigmaPlot 10.0 软件完成.

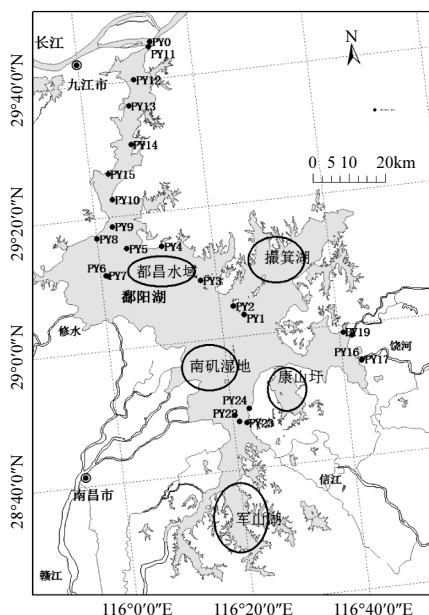


图 1 鄱阳湖采样区域分布

Fig.1 The sampling areas in Poyang Lake

2 结果

2.1 鄱阳湖浮游植物的群落结构

2009~2014 年鄱阳湖浮游植物隶属于 7 门 67 属 132 种,其中绿藻门 34 属 64 种,占总藻类数百分比为 48.5%;硅藻门 17 属 30 种,占总藻类数的 22.7%;蓝藻门 6 属 22 种,占总藻类数的 16.7%;

裸藻门 4 属 7 种,占 5.3%;甲藻门和隐藻门分别为 3 属 4 种和 2 属 4 种,均占鄱阳湖浮游植物总藻类数的 3.0%;金藻门种类数最少,仅见 1 属 1 种.鄱阳湖浮游植物生物量从 2009 年到 2014 年逐渐增加(图 2),其平均值分别为 0.66, 5.00, 5.13, 51.56, 57.92mg/L,特别是 2012 年 10 月份和 2013 年 1 月份和 4 月份,其平均值分别达到 94.55,80.82, 83.40mg/L.总体而言,鄱阳湖浮游植物的优势种为硅藻,生物量百分比可达 53%;蓝藻和绿藻为鄱阳湖的次级优势种,生物量百分比分别为 15%和 13%;隐藻生物量百分比为 12%,并且蓝藻占浮游植物总生物量的比例有逐年增加的趋势.鄱阳湖浮游植物优势种季节变化见表 1.其中颗粒直链硅藻 (*Aulacoseira granulata*) 和 卵形 隐 藻 (*Cryptomonas ovata*)在 4 个季节均为主要的优势种,其生物量百分比分别占 15.53%~34.92%和 9.34%~15.30%.鄱阳湖水华蓝藻分布具有明显的季节变化,丰水期平均生物量为 0.69mg/L,枯水期平均生物量为 0.50mg/L.

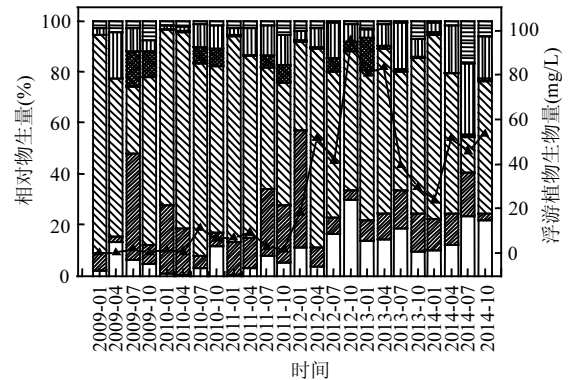


图 2 2009~2014 年鄱阳湖藻类总生物量及群落结构的季度变化

Fig.2 Seasonal variations of phytoplankton biomass and community composition in 2009~2014

鄱阳湖水华蓝藻的主要优势种为鱼腥藻、微囊藻和浮游蓝丝藻(图 3).总体而言,鱼腥藻的生物量百分比相对较高,其次为微囊藻和浮游蓝丝藻.鱼腥藻在丰水期的生物量百分比比较高,占 28%~55%;浮游蓝丝藻和微囊藻在枯水期的

生物量百分比比较高,分别为 29%~36%和 29%~33%.

表 1 鄱阳湖浮游植物优势种及其生物量百分比(%)
Table 1 The dominant species and the relative biomass of phytoplankton in Poyang Lake (%)

优势种	春季	夏季	秋季	冬季
颗粒直链硅藻(<i>Aulacoseira granulata</i>)	34.92	15.53	18.29	34.19
卵形隐藻(<i>Cryptomonas ovata</i>)	14.43	15.30	9.34	9.57
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> Spp.)	6.43	9.45	7.63	7.13
双菱藻(<i>Surirella</i> Spp.)	3.88	4.29	8.61	9.73
飞燕角甲藻(<i>Ceratium hirundinella</i>)	0.73	5.80	1.93	8.69
小环藻(<i>Cyclotella</i> Spp.)	4.01	1.07	8.05	3.75
浮游蓝丝藻(<i>Planktothrix</i> Spp.)	3.15	4.24	5.58	2.91
微囊藻(<i>Microcystis</i> Spp.)	2.41	5.71	5.49	1.50
脆杆藻(<i>Fragilaria</i> Spp.)	1.77	1.60	1.74	3.74

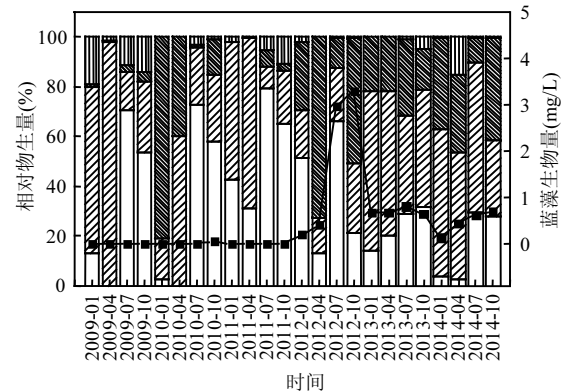


图 3 鄱阳湖蓝藻的种类组成与蓝藻生物量
Fig.3 Species composition and biomass of cyanobacteria

微囊藻 浮游蓝丝藻 蓝藻生物量 鱼腥藻 其他

2.2 水华蓝藻在鄱阳湖的分布现状

鄱阳湖水华蓝藻生物量较高的区域为营养盐浓度相对较高且水流较缓的内湾及尾闾区.目前,康山圩、撮箕湖、战备湖、军山湖以及都昌区域均有蓝藻群体聚集出现,并且水华蓝藻在鄱阳湖中的分布面积及生物量逐年增加(图 4).2010 年都昌水域水华蓝藻生物量达到 0.15mg/L,军山湖水华蓝藻生物量达到 0.6mg/L.2012~2014 年位于东部和南部的撮箕湖、军山湖、战备湖、蚌湖以及主航道都昌水域的水华蓝藻均相对较高.

鄱阳湖水华蓝藻季度变化趋势(图 5)显示,春

季撮箕湖、康山圩、军山湖和战备湖的蓝藻生物量较高,夏季蓝藻分布范围不仅包括军山湖、康山湖,在鄱阳湖主航道也有分布.秋季,水华蓝藻

分布范围有所扩大,蚌湖、撮箕湖以及康山圩生物量均高于 1mg/L .冬季枯水期,军山湖、康山圩以及撮箕湖周围水域蓝藻生物量均较高.

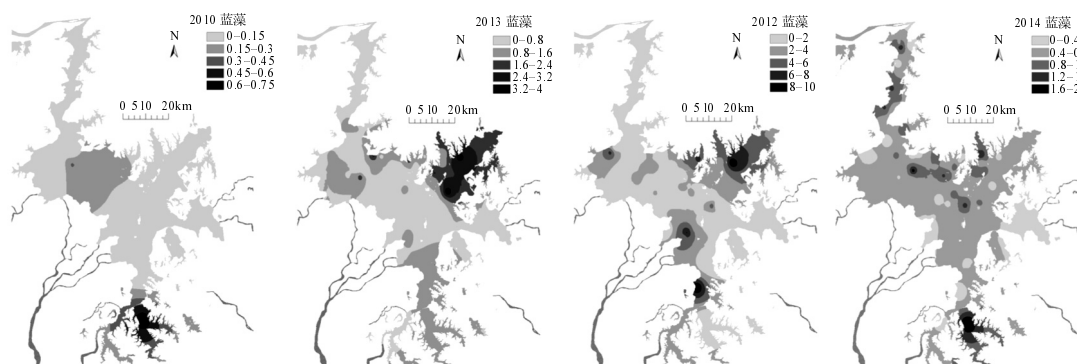


图4 2010~2014年鄱阳湖水华蓝藻分布区域(mg/L)

Fig.4 The distributions of cyanobacteria in Poyang Lake from 2010 to 2014(mg/L)

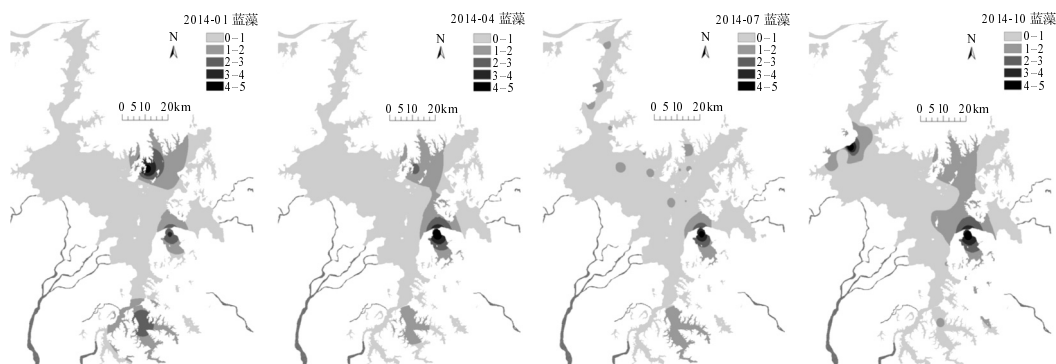


图5 鄱阳湖水华蓝藻在4个水文时期的分布(mg/L)

Fig.5 The distributions of cyanobacteria in Poyang Lake in different seasons (mg/L)

3 讨论

3.1 水华蓝藻生长与环境因子之间的关系

鄱阳湖磷和氮营养盐浓度在夏季高水位时期相对较低,而在低水位时期相对较高(图6).涨退水期,伴随涨退水过程,湖流增大,加上风浪的作用,湖泊底泥不断上涌,释放营养盐进入水体,同时水流带来周围的污染物营养盐.而来源于农用化肥和畜禽、水产养殖废水等农业生产活动产生大量的营养盐污染负荷,与季节密切相关^[4-5].

水体中浮游植物群落的种类组成和数量结构的变化主要受相关的物理、化学和生物等环境因子的影响^[6].鄱阳湖营养盐与水位呈显著的负

相关性(图6和表2),表明鄱阳湖中营养盐受到水位波动的显著影响.浮游植物生物量与SS和COD呈显著负相关($P < 0.01$).鄱阳湖浮游植物与SS表现出负相关性,说明鄱阳湖的涨退水过程中SS影响了浮游植物光合作用所需光照^[7].蓝藻生物量与浮游植物总生物量呈显著正相关($R^2 = 0.744$, $P < 0.001$),蓝藻平均生物量占浮游植物总生物量的25%左右.蓝藻生物量与营养盐和电导率表现出显著的负相关($P < 0.01$),与水位呈正相关($P < 0.01$).鱼腥藻生物量与水位和溶解氧呈显著正相关($P < 0.01$),与水温、SS及氮磷营养盐呈显著负相关($P < 0.01$).微囊藻、浮游蓝丝藻生物量与透明度和溶解氧呈显著正相关($P < 0.01$),与油

度、SS 及氮磷营养盐呈显著负相关($P<0.01$).

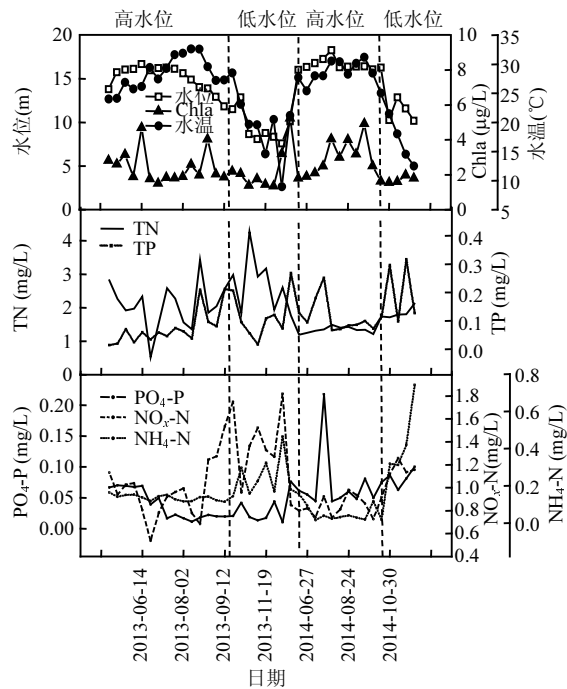


图6 鄱阳湖浮游植物 Chl a、水温及营养盐在不同水位时期的变化

Fig.6 Variations of Chl a, water temperature and nutrients in different hydrological phases in Poyang Lake

浮游植物生物量及 chl a 与水位呈正相关($P<0.01$).表现为鄱阳湖水位上升,浮游植物 chl a 浓度增加;水位回落,chl a 浓度减少.蓝藻与水位呈显著正相关($P<0.01$),表明鄱阳湖中水位变化会通过改变水体养分、理化变量等因素导致浮游植物群落结构变化^[8-10].鄱阳湖不同水位期对应了不同季节,季节变化与水位波动带来的协同耦合作用导致了鄱阳湖浮游植物以及蓝藻的季节变化.春末

夏初涨水期水位上升,水温的增加有利于浮游植物,特别是喜温耐高光强的种类生长,因此,浮游植物生物量增加;丰水期由于涨水过程导致的 SS 增加,透明度降低,同时加上涨水对藻类和营养盐的稀释作用,丰水期浮游植物生物量降低;秋冬季,水位回落,此时水温有所降低,只有少数喜低温的藻类生长,浮游植物生物量降低.总体来说,丰水期,水位显著提高,透明度降低,光照低,再加上大量生长的大型水生植物,对蓝藻的生长和繁殖不利.枯水期,营养盐浓缩,局部水体形成了静水状态,有利于水华蓝藻的生长,从而形成了蓝藻水华^[11].

营养盐和水温是影响浮游植物生长的关键因子^[12].一般来说,在营养物质充足、水体较为稳定时,适宜的高水温是蓝藻生长旺盛的外界诱发因子,随着温度的升高,蓝藻光合作用速率加快,在高水温的诱发下蓝藻大量繁殖生长.虽然绿藻在温度较高时可以快速生长,但当温度维持较高水平时,蓝藻可以产生藻毒素来抑制绿藻生长增殖^[13].同时其他藻类在 25℃ 以上时生长速率缓慢^[14],耐受不住高水温,因此高温条件下蓝藻更具有竞争优势.而本研究中,冬春季蓝藻生物量随着水温的增加而增加,而夏季生物量却有所降低,其原因为夏季涨水过程的稀释作用大于蓝藻的生长,导致蓝藻及其优势种与水温没有显著的相关关系.鄱阳湖水华蓝藻的优势种为鱼腥藻、浮游蓝丝藻和微囊藻,其中鱼腥藻占绝对优势.鱼腥藻属固氮藻类,夏季丰水期随着水体中氮营养盐的消耗及水体的稀释作用,同时水温较高,当周围氮源浓度降低时,鱼腥藻的部分营养细胞会转变为含固氮酶的异形胞,起到固氮作用,是较强的氮竞争者^[15].

表2 浮游植物生物量与环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between phytoplankton biomass and environment parameters

项目	透明度	水温	DO	浊度	SS	PO ₄ -P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TP	TN	Chla	水位
总生物量	0.249**	-0.003	0.053	-0.179**	-0.286**	0.026	-0.161**	-0.198**	-0.245**	-0.144**	-0.230**	0.232**	0.148**
蓝藻门	0.225**	-0.089	0.134	-0.204**	-0.196**	-0.046	-0.296**	-0.262**	-0.333**	-0.182**	-0.331**	0.243**	0.330**
鱼腥藻	0.123*	-0.176**	0.228**	-0.083	-0.176**	-0.163**	-0.212**	-0.185**	-0.173**	-0.056	-0.173**	0.185**	0.289**
微囊藻	0.305**	-0.123*	0.183**	-0.409**	-0.229**	-0.040	-0.264**	-0.329**	-0.390**	-0.342**	-0.361**	0.188**	0.519**
浮游蓝丝藻	0.151**	0.143**	-0.185**	-0.208**	-0.112*	0.202**	-0.186**	-0.120*	-0.320**	-0.109*	-0.314**	0.138*	0.018
Chla	0.191**	-0.152**	0.171**	-0.082	-0.096	-0.231**	-0.021	-0.047	-0.039	0.055	0.019	1.000	0.208**
水位	0.068	-0.256**	0.433**	-0.341**	-0.225**	-0.288**	-0.204**	-0.434**	-0.328**	-0.413**	-0.222**	0.208**	1.000

注:** 在置信度(双侧)为0.01时,相关性显著; * 在置信度(双侧)为0.05时,相关性显著.

3.2 鄱阳湖水位变化对水华蓝藻分布的影响

军山湖、康山圩、战备湖和撮箕湖为鄱阳湖四个季节性内湖(表3),主要污染来源包括水产养殖污染源、工业污染及通过支流带入的其他污染源,水体富营养化程度较高.这几个湖区在枯水期与鄱阳湖主湖区隔离,物理特征近似于浅水湖泊,为蓝藻生长提供了相对稳定的水力条件,同时营养负荷的积累^[20]促使该区域的水华蓝藻迅速繁殖并累积.

在常规采样过程中发现,不仅以上几个相对静止湖区(军山湖、撮箕湖、康山圩和战备湖等)有肉眼可见的蓝藻水华漂浮聚集层,在水流速度较快的主航道都昌水域也发现了暂时性的肉眼可见的水华蓝藻聚集.监测数据显示,主航道都昌水域水质正常,未发现氮磷超标、水质富营养化情况,表明蓝藻本地生长量较小.

表 3 鄱阳湖已发现蓝藻聚集湖区的比较
Table 3 Comparison of different regions

湖区	湖区简介	与鄱阳湖主湖区的水流关系
都昌水域	鄱阳湖的主航道	自由流通
撮箕湖	水产养殖基地,鄱阳湖的局部湖区	自由流通
战备湖	水产养殖基地,鄱阳湖的局部湖区	丰水期自由流通,枯水期与鄱阳湖主湖区隔离
康山圩	重要蓄洪区,鄱阳湖的阻隔湖区	由大堤与鄱阳湖主湖区阻隔,秋冬季放水
军山湖	重要蓄洪区,鄱阳湖的阻隔湖区 ^[19]	由大堤与鄱阳湖主湖区阻隔,秋冬季放水

鄱阳湖属于过水型湖泊,水位波动不仅会改变水体理化性质从而影响浮游植物生长,还会使得水体中的藻类随水流迁移^[16-18].鄱阳湖水下地形起伏,水位季节性变化大,湖区水面变化明显,流态呈多样性.枯水期(12~3 月)水位低时,水流在河道里流动(图 7),湖流流速较大,为河道型湖泊.枯水期水面较小,各个季节性内湖各自成湖,风对于藻类的输移作用不明显.丰水期湖区水位高,湖面广阔(图 1),出湖、入湖河道流量较大,除出湖、入湖河流的河口区域外,湖面流速很小,鄱阳湖中的浮游藻类就会受到风的作用.鄱阳湖年最多风向为偏北风,只有丰水期 7~9 月间在太平洋副高

控制下才多刮偏南风,偏南风加快湖流从南至北流动(图 8).

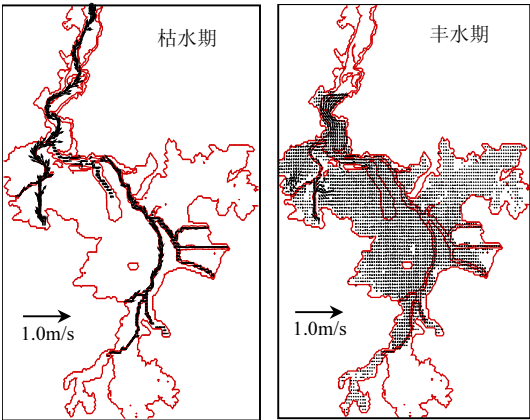


图 7 鄱阳湖的流场分布
Fig.7 The flow distribution of Poyang Lake

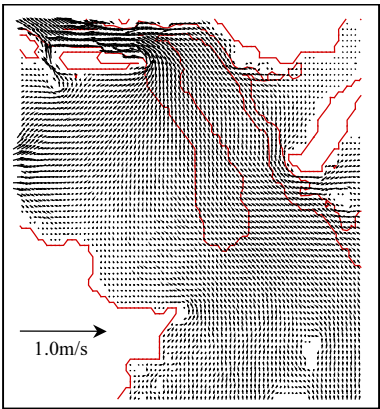


图 8 南风作用下鄱阳湖主湖面的流场分布
Fig.8 The flow distribution of Poyang Lake under south wind

从水华发生的空间分布上看,都昌水域位于鄱阳湖的主航道,表层流速较快,这有悖于流速和浮游植物生物量之间的相互关系^[21-24].这一现象同鄱阳湖的湖流特点以及形状特征有很大的关系.结合图 5 四个时期的水华蓝藻输移分布状况以及图 7 和图 8 的鄱阳湖流场图,丰水期鄱阳湖水体流速较低,在局部湖湾生长的浮游蓝藻,如内湾及尾闾区,不易受到鄱阳湖由南向北的主流场影响,而是堆积在这些湖湾中,从而形成表面水华.鄱阳湖内湾及尾闾区原位生长的浮游蓝藻在涨退水期间受到水流的影响,就会在鄱阳湖主

航道中输移, 其中的鱼腥藻和微囊藻的丝状、絮状群体在未明显聚集成片的情况下随水流顺着主航道向下游漂移, 到都昌水域这段收缩的过水断面时, 该处过水断面的收缩对水中大量繁殖生长的蓝藻生物群体起到了一定的“浓缩”作用, 在气温、光照等环境条件合适的情况下大量蓝藻逐渐上浮, 并形成自岸边缓流带向河道中心逐渐延伸的肉眼可见的片状、带状蓝藻生物聚集体。

4 结论

鄱阳湖水华蓝藻在营养盐浓度相对较高且水流较缓的内湾及尾闾区如撮箕湖、战备湖、康山圩和军山湖中生长积累, 水位较高时随水流在鄱阳湖主航道中输移, 在都昌水域上浮聚集。因此, 鄱阳湖水华蓝藻的源发地应为营养盐浓度相对较高且水流较缓的内湾及尾闾区, 即已发现水华蓝藻聚集的 4 个湖区撮箕湖、战备湖、康山圩和军山湖。

参考文献:

- [1] 闵 蓁. 鄱阳湖水位变化规律的研究 [J]. 湖泊科学, 1995, 7(3): 281-288.
- [2] 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 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [3] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [4] 陈晓玲, 张 媛, 张 琨, 等. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征. 湖泊科学, 2013, 25(5): 643-648.
- [5] 莫明浩, 杨 洁, 顾 胜, 等. 鄱阳湖环湖区非点源污染负荷估算 [J]. 人民长江, 2010, 41(17): 51-53.
- [6] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status [J]. Hydrobiologia, 1998, 369: 11-26.
- [7] Wu Z, He H, Cai Y, et al. Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang, a Yangtze-connected lake [J]. Hydrobiologia, 2014, 732: 61-70.
- [8] Casali S, Calijuri M C, Barbarisi B, et al. Impact of the 2009 extreme water level variation on phytoplankton community structure in Lower Amazon floodplain lakes [J]. Acta Limnologica Brasiliensia, 2011, 23(3): 260-270.
- [9] Domitrovic Y Z. Effect of fluctuations in water level on phytoplankton development in three lakes of the Paraná river floodplain (Argentina) [J]. Hydrobiologia, 2003, 510: 175-193.
- [10] Emiliani M O G. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a river- floodplain lake system (Paraná River, Argentina) [J]. Hydrobiologia, 1997, 357(1-3): 1-15.
- [11] Mihaljević M, Stević F. Cyanobacterial blooms in a temperate river-floodplain ecosystem: the importance of hydrological extremes [J]. Aquat Ecol, 2011, 45: 335-349.
- [12] Cetinić I, Vilic D, Ljubecic Z, Olujić G. Phytoplankton Seasonality in a Highly Stratified Karstic Estuary (Krka, Adriatic Sea) [J]. Hydrobiologia, 2006, 555: 31-40.
- [13] 戴瑾瑾, 陈德辉, 高云芳, 等. 蓝藻毒素的研究概况 [J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(1): 90-97.
- [14] 史小丽, 王凤平, 蒋丽娟, 等. 扰动对外源性磷在模拟水生态系统中迁移的影响 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 537-541.
- [15] Laamanen M, Kuosa H. Annual variability of biomass and heterocysts of the N₂-fixing cyanobacterium Aphanizomenon flos-aquae in the Baltic Sea with reference to Anabaena spp. and Nodularia spumigena. Boreal Env Res, 2005, 10: 19-30.
- [16] Schrenk-Bergt C, Krause D, Prawitt O, et al. Eutrophication problems and their potential solutions in the artificial shallow lake Altmühlsee (Germany) [J]. Studia Quaternaria, 2004, 21: 73-86.
- [17] Muzaffar S B, Ahmed F A. The effects of the flood cycle on the diversity and composition of the phytoplankton community of a seasonally flooded Ramsar wetland in Bangladesh [J]. Wetlands Ecol Manage, 2007, 15: 81-93.
- [18] Wang L, Cai Q, Xu Y, et al. Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay [J]. Aquatic Ecology, 2011, 45(2): 197-212.
- [19] 刘 霞, 钱奎梅, 谭国良, 等. 鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例 [J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2557-2564.
- [20] DENG X, ZHAO Y, WU F, et al. Analysis of the trade-off between economic growth and the reduction of nitrogen and phosphorus emissions in the Poyang Lake Watershed, China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 330-336.
- [21] WANG T Y, WANG J Q, WU J P. The comparison of species diversity of phytoplankton between spring and autumn in Poyang Lake [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2004, 43(6): 1073-1078.
- [22] WU Z, CAI Y, LIU X, et al. Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang, The largest freshwater lake in China [J]. Journal of Great Lakes Research, 2013, 39: 476-483.
- [23] 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 707-711.
- [24] Stević F, Mihaljević M, Špoljaric D. Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations [J]. Hydrobiologia, 2013, 709: 143-158.

作者简介: 钱奎梅(1982-), 女, 江苏连云港人, 博士, 主要从事淡水藻类生态学研究. 发表论文 10 余篇.