

## 钱塘江干流夏季浮游植物群落结构特征及其对水文气象的响应<sup>\*</sup>

张萍<sup>1</sup>, 国超旋<sup>2</sup>, 俞洁<sup>3</sup>, 权秋梅<sup>1\*\*</sup>, 姚建良<sup>4</sup>, 王吉毅<sup>5</sup>, 叶小锐<sup>2</sup>, 朱梦圆<sup>2</sup>, 孙起亮<sup>4</sup>, 朱广伟<sup>2\*\*</sup>

(1: 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637002)

(2: 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, 南京 210008)

(3: 浙江省生态环境监测中心, 杭州 310012)

(4: 杭州市桐庐县环境保护监测站, 桐庐 311500)

(5: 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 河流中浮游植物的动态变化能够较好的指示河流水质状况. 为探索水文气象过程对筑坝河流浮游植物群落结构的影响, 2020年夏季, 以钱塘江干流为例, 对包括富春江水库在内的11个河段开展了浮游植物群落结构及相关环境因子的调查分析. 结果表明: 夏季在钱塘江干流共鉴定出浮游植物6门59属95种, 优势属为沟链藻(*Aulacoseira*)、菱形藻(*Nitzschia*)、平裂藻(*Merismopedia*)、长孢藻(*Dolichospermum*)、假鱼腥藻(*Pseudoanabaena*)和微囊藻(*Microcystis*), 其中梅雨期优势属主要隶属于硅藻门, 梅雨后蓝藻门种属则迅速占优, 浮游植物总细胞密度快速增加; 整个夏季浮游植物的平均细胞密度为  $(1.57 \pm 2.96) \times 10^6$  cells/L, 其中梅雨期细胞密度为  $(0.37 \pm 0.36) \times 10^6$  cells/L, 显著低于梅雨后的细胞密度  $(4.06 \pm 4.38) \times 10^6$  cells/L. 空间上, 大坝拦截形成的河流型水库对浮游植物群落结构和藻密度均产生极显著的影响, 浮游植物密度在富春江库区段最高, 兰江及以上江段其次, 新安江库区段及钱塘江河口较低; 梅雨后富春江库区水温分层, 显著促进了蓝藻和硅藻的增殖. 冗余分析表明, 气温和降雨是夏季钱塘江干流浮游植物群落结构变化的主要驱动因子, 蓝藻门、绿藻门细胞密度与气温呈显著正相关, 与降雨呈显著负相关, 而硅藻门细胞密度与之相反; 梅雨后气温快速增高显著增加库区段水体的蓝藻门细胞密度, 蓝藻水华暴发风险迅速增高, 水安全管理中应予以重点防范.

**关键词:** 浮游植物; 有害蓝藻; 河流; 降雨; 气温; 富春江水库; 钱塘江

## Characteristics of phytoplankton community structure and its response to hydro-meteorology in summer of Qiantang River<sup>\*</sup>

Zhang Ping<sup>1</sup>, Guo Chaoxuan<sup>2</sup>, Yu Jie<sup>3</sup>, Quan Qiumei<sup>1\*\*</sup>, Yao Jianliang<sup>4</sup>, Wang Jiyi<sup>5</sup>, Ye Xiaorui<sup>2</sup>, Zhu Mengyuan<sup>2</sup>, Sun Qiliang<sup>4</sup> & Zhu Guangwei<sup>2\*\*</sup>

(1: College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Ecological and Environmental Monitor Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, P.R.China)

(4: Tonglu Environmental Protection Monitoring Station of Hangzhou, Tonglu 311500, P.R.China)

(5: College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, P.R.China)

**Abstract:** The dynamic changes of phytoplankton in rivers can better indicate the water quality of rivers. In order to explore the effects of hydro-meteorological processes on the phytoplankton community structure of damming rivers, taking the main stream of Qiantang River as an example, the phytoplankton community structure and related environmental factors were investigated and

<sup>\*</sup> 2021-07-07 收稿; 2021-08-13 收修改稿.

国家自然科学基金项目(41830757)、中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)和杭州市生态环境局淳安分局委托调查项目(CAZFCGK2020-1)联合资助.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: meimeiq@163.com, gwzhu@niglas.ac.cn.

analyzed in 11 river reaches including Fuchunjiang Reservoir in the summer of 2020. The results showed that: A total 95 species belonging to 6 phyla and 59 genera of phytoplankton were identified during the summer in the main stream of Qiantang River. The dominant genera were *Aulacoseira*, *Nitzschia*, *Merismopedia*, *Dolichospermum*, *Pseudoanabaena*, and *Microcystis*. During the Meiyu period, the dominant genera belonged to the diatoms, while after the rain, the cyanobacteria quickly became dominant. The average cell density of phytoplankton in summer was  $(1.57 \pm 2.96) \times 10^6$  cells/L, and the cell density during Meiyu period was  $(0.37 \pm 0.36) \times 10^6$  cells/L, which was significantly lower than that in Meiyu period ( $(4.06 \pm 4.38) \times 10^6$  cells/L). Spatially, the river reservoir formed by dam interception has an extremely significant effect on phytoplankton community structure and algal density. The phytoplankton density is the highest in the Fuchunjiang River reservoir section, followed by the Lanjiang River and its upper reaches, and the Xin'anjiang River reservoir section and the Qiantang River estuary. After the Meiyu period, the water temperature stratification in the Fuchunjiang River reservoir significantly promoted the proliferation of cyanobacteria and diatoms. Redundancy analysis showed that temperature and rainfall were the main driving factors of phytoplankton community structure change in the main stream of Qiantang River in summer. Cyanophyta and Chlorophyta cell densities were positively correlated with temperature and negatively correlated with rainfall, while Diatomophyta cell densities were contrary to Cyanophyta. The rapid increase of temperature after the Meiyu period can rapidly increase the cell densities of cyanobacteria in the reservoir area, and the risk of cyanobacteria blooms increases rapidly. Therefore, the prevention of cyanobacteria blooms should be emphasized in water safety management.

**Keywords:** Phytoplankton; harmful algal; river; rainfall; temperature; Fuchunjiang Reservoir; Qiantang River

浮游植物是河流生态系统中的初级生产者,在信息传递、物质循环和能量流动过程中发挥着不可替代的作用。浮游植物群落结构与河流环境因子之间会相互影响<sup>[1]</sup>,其可以快速地响应环境变化,能够较好地指示河流水质状态<sup>[2-4]</sup>。浮游植物的异常增殖会引发藻类水华,对河流生态系统的结构和功能造成严重危害,威胁着沿岸渔业、旅游业的发展<sup>[5]</sup>,因此,阐明浮游植物群落结构动态特征及影响因素在河流生态系统中至关重要<sup>[6]</sup>。

浮游植物在河流中的生长既受到营养盐限制,也受水文气象条件的显著影响。营养盐是浮游植物生长的基础<sup>[7]</sup>,气象与水文动力学过程组合对浮游植物群落结构的变化和水华的快速形成具有重要影响<sup>[8]</sup>。例如,降雨能将营养盐带入水体,改变藻类的生长环境,造成浮游植物群落结构组成的变化<sup>[9-11]</sup>;水体流量影响着浮游植物功能群和生物量的变化<sup>[12]</sup>;水库入库流量、水位<sup>[13]</sup>和水体稳定度<sup>[14]</sup>等是水华形成的关键因素;全球变暖有利于蓝藻在水生生态系统中占优势<sup>[15]</sup>,极度干旱影响水动力条件,进而对水华的形成构成显著影响<sup>[16]</sup>。

钱塘江干流不仅是重要的水源地,还是开发可持续发展渔业资源的重要水域,水域环境背景条件和水质状况复杂多变<sup>[17]</sup>。2004、2016 和 2017 年钱塘江干流的富春江段均发生过蓝藻水华<sup>[18]</sup>。水华的暴发不仅仅对旅游业造成一定冲击,也对饮用水安全构成严重威胁。鉴于此,阐明钱塘江干流浮游植物群落结构的时空特征和影响因素,对流域水质安全保障尤为重要。

盛海燕等<sup>[19]</sup>利用 2006—2007 年 20 次富春江水库的调查数据,发现富春江水库浮游植物群落结构、组成及密度受水文、水温、营养盐等环境因子的显著影响;谷雨等<sup>[20]</sup>在钱塘江(杭州段)4 个断面用野外藻类测定仪(BBE)测定,分析不同门藻类的季节变化特征及其与水温 and 总磷的关系;赫雅宾等<sup>[21]</sup>对富春江下游夏季浮游植物群落结构进行调查,认为氮是影响浮游植物的主要因子;国超旋等<sup>[22]</sup>分析极端天气对富春江水库蓝藻水华暴发的促发作用;吴挺峰等<sup>[23]</sup>通过数值模拟推算,认为当水库日均下泄流量超过  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  以上,能够有效预防水库水华暴发;王婕等<sup>[24]</sup>初步探究了富春江水库变动回水区蓝藻水华的成因。此外,还有少量关于钱塘江河口浮游植物分布和蓝藻水华的研究<sup>[25-26]</sup>。然而,上述研究虽然表明水文气象因子是富春江水库浮游植物群落结构的重要影响因子,但是缺乏在较宏观尺度上对不同江段浮游植物群落结构、组成和细胞密度的对比分析与探讨,也未见有关浮游植物对水文气象过程动态响应的详细观测研究。因此,本研究选取了浮游植物群落结构演替剧烈的梅雨季及之后的高温晴热时段,在钱塘江干流的 11 个断面采样进行浮游植物和水质物理化学指标监测,并结合同期水文气象数据,探究水文气象过程及河流筑坝影响下钱塘江干流浮游植物群落结构时空变化特征及关键驱动因子,以为钱塘江流域的

水环境管理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

钱塘江流域( $28^{\circ}0' \sim 30^{\circ}30'N$ ,  $117^{\circ}30' \sim 120^{\circ}30'E$ )位于浙江省西部,发源于安徽省休宁县,主要支流有衢江、金华江、兰江、新安江、富春江和钱塘江,属于亚热带季风气候,年均降雨量 980~2000 mm,年均气温  $15 \sim 18^{\circ}C$ <sup>[27]</sup>. 受梅雨控制,6 月中下旬到 7 月上旬常有连绵阴雨,并伴有暴雨<sup>[28]</sup>.

富春江水库地处钱塘江干流兰江与新安江交汇后的江段,是一个过流型水库. 出库流量主要受控于上游兰江自然河道的径流量,以及新安江水库的下泄流量,库区段多年平均水域面积为  $56 \text{ km}^2$ <sup>[19]</sup>,平均库容为  $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[29]</sup>. 富春江水库是桐庐县的主要供水水源,其富营养化程度与水质安全备受关注.

### 1.2 样品采集与数据来源

于 2020 年夏季 6—8 月在钱塘江干流设置 11 个监测点位(图 1)进行样品采集,其中 S1 位于衢江, S2 位于金华江, S3~S4 位于兰江, S5 位于千岛湖下游新安江, S6~S9 位于富春江水库库区, S10~S11 位于富春江水库下游. 其中, S5(新安江)6 月数据缺失.

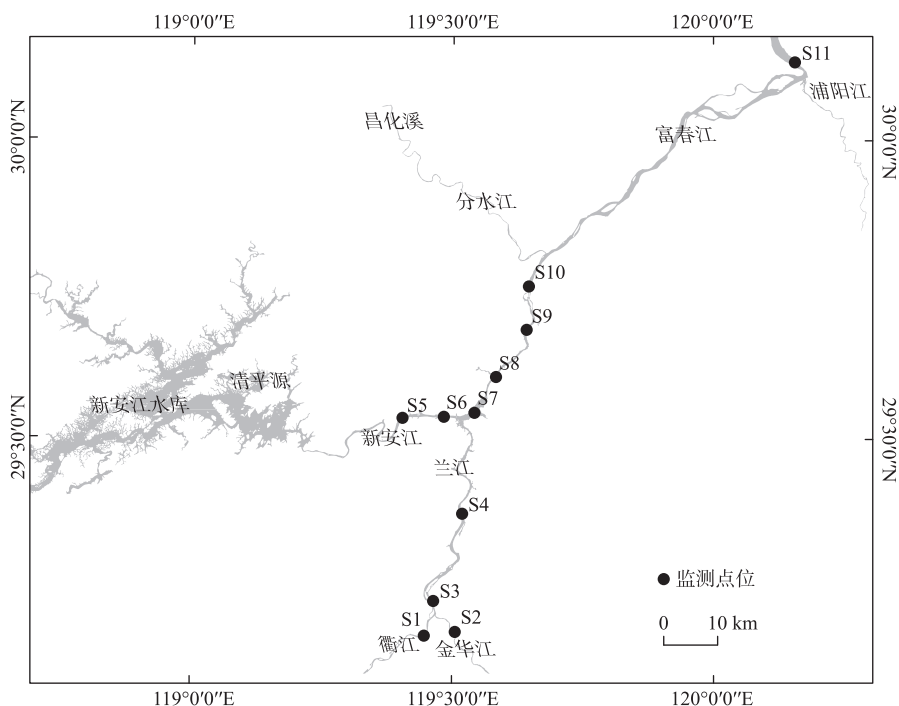


图 1 钱塘江干流采样点位(S1: 衢江; S2: 金华江; S3: 兰江; S4: 将军岩; S5: 新安江; S6: 梅城大桥; S7: 三都大桥; S8: 子胥渡; S9: 严陵坞; S10: 桐庐水厂; S11: 闻家堰)

Fig.1 Sketches of sampling sites in Qiantang River

使用 YSI 公司的 EXO2 多参数水质分析仪原位测定水温(WT)、叶绿素  $a$  (Chl.  $a$ )、浊度等水质指标,并现场查看 EXO 数据,选取叶绿素  $a$  最大层,采集该层的浮游植物样品及水样. 取 1.5 L 水样立即冷藏,带回实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、溶解性有机碳(DOC)、高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ )、有机悬浮颗粒物(OSS)等水质指标. DOC 指标采用总有机碳测定仪(multi N/C 2100)测定,其余参数测定方法参考文献[30].

浮游植物定量样品的采集,使用有机玻璃采水器取水样 1 L,置于样品瓶中,现场用 1% (体积比)鲁哥试

剂固定,带回实验室静置、沉淀 48 h 后,利用虹吸法将上清液吸除,定容至 30 mL,存放在样品瓶中. 浮游植物计数时,吸取 0.1 mL 水样于浮游植物计数框中,在 40 倍物镜下,观察 100 个视野. 浮游植物鉴定和计数使用光学显微镜 OLYMPUS-BX53. 浮游植物种类鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》<sup>[31]</sup>.

新安江出库和富春江出库流量分别来源于新安江电站和富春江电站,兰江径流量根据区间占比计算而出. 同期气温、日照时数、降雨数据来源于国家气象科学数据共享服务平台杭州站监测数据(<http://data.cma.cn>).

### 1.3 数据处理与分析

累积降雨以及流量、气温和日照时数平均值使用 2 次采样间隔的数据作为当月值,其中 6 月使用采样前 31 d 的数据进行分析. 降雨量等级的划分依据国家气象局的降雨量等级划分标准,24 h 内 25~49.9 mm 为大雨;50~99.9 mm 为暴雨.

根据浮游植物在不同采样点的优势度( $Y$ )来判定优势属<sup>[32]</sup>:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中, $n_i$ 为*i*种的浮游植物细胞个数, $N$ 为所有种类浮游植物总细胞个数, $f_i$ 为第*i*种浮游植物出现的频率,当 $Y>0.02$ 时,该种类即为优势属.

换水周期计算公式为:

$$T = W/Q_u \quad (2)$$

式中, $T$ 为换水周期(d), $W$ 为多年平均蓄水量( $m^3$ ), $Q_u$ 为多年平均出库流量( $m^3/s$ ).

首先进行 Kruskal-Wallis 检验以探究 6—8 月营养盐和浮游植物细胞密度的差异性. 其次,进行 Wilcoxon 秩和检验以探究 2020 年与历史同期水文气象因子间的差异,以上方法在 SPSS 22.0 进行. 最后,运用 CANOCO 5.0 软件分析浮游植物群落和环境因子的关系,将浮游植物细胞密度进行 Hellinger 转换,将环境因子(除 pH 外)进行  $\lg(x+1)$  转换,在排序前对浮游植物细胞密度进行去趋势对应分析(DCA),检验结果显示排序轴最大为 2.91<3,故选用冗余分析(RDA). 通过共线性检验排除了水温、浊度、新安江出库流量、富春江出库流量和兰江出库流量,采用蒙特卡洛置换检验选出显著影响因子( $P<0.05$ )进行 RDA 分析,本文进行排序的物种数据满足至少在一个点出现密度大于 2%.

数据处理及图形绘制使用 Excel 2010、Origin 2018 及 ArcGIS 10.2 软件完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 水文气象因子变化特征

调查期间,钱塘江干流的水文气象因子变化特征如图 2 所示. 从图可以看出,降雨量的月间差异显著,6 月和 7 月总降雨量显著高于 8 月. 其中,7 月共发生 4 场暴雨,总降雨量达到 476.7 mm. 然而,8 月连续 19 d 无降雨,该月总降雨量也仅为 32.5 mm. 2020 年夏季与 2016—2019 年同期相比,6、7 月月降雨量分别增加了 68.7 和 182.4 mm,其中 7 月累积降雨量为前 4 年均值的 1.6 倍;而 2020 年 8 月累积降雨比历史同期减少了 96.6 mm,仅为前 4 年同期的 17.38%(表 1).

受降雨的影响,月间流量相差很大. 7 月兰江径流、新安江出库流量和富春江出库流量显著高于 8 月,7 月平均流量分别为 2138、4285、1842  $m^3/s$ ,8 月平均流量分别为 354、655、1046  $m^3/s$ . 受流量影响,富春江水库 8 月换水周期为 5.77 d,而 6 月和 7 月分别为 1.76 和 1.32 d. 与 2016—2019 年同期相比,7 月新安江出库和富春江水库平均流量分别为历史同期的 4.14 和 1.94 倍.

气温在月间差异明显. 8 月日照充足,连续 12 d 日照时数大于 10.7 h;8 月气温明显高于 6、7 月,连续 15 天平均温度高于 30.9℃,平均温度为(30.6±2.6)℃. 与前 4 年的同期均值相比,2020 年 7 月平均气温显著低于历史同期( $P<0.01$ ),为(25.9±2.5)℃,而 6 月和 8 月温度相较历年无显著差异( $P>0.05$ ).

### 2.2 水体理化指标变化特征

钱塘江干流的水体理化特征的时间变化如图 3 所示. 研究期间,除了  $COD_{Mn}$  外,碳氮磷浓度在月间无显著性差异( $P>0.05$ ),DOC、TN、TP 的平均浓度分别为 2.28、1.64 和 0.08 mg/L.  $COD_{Mn}$  在月间差异显著( $P<0.05$ ),其中 8 月为 2.37 mg/L,显著高于 6 月(1.47 mg/L)和 7 月(1.67 mg/L). 空间变化如图 4 所示,富春江

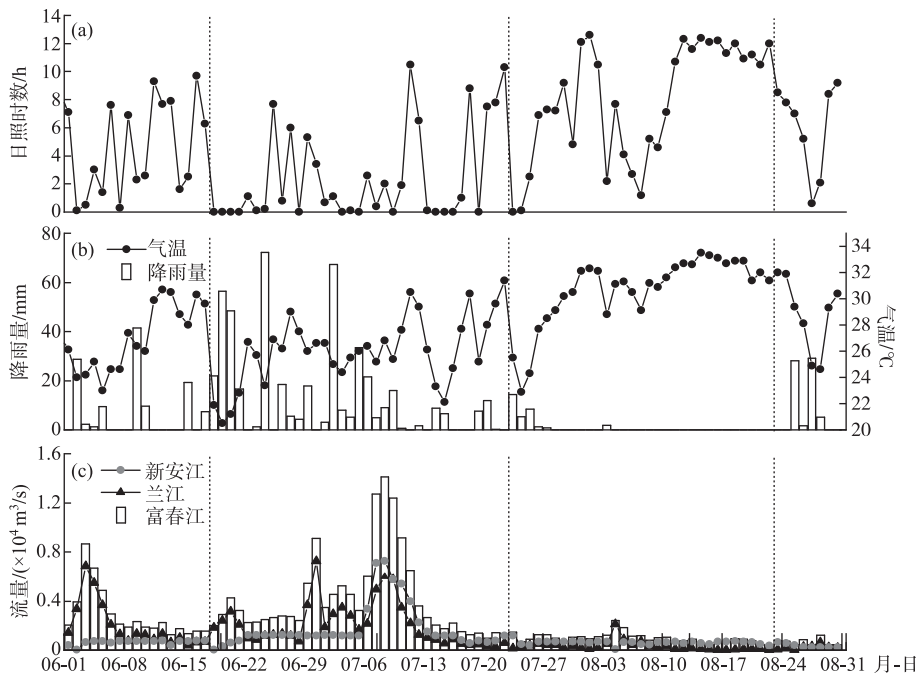


图 2 2020 年夏季钱塘江水文气象因子逐日变化图(图中虚线代表采样时间)

Fig.2 Diurnal variation of hydro-meteorological factors of Qiantang River in summer of 2020  
(The dotted line represents the sampling time)

表 1 2016—2019 年与 2020 年钱塘江夏季主要水文气象因子比较

Tab.1 Differences in hydro-meteorological factors of Qiantang River in summer between 2016–2019 and 2020

时间		平均气温/ ℃	累积降雨量/ mm	新安江出库流量/ (m <sup>3</sup> /s)	富春江出库流量/ (m <sup>3</sup> /s)	兰江径流/ (m <sup>3</sup> /s)
6 月	2016—2019 年	23.96±1.04	153.63	699±145	1842±408	1001±389
	2020 年	25.10±3.08	222.30	492±229	2148±1819	1443±1562
	P	>0.05	—	<0.01	>0.05	>0.05
7 月	2016—2019 年	27.25±2.97	294.25	445±174	2204±1188	1541±1115
	2020 年	25.89±2.49	476.70	1842±1854	4285±3412	2138±1743
	P	<0.01	—	<0.01	<0.01	>0.05
8 月	2016—2019 年	31.01±1.20	187	398±80	748±196	310±151
	2020 年	30.59±2.62	32.50	655±199	1046±395	354±392
	P	>0.05	—	<0.01	<0.01	>0.05
6—8 月	2016—2019 年	27.40±3.46	634.88	512±191	1617±970	969±864
	2020 年	27.15±3.62	731.50	1023±1264	2549±2647	1338±1556
	P	>0.05	—	<0.01	0.05	>0.05

库区的各水体理化指标均与上下游江段具有明显差异:库区上游的新安江段(S5)水质较好,而兰江及以上江段(S1~S4)水质较差,尤其在金华江段(S2),营养盐浓度明显高于其他断面. DOC 浓度变化范围为 1.10~4.34 mg/L,最大值在金华江段(S2),最小值在新安江段(S5). TN 浓度变化范围为 1.10~4.34 mg/L,最大值在金华江段(S2),最小值在富春江库区(S6);TP 浓度在 0.022~0.208 mg/L 之间变化,最大值在下游钱塘江

河口区(S11),最小值在富春江库区(S6).  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  在  $0.85 \sim 4.43 \text{ mg/L}$  之间变化,最大值和最小值分别出现在兰江的将军岩(S4)和新安江段(S5).

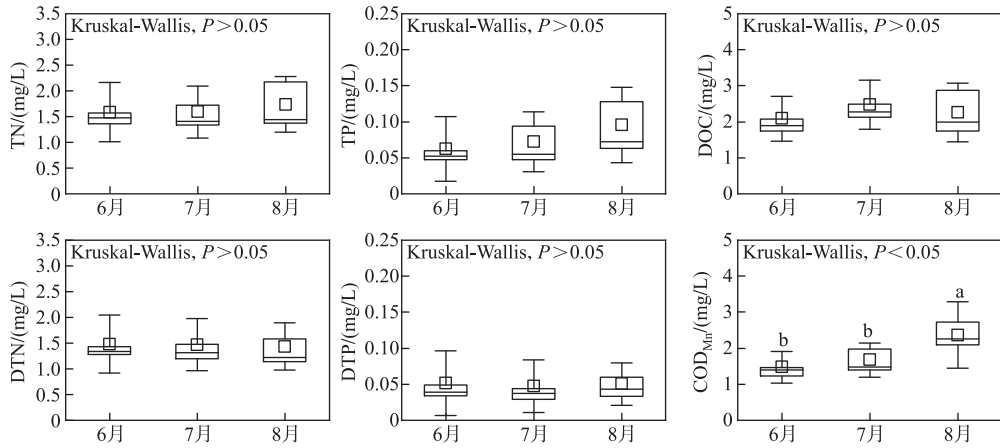


图 3 2020 年夏季钱塘江水体理化指标浓度时间变化

Fig.3 Temporal variation of water quality index concentration at the Qiantang River in summer of 2020

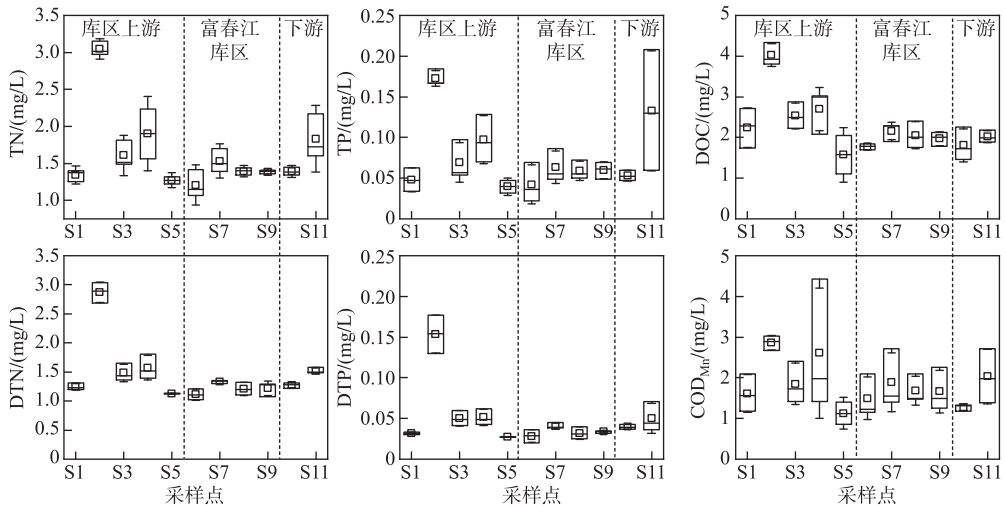


图 4 2020 年夏季钱塘江水体理化指标浓度空间变化

Fig.4 Spatial variation of water quality index concentration at the Qiantang River in summer of 2020

### 2.3 浮游植物群落结构组成和优势属变化

**2.3.1 浮游植物群落组成及细胞密度** 2020 年夏季钱塘江干流共鉴定出浮游植物 95 种,隶属于 6 门 59 属,包括蓝藻门 8 属 9 种、硅藻门 21 属 38 种、绿藻门 24 属 41 种、隐藻门 1 属 2 种、甲藻门 2 属 2 种和裸藻门 3 属 3 种. 钱塘江干流浮游植物细胞密度时空变化如图 5 所示,浮游植物细胞密度月间差异显著( $P < 0.01$ ),8 月细胞密度显著高于 6、7 月(图 5a). 浮游植物夏季平均细胞密度为  $(1.64 \pm 3.07) \times 10^6 \text{ cells/L}$ ,6—8 月平均细胞密度分别为  $(0.19 \pm 0.14) \times 10^6$ 、 $(0.54 \pm 0.42) \times 10^6$  和  $(4.06 \pm 4.38) \times 10^6 \text{ cells/L}$ . 空间上浮游植物细胞密度在富春江库区高于库区上下游,最高值在富春库区的三都大桥(S7),为  $1.31 \times 10^7 \text{ cells/L}$ ,最低值在新安江段(S5),为  $3.6 \times 10^4 \text{ cells/L}$ (图 5b).

**2.3.2 浮游植物优势属组成及丰度的变化特征** 夏季各月份之间优势属组成和丰度差异较大,如图 6 所示.

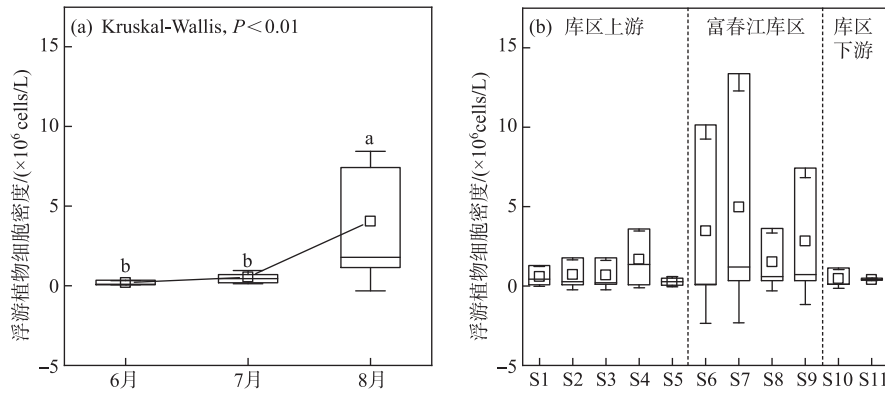


图5 2020年夏季钱塘江浮游植物细胞密度时空变化

Fig.5 Spatiotemporal variation of phytoplankton cell densities at Qiantang River in summer of 2020

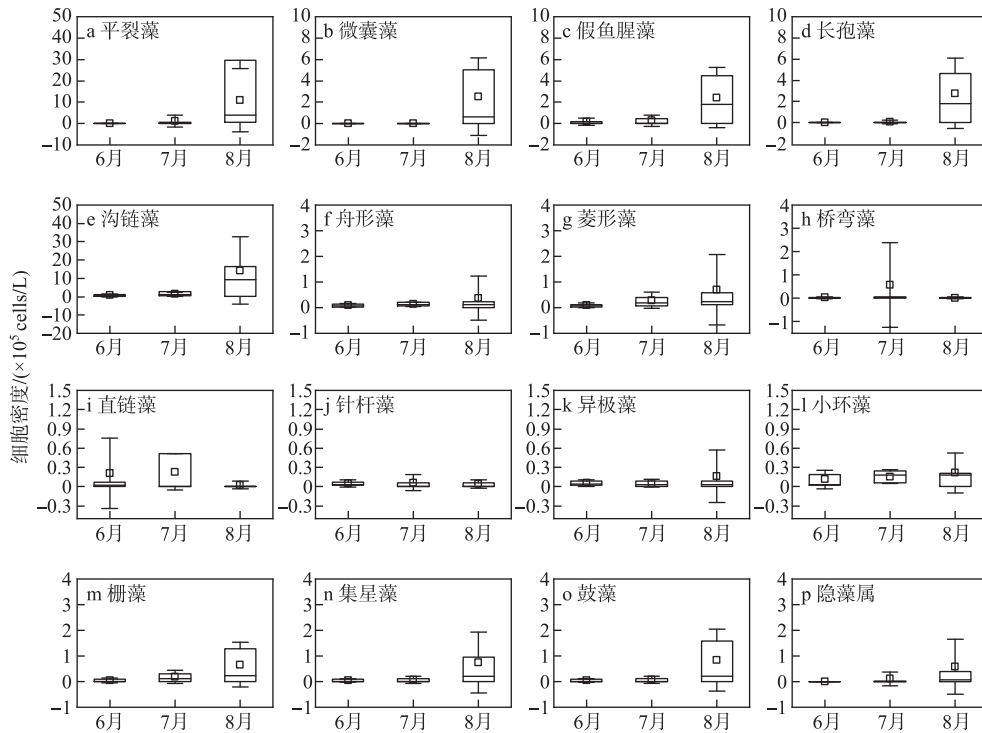


图6 2020年夏季钱塘江浮游植物优势属细胞密度时间变化趋势(因矛丝藻仅在S8出现, 辐环藻只在S11出现,故在图中未展现. a~d为蓝藻门;e~l为硅藻门;m~o为绿藻门;p为隐藻门)

Fig.6 Temporal change of cell densities of dominant genus of phytoplankton in Qiantang River in summer of 2020

整个夏季沟链藻(*Aulacoseira*)占据绝对优势,梅雨期6和7月主要为硅藻门的沟链藻、直链藻(*Melosira*)、小环藻(*Cyclotella*)、菱形藻(*Nitzschia*)、舟形藻(*Navicula*)、桥弯藻(*Cymbella*)、异极藻(*Gomphonema*)和针杆藻(*Synedra*)占优,其次为绿藻门的栅藻(*Scenedesmus*),蓝藻门的平裂藻(*Merismopedia*)和假鱼腥藻(*Pseudoanabaena*).梅雨后主要优势属为蓝藻门的平裂藻、微囊藻(*Microcystis*)、长孢藻(*Dolichospermum*)和假鱼腥藻,以及硅藻门的沟链藻.

各点位之间优势属组成和丰度差异较大,如表 2 所示. 富春江库区(S6~S8)出现的优势属种类最多,细胞密度最高,其次为钱塘江河口区闻家堰(S11)和兰江及以上(S1~S4)的各监测断面,种类最少、细胞密度最低的为新安江(S5). 从兰江到富春江库区,浮游植物优势属从硅藻占优逐渐演替为蓝藻占优;富春江库区下游则又变为硅藻占优. 其中衢江(S1)主要优势属为沟链藻、平裂藻和菱形藻,平均细胞密度分别为  $3.66\times 10^5$ 、 $1.12\times 10^5$ 、 $0.09\times 10^5$  cells/L;金华江(S2)主要优势属为菱形藻、舟形藻和假鱼腥藻,平均细胞密度分别为  $1.68\times 10^5$ 、 $1.12\times 10^5$ 、 $1.08\times 10^5$  cells/L;在金华江和衢江的汇合断面兰江(S3)主要优势属为沟链藻、假鱼腥藻和栅藻,平均细胞密度分别为  $3.39\times 10^5$ 、 $1.50\times 10^5$ 、 $0.42\times 10^5$  cells/L. 新安江(S5)主要为硅藻门的沟链藻、直链藻和针杆藻,平均细胞密度分别为  $1.08\times 10^5$ 、 $0.23\times 10^5$ 、 $0.24\times 10^5$  cells/L. 在富春江库区(S6~S8),优势属为平裂藻、长孢藻、微囊藻和沟链藻,细胞密度最高值分别为  $3.94\times 10^6$ 、 $1.02\times 10^6$ 、 $1.03\times 10^6$ 、 $5.38\times 10^6$  cells/L;下游坝下(S10)主要为沟链藻和平裂藻,平均细胞密度分别为  $1.75\times 10^5$  和  $1.28\times 10^5$  cells/L;闻家堰(S11)主要优势属为辐环藻(*Actinocyclus*)和沟链藻,平均细胞密度分别为  $1.37\times 10^5$  和  $0.84\times 10^5$  cells/L.

表 2 2020 年夏季钱塘江各监测河段浮游植物优势属平均细胞密度( $\times 10^5$  cells/L)  
Tab.2 Spatial change of cell densities of dominant genus of phytoplankton in Qiantang River  
in summer of 2020( $\times 10^5$  cells/L)

门	属	拉丁名	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
蓝藻	平裂藻	<i>Merismopedia</i>	1.12	0.80	0.16	5.12	—	10.56	13.28	2.24	10.08	1.28	—
	微囊藻	<i>Microcystis</i>	0.40	0.10	—	2.65	—	1.68	3.44	0.20	0.78	0.06	—
	假鱼腥藻	<i>Pseudoanabaena</i>	—	1.08	1.50	—	—	1.70	1.98	0.91	2.91	0.19	0.21
	长孢藻	<i>Dolichospermum</i>	—	0.18	—	0.83	0.27	2.14	3.40	1.44	1.55	0.60	0.06
	矛丝藻	<i>Cuspidothrix</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.77	—	—	—
硅藻	沟链藻	<i>Aulacoseira</i>	3.66	0.17	3.39	2.69	1.08	15.19	19.33	5.44	7.24	1.75	0.84
	舟形藻	<i>Navicula</i>	0.05	1.12	0.12	0.07	0.20	0.11	0.09	0.09	0.14	0.08	0.11
	菱形藻	<i>Nitzschia</i>	0.09	1.68	0.41	0.52	0.17	0.23	0.28	0.15	0.21	0.06	0.19
	桥弯藻	<i>Cymbella</i>	—	0.04	0.02	0.01	0.06	0.02	2.03	0.02	0.01	0.02	0.04
	直链藻	<i>Melosira</i>	0.02	—	0.28	—	0.23	0.18	0.10	0.59	—	0.02	0.27
	针杆藻	<i>Synedra</i>	0.02	—	0.02	0.01	0.24	0.04	0.01	0.02	0.09	0.06	0.10
	异极藻	<i>Gomphonema</i>	0.03	0.55	0.06	0.04	0.11	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.10
	小环藻	<i>Cyclotella</i>	0.02	0.14	0.13	0.08	0.05	0.02	0.28	0.16	0.18	0.10	0.58
	辐环藻	<i>Actinocyclus</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.37
	栅藻	<i>Scenedesmus</i>	0.04	0.84	0.42	0.71	0.06	0.07	0.68	0.11	0.26	0.10	0.03
绿藻	集星藻	<i>Actinastrum</i>	0.06	—	—	0.21	—	0.35	0.61	0.42	1.41	0.07	—
	鼓藻	<i>Cosmarium</i>	0.08	0.03	—	0.53	—	0.37	0.61	0.42	1.41	0.07	—
隐藻	隐藻	<i>Cryptomonas</i>	0.02	—	0.13	1.12	—	0.02	0.10	0.41	0.73	—	—

2.4 浮游植物与环境因子之间的关系

浮游植物与环境因子的关系如图 7 所示,平均气温(AT)、DTP、TP、DOC、COD<sub>Mn</sub>、OSS 和累积降雨量(Rainfall)与钱塘江干流浮游植物群落结构呈相关( $P < 0.05$ ),7 个环境因子共解释了 72.73%的浮游植物群落结构变化. 其中平均气温解释率为 30.5% ( $P = 0.002$ ),累积降雨量解释率为 25.9% ( $P = 0.002$ ). 因此推断,气温与降雨量是驱动钱塘江干流河道浮游植物群落结构变化的最主要因子. 蓝藻门主要与气温呈正相关,与降雨量呈负相关,主要包括微囊藻、长孢藻、平裂藻和假鱼腥藻. 但浮丝藻与之相反,与气温呈负相关,与降雨呈正相关. 硅藻门与气温和降雨量的关系与蓝藻门相反,其中沟链藻受到气温和降雨量的影响较小. 绿藻门种类丰富,生态位较宽,与气温呈正相关,与降雨量呈负相关.

3 讨论

在调查期间,钱塘江的浮游植物群落结构由梅雨期的硅藻占优,演替为梅雨后的蓝藻占优,包括微囊藻、长孢藻等水华蓝藻常见属. 2020 年梅雨期的累积降雨量比历史同期高,其中 7 月为历史同期的 1.6 倍





电站,在夏季白天用电高峰发电,晚上停发.这种调度模式之下,富春江水库形成了时断时流的间歇性水流特征,当停止发电时,富春江水库库区是底层低温水流向兰江上溯,富春江水库和兰江水向新安江回流,从而导致水体滞留,相关的研究结果也表明富春江存在一定时间内的往复运动和静止状态<sup>[24]</sup>.与此同时,富春江水库水深相对较深(图8),水体开阔,增加了水流滞缓的程度,再加上水体温度分层的作用,致使浮游植物细胞密度在此江段最高.而筑坝减缓水体的流速在文献中已有报道<sup>[42]</sup>,在金华江段的采样点上是一个水坝,也导致该江段水流相对滞缓,其浮游植物细胞密度也较衢江和兰江较高;而钱塘江口则属于咸淡水交汇区,浮游植物细胞密度相对富春江库区较低.此次调查的金华江、将军岩、钱塘江口都是处于水体汇合区域,可能存在回力顶托的作用,使得水体流速减缓,进而有助于浮游植物相对较高.

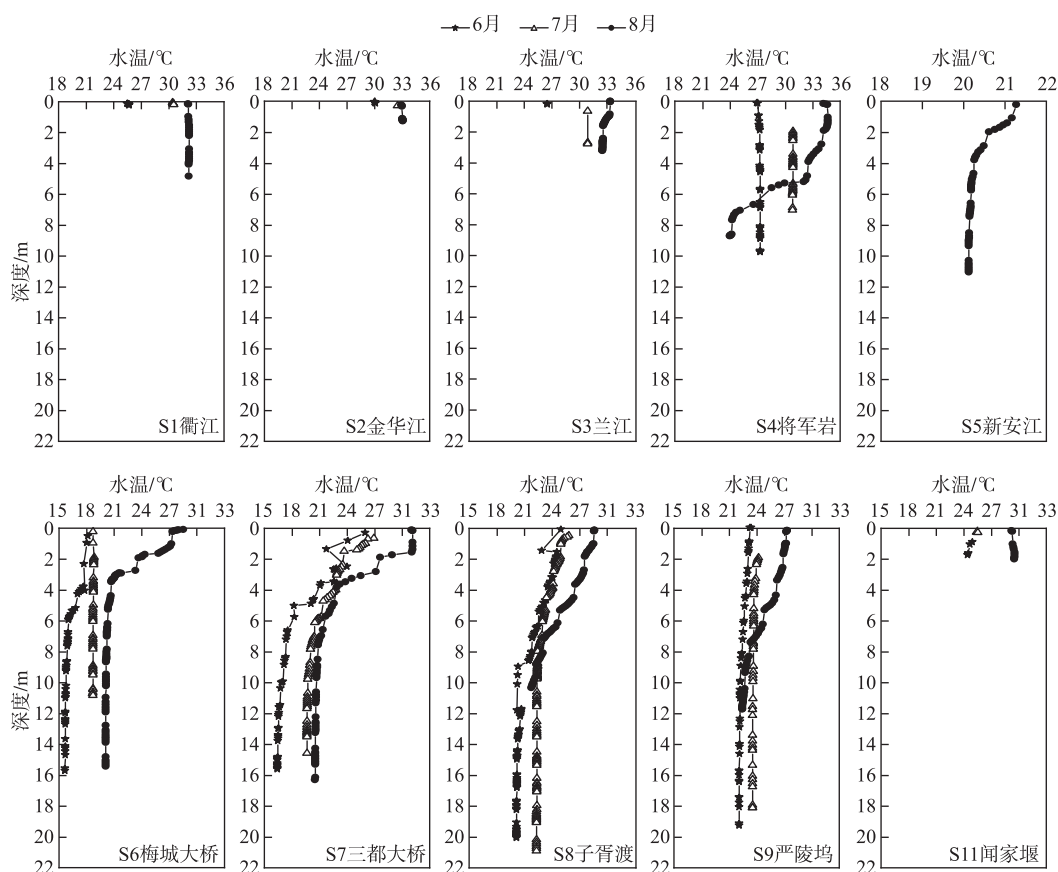


图8 钱塘江关键断面水温垂直剖面

Fig.8 Stratification of environmental water temperature in summer obtained at Qiantang River

此前许多研究报道了在水库的回水区均暴发过蓝藻水华.例如三峡水库的小江回水区、香溪河回水区、澎溪河回水区等<sup>[8,43-45]</sup>.富春江水库作为典型的亚热带大型河流型水库,因为筑坝建库使得库区的水体流速相对滞缓,相对利于藻类的生长繁殖,多个优势属的细胞密度均在富春江库区出现峰值,如微囊藻、长孢藻、平裂藻、沟链藻等.相比于库区而言,衢江段、金华江段和兰江段(S3)水较浅(图8),水团混合较为充分,换水速率较高,所以夏季浮游植物细胞密度低于库区.而新安江段(S5)则主要是因为水温低,水质良好,营养盐浓度较低,其浮游植物生长受到限制.因此,应当重点关注富春江水库回水区和水流滞缓区的浮游植物动态.

持续的高温晴热天气为蓝藻异常增殖提供了契机.梅雨后的高温晴热,导致富春江库区出现明显的温度分层(图8).同时库区蓝藻细胞密度快速增高,微囊藻的最高密度达到了  $1.03 \times 10^6$  cells/L.梅雨后,雨量

骤降,高温晴热天气的接踵而至,加之新安江电站下泄水温较低,兰江来水温度较高,更加利于将军岩和富春江库区出现明显的温度分层<sup>[24]</sup>. 温度分层会阻碍水体垂向的水动力交换,使得水体中溶解氧、营养盐等指标的分层<sup>[35]</sup>. 当水体表层温度较高,并且混合减弱时,不利于个体小,沉降速率高的藻类细胞密度增加,而利于蓝藻尤其是具有气囊的微囊藻、长孢藻占优<sup>[15,46]</sup>. 微囊藻和长孢藻能够利用气囊上浮,在稳定的分层条件下,进入表层水体从而获得最优的光热条件<sup>[47]</sup>,甚至在水体表面形成致密的水华,遮盖其他更深的非浮性真核浮游植物,从而增加其竞争力<sup>[48]</sup>.

在分层条件下还可能会加剧底泥表面缺氧而使氧化还原点位发生改变,促进磷的内源释放,从而进一步提高水华蓝藻的细胞密度<sup>[49]</sup>. 以往的研究表明,在升温的条件下,2016年因为持续高温晴热天气在钱塘江干流发生了蓝藻水华<sup>[22]</sup>,在白洋淀也因为温度的升高而导致浮游植物向蓝藻为主转变<sup>[50]</sup>. 温度上升能够促进藻类的生长,但是不同藻种具有不同的温度适应性,硅藻在16~26℃时生长较快,而蓝藻喜高温,在25~30℃具有最佳生长速度<sup>[51-52]</sup>. 总之,晴热天气的持续使得水体温度分层更加稳定,分层增强则更加有利于蓝藻占优势地位.

营养盐是浮游植物生长的重要因子,但其并不是钱塘江干流夏季浮游植物群落结构变化的主要控制因子. 氮浓度与浮游植物的群落结构并不显著相关(图7),6—8月TP平均浓度分别为0.06、0.07和0.1 mg/L,仅6月梅城大桥(S6)TP浓度为0.022 mg/L,其余监测断面的TP浓度在0.032~0.208 mg/L之间波动,TP达到0.03 mg/L时,满足藻类的生长<sup>[53]</sup>,并且已经具有较大水华蓝藻占优的可能<sup>[54]</sup>. 根据文献<sup>[55-56]</sup>计算出钱塘江干流的 $TSI(Chl.a)$ 、 $TSI(TP)$ 和 $TSI(TN)$ 分别为46.24、64.76和160.67. 根据营养状态指数来看,当 $TSI(TN)$ 或 $TSI(TP)$ 大于 $TSI(Chl.a)$ 时可认为氮或磷不是浮游植物生长最主要的限制因子<sup>[57-58]</sup>. 由此来看,在钱塘江干流营养盐所能支持的藻类最大生长潜力并未达到.

综合而言,2020年夏季钱塘江干流的浮游植物群落结构主要受到水文气象过程的驱动,同时,流态变化是重要的影响因子,而受营养盐影响较小. 梅雨期,雨量增多,水体流量较大,水体扰动强而不利于浮游植物的生长和增殖;梅雨后,雨量变少,水体流量骤减,换水周期变长,为浮游植物的生长提供了极其有利的环境条件. 此外,持续高温晴热天气导致的温度分层,为蓝藻的异常增殖提供了条件. 钱塘江干流已经发生过大规模的蓝藻水华,并且仍然具有较高的蓝藻水华暴发风险. 夏季梅雨期后的持续高温晴热天气是暴发蓝藻水华的高危期,应当着重关注,加以防范,并且应当重点关注其回水区和水流滞缓区的浮游植物动态变化.

## 4 结论

1) 2020年夏季钱塘江干流共鉴定出浮游植物95属(种),主要由硅藻门、蓝藻门和绿藻门组成,主要优势属为沟链藻、菱形藻、平裂藻、长孢藻、假鱼腥藻和微囊藻属. 夏季平均藻细胞密度为 $(1.64 \pm 3.07) \times 10^6$  cells/L,其中梅雨期藻细胞密度为 $(0.37 \pm 0.36) \times 10^6$  cells/L,显著低于梅雨后 $(4.06 \pm 4.38) \times 10^6$  cells/L.

2) 梅雨影响了钱塘江干流浮游植物群落的演替,浮游植物群落组成从梅雨期的硅藻占优,演替为梅雨后的蓝藻占优,且梅雨后期持续的高温天气进一步为微囊藻、长孢藻等水华蓝藻的异常增殖提供契机.

3) 流态的变化影响了钱塘江干流浮游植物群落结构的差异,富春江库区藻密度最高,其次为兰江及以上江段,新安江段藻密度最低,因此,梅雨后期应当重点关注库区和水流滞缓区的藻类动态,防控蓝藻水华暴发.

致谢:感谢杭州市生态环境科学研究院在数据收集中提供的帮助,感谢杭州市桐庐县环境保护监测站在采样工作的大力协助,感谢江南大学王子聪和西华师范大学郑清在采样过程中的帮助,感谢胡春华副研究员和刘莉实验员在样品测定中的帮助,感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的邹伟、史鹏程等在数据分析、绘图及论文修改中提供的帮助.

## 5 参考文献

- [1] Xu Z, Chen XH, Shen GX *et al.* Spatial and temporal variation of phytoplankton community structure and its influencing factors in Shanghai river channels. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3621-3628. DOI: 10.13227/j.hjxx.202001186.  
[许志, 陈小华, 沈根祥等. 上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析. 环境科学, 2020, 41(8):

- 3621-3628.]
- [ 2 ] Jun S, Wang DB, Zhou JH *et al.* Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 787-798.[ 君珊, 王东波, 周健华等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2019, **39**(3): 787-798.]
- [ 3 ] Sun YP, Yu HG, Zhou Q *et al.* Seasonal variation of phytoplankton communities in Wenrui Tang River—A typical eutrophic urban river, Zhejiang Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 375-384. DOI: 10.18307/2018.0209.[ 孙玉平, 于恒国, 周钦等. 典型富营养化城市河流——浙江温瑞塘河的浮游植物群落类型与季节变化. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 375-384.]
- [ 4 ] Pérez JR, Loureiro S, Menezes S *et al.* Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(3): 688-702. DOI: 10.1007/s11356-009-0174-9.
- [ 5 ] Huisman J, Codd GA, Paerl HW *et al.* Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1.
- [ 6 ] Tian YL, Jiang Y, Liu Q *et al.* The impacts of local and regional factors on the phytoplankton community dynamics in a temperate river, Northern China. *Ecological Indicators*, 2021, **123**: 107352. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107352.
- [ 7 ] Ma Y, Li GB, Li J *et al.* Seasonal succession of phytoplankton community and its relationship with environmental factors of North Temperate Zone water of the Zhalong Wetland, in China. *Ecotoxicology*, 2014, **23**(4): 618-625. DOI: 10.1007/s10646-014-1231-9.
- [ 8 ] Li Z, Wang S, Guo JS *et al.* Phytoplankton diversity in backwater area of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir before and after 156 m impoundment. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 227-231. DOI: 10.18307/2012.0209.[ 李哲, 王胜, 郭劲松等. 三峡水库 156 m 蓄水前后澎溪河回水区藻类多样性变化特征. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 227-231.]
- [ 9 ] Huo SL, He ZS, Ma CZ *et al.* Spatio-temporal impacts of meteorological and geographic factors on the availability of nitrogen and phosphorus to algae in Chinese lakes. *Journal of Hydrology*, 2019, **572**: 380-387. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.010.
- [ 10 ] Díaz-Torres O, de Anda J, Lugo-Melchor OY *et al.* Rapid changes in the phytoplankton community of a subtropical, shallow, hypereutrophic lake during the rainy season. *Frontiers in Microbiology*, 2021, **12**: 617151. DOI: 10.3389/fmicb.2021.617151.
- [ 11 ] Varkey D, Mazard S, Jeffries TC *et al.* Stormwater influences phytoplankton assemblages within the diverse, but impacted Sydney Harbour estuary. *PLoS One*, 2018, **13**(12): e0209857. DOI: 10.1371/journal.pone.0209857.
- [ 12 ] Zhu KX, Bi YH, Hu ZY. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2013, **450/451**: 169-177. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.101.
- [ 13 ] Brito D, Neves R, Branco MA *et al.* Modeling flood dynamics in a temporary river draining to an eutrophic reservoir in southeast Portugal. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(10): 1-15. DOI: 10.1007/s12665-017-6713-7.
- [ 14 ] Zhao MX, Han BP. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1554-1561.[ 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1561.]
- [ 15 ] Paerl HW, Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, **320**(5872): 57-58. DOI: 10.1126/science.1155398.
- [ 16 ] Remmal Y, Hudon C, Hamilton PB *et al.* Forecasting the magnitude and composition of phytoplankton blooms in a eutrophic lowland river (Rivière Yamaska, Que., Canada). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, **74**(8): 1298-1311. DOI: 10.1139/cjfas-2016-0305.
- [ 17 ] He HS, Liu JD, Zhang AJ *et al.* Relationship between algae community characteristics in autumn and water environment factors in Qiantang River. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, **48**(13): 292-297.[ 何海生, 刘金殿, 张爱菊等. 钱塘江水域秋季着生藻类群落特征与水环境因子的关系. 江苏农业科学, 2020, **48**(13): 292-297.]
- [ 18 ] Chang WT, Shen X, Ji ZS *et al.* Water quality simulation of Qiantang River between Xin'anjiang and Fuchunjiang dam. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S1): 382-385.[ 常文婷, 沈旭, 姬战生等. 钱塘江(新安江大坝-富春江大坝)水质模拟. 环境科学与技术, 2014, **37**(S1): 382-385.]
- [ 19 ] Sheng HY, Yu ZM, Han YC *et al.* Phytoplankton community and its relationship with environmental factors of a large riverine reservoir, Fuchunjiang Reservoir in subtropical China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 235-243. DOI: 10.18307/2010.

- 0213.[盛海燕, 虞左明, 韩轶才等. 亚热带大型河流型水库——富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 235-243.]
- [20] Gu Y, Yan LL, Yao JL *et al.* Seasonal dynamics of main phytoplankton in Qiantang River (Hangzhou section) and its relationship with environmental factors. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, **19**(2): 334-341.[谷雨, 闫兰玲, 姚建良等. 钱塘江(杭州段)浮游藻类季节动态与环境因子. 南水北调与水利科技, 2021, **19**(2): 334-341.]
- [21] Hao YB, Liu JD, Zhang AJ *et al.* Phytoplankton community structure in the downstream section of Fuchun River in summer and its relationship with environmental factors. *Freshwater Fisheries*, 2020, **50**(4): 52-59.[郝雅宾, 刘金殿, 张爱菊等. 富春江下游段夏季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. 淡水渔业, 2020, **50**(4): 52-59.]
- [22] Guo CX, Zhu GW, Paerl HW *et al.* Extreme weather event may induce *Microcystis* blooms in the Qiantang River, South-east China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(22): 22273-22284. DOI: 10.1007/s11356-018-2216-7.
- [23] Wu TF, Gao G, Chao JY *et al.* Analysis on factors inducing algal bloom in reservoir based on basin eutrophication model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(4): 391-397.[吴挺峰, 高光, 晁建颖等. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策. 水利学报, 2009, **40**(4): 391-397.]
- [24] Wang J, Wu TF, Ding YQ. Preliminary study on causes of cyanobacteria blooms in fluctuating backwater area of Fuchunjiang Reservoir. *Water Resources and Power*, 2019, **37**(2): 51-54.[王婕, 吴挺峰, 丁艳青. 富春江水库变动回水区蓝藻水华成因初探. 水电能源科学, 2019, **37**(2): 51-54.]
- [25] Ma YX, Zhang BT, Zang JY *et al.* Canonical correspondence analysis of phytoplankton distribution and environmental factors in the Qiantang River estuary. *Ocean Development and Management*, 2015, **32**(6): 100-106.[马永星, 张波涛, 臧家业等. 钱塘江河口浮游植物分布与环境因子的典范对应分析. 海洋开发与管理, 2015, **32**(6): 100-106.]
- [26] Li RH, Pan CH, Ge C *et al.* Analysis and numerical simulation of the limiting factors of algal blooms in Qiantang River estuary. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **569**: 012080. DOI: 10.1088/1755-1315/569/1/012080.
- [27] Liu DX, Yu HY, Liu SR *et al.* Impacts of urbanization on the water quality and macrobenthos community structure of the tributaries in middle reach of Qiantang River, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(5): 1370-1376. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2012.0185.[刘东晓, 于海燕, 刘朔孺等. 城镇化对钱塘江中游支流水质和底栖动物群落结构的影响. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1370-1376.]
- [28] Liu SR. Impact of watershed land use change on benthic biota community, a case study in Qiantang River, China [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.[刘朔孺. 钱塘江流域不同土地利用类型对底栖生物群落结构的影响[学位论文]. 南京农业大学, 2012.]
- [29] Yu HH, Chen M, Gu SL. Application of multi-beam in Fuchunjiang Reservoir capacity measurement. *China Construction*, 2018, (5): 121-123.[余鸿慧, 陈敏, 谷松立. 多波束在富春江水库库容测量中的应用. 中华建设, 2018, (5): 121-123.]
- [30] Shi PC, Zhu GW, Yang WB *et al.* Spatial-temporal distribution of suspended solids and its sedimentation flux and nutrients effects in Xin'anjiang Reservoir, China. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2137-2148. DOI: 10.13227/j.hjxx.201910053.[史鹏程, 朱广伟, 杨文斌等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应. 环境科学, 2020, **41**(5): 2137-2148.]
- [31] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006.[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.]
- [32] McNaughton SJ. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature*, 1967, **216**(5111): 168-169. DOI: 10.1038/216168b0.
- [33] Li JD, Xiao LJ, Han BP. Steady-state analysis of phytoplankton communities in summer in a meso-eutrophic reservoir, Southern China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, **17**(6): 833-838.[李季东, 肖利娟, 韩博平. 一座南亚热带中富营养水库夏季浮游植物群落的稳态平衡分析. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(6): 833-838.]
- [34] Ji DB, Li Y, Kong S *et al.* The influence of a typical storm flood on the water bloom in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (6): 39-44.[纪道斌, 李媛, 孔松等. 典型暴雨洪水对三峡水库

- 香溪河库湾水华的影响. 中国农村水利水电, 2013, (6): 39-44.]
- [35] Liu M, Zhang YL, Shi K *et al.* Spatial variations of subsurface chlorophyll maxima during thermal stratification in a large, deep subtropical reservoir. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, **125**(2): e2019JG005480. DOI: 10.1029/2019JG005480.
- [36] Ren J, Zhu GW, Jin YW *et al.* Combined effects of water exchange rate and nutrient on diatom proliferation in Hengshan Reservoir, Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 604-616. DOI: 10.18307/2017.0309.[任杰, 朱广伟, 金颖薇等. 换水率和营养水平对太湖流域横山水库硅藻水华的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 604-616.]
- [37] Yang Q, Xie P, Xu J *et al.* Research advances of diatom blooms in rivers. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(S1): 159-165.[杨强, 谢平, 徐军等. 河流型硅藻水华研究进展. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(S1): 159-165.]
- [38] Liu XM, Chen LW, Zhang GX *et al.* Spatiotemporal dynamics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake. *Water Research*, 2021, **194**: 116910. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116910.
- [39] Mitrovic SM, Hardwick L, Dorani F. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the Lower Darling River, Australia. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(2): 229-241. DOI: 10.1093/plankt/flbq094.
- [40] Verspagen JMH, Passarge J, Jöhnk KD *et al.* Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the Dutch delta. *Ecological Applications*, 2006, **16**(1): 313-327. DOI: 10.1890/04-1953.
- [41] Xu LQ. Study on main contamination fluxes of water environment in the Qiantang River[Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.[徐礼强. 钱塘江水环境主要污染物通量研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.]
- [42] Li YJ, Zhang HT, Xiao J *et al.* Effects of river hydrology on phytoplankton dynamics in dammed rivers. *Earth and Environment*, 2019, **47**(6): 857-863.[李亚军, 张海涛, 肖晶等. 筑坝河流水动力条件对浮游植物动态变化的影响. 地球与环境, 2019, **47**(6): 857-863.]
- [43] Guo JS, Chen J, Li Z *et al.* Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges reservoir after its initiate impounding to the water level of 156 m in spring. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2710-2715. DOI: 10.13227/j.hjlx.2008.10.003.[郭劲松, 陈杰, 李哲等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.]
- [44] Zhu KX, Bi YH, Hu JL *et al.* Characteristics of *Microcystis aeruginosa* bloom in summer 2008 in Shennong River of Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 220-226. DOI: 10.18307/2012.0208.[朱孔贤, 毕永红, 胡建林等. 三峡水库神农溪 2008 年夏季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华暴发特性. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 220-226.]
- [45] Xiao Y, Li Z, Guo JS *et al.* Succession of phytoplankton assemblages in response to large-scale reservoir operation: A case study in a tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(3): 1-20. DOI: 10.1007/s10661-016-5132-7.
- [46] Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 5-16. DOI: 10.1007/s10750-012-1149-2.
- [47] Paerl HW, Otten TG. Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y.
- [48] Reynolds CS. Cyanobacterial water-blooms. *Advances in Botanical Research*, 1987, **13**(4): 67-143. DOI: 10.1016/S0065-2296(08)60341-9.
- [49] Paerl HW. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4part2): 823-843. DOI: 10.4319/lo.1988.33.4part2.0823.
- [50] Li N, Zhou XS, Sun BW *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 772-783. DOI: 10.18307/2020.0317.[李娜, 周绪申, 孙博闻等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 772-783.]
- [51] Zhang CM, Zhu YX, Song GF *et al.* Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 675-686. DOI: 10.18307/2021.0305.[张春梅, 朱宇轩, 宋高飞等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 675-686.]
- [52] Zhu GW, Jin YW, Ren J *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2016.0102.[朱广伟, 金颖薇, 任杰等. 太湖

- 流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析. 湖泊科学, 2016, 28(1): 9-21.]
- [53] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 ( 2 ): 1051-1059. DOI: 10.1021/es503744q.
- [54] Downing JA, Watson SB, McCauley E. Predicting Cyanobacteria dominance in lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58( 10 ): 1905-1908. DOI: 10.1139/f01-143.
- [55] Kratzer CR, Brezonik PL. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1981, 17( 4 ): 713-715. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x.
- [56] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22( 2 ): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [57] Carlson RE. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. *Enhancing the State's Lake Management Programs*, 1991: 59-71.
- [58] Havens KE. Using trophic state index ( *TSI* ) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean Journal of Limnology*, 2000, 33( 3 ): 187-196.