

## 江西柘林水库春季浮游藻类、叶绿素 a 与环境因子的分布、关系及意义\*

李懿森, 李茂田\*\*, 艾 威, 罗 章, 胡 进, 侯立军

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘 要:** 江西柘林水库是长江中游的大型峡谷型旅游性水库, 库容  $79.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 长 115 km. 2015 年 4 月在 56 km 的中心库区走航和定点测量了水库表层水体浮游藻类、叶绿素 a (Chl.a) 浓度与溶解无机氮 (DIN) 浓度、溶解无机磷 (DIP) 浓度、溶解硅 (DSi) 浓度、水温、浊度和溶解氧浓度等环境因子的分布特征. 结果表明: 1) 水库属于中营养水体, 表层主要浮游藻类 (细胞丰度  $> 1000 \text{ cells/L}$ ) 有 34 种, 平均生物量为  $0.41 \text{ mg/L}$ . 主要优势藻类 (优势度  $\geq 0.02$ ) 为硅藻和蓝藻, 藻类组成与 DIN 浓度、DIP 浓度、DSi 浓度和水温等环境因子关系密切, 4 种因子对藻类结构的解释水平达 60% 以上. 2) 水库水体 Chl. a 浓度具有显著的次表层叶绿素最大值 (SCM) 现象, SCM 层深度为 3~8 m, 厚度为 2~7 m, SCM 层占整个水体的 25.2%~74.1%. SCM 层的藻类对营养盐吸收消耗致使 DIN、DIP 和 DSi 浓度下降, 同时藻类的产氧使溶解氧浓度增加. 3) 水库对 DSi 具有显著的生物过滤器效应, 中、上层约有 11%~12% 的 DSi 被生物吸收利用, 从上游至下游, 累积约有 21% 的 DSi 被藻类吸收沉降于库底. 4) 人类氮、磷排放对水库生态和水质有严重影响, 毗邻县城区域水体的 Chl.a 和 DIP 浓度分别是自然河段的 2.9 倍和 3 倍左右.

**关键词:** 浮游藻类; 叶绿素 a; 次表层叶绿素最大值; 过滤器效应; 柘林水库

## Distribution, relationship and significance of phytoplankton, chlorophyll-a and environment variables in spring season of the Zhelin Reservoir, Jiangxi Province

LI Yimiao, LI Maotian \*\*, AI Wei, LUO Zhang, HU Jin & HOU Lijun

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P.R.China)

**Abstract:** Zhelin Reservoir is a large canyon-reservoir in the midstream of the Yangtze River, and the storage capacity is  $79.2 \times 10^8 \text{ m}^3$  and length is 115 km. Through measurements on a moving vessel and at fixed-point sites in the Zhelin Reservoir in April, 2015, the distribution of phytoplankton, chlorophyll-a (Chl.a) concentration and main environment variables (including dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved silicon (DSi), water temperature, turbidity, dissolved oxygen (DO)) were analyzed. The redundancy relationship of phytoplankton taxa and environmental variables was analyzed using the software CANOCO 4.5. The results showed that, 1) the reservoir water was categorized as a middle-status in nutrients. There were 34 main phytoplankton species in the surface (the cell density of which exceeding  $1000 \text{ cells/L}$ ), and the average biomass of reservoir was  $0.41 \text{ mg/L}$ . The dominant algae (dominance be equal or greater than 0.02) were the diatoms and cyanobacteria. DIN, DIP, DSi and water temperature can impact on the structure of algae, and the four factors were explained for more than 60% variation of the algal structure. 2) The reservoir had a significant phenomenon of subsurface chlorophyll maximum (SCM). The depth of SCM appears at the water depth from 3 to 8 m, and the thickness is about 2-7 m. The Chl.a in the SCM layer is 25.2% - 74.1% among the total in the vertical. The algae in the SCM layer absorbed the nutrients, resulting in decreased concentrations of DIN, DIP and DSi and the increased DO concentration. 3) The reservoir had significant biological and biochemical filtering effect for the DSi. About 11% to 12% DSi were absorbed by organisms in the middle and upper area of in the reservoir, and accumulating about 21% DSi was absorbed by algae from upstream to downstream. 4) Nitrogen and phosphorus emissions by human activities

\* 国家自然科学基金项目 (41271520) 和国家重点研发计划项目 (2016YFA0600904) 联合资助. 2016-05-11 收稿; 2016-09-05 收修改稿. 李懿森 (1992~), 男, 硕士研究生; E-mail: liyimiao@foxmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: mtli@sklec.ecnu.edu.cn.

have a serious impact on the ecology and water quality of the reservoir and the adjacent county region. The concentrations of Chl.a and DIP in the region is about 2.9 times and 3 times higher than that in the natural region of the reservoir, respectively.

**Keywords:** Phytoplankton; chlorophyll-a; subsurface chlorophyll maximum; biological and biochemical filtering; Zhelin Reservoir

江西柘林水库是长江中游鄱阳湖流域支流——修河流域的大型峡谷型旅游性水库,位于河流下游,库容  $79.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,长 115 km,正常水面面积  $308 \text{ km}^2$ ,截修河流域面积  $9340 \text{ km}^2$ ,占流域面积的 63.5%<sup>[1-2]</sup>.水库是武宁县、德安县、共青城市百万人口的主要水源地,也是沿湖城乡生活污水和工业废水的主要纳污水体,另外武宁县城毗邻水库上游,常住人口 40 万<sup>[1-3]</sup>.水库多年平均降水量 1615 mm,库内岛屿众多.近年来,随着库区工农业和旅游业的发展,柘林水库生态环境和水质状况日益成为水库管理部门、自来水部门、旅游部门以及水产养殖工作者关心的问题,并被列入第二批江河湖泊生态环境保护专项,急需开展全面系统的生态环境过程研究<sup>[2-4]</sup>.

浮游藻类是湖泊(水库)主要的初级生产者,其生物量及优势种是衡量湖泊(水库)生态系统以及环境的主要指标<sup>[5]</sup>.叶绿素 a (Chl.a)是浮游藻类的重要组成成分,占藻类生物量的比例平均为  $1/405$ <sup>[6]</sup>,其测量技术简易可靠,因此广泛应用 Chl.a 估计藻类生物量、衡量水体富营养化程度、评价生态和水质状况<sup>[7]</sup>.另外,水体的氮、磷、硅是藻类的生源要素,水温(WT)、浊度(TD)、溶解氧(DO)等是影响藻类生长发育的环境因子,因此,水体的生源要素和环境因子控制着藻类生物量及优势种、Chl.a 浓度等生态特征,也是衡量水体水质的主要参数<sup>[8-9]</sup>.比如,随溶解无机磷(DIP)浓度的不断增加,优势藻类由蓝藻演变为绿藻<sup>[10]</sup>;静水与动水环境中的藻类优势种差异明显,流速对藻类生长有重要影响<sup>[11-12]</sup>,WT 和 TD 条件不同,藻类优势种也随之变化<sup>[13]</sup>;且藻类结构与水质有密切关系<sup>[14]</sup>.同样,Chl.a 浓度与各环境因子间也存在密切的相互关系<sup>[15-17]</sup>.柘林水库前期的研究多侧重水质、藻类、污染负荷等生态环境历史变化及评价<sup>[1-4]</sup>,对于探讨湖泊浮游藻类与水体中生源要素和环境因子的相互关系的研究,尚有待于深入.本研究通过对柘林水库进行实地调查,尝试揭示柘林水库藻类生物量、优势种和 Chl.a 浓度等生态指标,水体的溶解无机氮(DIN)、DIP、溶解硅(DSi)浓度等生源要素和 WT、TD、DO 浓度等环境因子的分布特征,探讨三者之间的内在关系,以为水库环境管理与水体利用提供科学依据.

## 1 样品与方法

### 1.1 样品采集与分析

鉴于春、夏季节是藻类生长较快的季节<sup>[18]</sup>,根据实际情况,本次调查采样时间选取在 2015 年 4 月底.采样分走航测量和定点测量两种方式.走航从下游大坝向上游测量 56 km,沿程设置 4 个采样点,从下游向上游依次为 D 点(大坝前,下游代表站)、C 点(中游代表站)、B 点(毗邻武宁县城河段站)和 A 点(上游代表站).走航的航迹线和采样点位置分布如图 1 所示.

走航时航速保持 2~3 节,利用悬挂在水下 1 m 处的多参数水质监测仪(Multiparameter system-Manta2)测量水体表层 Chl.a 浓度.同时利用声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)沿程测量水深和流速.多参数水质监测仪的 Chl.a 浓度测量值与常规的丙酮法测量值相比,其均值相对误差范围为 0.7%~9.2%(2014 年 6 月在长江口大戟山水域 24 h 测量).

定点调查,首先利用多参数水质监测仪和光学后向散射浊度计(Optical Back Scatter Sensor, OBS)沿垂线记录水体 Chl.a 浓度、WT、TD、DO 浓度指标.其次采用垂线 5 层(表层、5 m、10 m、20 m 和底层)采水法调查表层浮游藻类和各层的 DIN、DIP 和 DSi 浓度,并用直径为 20 cm 的黑白塞氏盘(Secchi Disc)进行透明度(SD)的测量.采样方法为:1)前处理:采样瓶均用 1 L 的 PE 塑料瓶,并事先用 10% 的稀 HCl (AR)溶液浸泡 7 d,再用去离子水洗净,自然风干后拧盖备用;2)营养盐采样及测定:每个定点分层各采 1 L 水样,现场将水样用  $0.45 \mu\text{m}$  的混合醋酸酯膜抽滤,滤液用 1~2 滴 1% 的  $\text{HgCl}_2$  固定装入 50 ml PE 塑料瓶中,带回实验室用 San Plus 营养盐分析仪测量其中的 5 项营养盐:DSi ( $\text{SiO}_3 \cdot \text{Si}$ )、DIP ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) 和 DIN ( $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 之和)浓度.监测及分析方法分别按照《湖泊生态系统观测方法》<sup>[19]</sup>和《水和废水监测分析方法》<sup>[20]</sup>进行;3)浮游藻类的采集及鉴定:每个定点表层(水下 0.2 m)用 PE 塑料瓶各采 1 L 水样,加入 10 ml 鲁哥试剂保

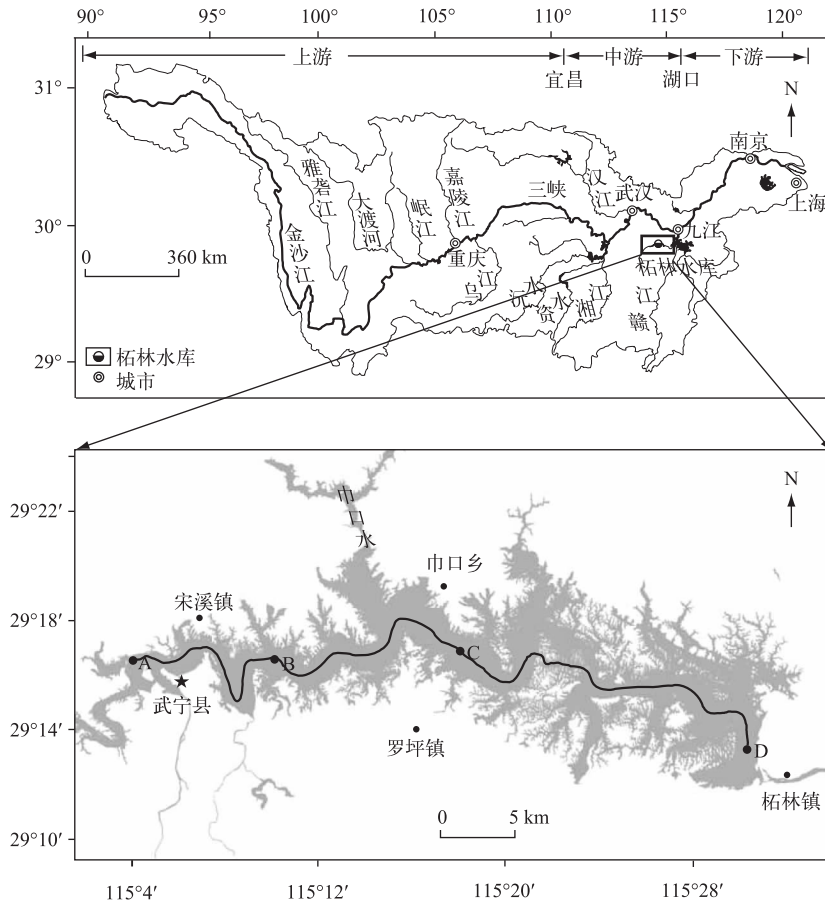


图1 柘林水库位置、采样航线和采样点位分布

Fig.1 Sampling route and sites in the Zhelin Reservoir

存.样品经沉淀、浓缩、定容后,依据文献[21-22]采用目镜视野计数法进行藻类细胞计数与鉴定,藻类生物量采用细胞体积法推算<sup>[23]</sup>.藻类优势度指数( $Y$ )计算公式为:

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

式中, $n_i$ 为样品中第*i*种浮游藻类的个体数, $N$ 为同一样品中所有浮游藻类的总个体数, $f_i$ 为第*i*种浮游藻类在各个样点出现的频度,当 $Y \geq 0.02$ 时的物种认定为优势种<sup>[24]</sup>.

另外,水库的营养状态类型采用相关加权营养状态指数法( $TLI(\Sigma)$ )<sup>[25-26]</sup>,即综合营养状态指数法,利用Chl.a浓度、SD、TP浓度和TN浓度4个参数评价,公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (2)$$

式中, $W_j$ 为第*j*种参数的相关权重; $TLI(j)$ 代表第*j*种参数的营养状态指数;且Chl.a浓度、SD值为实测值,TP浓度根据TP与Chl.a浓度关系<sup>[25]</sup>进行计算,TN浓度根据DIN与浮游藻类生物量的含氮量之和计算<sup>[27]</sup>.评价分级标准为: $TLI(\Sigma) < 30$ 为贫营养, $30 \sim 50$ 为中营养, $> 50$ 为富营养<sup>[25]</sup>.

## 1.2 藻类、Chl.a 与环境因子的冗余分析

水库浮游藻类繁多,其种类组成本质是一组多元因变量,受外部生源要素及环境因子等一组多元自变量所控制.冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种典型相关分析的统计方法,能定量分析两组多元变量(响应变量组和解释变量组)之间的线性关系,分析这种线性关系引起响应变量变异占总变异的比例.本文

将水库中细胞丰度大于 1000 cells/L 的 34 种藻类(代码见表 1)作为响应变量组,将环境因子包括 DIN 浓度、DIP 浓度、DSi 浓度、WT、TD、DO 浓度等 6 个变量作为解释变量组,原始数据均进行 log 转换,利用 Canoco 4.5 软件进行 RDA 分析,变量的显著性用 499 次的 MonteCarlo 检验<sup>[28]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游藻类的组成与空间分布

柘林水库共检出细胞丰度>1000 cells/L 的主要浮游藻类 6 门 24 属 34 种(表 1),主要优势藻类( $Y \geq 0.02$ )为硅藻门和蓝藻门,硅藻门以颗粒直链藻、颗粒直链藻最窄变种、梅尼小环藻、美丽星杆藻和尖针杆藻为主要优势种,优势度分别为 0.026、0.080、0.021、0.022 和 0.111;蓝藻门以鱼害微囊藻、卷曲长孢藻、类颤鱼腥藻、阿氏拟鱼腥藻和小席藻为优势种,优势度分别为 0.073、0.081、0.110、0.028 和 0.052(表 1).毗邻武宁县城河段的 A 和 B 点藻类分别为 22 和 20 种,以蓝藻和硅藻为优势藻类,而自然河段 C 和 D 点藻类分别为 18 和 12 种,以蓝藻为优势藻类.另外,毗邻城市(武宁县城)河段的 A 点和 B 点的生物量和细胞丰度分别为 0.39~0.51 mg/L 和  $4.1 \times 10^6 \sim 5.4 \times 10^6$  cells/L,远高于自然河段的 C 和 D 点的 0.26~0.46 mg/L 和  $2.7 \times 10^6 \sim 3.7 \times 10^6$  cells/L(图 2).

表 1 柘林水库浮游藻类物种代码、名称和优势度

Tab.1 Codes, names and dominance of phytoplankton taxa species in the Zhelin Reservoir

代码	中文种名	拉丁名	优势度	代码	中文种名	拉丁名	优势度
<b>硅藻门</b>				B4	双对栅藻	<i>Scenedesmus bijuga</i>	<0.001
A1	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	0.026	B6	四尾栅藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.002
A2	螺旋颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	0.016	B7	针形纤维藻	<i>Ankistrodesmus acicularis</i>	0.002
A3	直链藻最窄变种	<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.080	B8	钝鼓藻	<i>Cosmarium obtusatum</i>	<0.001
A4	直链藻极狭变种	<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	<0.001	B9	纤细新月藻	<i>Closterium gracile</i>	0.001
A5	变异直链藻	<i>Melosira varians</i>	0.009	<b>蓝藻门</b>			
A6	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.021	C1	鱼害微囊藻	<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	0.073
A7	具星小环藻	<i>Cyclotella stelligera</i>	0.004	C2	卷曲长孢藻	<i>Dolichospermum circinalis</i>	0.081
A8	美丽星杆藻	<i>Asterionella formosa</i>	0.022	C3	类颤鱼腥藻	<i>Anabaena oscillarioides</i>	0.110
A9	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	0.111	C4	阿氏拟鱼腥藻	<i>Anabaenopsis arnoldii</i>	0.028
A10	双头针杆藻	<i>Synedra amphicephala</i>	0.003	C5	小席藻	<i>Phormidium tenue</i>	0.052
A11	肘状针杆藻	<i>Synedra ulna</i>	0.007	C6	小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<0.001
A12	窗格平板藻	<i>Tabellaria fenestrata</i>	0.001	<b>裸藻门</b>			
A13	细布纹藻	<i>Gyrosigma kuetzingii</i>	<0.001	D1	尖尾裸藻	<i>Euglena oxyuris</i>	0.002
A14	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	0.001	D2	长尾扁裸藻	<i>Phacus longicauda</i>	<0.001
A15	短小曲壳藻	<i>Achnanthes exigua</i>	0.001	<b>甲藻门</b>			
<b>绿藻门</b>				E1	光薄甲藻	<i>Glenodinium gymnodinium</i>	0.009
B1	十字藻	<i>Crucigenia apiculata</i>	0.001	E2	飞燕角甲藻	<i>Ceratium hirundinella</i>	0.001
B2	集星藻	<i>Actinastrum hantzschii</i>	0.001	<b>隐藻门</b>			
B3	龙骨栅藻	<i>Scenedesmus carinatus</i>	<0.001	F1	尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>	<0.001

### 2.2 Chl.a 浓度的空间分布

纵向上自上游至下游,柘林水库水体 Chl.a 浓度在毗邻武宁县城河段(A 和 B 点)和自然河段(C 和 D 点)表层差别显著,自然河段 Chl.a 浓度稳定在 2  $\mu\text{g/L}$  左右,毗邻城市河段高达 5.8  $\mu\text{g/L}$ ,是自然河段的 2.9 倍(图 3),这与上面所述的浮游藻类生物量和细胞丰度的分布基本一致.

垂向上,4 个采样点水体的 Chl.a 浓度剖面均出现了次表层叶绿素最大值现象(subsurface chlorophyll maximum,SCM).其 SCM 均出现在 3~8 m,除 A 点外,其余 3 个点从 3~8 m 开始急剧下降,10 m 以下稳定在 1.5~2  $\mu\text{g/L}$ (图 4).其中,B 点 SCM(10.29  $\mu\text{g/L}$ )出现在 3.2 m,平均垂向浓度为 4.19  $\mu\text{g/L}$ ,SCM 层累积 Chl.a 占垂向水体的 74.1%.A 点 SCM(4.2  $\mu\text{g/L}$ )出现在 2.78 m,垂线平均值为 3.61  $\mu\text{g/L}$ .C 点 SCM(2.51  $\mu\text{g/L}$ )出

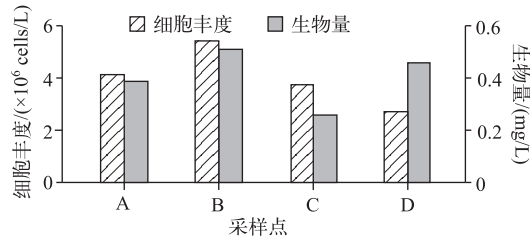


图 2 柘林水库 4 个采样点的细胞丰度和生物量

Fig.2 Cell density and biomass of four sampling sites in the Zhelin Reservoir

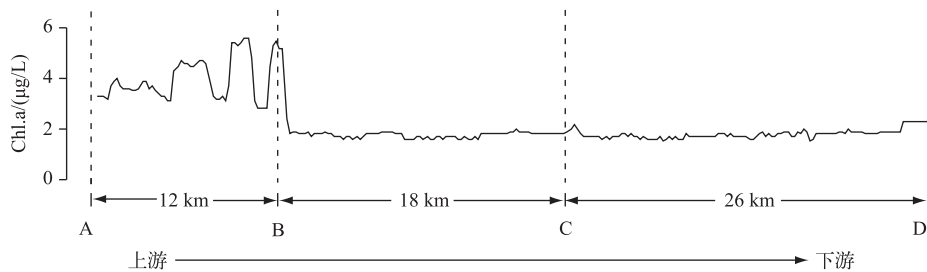


图 3 柘林水库水体 Chl.a 浓度的纵向分布

Fig.3 Longitudinal distribution of chlorophyll-a concentration in the water of Zhelin Reservoir

现在 2.17 m, 垂线平均值为 1.78  $\mu\text{g/L}$ , SCM 层累积 Chl.a 占垂向水体的 27.8%. D 点 SCM (2.75  $\mu\text{g/L}$ ) 出现在 2.33~7.26 m, 垂线平均值为 1.99  $\mu\text{g/L}$ , SCM 层累积 Chl.a 占垂向水体的 25.2% (图 4).

### 2.3 环境因子的空间分布

2.3.1 生源要素的空间分布及其与 Chl.a 浓度的相关关系 纵向上自上游至下游, DIN 浓度在自然河段 (C 和 D 点) 和毗邻城市河段 (A 和 B 点) 表层差别不大, 均稳定在 0.69~0.84 mg/L. 而 DIP 在毗邻城市河段的浓度 (23~36  $\mu\text{g/L}$ ) 远大于自然河段 (7~12  $\mu\text{g/L}$ ), 是自然河段的 3 倍左右, 从 B 点到 D 点, 表层 DIP 浓度下降了 72%. DSi 浓度沿程不断减少, 由 A 点的 4.82 mg/L 下降到 D 点的 3.8 mg/L (图 4), 下降了 21%, C 点由于北岸中口水的注入而升高到 4.48 mg/L.

垂向自表层至底层, 随 Chl.a 浓度的垂直变化, 营养盐浓度呈现独特变化. DIN、DIP 浓度均在表层和 Chl.a 浓度的 SCM 层呈现较小值, 而在 Chl.a 浓度的 SCM 层下达到最大, 然后又不断减少, 至 10 m 以下逐渐稳定; 而 DSi 浓度除 B 点外均自表层至底层不断增加, 增加幅度 10%~12% (图 4).

另外, 水深 0~10 m 的 Chl.a 浓度与 DIN、DIP 和 DSi 浓度的相关系数分别为 0.154、0.814 和 0.140 (图 5).

2.3.2 环境要素的空间分布 从纵向上表层水体来看, 自上游至下游, 上游毗邻城市河段与自然河段 (C 和 D 点) WT 差别不大, 均在 20~24 $^{\circ}\text{C}$  之间; TD 从上游向下游不断增加, 从 A 点的 5.1 NTU 增加到 D 点的 13 NTU; DO 浓度从上游向下游总体呈增加趋势, 从上游毗邻城市河段 (A 和 B 点) 的 10.2~10.8 mg/L 增加到下游自然河段 (C 和 D 点) 的 11.5~12.0 mg/L (图 4); 从上游到下游流速从 0.2 m/s 降低至 0.1 m/s. 从上游向下游 SD 总体呈升高趋势, A 点水深 2.8 m, 可见底, B、C 和 D 点的 SD 分别为 4.4、7.8 和 8.1 m.

垂向上 0~5 m, 各点出现温跃现象, WT 急速下降, 下降幅度大于 1.5 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , 5~20 m 缓慢下降, 下降幅度为 0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$  左右, 20 m 以下 WT 稳定在 11 $^{\circ}\text{C}$  左右; 上游毗邻城市河段 (A 和 B 点) 水体 TD 不断增加, 而自然河段 (C 和 D 点) 在 0~5 m 各点 TD 均不断降低, 5~7 m 以下又不断升高; DO 浓度的垂向变化与 Chl.a 浓度剖面类似, 在 SCM 层存在 DO 浓度的最大值 (图 4).

### 2.4 水库营养状态

柘林水库上、中游 4 个站点水体 DIN、DIP 和 DSi 浓度的平均值分别为 0.83 mg/L、13.89  $\mu\text{g/L}$ 、4.44 mg/L.

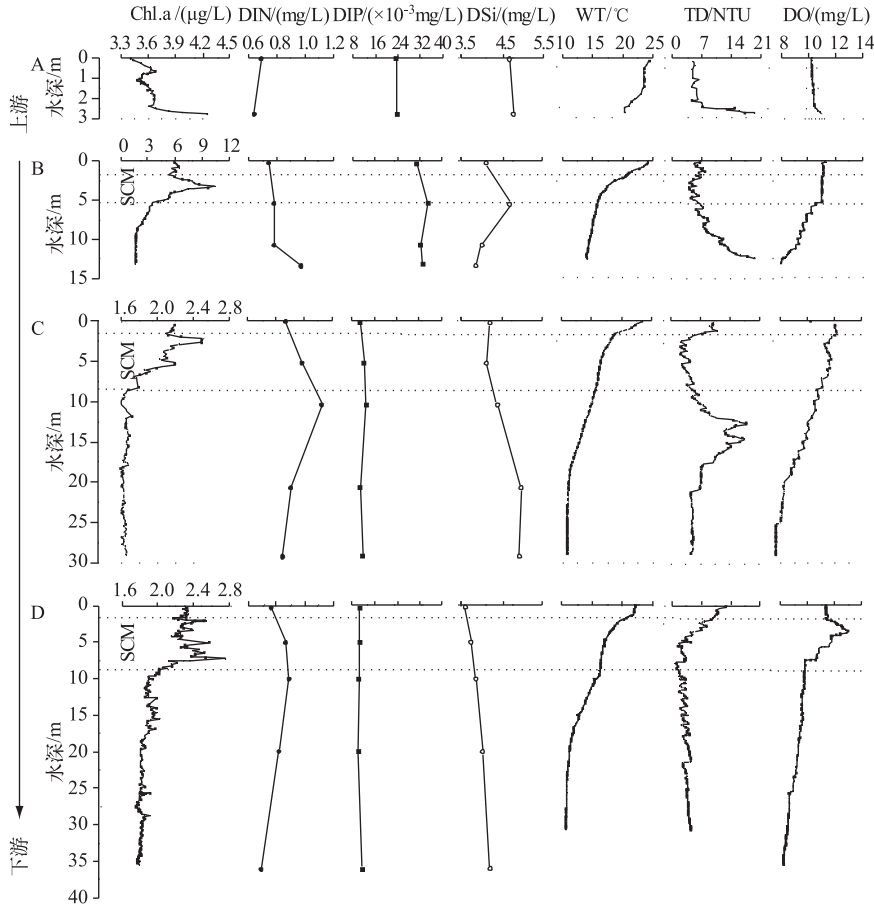


图 4 柘林水库水体 Chl.a 浓度与环境因子的垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of chlorophyll-a concentration and environment variables in the water of Zhelin Reservoir

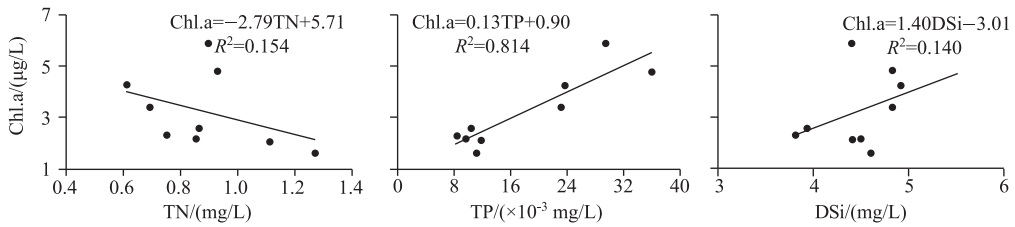


图 5 柘林水库水体 Chl.a 浓度与营养盐浓度的相关关系

Fig.5 Interrelation of chlorophyll-a concentration and nutrition concentrations in the water of Zhelin Reservoir

水库 N : P 比值均在 26 以上,最高达 116.因此,柘林水库 N : P 比值远高于 Redfield 比例(16 : 1),说明水库中 DIN 相对比较充足,而 DIP 为限制因子.

柘林水库自上游而下 A、B、C、D 4 个站点的综合营养状态指数(TLI(Σ))分别为 37.30、43.65、33.04、32.20,平均为 36.55,介于 30~50 之间,属于中营养型水体.

### 3 讨论

#### 3.1 藻类与环境因子的冗余分析

柘林水库主要藻类(细胞丰度 $>1000$  cells/L)有 34 种,平均细胞丰度为  $39 \times 10^4$  cells/L,平均生物量为  $0.41$  mg/L,其细胞丰度和生物量均较低,不及同季节的千岛湖<sup>[29]</sup>,远远小于 5 月初的洞庭湖和鄱阳湖<sup>[30-31]</sup>.藻类优势度的结果表明硅藻门和蓝藻门为主要优势藻类,冗余分析表明这 2 种藻类组成与营养盐和 WT 等环境因子有密切关系(图 6),经 Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平( $P < 0.05$ ),说明排序结果可靠,具体关系如下:6 个变量在两主成份轴上共解释了 74.9% 的浮游藻类变率,其中在第 1 轴为 42.8%,在第 2 轴为 32.1%.12 种硅藻(占 80%)、5 种绿藻(占 55.6%)和 1 种裸藻(占 50%)的细胞丰度沿着 DSi 与 DIN 浓度的方向排列,DSi 浓度与第 1 轴的相关系数为 0.733,与第 2 轴的相关系数为  $-0.181$ ;DIN 浓度与第 1 轴的相关系数为 0.601,与第 2 轴的相关系数为  $-0.342$ ,表明硅藻和绿藻的生长更依赖 DSi 和 DIN.这是因为 Si 元素是构成硅藻骨架和外壳的必需元素,其生长发育对 DSi 的需求敏感所致.5 种蓝藻(占 71.4%)、5 种硅藻(占 33.3%)、2 种绿藻(44.4%)、2 种甲藻(占 100%)和 1 种隐藻(占 100%)的细胞丰度沿着 DIP 浓度和 WT 的方向排列,呈现出正相关关系,DIP 浓度与第 1 轴的相关系数为  $-0.202$ ,与第 2 轴的相关系数为 0.911,WT 与第 1 轴的相关系数为 0.345,与第 2 轴的相关系数为 0.671,表明蓝藻、甲藻的生长更多依赖 DIP 和较高的 WT.这是因为在同等营养条件下,多数蓝藻、甲藻对磷的获取、储存能力大于其他藻类,使水体中 DIP 浓度降低,抑制其他藻类生长<sup>[3,32]</sup>,而且其最适生长 WT 较高<sup>[33]</sup>(高于大多数硅藻和绿藻),柘林水库表层 WT 均接近  $25^{\circ}\text{C}$ ,高温有利于蓝藻优先生长,成为优势藻类.另外,TD 和 DO 浓度等因子与大多数藻类细胞丰度的方向夹角大于  $90^{\circ}$ (图 6),而且与第 1、2 轴相关系数小于 0.45,说明 TD 和 DO 浓度对藻类组成的影响较小.上述分析表明,相比于其他环境因子,柘林水库中 DIN 浓度、DIP 浓度、DSi 浓度和 WT 可能对藻类组成有更多的影响和控制作用.本次藻类与优势种的调查结果与 2012—2013 年的调查结果一致,均表明柘林水库藻类以蓝藻和硅藻为优势藻类<sup>[3]</sup>.其中蓝藻门的类颤鱼腥藻和硅藻门的尖针杆藻是富营养化乃至发生水华事件的主要藻类.

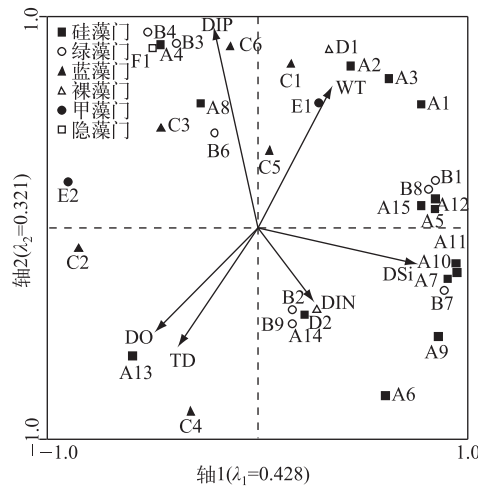


图 6 浮游藻类(细胞丰度)与环境因子的 RDA 排序图

Fig.6 Correlation plots of RDA on the relationship between the environment variables and cell density of phytoplankton taxa

#### 3.2 Chl.a 浓度与环境因子的相关分析

3.2.1 人类排放对 Chl.a 和营养盐浓度的影响 上游毗邻武宁县城河段(A 和 B 点)水体的 Chl.a 浓度垂向均值( $4.0 \sim 5.8 \mu\text{g/L}$ )明显高于下游自然河段(C 和 D 点,约  $2 \mu\text{g/L}$ )(图 3),这表明人类排放对 Chl.a 浓度变化

有显著的影响。B点 DIP 浓度(23~36  $\mu\text{g/L}$ )也远高于自然河段(C点和D点,7~12  $\mu\text{g/L}$ ),这说明武宁县城向柘林水库排放了大量的营养盐,导致毗邻武宁县城河段藻类物种的多样性、生物量显著增加(表1),Chl.a 浓度也显著增加(图3、4)。

3.2.2 Chl.a 浓度的 SCM 特征及与营养盐浓度垂向分布的关系 柘林水库水体 Chl.a 浓度有显著的 SCM 现象,SCM 层深度为3~8 m,厚度为2~7 m,SCM 层占整个水体的25.2%~74.1%(图4)。另外,《中国湖泊志》曾报道镜泊湖等少数深水湖泊生物量的垂向分层现象<sup>[18]</sup>。近期滦河流域潘家口水库、新安江水库和抚仙湖也报道了显著的 SCM 现象<sup>[34-36]</sup>。SCM 最早报道于海洋研究中,指弱混合(层化)水体中,叶绿素浓度最大值出现在海面以下一定深层。柘林水库与其他湖泊和水库中的 SCM 现象表明,SCM 也是湖泊和水库普遍存在的现象,但是 SCM 层的深度和厚度比海洋小。

柘林水库水体营养盐浓度随 Chl.a 浓度垂向变化而变化的特征表明,Chl.a 浓度的垂向变化导致营养盐浓度变化。在表层和 SCM 层藻类吸收 DIN、DIP,致使其浓度减少;SCM 层的下层尽管仍有藻类吸收 DIN、DIP,但 SCM 层死亡的大量藻类分解的 DIN、DIP 的沉降效应,导致其浓度增加;然后随沉降效应减弱,DIN 浓度减小,DIP 浓度略有减小(图4)。而 DSi 浓度自表向底不断增加的特点表明,尽管表层和 SCM 层藻类也吸收 DSi 致使其浓度减少,该层内的藻类死亡后,并不能快速溶出释放 DSi,从而 SCM 层的下层并未出现因 DSi 沉降累积效应而出现最大值,DSi 和 DIN、DIP 吸收及分解的差异,以及沉积物界面的再释放导致其最大值出现在底部(图4)。

另外,柘林水库水体 N:P 值均在26以上,最高达116。而 Redfield 定律表明,浮游藻类的生长繁殖对无机氮和磷酸盐的摄取基本按照16:1的比例进行<sup>[37]</sup>。因此,柘林水库水体 N:P 远高于 Redfield 比例,说明水库中 DIN 相对比较充足,而 DIP 为限制因子。另外,深度10 m 以上的水体 Chl.a 浓度与 DIN、DIP 和 DSi 浓度相关系数分别为0.154、0.814 和0.140(图5),这表明柘林水库水体 Chl.a 浓度的分布也受到 DIP 浓度的影响。

3.2.3 Chl.a 浓度与 WT、DO 浓度和 TD 的垂向分布关系 首先,Chl.a 浓度在水体垂向3~8 m 出现明显的 SCM 层,而 WT 在0~5 m 出现明显的温跃层,表明 SCM 层与 WT 温跃层基本一致,SCM 层发育在 WT 温跃层内或者下部(图4)。这说明 SCM 层发育与 WT 温跃层有密切关系。其次,在 SCM 层,DO 浓度达到最大值,而在其上层和下层,DO 浓度均减少,这说明 Chl.a 浓度的垂直分布控制了 DO 浓度的分布(图4)。其机理即为 SCM 层藻类的大量生长,释放出大量的氧气,导致 DO 浓度增加并达到最大值。另外,TD 在0~5 m 呈现不断降低的趋势(图4),这种现象主要是调查期间漂浮的大量花粉随深度减少所造成。在5 m 以下,TD 基本稳定(图4)。B点5 m 以下 TD 升高主要是底层泥沙的再悬浮所造成。C点的 TD 在12~20 m 出现峰值,其原因可能是温跃层的存在限制了物质向下传递,从而北岸中口水的注入由于介质不同(WT 不同)形成平面射流,从而在此层内累积,导致汇入区出现12~18 m 的高浊度区(图4)。

3.2.4 柘林水库水体 Chl.a 浓度的 SCM 层发育机理 Chl.a 浓度的 SCM 现象早在1935 年就有报道<sup>[38]</sup>,1958 年 Sverdrup 用真光层深度( $Z_{cu}$ ,表面光强减到1%的深度)与混合层深度( $Z_{mix}$ ,水体温度或密度沿深度变化很小的垂直混合充分的水层)的比值变化描述湖泊 SCM 的产生机理,提出比值的临界值理论,当水体  $Z_{cu}/Z_{mix}$  高于临界值(混合层深度浅于临界层深度),藻类迅速生长,反之则抑制其生长<sup>[39]</sup>。该理论广泛用于探讨水库 SCM 的机理<sup>[40-41]</sup>。该理论的本质是浮游植物初级生产力与水体垂向层化稳定度的关系,而水体垂向层化稳定度的核心是温跃层的存在与否<sup>[42-43]</sup>,水库中 SCM 形成首先有赖于温跃层的存在与否,温跃层阻碍水体的上下混合交换,在层内形成相对静止稳定的环境<sup>[44]</sup>;其次浮游植物对弱光的适应原理导致大部分种类的藻类在位于水体表面光强1%~12%的水下层(光饱和层)光合作用最强<sup>[45-47]</sup>;另外温跃层内营养盐自底部向上的输送及营养盐沉降累积,导致温跃层内尤其是下部区域营养盐的富集,为藻类生长提供了充足的营养来源<sup>[48]</sup>。上述温跃层、藻类对弱光的适应原理及营养盐富集机制相互作用,致使海洋、湖泊与水库中普遍存在 Chl.a 浓度的 SCM 现象。从上述讨论可以看出,对于柘林水库而言,柘林水库温跃层的存在也是与 Chl.a 浓度的 SCM 层发育密切相关,温跃层的存在造成层内稳定静止的环境,同时也阻碍了营养盐的上下交换,致使营养盐在沉降作用下在层内出现富集(图4)。另外,由于水库光衰减系数远比海洋(0.04~0.2)要高,如果假定水库光衰减系数为0.6,水表面光强(调查时为晴天)为100000 lux,根据光衰公式(Lambert-Beer Law)<sup>[49]</sup>: $I_d = I_0 \cdot e^{-kd}$ ( $I_d$ 为深度  $d$  处的光强, $I_0$ 为水表层晴天光照, $k$ 为光衰系数),则光强衰减到10%的深度



约为 4.6 m.因此,根据浮游植物对弱光的适应原理,柘林水库浮游藻类在水下 4.6 m 左右光合作用最强.因此,本研究表明,温跃层是水库 SCM 发育的前提,藻类对弱光的适应性是 SCM 发育的生态学基础,而温跃层内营养盐富集机制是 SCM 发育的物质基础,三者相互作用,形成 SCM 现象.

### 3.3 水库的自净能力及营养盐的过滤器效应

柘林水库水体 Chl.a 和 DIP 浓度从 B 点到 C 点不断减少,但 C 点至 D 点基本稳定(图 3、4),说明尽管水库接纳了来自县城排放的大量 DIP 等营养盐,造成了藻类的大量繁殖,但是经过 18 km 长的河段(B~C 段)的自净,藻类与水质都达到稳定.另外,营养状态评价表明柘林水库整体处于中营养状态.上述分析说明柘林水库的自净能力非常强,一个人口 40 万的县城,经过初级处理的废水排入水库,经过 18 km 长的弱流动水体(流速 0.1 m/s)的自净,水体水质便达到稳定.

水库的自净能力的本质是藻类吸收消化营养盐,导致营养盐产生了显著的生物过滤器效应,即营养盐通过浮游藻类的吸收,固定于藻类中,并随藻类沉降沉积于库内.首先,水库的自净表明水库对氮和磷均产生了吸收固定作用,但是垂向分布也表明,藻类在沉降过程中,具有明显的分解释放氮、磷的现象,导致 SCM 层下水体的 DIP 和 DIN 浓度出现最大值,这说明水库尽管有吸收固定氮、磷的现象,但大部分又在藻类沉降过程迅速释放回归水体,并没有随沉降藻体沉积于库内,因此水库对氮和磷的过滤器效应不显著.

但是对于 DSi 而言,其纵向不断减少表明水体中 DSi 浓度不断减少(减少 21%)(图 4).其垂向上(除 B 点外)不断增加的趋势表明,水体上层吸收固定 DSi 能力大于下层,而且藻类沉积过程没有显著溶出再释放 DSi 的现象,因此上层被吸收固定的 DSi 均随藻体沉降而沉积于库内.DSi 垂向累积计算表明,如以底层 DSi 浓度为河流原始浓度,则垂向上,经藻类吸收固定的 DSi 约为 11%~12%(C 和 D 点)(图 4).这种垂向上 DSi 的吸收固定正是导致 DSi 从上游向下游不断减少的原因.综合评价,柘林水库生物过滤器效应导致 21% 的 DSi 滞留于库内.这种水库的 DSi 滞留现象也是其他成千上万水库的普遍现象,导致长江入海 DSi 通量自 1960 s 以来下降了 2/3,导致河口营养盐比例失调,生态结构改变<sup>[50-51]</sup>.

### 3.4 水库富营养化水平

柘林水库 4 个站点水体的 DIN 和 DIP 浓度平均值分别为 0.69~0.84 mg/L 和 7~36  $\mu\text{g/L}$ ,根据国家水质标准<sup>[52]</sup>,调查期间干流区域水体水质良好,属于 III 类水体.江西省环境保护科学研究院于 2012 年 8 月—2013 年 7 月对柘林水库 16 个监测点的调查数据表明:DIN 浓度全年平均在 0.65 mg/L 左右,DIP 浓度全年平均在 30  $\mu\text{g/L}$  左右,其中 4 月份的 DIN 浓度约 0.6 mg/L,DIP 浓度约 20  $\mu\text{g/L}$ <sup>[1,3]</sup>.本次调查与 2012—2013 年度的调查结果基本一致.其次,本次调查的营养状态指数均介于 30~50 之间,说明调查期间干流水域属于中营养型水体,也与 2012—2013 年度调查结果一致<sup>[1,3]</sup>.另外,柘林水库水体 TN、TP 浓度和营养状态指数自 2008 年以来呈现不断减小的趋势,其主要原因是流域污染治理水平的提高<sup>[1,3]</sup>.

## 4 参考文献

- [1] Liu Huili, Dai Guofei, Zhang Wei *et al.* Analysis of the water ecological environment changes of the large lakes and driving factors in Lake Poyang basin: A case study of Lake Zhelin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 266-274. DOI:10.18307/2015.0210. [刘慧丽,戴国飞,张伟等.鄱阳湖流域大型湖库水生生态环境变化及驱动力分析——以柘林湖为例.湖泊科学, 2015, **27**(2): 266-274.]
- [2] Chen Ran, Fan Hua, Liu Zhigang. Feasibility analysis of Zhelin Reservoir as backup water source for city based on fuzzy evaluation. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, (1): 24-27. [陈然,樊华,刘志刚.柘林水库作为城市备用水源地可行性分析——基于模糊评价.中国农村水利水电, 2010, (1): 24-27.]
- [3] Dai Guofei, Liu Huili, Zhang Wei *et al.* Spatio temporal variation of algae and eutrophic status of Lake Zhelin, Jiangxi Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 275-281. DOI:10.18307/2015.0211. [戴国飞,刘慧丽,张伟等.江西柘林湖富营养化现状与藻类时空分布特征.湖泊科学, 2015, **27**(2): 275-281.]
- [4] Liu Huili, Feng Minglei, Xiong Peng. Non-point source into lake load estimation and countermeasure research on Zhelin Lake. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2013, **41**(4): 1670-1673. [刘慧丽,冯明雷,熊鹏.柘林湖非点源入湖负荷估算及对策研究.安徽农业科学, 2013, **41**(4): 1670-1673.]
- [5] Liu Jiankang ed. *Advanced hydrobiology*. Beijing: Science Press, 1999: 176-198. [刘建康.高级水生生物学.北京:科学出版社, 1999: 176-198.]

- 学出版社, 1999: 176-198.]
- [ 6 ] Wang Ji, Wang Jian. Some problems in the conversion among chlorophyll-a, biomass, and production of phytoplankton. *Plant Science Journal*, 1984, **2**(2): 249-258. [王骥, 王建. 浮游植物的叶绿素含量、生物量、生产量相互换算中的若干问题. 植物科学学报, 1984, **2**(2): 249-258.]
- [ 7 ] Kalff J ed. *Limnology: Inland water ecosystems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 1-640.
- [ 8 ] Neal C, House WA, Jarvie HP *et al.* The water quality of the River Dun and the Kennet and Avon Canal. *Journal of Hydrology*, 2006, **330**(1): 155-170.
- [ 9 ] Engle VD, Summers JK, Macauley JM. Dissolved oxygen conditions in northern Gulf of Mexico estuaries. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, **57**(1): 1-20.
- [ 10 ] Jensen JP, Jeppesen E, Orlík K *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish Lakes. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [ 11 ] Zhang Yimin, Zhang Yongchun, Zhang Longjiang *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.]
- [ 12 ] Liao Ping'an, Hu Xiulin. Experimental study on the effect of flow velocity on algal growth. *Beijing Water Resources*, 2005, (2): 12-14. [廖平安, 胡秀琳. 流速对藻类生长影响的试验研究. 北京水利, 2005, (2): 12-14.]
- [ 13 ] Wu N, Schmalz B, Fohrer N. Distribution of phytoplankton in a German lowland river in relation to environmental factors. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(5): 807-820.
- [ 14 ] Gou Ting, Xu Zhencheng, Li Jie *et al.* Phytoplankton community structure and water quality assessment of Hejiang River, a branch of Xijiang River, Pearl River drainage basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(3): 412-420. DOI:10.18307/2015.0307. [苟婷, 许振成, 李杰等. 珠江流域西江支流贺江浮游藻类群落特征及水质分析. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 412-420.]
- [ 15 ] Neal C, Hilton J, Wade AJ *et al.* Chlorophyll-a in the rivers of eastern England. *Science of the Total Environment*, 2006, **365**(1): 84-104.
- [ 16 ] Wang Zhen, Zou Hua, Yang Guijun *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 567-575. DOI: 10.18307/2014.0411. [王震, 邹华, 杨桂军等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 567-575.]
- [ 17 ] Wu E'na, Zhu Mengjie, Tang Lin *et al.* Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn. *J Lake Sci*, 2011, **23**(1): 67-72. DOI:10.18307/2011.0111. [吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 67-72.]
- [ 18 ] Wang Sumin, Dou Hongshen eds. *Chinese lakes*. Beijing: Science Press, 1998, 114-122. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 114-122.]
- [ 19 ] Chen Weimin, Huang Xiangfei, Zhou Wanping eds. *Observation method of lakes ecosystem*. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 1-259. [陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 1-259.]
- [ 20 ] "Water and wastewater monitoring and analysis method" editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. *Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [ 21 ] Hasle GR, Sournia A eds. *Phytoplankton manual, monographs on oceanographic methodology*. Paris: UNESCO, 1978.
- [ 22 ] Hu Hongjun, Wei Yinxin eds. *The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology*. Beijing: Science Press, 2006: 1-1023. [胡鸿均, 魏印心. 中国淡水藻类——系统, 分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006: 1-1023.]
- [ 23 ] Sun Jun, Liu Dongyan, Qian Shuben. Study on phytoplankton biomass I. Phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **22**(2): 75-85. [孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报(中文版), 1999, **22**(2): 75-85.]
- [ 24 ] Wu Dan, Wang Haiying, Zhang Zhen. Investigation of summer plankton community structure in Yuqiao Reservoir, Tianjin. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 735-742. DOI:10.18307/2013.0516. [武丹, 王海英, 张震. 天津于桥水库夏季浮游生物调查及群落结构变化. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 735-742.]

- [25] Jin Xiangcan, Tu Qingying eds. Specifications for lake eutrophication survey (2nd Edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 286-302. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第2版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 286-302.]
- [26] Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [27] Du Jiawei. Elemental and trace metal composition of nano-phytoplankton in natural assemblage[Dissertation]. Taipei: Institute of Oceanography, NTU, 2014. [杜家玮. 天然群落中微型浮游植物的元素含量及组成变化[学位论文]. 台北: 台湾大学海洋研究所, 2014.]
- [28] Pierre I. Study Beta diversity: Ecological variation partitioning by multiple regression and canonical analysis. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(5): 976-981.
- [29] Zhou Xiaoyu. The planktonic algae succession in relation to environmental factors of Lake Qiandao Lake and the influence mechanism [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [周小玉. 千岛湖浮游藻类演替格局与环境因子的关系及其机理的初探[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [30] Zeng Chunfang, Huang Xiangrong, Li Xiaoling. Plankton resources in South Dongting Lake. *Inland Fisheries*, 2007, (1): 24-26. [曾春芳, 黄向荣, 李小玲. 南洞庭湖浮游生物资源调查. 内陆水产, 2007, (1): 24-26.]
- [31] Chen Gejun, Zhou Wenbin, Li Meiting et al. Research of the nitrogen and phosphorus on the phytoplankton community in Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (3): 48-52. [陈格君, 周文斌, 李美婷等. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究. 中国农村水利水电, 2013, (3): 48-52.]
- [32] Fujimoto N, Sudo R, Sugiura N et al. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnology & Oceanography*, 1997, **42**(2): 250-256.
- [33] Dokulil MT, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 2000, **438**(1/2/3): 1-12.
- [34] Zhou Yuyan, Xiao Weihua, Bao Zhu et al. Research of the Panjiakou Reservoir chlorophyll-a distribution and its correlation analysis with physical and chemical factors. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (4): 34-38. [周毓彦, 肖伟华, 暴柱等. 潘家口水库叶绿素 a 分布及与理化因子的相关分析. 中国农村水利水电, 2014, (4): 34-38.]
- [35] Wu Zhixu, Liu Mingliang, Lan Jia et al. Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 460-465. DOI:10.18307/2012.0319. [吴志旭, 刘明亮, 兰佳等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 460-465.]
- [36] Liu Zhensheng, Wang Chunsheng, Ni Jianyu et al. Ecological distribution characteristics of chlorophyll a in Fuxian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1773-1780. [刘镇盛, 王春生, 倪建宇等. 抚仙湖叶绿素 a 的生态分布特征. 生态学报, 2003, **23**(9): 1773-1780.]
- [37] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress*, 1958, **46**(11): 150-70.
- [38] Gran HH, Braarud T. A quantitative study of the phytoplankton in the Bay of Fundy and the Gulf of Maine (including observations on hydrography, chemistry and turbidity). *Journal of the Biological Board of Canada*, 1935, **1**(5): 279-467.
- [39] Sverdrup HU. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil*, 1953, **18**(3): 287-295.
- [40] Tirok K, Gaedke U. The effect of irradiance, vertical mixing and temperature on spring phytoplankton dynamics under climate change: Long-term observations and model analysis. *Oecologia*, 2007, **150**(4): 625-642.
- [41] Townsend DW, Keller MD, Sieracki ME et al. Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Nature*, 1992, **360**(6399): 59-62.
- [42] Liu Liu, Liu Defu, Xiao Shangbin et al. Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050. [刘流, 刘德富, 肖尚斌等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响. 环境科学, 2012, **33**(9): 3046-3050.]
- [43] Chen Yang, Yang Zhengjian, Huang Yuling et al. Research on the influence of mixing layer depth on algal growth. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3049-3057. [陈洋, 杨正健, 黄钰铃等. 混合层深度对藻类生长的影响研究. 环境科学, 2013, **34**(8): 3049-3057.]
- [44] Chen Xingqun, Chen Qihuan, Zhuang Liangzhong. Distribution of chlorophyll-a and photosynthesis and its relations with environmental factors in Central South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, **11**(3): 349-355. [陈兴群, 陈其焕,

- 庄亮钟. 南海中部叶绿素 a 分布和光合作用及其与环境因子的关系. 海洋学报(中文版), 1989, **11**(3): 349-355.]
- [45] Martin J, Tremblay JÉ, Gagnon J *et al.* Prevalence, structure and properties of subsurface chlorophyll maxima in Canadian Arctic waters. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, **412**: 69-84.
- [46] Richardson K, Beardall J, Raven JA. Adaptation of unicellular algae to irradiance: An analysis of strategies. *New Phytologist*, 1983, **93**(2): 157-191.
- [47] Anderson GC. Subsurface chlorophyll maximum in the northeast Pacific ocean. *Limnology & Oceanography*, 1969, **14**(3): 386-391.
- [48] Gong Xiang, Shi Jie, Gao Huiwang. Subsurface chlorophyll maximum in ocean; Its characteristics and influencing factors. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(5): 539-548. [宫响, 史洁, 高会旺. 海洋次表层叶绿素最大值的特征因子及其影响因素. 地球科学进展, 2012, **27**(5): 539-548.]
- [49] Stavn RH. Lambert-Beer law in ocean waters: Optical properties of water and of dissolved/suspended material, optical energy budgets. *Applied Optics*, 1988, **27**(2): 222-231.
- [50] Li Maotian, Sun Qianli, Wang Hong *et al.* The filter effect of big reservoirs on dissolved silicate flux decrease in the Yangtze River drainage basin. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 505-514. DOI: 10.18307/2014.0403. [李茂田, 孙千里, 王红等. 长江流域水库“过滤器效应”对入海溶解硅通量的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 505-514.]
- [51] Li M, Xu K, Watanabe M *et al.* Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem. *Estuarine & Coastal Marine Science*, 2007, **71**(1/2): 3-12.
- [52] Environmental protection department, Development and Reform Commission, Treasury Department eds. Overall planning of lake ecological environment protection with better water quality. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2014: 3-47. [环境保护部, 发展改革委员会, 财政部. 水质较好湖泊生态环境保护总体规划. 中华人民共和国国务院公报, 2014: 3-47.]