

## 广东省镇海水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的季节动态及驱动因子分析\*

赵莉<sup>1</sup>, 雷腊梅<sup>1,2\*\*</sup>, 彭亮<sup>1,2</sup>, 韩博平<sup>1,2</sup>

(1: 暨南大学水生生物研究中心, 广州 510632)

(2: 广东省水库蓝藻水华防治中心, 广州 510632)

**摘要:** 拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 是热带地区普遍存在的蓝藻种类, 已在广东省很多水库成为优势种类甚至形成水华, 作为一种新的有害水华类型, 目前对其成因研究甚少. 以广东省江门市镇海水库为研究对象, 于 2014 年 11 月—2015 年 10 月期间对其进行逐月采样, 观测理化因子和浮游植物组成, 测定拟柱孢藻的丝体长度, 初步探讨该水库拟柱孢藻优势形成的原因. 数据表明, 拟柱孢藻是镇海水库的绝对优势种, 常年生物量较高, 介于 5.9~15.5 mg/L 之间, 平均生物量为 11.3 mg/L, 占浮游植物总生物量的 93.5%. 从季节上看, 拟柱孢藻生物量在 2—6 月相对较高, 最高生物量出现在 6 月, 10 月和 11 月生物量最低. 拟柱孢藻的丝体长度具有显著的季节变化, 与水温呈极显著负相关. 相关性分析表明拟柱孢藻生物量与总氮、总磷浓度呈显著正相关, 与氮磷比呈显著负相关, 而逐步回归分析表明拟柱孢藻生物量的变化主要由总磷浓度决定, 推测该藻对磷的超强吸收和储存能力在其生物量季节变动中起重要作用.

**关键词:** 拟柱孢藻; 藻丝体长度; 生物量; 环境因子; 镇海水库

## Seasonal dynamic and driving factors of *Cylindrospermopsis raciborskii* in Zhenhai Reservoir, Guangdong Province

ZHAO Li<sup>1</sup>, LEI Lamei<sup>1,2\*\*</sup>, PENG Liang<sup>1,2</sup> & HAN Boping<sup>1,2</sup>

(1: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China)

(2: Guangdong Center for Control and Prevention of Reservoir Cyanobacterial Blooms, Guangzhou 510632, P.R.China)

**Abstract:** *Cylindrospermopsis raciborskii*, thought to be an originally tropical species, is found to become dominant and even formed blooms in many reservoirs of Guangdong Province. The dominance of this species presents a new threat to the region but little is known about its bloom forming mechanism. With the above reasons, the study aims to determine the factors that may lead to the successful dominance and bloom formation of *C. raciborskii*. The *C. raciborskii* filamental length, phytoplankton species composition, and different environmental physico-chemical parameters were examined monthly during the period of November 2014 and October 2015 in Zhenhai Reservoir. Our results showed that *C. raciborskii* dominated absolutely in the reservoir during the sampling period. Its biomass ranged from 5.9 to 15.5 mg/L, with a mean value of 11.3 mg/L, accounting for nearly 93.5% of the total phytoplankton biomass. *C. raciborskii* biomass was relatively high from February to June in 2015. The highest levels were recorded in June and the lowest in both October and November. Filamental length of *C. raciborskii* exhibited an obvious seasonal regularity. Correlation analysis shows a highly significant negative correlation between filamental length of *C. raciborski* and water temperature. The biomass of *C. raciborskii* was significant-positively correlated with total nitrogen and total phosphorus, and significant-negatively correlated with the ratio of nitrogen to phosphorus. Further analysis with continuously multiple factors analysis indicated that total phosphorus concentration was the key factor affecting *C. raciborskii* biomass. We speculate that the strong absorption to phosphorus and the high P-storage capacity of *C. raciborskii* have played an important role in the seasonal variation of biomass.

\* 广东省科技计划项目 (2013B091300015)、广东省水利科技创新项目 (2016-29) 和国家自然科学基金项目 (41403061) 联合资助. 2016-02-28 收稿; 2016-05-04 收修改稿. 赵莉 (1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1729251839@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: tleilam@jnu.edu.cn.

**Keywords:** *Cylindrospermopsis raciborskii*; filamental length; biomass; environmental factors; Zhenhai Reservoir

拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 是热带特征性种类, 具有较强的入侵性, 随着全球气候变暖, 近年来在温带地区出现得越来越频繁<sup>[1]</sup>. 目前已对拟柱孢藻的广泛分布和不断扩张的行为进行了大量研究, 认为该藻具有一些独特的生理生态特性, 有利于其种群在竞争中获得生长优势. 研究表明拟柱孢藻能耐受较宽的温度波动, 能在温度达到 35℃ 时获得净生长<sup>[2]</sup>, 其生物量也可在 11.2℃ 时占到总浮游植物的 95%<sup>[3]</sup>; 该藻耐阴性强, 在低光照下比其他蓝藻更易形成水华<sup>[4]</sup>, 法国 Francs-Pêcheurs 池塘中拟柱孢藻水华的发生即与低透明度显著相关<sup>[5]</sup>; 拟柱孢藻对磷有较高亲和力和储存能力, 在低磷条件下比其他蓝藻繁殖更快<sup>[6]</sup>, 如巴西 Lagoa Santa 湖中拟柱孢藻的绝对优势即在总磷浓度低至 0.023 mg/L 时形成<sup>[7]</sup>; 拟柱孢藻还可以通过利用  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、有机氮等不同形态的氮解决缺氮危机<sup>[8-9]</sup>, 在氮不足的环境中, 有研究显示拟柱孢藻约有 63% 的藻丝体能形成异形胞, 通过自行固氮而获得生长优势<sup>[10-11]</sup>; 此外拟柱孢藻还可以形成厚壁孢子帮助其渡过不良环境<sup>[12]</sup>.

由于我国经济的快速发展, 淡水水体富营养化日益严重, 导致蓝藻水华频发, 其中以微囊藻水华最为常见. 但近年来, 鱼腥藻 (*Anabaena*)、束丝藻 (*Aphanizomenon*)、拟柱孢藻等蓝藻水华也屡有报道<sup>[13-15]</sup>. 拟柱孢藻在我国的广东、湖北、云南、台湾、福建等地区的水体中均有发现<sup>[15-18]</sup>. 作为热带特征性种类, 拟柱孢藻在温带地区的湖北和云南等水体中并不是优势种, 在相对温暖的广东、台湾和福建等地区, 拟柱孢藻可占据优势, 并在广东与台湾地区形成水华. 在福建江东水库, 拟柱孢藻在水体稳定的夏、秋季为蓝藻优势种之一<sup>[18]</sup>. 在台湾, 拟柱孢藻从夏季到冬季均占优势, 尤其在夏季高温时, 该藻占浮游植物的比例可达 90%, 分析发现低透明度、高温、弱碱性、低 DIN 的环境条件有利于拟柱孢藻形成优势<sup>[17]</sup>. 广东省属于亚热带海洋性季风气候, 常年温度较高, 调查显示该省多个水库均发现拟柱孢藻的分布, 其生物量在丰水期高于枯水期<sup>[15]</sup>, 在三坑、百花林、显岗等多个水库中发生了拟柱孢藻水华, 其相对丰度可达 93% 以上<sup>[19]</sup>, 而目前我国对南亚热带水库拟柱孢藻频繁出现乃至形成水华的原因完全缺乏了解. 为深入分析广东省拟柱孢藻种群优势形成的影响因素, 本文以镇海水库为研究对象, 对 2014 年 11 月—2015 年 10 月间的浮游植物群落结构和理化环境因子进行观测和分析, 探讨拟柱孢藻优势形成的生态条件.

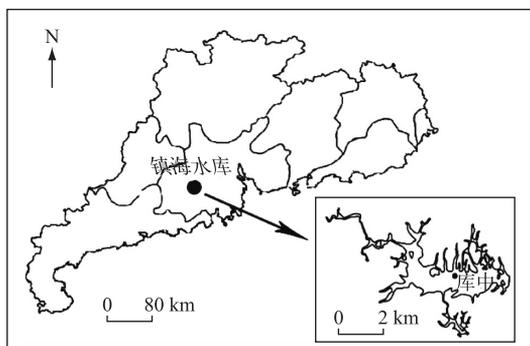


图 1 镇海水库在广东省的位置与水库采样点设置

Fig.1 Location of the sampling site in Zhenhai Reservoir in Guangdong Province

## 1 材料与方法

### 1.1 水库概况、采样点与采样时间

镇海水库 (22°34'N, 112°33'E) 位于广东省江门的开平市北部, 水库集雨面积为 128 km<sup>2</sup>, 总库容为 1.09×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 正常库容为 7670×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 平均水深 9.6 m, 属于亚热带海洋性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 为广东省重要的大型供水水库. 本次调查的采样点设置在镇海水库的库中区 (图 1), 于 2014 年 11 月—2015 年 10 月间每月进行一次采样.

### 1.2 理化因子的测定

在镇海水库库中区距表层水体 0.5 m 处使用采水器进行采样, 共采集 2 L 水样, 1 L 用于浮游植物的定量镜检, 1 L 用于理化因素测定. 叶绿素 a 浓度

采用反复冻融解冻的方法测定<sup>[20]</sup>; 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 浓度分别采用碱性过硫酸钾和过硫酸钾消解法测定; 硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N) 浓度采用紫外分光光度法测定 (GB 3838—2002); 亚硝态氮 ( $\text{NO}_2^-$ -N) 浓度采用分光光度法测定; 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ -N) 浓度使用纳氏试剂比色分光光度法测定; 可溶性活性磷 (SRP) 浓度采用钼酸铵比色分光光度法测定, 可溶性无机氮 (DIN) 浓度为  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的总和. 同时现场用多参数水质仪 (YSI 85) 测定水温 (Temp), 塞氏盘测定透明度 (SD); 真光层深度 (Zeu) 与混合层深度 (Zm) 之比 (Zeu/

$Z_m) = SD \times 2.7 / Z_m$ .

### 1.3 浮游植物的处理与鉴定

用于浮游植物定量镜检的样品当场加 10 ml 鲁哥试剂固定,带回实验室沉淀浓缩后计数,在进行浮游植物计数过程中,随机测量 180 根拟柱孢藻丝体长度,同时对藻丝体上异形胞和厚壁孢子进行观察和计数<sup>[21]</sup>. 浮游植物的定性样品用 25# 网孔直径为 64  $\mu\text{m}$  的浮游生物网,在水体的水平和垂直方向上多次拖网,所得样品当场加福尔马林至终浓度的 3%~5% 保存. 浮游植物的定性与定量样品均在光学显微镜(OLYMPUS-BX51)10×40 倍下进行鉴定和计数.

### 1.4 数据处理

采用相关性分析和多因素逐步回归对拟柱孢藻的生物量和长度与环境因子之间的关系进行分析,在方差分析(ANOVA)中,取  $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.01$  为差异极显著. 本文所涉及的所有数据的处理和分析均在 SPSS 16.0 软件中完成,作图均在 Origin 8.0 和 Photoshop 6.0 软件中进行.

## 2 结果与分析

### 2.1 镇海水库理化因素的动态特征

调查期间,TP 浓度介于 0.019~0.086 mg/L 之间,平均浓度为 0.040 mg/L,其浓度在 3—6 月间维持较高水平;SRP 浓度介于 0.001~0.018 mg/L 之间,平均值为 0.006 mg/L,其季节性变化趋势与 TP 浓度基本一致(图 2a). TN 浓度介于 0.83~1.80 mg/L 之间,平均浓度为 1.39 mg/L,在 2014 年 10 月—2015 年 6 月比较平稳,基本维持在 1.58 mg/L,7—10 月逐渐降低至 0.83 mg/L;DIN 浓度介于 0.12~0.62 mg/L 之间,平均浓度为 0.41 mg/L(图 2b). 镇海水库 TN/TP 的范围为 19.2~75.8,根据水体中 TN/TP 高于 Redfield 比(TN/TP = 16),则水体是磷限制的标准,该水库全年均处于磷限制状态.

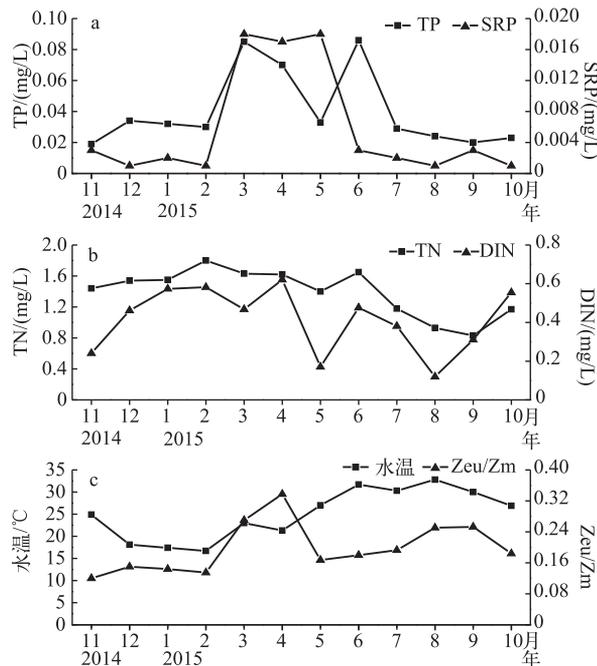


图2 镇海水库 TP 和 SRP 浓度(a), TN 和 DIN 浓度(b), Zeu/Zm 和水温(c)的季节动态

Fig.2 Seasonal dynamics of TP and SRP concentrations (a), TN and DIN concentrations (b), Zeu/Zm and surface water temperature (c) in Zhenhai Reservoir

镇海水库的 Zeu/Zm 在 0.12~0.34 间波动,平均值为 0.2,水库在 3—4 月 Zeu/Zm 较高,在 3 月达到最大

值,也仅为 0.34(图 2c),因此该水库浮游植物的生长常年受到光限制. 表层水温在 16.7~32.8℃ 间波动,平均表层水温为 25℃,6—9 月水温均在 30℃ 以上,8 月达到最高值 32.8℃,在 12 月至次年 2 月,表层水温一直低于 20℃,2 月为最低水温 16.7℃(图 2c).

2.2 镇海水库浮游植物群落动态特征

调查期间,镇海水库共检测到浮游植物 6 门 43 种(属),其中蓝藻门 11 种(属),绿藻门 23 种(属),硅藻门 4 种(属),甲藻门 3 种(属),裸藻门 1 种(属),隐藻门 1 种(属). 镇海水库的浮游植物群落以蓝藻为主,其平均生物量为 11.6 mg/L,占浮游植物总生物量的 95.6%,其他各门浮游植物仅占浮游植物总生物量的 4.4%(图 3).

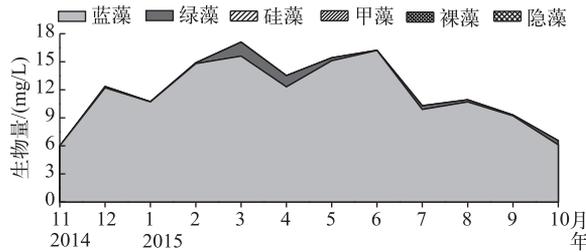


图 3 镇海水库浮游植物生物量的季节动态

Fig.3 Seasonal dynamic of phytoplankton biomass in Zhenhai Reservoir

拟柱孢藻为蓝藻门的绝对优势种,生物量为 5.9~15.5 mg/L,平均值为 11.3 mg/L,在调查期间其优势度一直维持较高水平,平均占浮游植物总生物量的 93.5%. 从季节上看,拟柱孢藻生物量在 2—6 月相对较高,最高生物量出现在 6 月,10 月和 11 月生物量最低(图 4a). 拟柱孢藻生物量与 TN 和 TP 浓度呈显著正相关( $r=0.596, P=0.041$ ;  $r=0.671, P=0.017$ ),与 TN/TP 呈显著负相关( $r=-0.583, P=0.046$ )(表 1). 将拟柱孢藻生物量与相关的环境因子进一步进行多因素逐步回归分析表明,拟柱孢藻生物量只与 TP 浓度呈显著正相关( $r^2=0.4, P=0.017$ ).

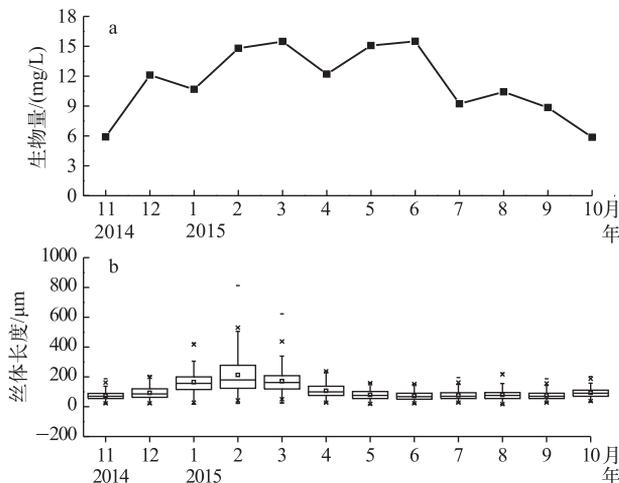


图 4 镇海水库拟柱孢藻生物量(a)和丝体长度(b)的季节动态

Fig.4 Seasonal dynamic of the *C. raciborskii* biomass(a) and filamental length(b) in Zhenhai Reservoir

在本次调查期间,基本没有见到含异形胞或厚壁孢子的拟柱孢藻,但其丝体形态呈现明显的季节变化,这主要体现在丝体长度,丝体宽度则无显著差异. 镇海水库拟柱孢藻丝体长度在 72.1~212.8 μm 内波动,平均长度为 108.1 μm. 在表层水温较低的 1—3 月,藻丝体长度均在 160 μm 以上,在表层水温最低的 2 月,藻

丝体长度达到最大值 212  $\mu\text{m}$ ;反之,藻丝体在水温较高的季节较短,长度集中在 70~90  $\mu\text{m}$  之间,最小值出现在 2015 年 6 月(图 4b)。相关性分析表明,拟柱孢藻的丝体长度与 TN 浓度呈显著正相关( $r=0.596, P=0.041$ ),与水温呈极显著负相关( $r=-0.734, P=0.007$ )(表 1)。进一步的多因素逐步回归分析表明,拟柱孢藻丝体长度只与水温存在极显著负相关( $r^2=0.554, P=0.007$ )。

表 1 拟柱孢藻生物量或丝体长度与环境因子之间的相关性

Tab.1 Correlation analysis between the environmental factors and *C. raciborskii* biomass or filamental length

	Temp	Zeu/Zm	TN	TP	TN/TP	SRP	DIN	DIN/SRP	拟柱孢藻丰度
拟柱孢藻生物量	ns	ns	0.596 *	0.671 *	-0.583 *	ns	ns	ns	ns
拟柱孢藻丝体长度	-0.734 **	ns	0.596 *	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* 表示显著相关, $P<0.05$ ; \*\* 表示极显著相关, $P<0.01$ ; ns 表示无显著相关性, $P>0.05$ 。

### 3 讨论

本次调查中,广东省镇海水库的浮游植物生物量几乎都由拟柱孢藻贡献,其他藻类的生物量所占比例极少。这种拟柱孢藻常年占据绝对优势的现象极为少见,在巴西 Ingazeira 水库和 Lagoa santa 湖有类似的现象发生,Ingazeira 水库拟柱孢藻的相对生物量在 4—11 月可占到 96%~100%,生物量最高可达 70 mg/L<sup>[22]</sup>; Lagoa santa 湖的拟柱孢藻在整个研究期间都为绝对优势种,平均占总浮游植物的 70%<sup>[7]</sup>。但更多的研究发现拟柱孢藻的优势度往往呈季节性变化,如希腊的 Kastoria 湖和非洲塞内加尔的 Guiers 湖的研究发现,拟柱孢藻常年为两个湖泊的优势种,在夏季温度较高时生物量较高,约占浮游植物总生物量的 60%<sup>[23-24]</sup>;在法国的 Francs-Pêcheurs 池塘中,虽然拟柱孢藻最高可达 99%,但仅在 7—9 月水温较高的季节发生<sup>[5]</sup>。

镇海水库中拟柱孢藻丝体长度与温度呈显著负相关,这与以色列和中国台湾水体的研究结果一致<sup>[21,17]</sup>,推测拟柱孢藻可以通过调整藻丝体的长短以适应外界温度的变化。高温是拟柱孢藻增殖的必要条件<sup>[5]</sup>,因此在低温条件下,拟柱孢藻为积蓄能量不进行分裂繁殖而形成长藻丝体,当温度升高至适宜范围,拟柱孢藻进入快速生长阶段,通过频繁分裂增殖形成短的藻丝体,因此拟柱孢藻丝体长度的季节变化可以反映其生长速率<sup>[17]</sup>。在进行拟柱孢藻长度测量的过程中,几乎没有发现厚壁孢子和异形胞,可能是因为镇海水库的水温高于厚壁孢子萌发的最适温度 5~10℃<sup>[12]</sup>,氮营养盐浓度较高,不需要通过异形胞固氮来获取生长所需氮源。

高温可能也是导致拟柱孢藻在镇海水库常年发生水华的关键因素。调查期间,镇海水库水温高且波动小,这样的温度条件有助于增强浮游植物群落的稳定性,并促进拟柱孢藻获得生长优势。已有研究表明,拟柱孢藻喜高温环境<sup>[25]</sup>,从镇海水库分离出的 N8 藻株的比生长速率随温度的升高而升高,并在高温下具最适生长速率<sup>[26]</sup>。本研究中拟柱孢藻生物量与水温之间并不具显著相关性,这可能是由于南亚热带地区表层水温变化范围小,温度始终处于拟柱孢藻生长所需的适宜范围内。调查期间,除 TP 和 SRP 浓度稍有变化外,镇海水库的表层水温、Zeu/Zm 及 TN、DIN 浓度均无显著的季节变化,多因素逐步回归分析表明除 TP 浓度外,其他因素与拟柱孢藻生物量无显著相关性,而蓝藻的存在和优势地位通常与水体的稳定性有较高的相关性<sup>[27]</sup>,有人认为拟柱孢藻不仅能够很好地适应稳定的水体条件,而且可以在稳定的水体中一直保持优势地位并形成水华<sup>[7,22]</sup>。

镇海水库浮游植物的生长常年受到光限制,Zeu/Zm 代表了光可获得性的大小,当该比值>1 时光可获得性较好,湖上层的浮游植物极少受到光限制;当该比值<1 时光可获得性较差<sup>[28]</sup>。而拟柱孢藻被认为能耐受低光,比其他蓝藻对光照的需求更低<sup>[4]</sup>,由此低的光照给高耐阴性的拟柱孢藻提供竞争优势使得镇海水库易发生拟柱孢藻水华<sup>[29]</sup>,这与 Briand、Figueredo、Bouy 等的研究结果基本一致<sup>[5,7,22]</sup>。镇海水库属于磷限制性水体,SRP 浓度在 3—5 月较高时也仅达到 18  $\mu\text{g/L}$ ,其他月份一直低于 4  $\mu\text{g/L}$ ,但拟柱孢藻却常年都是浮游植物的绝对优势种群,这可能是由于拟柱孢藻具有超强的吸收和储存磷的能力<sup>[6]</sup>,比其他蓝藻(如微囊藻)有更高的吸收和转换效率<sup>[4]</sup>。我们的研究也发现,在以磷为限制性底物时,镇海水库分离出的拟柱孢藻 N8 藻株的半饱和常数比微囊藻低,即该藻在低磷环境中更具生长优势<sup>[30]</sup>。此外,当外界环境中的无机磷处

于限制条件时,拟柱孢藻有可能利用不同的有机磷源支持其生长<sup>[31]</sup>. 镇海水库具有常年高温且波动小、低的光可获得性及磷限制性水体的特性,有利于拟柱孢藻在这一环境条件下维持竞争优势与高生物量.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Antunes JT, Leão PN, Vasconcelos VM *et al.* *Cylindrospermopsis raciborskii*: Review of the distribution, phylogeography, and ecophysiology of a global invasive species. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 473. DOI: 10.3389/fmicb.2015.00473.
- [ 2 ] Briand JF, Le Boulanger C, Humbert JF *et al.* *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: Selection, wide physiological tolerance, or global warming? *Journal of Phycology*, 2004, **40**(2): 231-238. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2004.03118.x.
- [ 3 ] Bonilla S, Aubriot L, Soares MCS *et al.* What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agar-dhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii*? *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(3): 594-607. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01242.x>.
- [ 4 ] Wu ZX, Shi JQ, Li RH. Comparative studies on photosynthesis and phosphate metabolism of *Cylindrospermopsis raciborskii* with *Microcystis aeruginosa* and *Aphanizomenon flos-aquae*. *Harmful Algae*, 2009, **8**(6): 910-915. DOI: 10.1016/j.hal.2009.05.002.
- [ 5 ] Briand JF, Robillot C, Quiblier-Llobéras C *et al.* Environmental context of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) blooms in a shallow pond in France. *Water Research*, 2002, **36**(13): 3183-3192. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00016-7.
- [ 6 ] Isvánovics V, Shafik HM, Présing M *et al.* Growth and phosphate uptake kinetics of the cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanophyceae) in throughflow cultures. *Freshwater Biology*, 2000, **43**: 257-275. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2000.00549.x.
- [ 7 ] Figueredo CC, Giani A. Phytoplankton community in the tropical lake of Lagoa Santa (Brazil): Conditions favoring a persistent bloom of *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2009, **39**(4): 264-272. DOI: 10.1016/j.limno.2009.06.009.
- [ 8 ] Saker ML, Eaglesham GK. The accumulation of cylindrospermopsin from the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* in tissues of the Redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Toxicon*, 1999, **37**(7): 1065-1077. DOI: 10.1016/S0041-0101(98)00240-2.
- [ 9 ] Herrero A, Muro-Pastor AM, Valladares A *et al.* Cellular differentiation and the NtcA transcription factor in filamentous cyanobacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 2004, **28**(4): 469-487. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.femsre.2004.04.003>.
- [ 10 ] Padisák J, Reynolds CS. Selection of phytoplankton associations in Lake Balaton, Hungary, in response to eutrophication and restoration measures, with special reference to cyanoprokaryotes. *Hydrobiologia*, 1998, **384**: 41-53. DOI: 10.1023/A:1003255529403.
- [ 11 ] Figueredo CC, Rückert GV, Cupertino A *et al.* Lack of nitrogen as a causing agent of *Cylindrospermopsis raciborskii*, intermittent blooms in a small tropical reservoir. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **87**(3): 557-567. DOI: 10.1111/1574-6941.12243.
- [ 12 ] Moore D, O'Donohue M, Garnett C *et al.* Factors affecting akinete differentiation in *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanobacteria). *Freshwater Biology*, 2005, **50**(2): 345-352. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2004.01324.x.
- [ 13 ] Li ZL, Yu JW, Yang M *et al.* Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China. *Harmful Algae*, 2010, **9**(5): 481-488. DOI: 10.1016/j.hal.2010.03.003.
- [ 14 ] Liu Y, Chen W, Li D *et al.* First report of aphanotoxins in China—waterblooms of toxigenic *Aphanizomenon flos-aquae* in Lake Dianchi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **65**(1): 84-92. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2005.06.012.
- [ 15 ] Lei L, Peng L, Huang X *et al.* Occurrence and dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* and dissolved cylindrospermopsin in urban reservoirs used for drinking water supply, South China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(5): 3079-3090. DOI: 10.1007/s10661-013-3602-8.
- [ 16 ] Wu Z, Shi J, Xiao P *et al.* Phylogenetic analysis of two cyanobacterial genera *Cylindrospermopsis* and *Raphidiopsis* based on

- multi-gene sequences. *Harmful Algae*, 2011, **10**(5): 419-425. DOI: 10.1016/j.hal.2010.05.001.
- [17] Yamamoto Y, Shiah FK. Factors related to the dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) in a shallow pond in northern Taiwan. *Journal of Phycology*, 2012, **48**(4): 984-991. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2012.01184.x.
- [18] Tian YQ, Huang BQ, Yu CC *et al.* Dynamics of phytoplankton communities in the Jiangdong Reservoir of Jiulong River, Fujian, South China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, **32**: 255-265. DOI: 10.1007/s00343-014-3158-7.
- [19] Jiang Qiming, Hou Wei, Gu Jiguang *et al.* Nutritional status and population characteristics of cyanobacteria in small and medium sized reservoirs in Guangzhou, southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(10): 2461-2467. [江启明, 侯伟, 顾继光等. 广州市典型中小型水库营养状态与蓝藻种群特征. 生态环境学报, 2010, **19**(10): 2461-2467.]
- [20] Lin Shaojun, He Lijing, Huang Peisheng *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton. *Ecological Science*, 2005, **24**(1): 9-11. DOI: 1008-8873(2005)01-009-03. [林少君, 贺立静, 黄沛生等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.]
- [21] Alster A, Kaplan-Levy RN, Sukenik A *et al.* Morphology and phylogeny of a non-toxic invasive *Cylindrospermopsis raciborskii* from a Mediterranean Lake. *Hydrobiologia*, 2010, **639**(1): 115-128. DOI: 10.1007/s10750-009-0044-y.
- [22] Bouvy M, Molica RJR, Oliveira SD *et al.* Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999, **20**(3): 285-297. DOI: 10.3354/ame020285.
- [23] Berger C, Ba N, Gugger M *et al.* Seasonal dynamics and toxicity of *Cylindrospermopsis raciborskii* in Lake Guiers (Senegal, West Africa). *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **57**(3): 355-366. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00141.x>.
- [24] Moustaka-Gouni M, Vardaka E, Tryfon E *et al.* Phytoplankton species succession in a shallow Mediterranean lake (L. Kastoria, Greece): Steady-state dominance of *Limnothrix redekei*, *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Hydrobiologia*, 2007, **575**(1): 129-140. DOI: 10.1007/s10750-006-0360-4.
- [25] Padiśák J. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: Worldwide distribution and review of its ecology. *Archiv für Hydrobiologie Supplementband Monographische Beiträge*, 1997, **107**(4): 563-593.
- [26] Yu Ting, Dai Jingjun, Lei Lamei *et al.* Effects of temperature, irradiance and nitrate on the growth of *Cylindrospermopsis raciborskii* N8. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 441-446. DOI: 10.18307/2014.0315. [于婷, 戴景俊, 雷腊梅等. 温度、光照强度及硝酸盐对拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii* N8)生长的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 441-446.]
- [27] Komárková J, Komárek O, Hejzlar J. Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1/2/3): 143-157. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008514.45771.aa.
- [28] Bormans M, Ford PW, Fabbro L. Spatial and temporal variability in cyanobacteria populations controlled by physical processes. *Plankton Res*, 2005, **27**: 61-70. DOI: 10.1093/plankt/fbh150.
- [29] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.
- [30] Dai Jingjun, Peng Liang, Yu Ting *et al.* The effects of phosphorus and nitrogen on the growth of *Cylindrospermopsis raciborskii* N8 isolated from the Zhenhai Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(3): 533-539. DOI: 10.7541/2015.70. [戴景俊, 彭亮, 于婷等. 镇海水库拟柱孢藻的分离鉴定和氮磷对其生长的影响. 水生生物学报, 2015, **39**(3): 533-539.]
- [31] Bai F, Liu R, Yang Y *et al.* Dissolved organic phosphorus use by the invasive freshwater diazotroph cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 112-120. DOI: 10.1016/j.hal.2014.06.015.