

山东某新建水库浮游藻类的群落结构特征及其环境驱动因子*

孙文秀¹, 武道吉¹, 裴海燕^{2,3**}, 韦洁琳², 张莎莎², 王玉婷²

(1: 山东建筑大学, 济南 250101)

(2: 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250010)

(3: 山东省环境科学工程技术研究中心, 济南 250061)

摘要: 基于山东某新建水库中 2014 年 4 月—2017 年 12 月的浮游藻类和水质监测结果, 研究了藻类群落结构特征, 采用非度量多维尺度分析了各年份不同季节藻类群落结构的相似性, 利用冗余分析探究了藻类群落结构和环境因子的关系. 结果表明: 尖针杆藻(*Synedra acus*)、湖泊伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*) 和小球藻(*Chlorella vulgaris*) 为此水库的主要优势藻种. 水库藻类群落结构的季节演替不稳定, 冬、春季多以硅藻和绿藻占优势, 不同年份夏、秋季藻类结构差异较大, 蓝藻和硅藻在夏、秋季存在一定的竞争优势. 该水库于 2013 年底开始启用, 由于水体环境的波动, 藻类群落结构有所变化, 整体上是由蓝藻—绿藻—硅藻向硅藻—绿藻—蓝藻变化. 水库浮游藻类生长主要受到氮盐和高锰酸盐指数影响, 但不同年份的主要环境影响因子存在一定差异.

关键词: 新建水库; 藻类结构; 环境因子; 冗余分析

Phytoplankton community structure and environmental factors in a newly built reservoir, Shandong Province

SUN Wenxiu¹, WU Daoji¹, PEI Haiyan^{2,3**}, WEI Jielin², ZHANG Shasha² & WANG Yuting²

(1: Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P.R.China)

(2: School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250010, P.R.China)

(3: Shandong Province Engineering Center on Environmental Science and Technology, Jinan 250061, P.R.China)

Abstract: Based on the results of phytoplankton and water quality monitoring in a new reservoir in Shandong Province from March 2014 to December 2017, the composition, density and diversity of phytoplankton were clarified. Non-metric multidimensional scaling was used to analyze the difference of phytoplankton community structure in different years and seasons. The relationship between phytoplankton community structure and environmental impact factors was explored by redundancy analysis. The results showed that *Synedra acus*, *Pseudanabaena limnetica* and *Chlorella vulgaris* were dominant algae species in this reservoir. The seasonal succession of the phytoplankton community structure in the reservoir was not stable. In winter and spring, Bacillariophyta and Cryptophyta were dominant, but phytoplankton community in summer and autumn were quite different in different years and Bacillariophyta competed with Cyanophyta in these two seasons. The reservoir started to activate at the end of 2013, due to fluctuations in the water environment, the community structure changed by the time. But the phytoplankton community structure of the reservoir was generally changed from Cyanophyta-Cryptophyta-Bacillariophyta to Bacillariophyta-Cryptophyta-Cyanophyta. The growth of phytoplankton in this reservoir was mainly affected by nitrogen and COD_{Mn} , however, main environmental factors were different in different years.

Keywords: New reservoir; phytoplankton community; environmental factors; redundancy analysis

浮游藻类是湖泊水库等水体中水生生物的重要组成部分, 作为重要的初级生产者, 在湖泊水库生态系统中扮演着重要角色. 浮游藻类因其敏感性和对生存环境的迅速动态响应^[1-2], 尤其是对营养水平的变化做

* 国家自然科学基金项目(51478251)和国家优秀青年基金项目(51322811)联合资助. 2018-07-12 收稿; 2018-10-13 收修改稿. 孙文秀(1994~), 女, 硕士研究生; E-mail: sunwxlc@163.com.

** 通信作者; E-mail: haiyanhup@126.com.

出直接的反应而经常被用做指示生物和水质评估依据^[3-4]。因此,研究藻类对监测湖库水质具有重要意义^[5-6]。

水库是我国重要的调蓄和供水的主要形式之一,保障水库的水环境健康对保障城市安全用水具有重要的意义^[7-8]。水库水体补给来源简单,以从其他水体进行调水为主,水体易受来水水质的影响^[9-10]。近些年随着工农业发展和城市化进程的加快,水体富营养化加剧。由于水库水体较为封闭,水体自净能力低,氮磷等营养物质浓度超过水体承载能力时,营养盐难以循环并在水体中累积,造成藻类异常增殖^[11],甚至会暴发水华,对水库水环境造成威胁。因此,探明藻类种群与环境因子之间的关系以及藻类种群对于水质变化的响应作用对于保障城市安全用水具有重要意义。

大多数研究是基于建成多年的水库,由于其水环境已趋于稳定,浮游藻类对水环境有一定的适应和承受能力,因此这些水库的浮游藻类群落结构较为稳定^[12-15],但对新建水库,尤其对国内北方地区新建水库,藻类群落结构的研究较少。水库在调蓄水过程中导致的水体水力停留时间短、水位变化等造成水库水质指标有所波动^[16],此外,调水过程中的藻类迁移均对群落结构的变化具有一定影响。因此,水库开始调蓄水时期,藻类群落结构随着水质波动如何变化、受哪些环境因子的影响、对于易引起藻类水华水质指标的响应情况如何有待研究。本文所研究的东湖水库是一座新建水库,于2013年底从东平湖调水至此,通过2014—2017年对此水库的水质和藻类群落结构进行研究,探明几年来藻类群落结构的变化和对环境因子的响应情况,以期探寻新建水库中藻类群落结构的演替规律。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东湖水库(36.88°N,117.35°E)位于山东省济南市历城区,是南水北调东线胶东干线工程的重要调蓄水库,水库总面积为543万m²,总库容5377万m³,调蓄水量可达8097万m³。水库于2013年年底开始调水,主要水源来自东平湖。2014—2016年每年调水期逐渐增加,2014年仅调水1个月(5—6月),2015—2016年分别调水3(4—7月)、6(1—6月、12月)个月,调水量也逐年增加。2017年1—4月调水,之后水库不再调入水源。

1.2 样品的采集与处理

2014年4月—2017年12月期间,在东湖水库共布设了两个采样点,每月采样一次,共采样42次,其中2015年2月、2016年2月和2017年1月由于水面结冰未取水样。现场采用便携式温度计(TES1316,上海精密仪器公司)测定表层水温(WT);采用便携式溶解氧测量仪(YSI59,YSI公司,美国)测定溶解氧(DO)浓度;采用便携酸度计(pH-HJ90MODEL B,航天计算机公司)测定pH;水深(WD)通过水库自动监测站自动监测。该水库属于浅水型水库,采样点设于水面下0.5m。样品的采集与测定依据《水和废水监测分析方法》(第4版)^[17]:总氮(TN)浓度采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定;总磷(TP)浓度采用钼锑抗分光光度法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)浓度分别采用纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法和N-乙二胺光度法进行测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用酸性高锰酸钾法测定;叶绿素a(Chl.a)浓度采用丙酮吸收分光光度法测定。

浮游藻类检测:取1L水样并立即加入15ml鲁哥试剂,静置沉淀48h后浓缩至5~10ml,在光学显微镜(CX31,OLYMPUS,日本)下放大400倍进行计数,并根据浮游植物的形态特征和结构特点参考文献^[18]进行分类鉴定。

1.3 分析方法

通过优势度(Y)对水库浮游藻类的生态特征进行评价,计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第*i*种浮游藻类的丰度, N 为总丰度, f_i 为第*i*种浮游藻类的出现频率。 $Y \geq 0.02$ 则为优势种^[19]。

采用PAST软件对物种数据进行非度量性多元标度分析(Non-metric Multi-dimensional Scaling, NMDS),研究水库不同年月种群组成的相似性,选取优势度 $\geq 1\%$ 的藻种进行排序。采用Canoco for Windows 4.5软件

对水库藻类和环境因子进行多元统计,先对浮游植物物种数据作去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),结果发现2014—2017年的逐年分析中4个轴长梯度最大值均小于3,2014—2017年的综合分析梯度最大值为3.2(介于3~4之间),因此选取冗余分析(redundancy analysis, RDA)对水库的藻类群落结构变化和环境因子之间的相关性进行分析.环境因子除了选取常规指标外,还增加了可以代表营养盐对浮游藻类生长限制水平的氮磷比;由于检测时间较长,藻类种数较多,藻类种属选取至少在一个样点的相对密度>5%且在此样点检出频率>12.5%的藻种.

2 结果与分析

2.1 水体理化指标

2014—2017年东湖水库的表层水温年变化趋势基本一致,年波动范围差别不大,且全年最高温度均出现在7月.2016、2017年DO浓度相比前两年略有降低,且波动较往年略小.水库水深在2014年变化范围较广,且其最高水位较其他3年略低,2015—2017年的水位波动范围略小,且最高水位均在5m以上. COD_{Mn} 相对2014年明显降低,2015—2017年虽呈降低趋势但差别不大. pH呈现升高趋势,但涨幅不大,整体属于弱碱性水体. TP浓度变化不大; TN、 NH_4^+-N 和 $NO_2^- -N$ 浓度在后3年相对于2014年均有降低, $NO_3^- -N$ 浓度略有升高;氮磷比(N/P)虽然波动较大,但整体水平明显降低. Chl.a浓度在2014年较高,2014年之后明显降低(图1).

2.2 藻类群落结构

2.2.1 藻类群落结构的种属组成和细胞密度 在调查期间,共检测出8门89属187种浮游藻类,其中绿藻门36属79种,占总种数的42.2%,为该水库的最主要类群;其次是硅藻门,为20属42种,占22.5%;蓝藻门为17属31种,占16.6%;裸藻门为5属19种,占10.2%. 金藻门为6属6种,占3.2%,隐藻和甲藻均为2属4种,占2.1%,黄藻门最少,仅有1属2种,占1.1%.

2014年4月—2017年12月期间,水库中藻类总藻密度呈一定的季节性变化,除2015年春季(3—5月)略高外,其他监测年份夏、秋季藻类总藻密度明显高于冬、春季.随着藻类总密度的降低,各门类密度也降低.绿藻、硅藻和蓝藻密度占总密度的比重较大,除个别月份金藻或隐藻占一定比例外,大部分月份绿藻、硅藻和蓝藻密度之和都能占总藻密度的70%以上.其中绿藻密度占比较为稳定,年均值在30%左右;硅藻密度占总密度的年均水平在2014—2016年逐年增加,2017年比2016年略低,除2015年夏季外,其他年份中硅藻密度在夏、秋、冬季均占较高的比例,其中2016年冬季占比高达76.9%;蓝藻在2014年的春、夏、秋季均占一定比例,2014年9月蓝藻密度占比达65.6%,2015年蓝藻密度在夏季占比为63.9%,2016年全年占比均较低(夏、秋季占10%左右),但2017年秋季所占比例为29.6%;隐藻密度占比较2014年有所增加,其中2016年4月高达43.0%;2014—2017年金藻密度变化不大,在春季占优势,其他季节密度较低,其春季密度占比逐年增加,2017年春季金藻所占比例为13.3%.总体上,春季藻类群落以绿藻为主,但优势度并不突出;夏季和冬季向着硅藻—绿藻的结构演变,秋季的演变情况尚不稳定,但多以绿藻和硅藻占优势(图2).

东湖水库浮游藻类优势种在不同年份的各个季节有所不同.绿藻或硅藻占优的频率较高,且以绿藻门的小球藻和硅藻门的尖针杆藻(*Synedra acus*)为主,说明这两种藻类在该水库中适应性较强.浮游藻类春季优势种在4年来略有变化,蓝藻仅有湖泊伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)在2014年的春季为第1优势种且优势度较大,之后春季的优势种以绿藻、隐藻和硅藻为主.夏季蓝藻门的藻种在2015年之后不再占优势,夏季优势种由蓝藻、硅藻和绿藻逐渐变成硅藻和绿藻.秋季优势种变动较大,主要体现为蓝藻的优势变化,2014年湖泊伪鱼腥藻优势度较大,2015年秋季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为第5优势种(0.039),2016年优势种中无蓝藻,而2017年拉氏拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)为第2优势种,湖泊伪鱼腥藻为第6优势种(0.027).冬季优势种以绿藻、硅藻为主,隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)在2015—2017年均占一定优势,金藻门的分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*)仅在2015年为第2优势种(表1).

2.2.2 藻类群落的相似性 对2014年4月—2017年12月水库浮游藻类群落的相似性程度做了NMDS分析,结果如图3.分析所得其应力值stress为0.1784(<0.2),说明该分析与实际情况吻合程度较好^[20].图中两点的距离远近表示两个月份之间浮游藻类群落结构相似程度的大小,距离越近藻类群落结构的相似性越大.

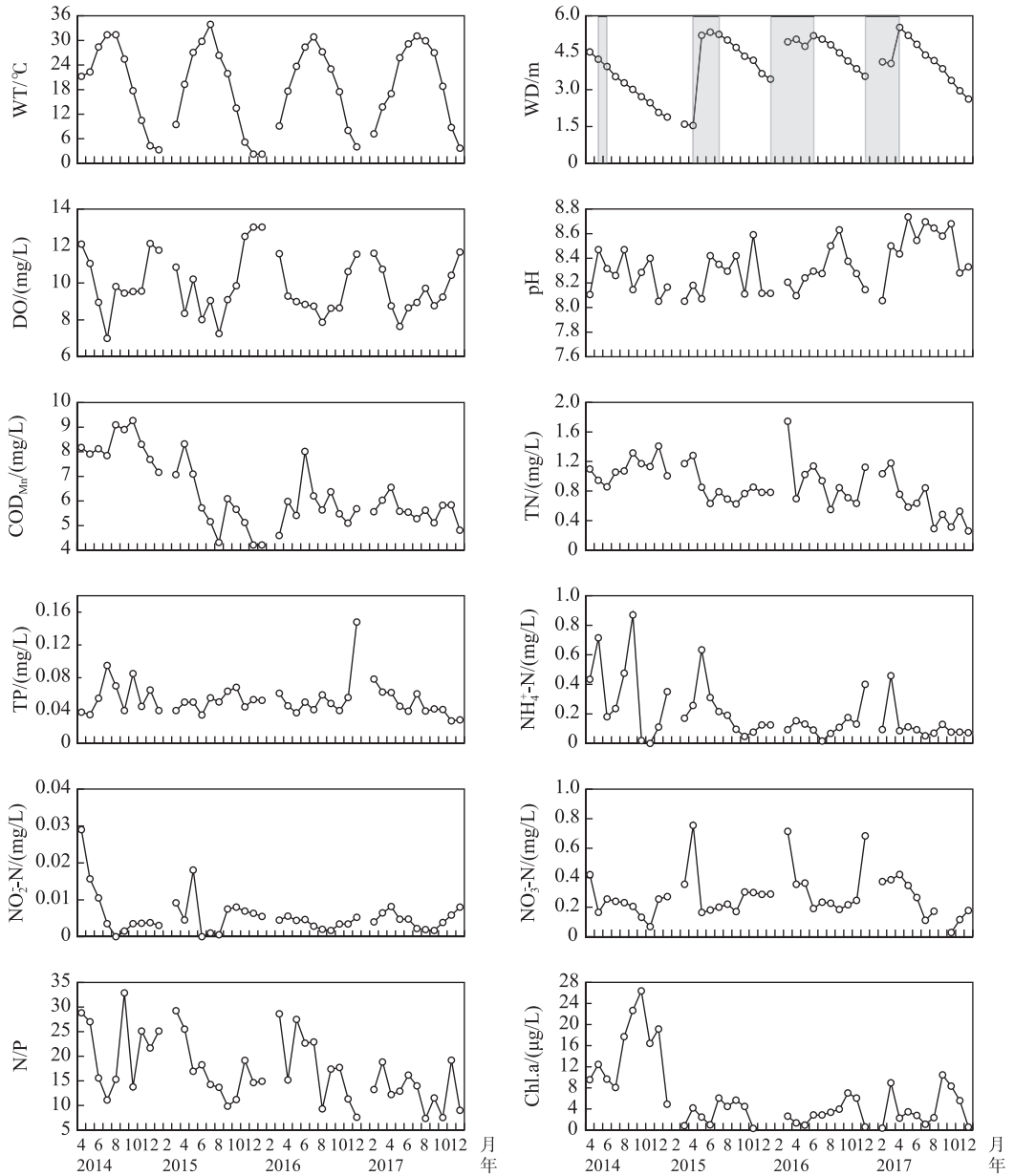


图 1 2014 年 4 月—2017 年 12 月东湖水库水体理化指标 (灰色阴影代表调水期)

Fig.1 Physical and chemical indicators of Donghu Reservoir water from April 2014 to December 2017

由图 3 可以看出,2014 年之中各月份的浮游藻类群落结构差别较小,但整体与其他年份的差别较大,2016 年各月份之间藻类群落结构的相似性较 2015 年的各月份之间要大,2015 和 2016 年之间的藻类群落结构相似度较高,2017 与 2016 年有一定的相似性但相似性不大。

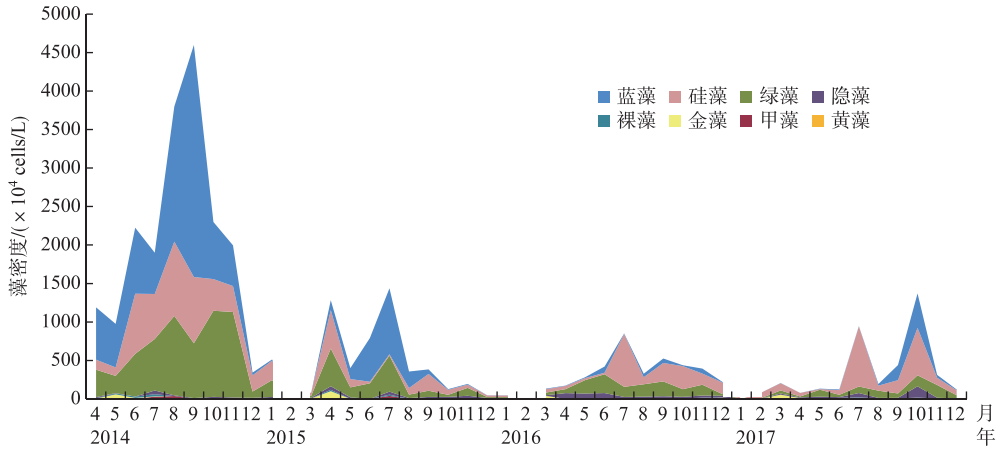


图 2 2014 年 4 月—2017 年 12 月东湖水库藻类密度变化

Fig.2 Changes of phytoplankton density in Donghu Reservoir from April 2014 to December 2017

表 1 2014—2017 年各季节东湖水库浮游藻类前 3 位优势种及其优势度

Tab.1 Relative abundance of top three seasons' dominant phytoplankton species in Donghu Reservoir from 2014 to 2017

| 时间 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|--------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| 2014 年 | 湖泊伪鱼腥藻 (0.536) | 湖泊伪鱼腥藻 (0.235) | 狭形纤维藻 (0.308) | 尖针杆藻 (0.472) |
| | 尖针杆藻 (0.105) | 尖针杆藻 (0.233) | 湖泊伪鱼腥藻 (0.231) | 小球藻 (0.119) |
| | 小球藻 (0.049) | 小球藻 (0.102) | 尖针杆藻 (0.121) | 小球衣藻 (0.086) |
| 2015 年 | 尖针杆藻 (0.194) | 铜绿微囊藻 (0.583) | 小球藻 (0.140) | 扭曲小环藻 (0.123) |
| | 小球藻 (0.123) | 小球藻 (0.060) | 梅尼小环藻 (0.110) | 分歧锥囊藻 (0.108) |
| | 短小曲壳藻 (0.104) | 四尾栅藻 (0.020) | 扭曲小环藻 (0.072) | 梅尼小环藻 (0.094) |
| 2016 年 | 小球藻 (0.241) | 尖针杆藻 (0.348) | 尖针杆藻 (0.444) | 尖针杆藻 (0.628) |
| | 尖尾蓝隐藻 (0.165) | 细链丝藻 (0.126) | 小球藻 (0.132) | 尖尾蓝隐藻 (0.043) |
| | 尖针杆藻 (0.064) | 小球藻 (0.111) | 尖尾蓝隐藻 (0.034) | 梅尼小环藻 (0.036) |
| 2017 年 | 细链丝藻 (0.109) | 钝脆杆藻 (0.292) | 钝脆杆藻 (0.201) | 钝脆杆藻 (0.196) |
| | 尖尾蓝隐藻 (0.091) | 尖针杆藻 (0.176) | 拉氏拟柱孢藻 (0.200) | 小球藻 (0.188) |
| | 尖针杆藻 (0.075) | 小球藻 (0.158) | 尖针杆藻 (0.155) | 尖针杆藻 (0.179) |

2.3 水库藻类群落结构与环境因子的关系

对水库藻类群落结构与环境因子关系的 RDA 分析如图 4 所示。2014—2017 年每年两轴对浮游藻类群落变化的解释量分别为 57.1%、51.2%、39.3% 和 49.4%，对物种和环境关系的累积解释量分别为 69.3%、66.3%、59.3% 和 64.3%。2014 年水库藻类群落结构的主要影响因子是 NO_2^- -N、 COD_{Mn} 和 NO_3^- -N (特征值 $\lambda_1 = 0.408$ 、 $\lambda_2 = 0.164$)，其中除镰形纤维藻 (*Ankistrodesmus falcatus*) 和两栖颤藻 (*Oscillatoria amphibian*) 外，大部分藻种与 COD_{Mn} 呈正相关，而与 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度呈负相关；2015 年的主要影响因子有 WD、TN 浓度和 COD_{Mn} (特征值 $\lambda_1 = 0.315$ 、 $\lambda_2 = 0.198$)，其中铜绿微囊藻和小环藻 (*Cyclotella* sp.) 等均与 WD 呈正相关，与 TN 浓度和 COD_{Mn} 呈负相关，而小球藻、尖针杆藻等则相反；2016 年的主要环境影响因子是 pH、DO 和 COD_{Mn} (特征值 $\lambda_1 = 0.258$ 、 $\lambda_2 = 0.135$)，除小环藻属、钝脆杆藻 (*Fragilaria capucina*) 和分歧锥囊藻，其他大部分藻种与 pH 呈正相关而与 DO 和 COD_{Mn} 呈负相关；2017 年的主要环境影响因子是 NO_3^- -N、TN 浓度和 WD (特征值 $\lambda_1 = 0.404$ 、 $\lambda_2 = 0.090$)，部分绿藻以及硅藻中的尖针杆藻、脆杆藻与主要环境影响因子呈负相关，而小环藻以及其他藻种与主要环境因子呈正相关。

综合对 2014—2017 年藻类群落结构与环境因子的 RDA 分析，两轴对 4 年中藻类群落结构变化的解释

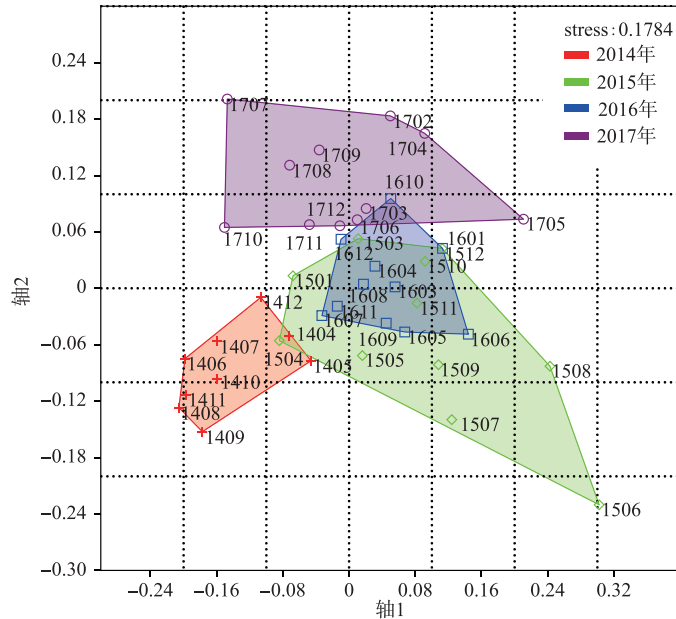


图3 2014年4月—2017年12月东湖水库浮游藻类非度量多维尺度分析图
(图中数据的前两位代表年份,后两位代表月份)

Fig.3 Analysis of NMS in phytoplankton in Donghu Reservoir from April 2014 to December of 2017

量为 27.9%,对藻类与环境关系的累积解释量为 69.2%. COD_{Mn} 、WD 和 TN 浓度是 4 年中藻类的主要影响因素(特征值 $\lambda_1 = 0.212$ 、 $\lambda_2 = 0.066$),其中大部分藻种与 TN 浓度呈正相关;绿藻门和蓝藻门藻种多与 WD 呈负相关,裸藻、隐藻、甲藻和金藻门的藻种受 WD 的影响较小;硅藻门和隐藻门的大部分藻种与 COD_{Mn} 呈负相关,而绿藻门的藻种多与其呈正相关. 因此该水库中浮游藻类的主要影响因子为 COD_{Mn} 、WD 和氮盐.

水库中主要优势种小球藻、尖针杆藻和湖泊伪鱼腥藻与环境因子的关系在不同年份有明显的不同,3 种藻与 COD_{Mn} 在 2014—2016 年呈正相关,而在 2017 年呈负相关;与氮盐浓度在 2016 年呈负相关,而在 2015 和 2017 年呈正相关. 但综合来看,3 种藻受氮盐的影响不大,与 COD_{Mn} 呈正相关,而与 WD 呈负相关.

3 讨论

3.1 藻类群落结构与变化趋势

东湖水库中浮游藻类总密度在 2014 年较高,而 2014 年之后急剧下降. 2014 年水体中藻类的生长来源充足,且水库调水时间短、调水量小,水力停留时间长,藻类大量生长繁殖. 2014 年之后调水期变长、调水量增加,氮磷比年均水平不断下降,大部分月份的浮游藻类总密度均稳定在 1000.0×10^4 cells/L 以下. 虽然每年的藻类总密度有所差异,但整体均表现出夏、秋季高,冬、春季低的变化趋势,这主要是由于夏、秋季比冬、春季水温高,有利于藻类的生长和繁殖^[21]. 该水库藻类群落逐年由蓝藻—绿藻—硅藻向硅藻—绿藻—蓝藻转变. 自 2015 年来,硅藻门的种数及密度占比相对于 2014 年均有明显增加,水库有向硅藻型水库转变的趋势;绿藻门的种数及密度占比比较为稳定,主要是由于绿藻对水温的适应范围广^[22],对水环境的适应性较高;相较于 2014 年,蓝藻门的种数和密度占比在 2015 和 2016 年均有所下降,而 2017 年均略有回升,这也对应着 2015 和 2016 年的藻类群落结构相似性较高而 2017 年产生了一定的差异. 密云水库在 1998、2000—2002 年的藻类群落结构季节性明显,且具有稳定的季节性演替^[23-25];再如青草沙水库在 2011—2012、2014—2015 年藻类群落结构的季节演替也较为稳定^[26-28]. 但我们所研究的水库藻类群落结构季节性演替则明显不稳定,主要是由于新建水库水体环境变动较大,以及水库中的藻类对水库水体环境的变化尚未适应.

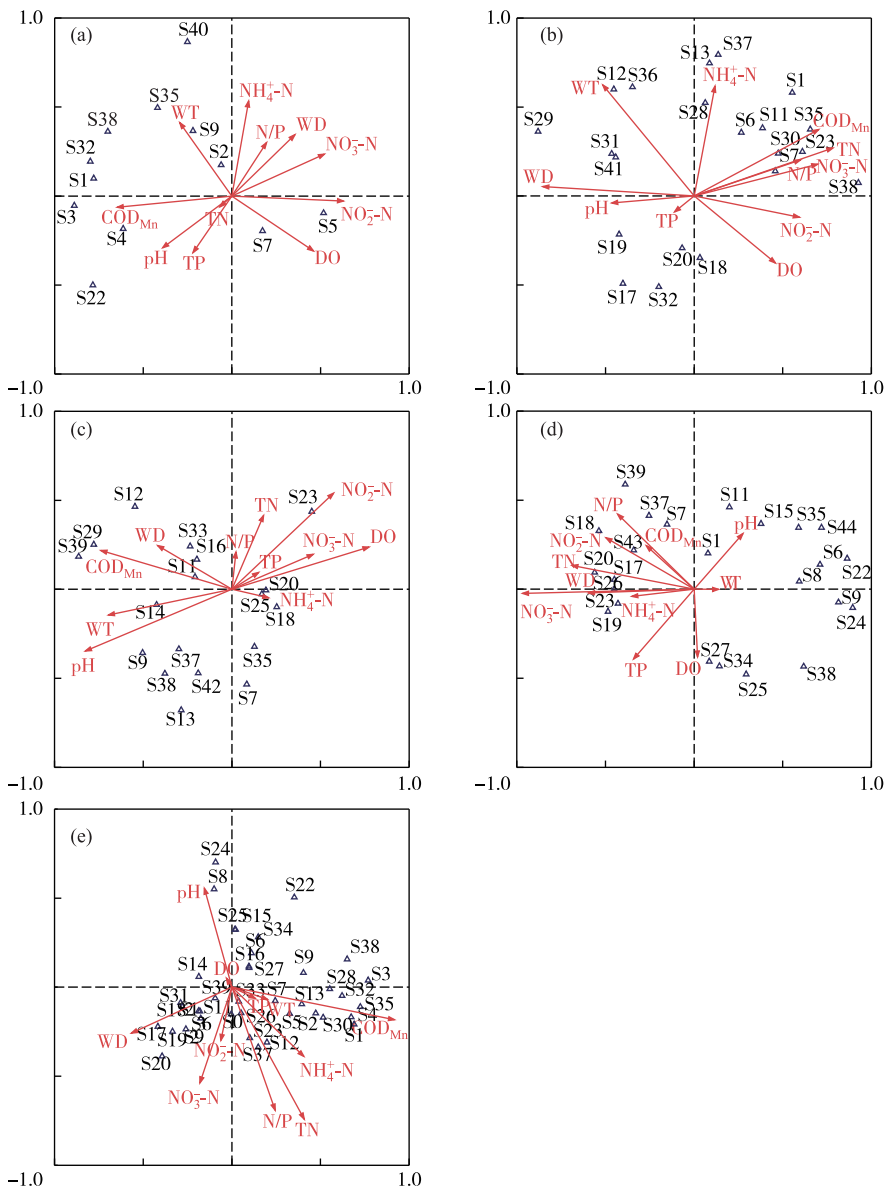


图4 2014—2017 东湖水库浮游藻类群落与环境因子冗余分析双序图

(a:2014年;b:2015年;c:2016年;d:2017年;e:2014—2017年)

- (S1:短小曲壳藻;S2:针形纤维藻;S3:狭形纤维藻;S4:卷曲纤维藻;S5:镰形纤维藻;S6:椭圆小球藻;
- S7:小球衣藻;S8:蛋白核小球藻;S9:小球藻;S10:四刺顶棘藻;S11:尖尾蓝隐藻;S12:微小色球藻;
- S13:扁鼓藻;S14:啮蚀隐藻;S15:卵形隐藻;S16:吻状隐藻;S17:广缘小环藻;S18:扭曲小环藻;
- S19:科曼小环藻;S20:梅尼小环藻;S21:具星小环藻;S22:拉氏拟柱孢藻;S23:分歧锥囊藻;
- S24:钝脆杆藻;S25:中型脆杆藻;S26:北方金杯藻;S27:纵纹鳞孔藻;S28:点状平裂藻;
- S29:铜绿微囊藻;S30:短小舟形藻;S31:椭圆卵囊藻;S32:阿氏颤藻;S33:粘四集藻;
- S34:带多甲藻;S35:湖泊伪鱼腥藻;S36:双对栅藻;S37:四尾栅藻;S38:尖针杆藻;
- S39:细链丝藻;S40:两栖颤藻;S41:实球藻;S42:弱细颤藻;S43:惠氏微囊藻;S44:细鞘丝藻)

Fig.4 Ordination diagram of RDA for phytoplankton community associated with environmental factors in Donghu Reservoir from 2014 to 2017

随着水库的使用,蓝藻的优势也发生了明显的变化,这是由于调水引起的水体变化对蓝藻的生长繁殖产生了一定的影响^[29].研究表明蓝藻中的微囊藻因其可以上浮的特性而对水库水深的变化具有一定的适应性^[30],该水库2015年春、夏季调水期间水位波动较大,铜绿微囊藻表现出了较大优势,其他年份调水期多不在夏季,因此水位的波动并没有使微囊藻占优势.虽然蓝藻优势度逐年下降,但拉氏拟柱孢藻逐渐表现出季节性优势,如2017年秋季拉氏拟柱孢藻密度占总藻密度的比例较大,主要与新建水库藻类群落结构不稳定以及近年来拉氏拟柱孢藻逐渐由热带向亚热带和温带的迁移有关.拉氏拟柱孢藻具有较强的可溶性藻毒素,对于供水安全具有一定的威胁^[31-33],因此,对于水库中拉氏拟柱孢藻的增殖应引起水库管理及供水部门的重视,制定切实可行的应急预案,采取有效措施进行防控.

近年来,湖泊水库中关于硅藻的研究相对较多.水库一般处于中营养—中富营养水平,而硅藻对这种营养环境适应性较强^[34].对不同水库中硅藻的研究发现,硅藻群落的演替规律略有差异:在对太湖流域几座水库的研究^[35]发现,水库硅藻主要在春末夏初形成优势,这和东南地区丘陵山地型水库苏南水库的硅藻变化^[36]较为相似;而在张云对湖北金沙河水库的研究中,硅藻虽在春、夏和冬季占一定优势,但主要还是在春季优势明显^[37].夏季硅藻一般较难形成优势,主要是由于蓝藻和绿藻相对于硅藻更易适应夏季的水体环境.而在对本研究中硅藻在2016和2017年的夏季均占绝对优势,可能和新建水库的水体环境与多年水库不同有关.调蓄水造成的水动力变化也会对藻类群落结构产生影响^[38-39],研究表明硅藻对一定的水动力条件适应性较强^[40],在新水库运作初期,硅藻可能先适应了调水时带来的水体扰动而形成优势.

东湖水库由东平湖调水至此,往年对东平湖藻类群落结构的研究发现,其主要优势种为湖泊伪鱼腥藻、小球藻、尖针杆藻和尖尾蓝隐藻^[41].在东湖水库中,湖泊伪鱼腥藻和小球藻保持了一定的优势,尖针杆藻的优势度较大,而尖尾蓝隐藻仅在2016年有一定优势.一般情况下水库容积较湖泊小,再加水库水体变动频繁等原因导致的湖泊和水库水体环境有所不同,藻类生存的环境不同;另外,在调水过程中不同藻种对水动力的适应性不同,因此东湖水库和东平湖的优势藻种有所差别.

3.2 藻类群落结构和环境因子的关系

研究表明,环境因子是影响藻类群落结构的重要因子^[42].很多研究表明,水温、光照、营养盐和 COD_{Mn} 是水体中浮游藻类的主要影响因子^[43-45].在本研究中,营养盐、 COD_{Mn} 和水深是影响藻类群落结构的主要环境因子,且营养盐以氮盐为主,此外,温度和pH等也对藻类群落结构有一定的影响.

水库的水深变化往往是调蓄水造成的,2014年该水库调水期短,且调水量小;随着调水期不断增长以及水库不断向城市输水供水,水体更替更加频繁,水库水深在2015年之后比2014年有明显的增加.水深变化和体扰动会对水体的水温分层、营养盐及有机物的浓度和分布、水体的透明度等产生一定影响^[46],因此2015—2017年水深对藻类群落结构的影响有所增加.

营养盐是藻类生长繁殖的必需物质,因此营养盐对藻类密度以及群落结构具有重要影响,其中以氮盐和磷盐为主.研究表明当氮磷比大于22.6时,磷元素可成为藻类增长的限制因素;氮磷比小于9.0时,氮限制会很明显^[47].而水体中磷浓度超过0.02 mg/L、氮浓度超过0.2 mg/L时,超过水体富营养化的临界浓度,氮、磷可以满足藻类的生长需要^[48].该水库中氮磷比有逐年降低的趋势,研究期间氮磷比由22.4降至13.3,但总磷浓度一直维持在0.05 mg/L左右,因此,磷对藻类生长繁殖的限制较小.综合来看,该水库影响藻类生长的营养盐为氮盐,且以 NO_3^- -N和 NO_2^- -N为主.氮盐和磷盐在2014和2016年略高于2015和2017年,有研究表明在较高的氮、磷浓度下会产生种间竞争^[49],较高浓度的营养盐对藻类生长会产生一定的抑制作用,因此优势藻种在不同年份受氮盐的影响不同.

大量研究表明, COD_{Mn} 与藻类群落结构的相关性较大,尤其在藻类大量生长时水体中的 COD_{Mn} 往往会升高^[50].在对该水库的研究中也是如此, COD_{Mn} 与藻细胞密度的变化趋势一致. COD_{Mn} 对蓝藻和绿藻的生长有一定的影响,而对硅藻的生长影响较大^[51-53].在对该水库的研究中,较多藻种与 COD_{Mn} 密切相关,其中硅藻与其相关性较大.本研究发现,2014—2016年间东湖水库中 COD_{Mn} 与大多数藻种相关性较大且多呈正相关,而在2017年, COD_{Mn} 对藻类的影响有所下降.相比2016年,钝脆杆藻在2017年取代尖针杆藻成为夏季和冬季的第1优势种,不同藻种受环境因子的影响不同, COD_{Mn} 与藻类生长的相关性有所变化.主要优势种在2017年与 COD_{Mn} 的相关性由前3年的正相关变成负相关,这是由于该水库中 COD_{Mn} 不断降低,2017年

COD_{Mn}达最低水平,说明水体中有机物浓度下降^[54],因此藻类群落结构与COD_{Mn}的相关性也会随之变化。

4 结论

1) 2014年4月—2017年12月在东湖水库共发现8门89属187种浮游藻类,其中绿藻种类最多,硅藻、绿藻和蓝藻密度所占比例较大,小球藻和尖针杆藻为该水库中出现频率较高的优势种。

2) 藻类群落总体上是由蓝藻—绿藻—硅藻向硅藻—绿藻—蓝藻变化,但其季节演替较不稳定。相比建成较久的水库夏、秋季较为稳定的蓝藻优势,由于不同藻种对新建水库水动力、理化环境波动的适应能力不同,尤其是蓝藻受水深的影响较大,该水库夏、秋季的蓝藻优势并不稳定,不同年份蓝藻优势期的主要蓝藻优势种也不同。2014和2015年蓝藻以夏季优势为主,2016年硅藻取代蓝藻成为夏、秋季节的主要优势种,而2017年蓝藻又形成了新的秋季优势,这也预示着蓝藻适应该水体环境并有恢复夏、秋季优势的趋势,最终该水库是否形成以蓝藻为夏、秋季优势的稳定季节演替还需要进一步研究。

3) 藻类生长与群落结构主要受氮盐、水深和COD_{Mn}的影响,其中以氮盐中的NO₃-N和NO₂-N为主。随着水库中氮磷比的下降,水库中浮游藻类受氮盐的影响有所增加。

致谢:感谢山东南水北调局以及东湖水库工作人员对样品采集过程的帮助与支持。

5 参考文献

- [1] Hu FF, Wang ML, Zhou WB. Phytoplankton community and evaluation of water quality in Yuanhe River. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(1): 27-33. [胡方凡, 王毛兰, 周文斌. 袁河浮游藻类群落结构与水质评价. 水生态学杂志, 2011, **32**(1): 27-33.]
- [2] Cabrita MT. Phytoplankton community indicators of changes associated with dredging in the Tagus estuary (Portugal). *Environmental Pollution*, 2014, **191**: 17-24.
- [3] Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, Sommer U *et al.* Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCol-a new phytoplankton community Index. *Ecological Informatics*, 2016, **31**(1): 22-29.
- [4] Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2007, **71**(3): 580-592.
- [5] Han HH, Fan YW. Phytoplankton community structure in autumn of Anxing Wetland, Heilongjiang Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(4): 577-585. DOI: 10.18307/2012.0411. [韩欢欢, 范亚文. 黑龙江省安兴湿地秋季浮游植物群落结构. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 577-585.]
- [6] Wu SR, Xu MJ, Chen YQ *et al.* Evaluation of eutrophication for the Hanshiqiao wetland based on water quality and plankton data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 411-417. [武士蓉, 徐梦佳, 陈禹桥等. 基于水质与浮游生物调查的汉石桥湿地富营养化评价. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 411-417.]
- [7] Hou W, Sun SH, Jia RB. Eutrophication and water characteristics of mountain river in northern China. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(2): 58-63. [侯伟, 孙韶华, 贾瑞宝. 中国北方山区水库与引黄水库富营养化特征. 中国环境监测, 2016, **32**(2): 58-63.]
- [8] Yuan C, Tao SY, Zhang YY *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in surfacewater of Ankang reservoir, North west China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 2167-2176. [袁聪, 陶诗雨, 张莹莹等. 安康水库表层浮游藻类群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 2167-2176.]
- [9] Liu GX, Wu ML, Yin J *et al.* Influence of pumping water from Xijiang River on eutrophication of water supply reservoirs and its management strategy in Zhuhai City. *Ecological Science*, 2013, **32**(4): 494-499. [刘格辛, 吴孟李, 尹娟等. 西江调水对珠海市供水水库富营养化的影响及其管理对策. 生态科学, 2013, **32**(4): 494-499.]
- [10] Wu XH, Wu G, Pan KM *et al.* Predicting analysis on impact of incoming water from South-to-North watertransfer project on water quality and aquatic organisms in Miyun reservoir. *Beijing Water*, 2015, (6): 4-6. [吴晓辉, 吴钢, 潘轲旻等. 南水北调来水对密云水库水质和水生生物影响的预测分析. 北京水务, 2015, (6): 4-6.]
- [11] Zuo C. The simulation and study one eutrophication of Fenhe reservoir [Dissertation]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. [左婵. 汾河水库富营养化模拟与研究[学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2014.]

- [12] Wang YH, Chen L, Niu Y *et al.* Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1057-1065. DOI: 10.18307/2016.0516. [王英华, 陈雷, 牛远等. 丹江湖口水库浮游植物时空变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1057-1065.]
- [13] Gou T, Ma QL, Wang ZX *et al.* Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi reservoir. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4141-4150. [苟婷, 马千里, 王振兴等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征. 环境科学, 2017, **38**(10): 4141-4150.]
- [14] Ma PM, Shi LD, Zhang JF *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569. [马沛明, 施练东, 张俊芳等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析. 环境科学, 2016, **37**(12): 4560-4569.]
- [15] Cui Y, Zhu GW, Li HY. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe reservoir within Tianmuhu reservoir and its relationship with phytoplankton community. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(3): 10-18. [崔扬, 朱广伟, 李慧赟等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 10-18.]
- [16] 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.]
- [17] Editorial board of "Water and wastewater monitoring and analysis method", Ministry of Environmental Protection of the People's Republic 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.]
- [18] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China; Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [19] Meng SL, Chen JZ, Fan LM *et al.* Eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007. *J Lake Sci*, 2009, **21**(6): 845-854. DOI: 10.18307/2009.0615. [孟顺龙, 陈家长, 范立民等. 2007年太湖五里湖浮游植物生态学特征. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 845-854.]
- [20] Johnson RK, Angeler DG, Moe SJ *et al.* Cross-taxon responses to elevated nutrients in European streams and lakes. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(1): 51-60.
- [21] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ *et al.* Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 385-393. DOI: 10.18307/2018.0210. [赵巧华, 孙国栋, 王健健等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 385-393.]
- [22] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(120): 45-50. [方丽娟, 刘德富, 杨正健等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. 环境科学与技术, 2014, **37**(120): 45-50.]
- [23] Du GS, Wang JT, Wu DW *et al.* Structure and density of the phytoplankton community of Miyun Reservoir. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(4): 501-504. [杜桂森, 王建厅, 武殿伟等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度. 植物生态学报, 2001, **25**(4): 501-504.]
- [24] Liu X, Du GS, Zhang H *et al.* Phytoplankton and nutrient degree of water body in Miyun Reservoir. *Research of Environmental Science*, 2003, **16**(1): 27-29. [刘霞, 杜桂森, 张会等. 密云水库的浮游植物及水体营养程度. 环境科学研究, 2003, **16**(1): 27-29.]
- [25] Liu J, Du GS, Liu XR *et al.* Study on plankton community in Miyun reservoir. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, (8): 1485-1488. [刘静, 杜桂森, 刘晓端等. 密云水库的浮游生物群落. 西北植物学报, 2004, (8): 1485-1488.]
- [26] Liu XP, Zhang W, Wang LQ *et al.* Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha reservoir. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, **24**(4): 532-543. [刘歆璞, 张玮, 王丽卿等. 青草沙水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 上海海洋大学学报, 2015, **24**(4): 532-543.]
- [27] Li JH, Wang SX, Zhu YP *et al.* Survey of changes for phytoplankton algae community inside the Downstream Gate in Qingcaosha Reservoir. *Water Purification Technology*, 2014, **33**(Z1): 30-34. [李嘉海, 王绍祥, 朱宜平等. 青草沙水库下游排水闸口内浮游藻类群落变化调查. 净水技术, 2014, **33**(Z1): 30-34.]

- [28] Yan WY, Wang SX, Gu J *et al.* Composition of planktonic algae community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha reservoir. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, **26**(1): 75-84. [严文逸, 王绍祥, 顾静等. 青草沙水库浮游藻类群落组成及其与环境因子的关系. 上海海洋大学学报, 2017, **26**(1): 75-84.]
- [29] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452.
- [30] Naselli-Flores L, Barone R. Water-level fluctuations in Mediterranean Reservoirs: Setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality. *Hydrobiologia*, 2005, **548**(1): 85-99.
- [31] Li HM, Pei HY, Sun JM *et al.* Progress and prospect in the study of *Cylindrospermopsis raciborskii* and its toxins. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 775-795. DOI:10.18307/2017.0401. [李红敏, 裴海燕, 孙炯明等. 拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)及其毒素的研究进展与展望. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 775-795.]
- [32] Su XM, Xue QJ, Cao Q *et al.* Advances and prospects in eco-toxicity of cylindrospermopsin. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(1): 64-72. [苏小妹, 薛庆举, 操庆等. 拟柱孢藻毒素生态毒性的研究进展和展望. 生态毒理学报, 2017, **12**(1): 64-72.]
- [33] Sinha R, Pearson LA, Davis TW *et al.* Comparative genomics of *Cylindrospermopsis raciborskii* strains with differential toxicities. *Bmc Genomics*, 2014, **15**(1): 83-83.
- [34] Saros JE. The ecology of the planktonic diatom *Cyclotella* and its implications for global environmental change studies. *Biological Reviews*, 2015, **90**(2): 522-541.
- [35] 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.]
- [36] Ren J, Zhou T, Zhu GW *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1742-1753. [任杰, 周涛, 朱广伟等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素. 环境科学, 2016, **37**(5): 1742-1753.]
- [37] Zhang Y, Ma XF, Guo FF *et al.* Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 902-910. DOI: 10.18307/2015.0517. [张云, 马徐发, 郭飞飞等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 902-910.]
- [38] Wang JY, Wang ZC, Li C *et al.* The spatio-temporal dynamics of phytoplankton community structure in the head region of the three gorges reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 877-884. [王静雅, 汪志聪, 李翀等. 三峡水库坝前水域浮游植物群落时空动态研究. 水生生物学报, 2015, **39**(5): 877-884.]
- [39] Xu H, Long LH, Ji DB *et al.* Causes of succession of planktonic algae in Shennong bay of Three Gorges Reservoir in spring in 2014. *Acta Microbiologica Sinica*, 2017, **57**(3): 375-387. [徐慧, 龙良红, 纪道斌等. 三峡水库神农溪 2014 年春季浮游藻类演替成因分析. 微生物学报, 2017, **57**(3): 375-387.]
- [40] An Q. The influence of hydrodynamic conditions on the dominant edge growth of the secondary tributary at Three Gorges Reservoir. *Journal of Water Resources Research*, 2015, **4**(6): 530-536.
- [41] Ren Y. Phytoplankton community characteristics and driving environmental factors of regulating lakes in the east route of South-to-North Water Diversion Project [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2016. [任颖. 南水北调东线调蓄湖泊浮游藻类群落特征与环境驱动因子[学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.]
- [42] Lu J, Yang Z, Zhang Y. Algae functional group characteristics in reservoirs and lakes with different trophic levels in north-western semi-humid and semi-arid regions in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **64**: 166-173.
- [43] Li LQ, Huang DZ, Xiong J *et al.* Nutrient limiting phytoplankton growth in Dongting Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, (2): 283-288. [李利强, 黄代中, 熊剑等. 洞庭湖浮游植物增长的限制性营养元素研究. 生态环境学报, 2014, (2): 283-288.]
- [44] Zhou BB, Wang GX, Xu Y *et al.* Spatial distribution of chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Qinhuai River, Nanjing. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 267-272. DOI: 10.18307/2012.0215. [周贝贝, 王国祥, 徐瑶等. 南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 267-272.]
- [45] Lin ZW. The spatial distribution of phosphorus and diatoms in sediments of three reservoirs in southern China [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2006. [林彰文. 热带典型水库沉积物磷与硅藻的空间分布[学位论文]. 广州:

- 暨南大学, 2006.]
- [46] Liang PY, Wang X, Ma FB. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication; A review. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 455-462. [梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 455-462.]
- [47] Dokulil M, Chen W, Cai Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China; the Tai Hu example. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2000, **3**(1): 81-94.
- [48] Lei P, Zhang H, Shan BQ *et al.* Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3038-3045. [雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究. 环境科学, 2012, **33**(9): 3038-3045.]
- [49] Meng SL, Wang J, Qiu LP *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus mass concentrations on the growth and competition of *Chlorella vulgaris* and *Anabaena* sp. strain PCC. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, (4): 658-664. [孟顺龙, 王菁, 裘丽萍等. 氮磷质量浓度对普通小球藻和鱼腥藻生长竞争的影响. 生态环境学报, 2015, (4): 658-664.]
- [50] Luo GY, Bu FP, Xu XY *et al.* Dynamics of TN and TP in the backwater region of the Linjiang River in the Three Gorge Reservoir. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, **31**(5): 106-111. [罗固源, 卜发平, 许晓毅等. 三峡库区临江河回水区总氮和总磷的动态特征. 土木建筑与环境工程, 2009, **31**(5): 106-111.]
- [51] Jiang YJ, He W, Liu WX *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2014, **40**(5): 58-67.
- [52] Luo BL, Yan PC, Tian XH *et al.* Characteristics of algous facies of planktonic algae in Lake Honghu and its response to habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(3): 680-689. [罗碧林, 严平川, 田小海等. 洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应. 生态学报, 2012, **32**(3): 680-689.]
- [53] Yang Y, Wang Y, Huang WH *et al.* Statistical regression analysis of water-bloom algae and related environment factors of a reservoir in Shenzhen City. *Journal of Water Resources Research*, 2016, **5**(1): 33-39. [杨滢, 王艳, 黄文辉等. 深圳某水库水华藻类及相关环境因子逐步回归统计分析. 水资源研究, 2016, **5**(1): 33-39.]
- [54] Wang HY. Correlation analysis on COD_{Mn} and COD_{Cr} of surface water. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(9): 118-121. [王鹤扬. 地表水高锰酸盐指数与化学需氧量相关关系研究. 环境科学与管理, 2011, **36**(9): 118-121.]