

青西郊野公园建设过程中大莲湖浮游植物 年际变化及与环境因子的关系*

谭娟¹ 王敏¹ 王卿¹ 龚静香² 徐志豪³ 吴建强^{1#}

(1.上海市环境科学研究院,上海 200233;2.上海市城市建设工程学校给排水教研室,上海 200232;

3.东华大学环境科学与工程学院,上海 201620)

摘要 为了解青西郊野公园建设过程中大莲湖水生态环境变化动态,分别于公园建设前(2014年)、建设过程中(2016年)及开园运营后(2017年)对大莲湖水质及浮游植物群落进行了调查监测。3个年度水体综合营养状态指数平均值分别为49.84、54.66、53.16,表明水体呈现轻度富营养化趋势;3个年度分别采集浮游植物106、98、78种,均以绿藻门种数最多;3个年度浮游植物丰度平均值分别为 6.36×10^6 、 1.05×10^7 、 1.89×10^7 个/L,呈逐年递增趋势;基于浮游植物多样性指数评价,3个年度大莲湖水水质基本处于中污染水平。冗余分析表明叶绿素a(Chl-a)、透明度和TN是影响大莲湖浮游植物种类和丰度的重要环境因子,其中Chl-a和透明度对浮游植物种类有显著影响,TN和透明度对浮游植物丰度有显著影响。

关键词 郊野公园 大莲湖 浮游植物 水质

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.07.019

Changes of phytoplankton community in Dalian Lake during the construction of Qingxi Country Park and its relationship with environmental factors TAN Juan¹, WANG Min¹, WANG Qing¹, GONG Jingxiang², XU Zhihao³, WU Jianqiang¹. (1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233; 2. Water Supply and Drainage Department, Shanghai Urban Construction Engineering School, Shanghai 200232; 3. School of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract: In order to understand the changes in the water ecological environment of Dalian Lake during the construction of Qingxi Country Park, the water quality and phytoplankton community in Dalian Lake were investigated in 2014 (before construction), 2016 (during construction) and 2017 (after operation). The average comprehensive eutrophication state index was 49.84, 54.66 and 53.16, respectively, indicating a mild eutrophication trend. In total, 106, 98 and 78 phytoplankton species were detected in the three years, in which Chlorophyta were the most. The average abundances of phytoplankton were 6.36×10^6 , 1.05×10^7 , 1.89×10^7 ind./L, respectively, showing an increasing trend. The water quality of Dalian Lake, based on the phytoplankton diversity index, was evaluated as the moderate pollution level. Redundancy analysis indicated that Chl-a, transparency and TN were important environmental factors affecting the species and abundance of phytoplankton. Thereinto, Chl-a and transparency had significant effects on phytoplankton species, while TN and transparency had significant effects on phytoplankton abundance.

Keywords: country park; Dalian Lake; phytoplankton; water quality

青西郊野公园是2012年5月上海市政府批复的21个郊野公园之一,公园位于青浦区西南部,淀山湖南侧,毗邻金泽镇区和青浦新城,于2015年启动一期工程建设工作,围绕大莲湖建成生态保育功能区、水乡农田示范区和渔村休闲体验区3大功能区。目前国内外对郊野公园的研究主要集中在空间规划、景观设计、运行管理机制等方面^[1-5],而对郊野公园建设过程中生态环境的动态监测与评估研究较少^[6]。

浮游植物是水环境生物监测的重要指标,作为水体主要的初级生产者,其种类组成、丰度特征及多样性变化都对水质有着一定的指示作用^[7-11],利用浮游植物评价水体水质及营养状况的研究已有大量报道^[12-15]。本研究聚焦郊野公园建设过程中产生的生态环境问题,重点关注大莲湖水水质和浮游植物群落动态变化及其影响因素,旨在为郊野公园生态环境保护工作提供科技支撑。

第一作者:谭娟,女,1987年生,硕士,工程师,主要从事生态环境调查监测评估研究。*通讯作者。

*国家重点研发计划项目(No.2016YFC0502700);国家自然科学基金资助项目(No.17ZDA058);上海市科技支撑计划项目(No.18DZ1204900)。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青西郊野公园位于青浦区西南部淀山湖南侧,区域以“湖、滩、荡、堤、圩、岛”等水环境为主要特色。青西郊野公园以大莲湖为核心,其主要补给来源为降水及地表径流。青西郊野公园东北接拦路港,西北接北横港,是淀山水体经由拦路港注入黄浦江的枢纽通道。同时,该区域是上海重要的水源保护区,其水质、生态环境状况对于水源地保护及饮用水安全具有重要影响。

1.2 样品采集与测定

根据大莲湖的地形状况和水流特点,在研究区域设置 5 个采样点(见图 1),其中 S1 位于东北部北横港, S2、S3、S4 位于湖区, S5 位于西北部拦路港。分别于青西郊野公园开始建设前(2014 年)、建设过程中(2016 年)及开园运营后(2017 年)开展生态监测,其中大莲湖水质选择丰、平、枯水期开展监测,浮游植物选择丰、平水期开展监测。使用塞氏盘测定水体透明度(SD),采用 YSI 便携式多参数水质测量仪测定溶解氧(DO),同时用 1 L 的柱状采水器采集表层(水面下 0.5 m)水样。浮游植物水样使用鲁哥试剂现场固定,带回实验室进行分析。水质水样用聚乙烯瓶低温保存后送往实验室分析各项指标,包括悬浮物(SS)、高锰酸盐指数、BOD₅、TN、TP、氨氮和叶绿素 a(Chl-a)。水样预处理及分析测定方法均采用相应国家标准方法进行^[16]。

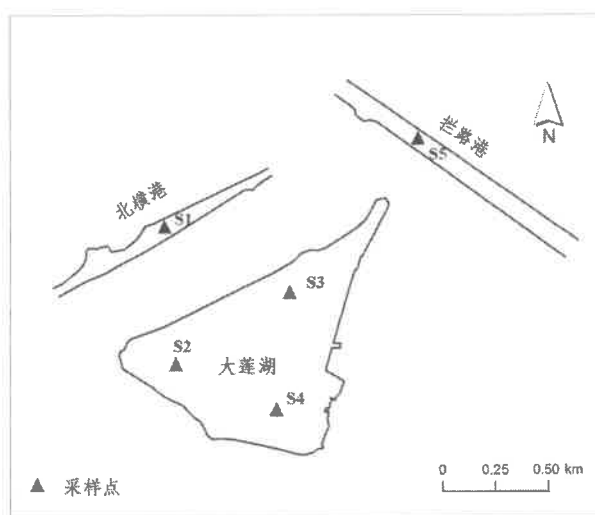


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig.1 The study area and distribution of sampling points

1.3 评价方法

采用综合营养状态指数对大莲湖的富营养化状

态进行评价^[17-18],选取Chl-a、TP、TN、SD、高锰酸盐指数 5 项指标反映水体营养程度。综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI_j \quad (1)$$

式中:TLI 为综合营养状态指数; m 为评价指标个数; W_j 为第 j 个指标的营养状态指数的权重; TLI_j 为第 j 个指标的营养状态指数。详细计算公式见参考文献[19]。大莲湖营养状态分级标准为: $TLI \leq 30$ 时为贫营养; $30 < TLI \leq 50$ 时为中营养; $TLI > 50$ 时为富营养,其中 $50 < TLI \leq 60$ 为轻度富营养, $60 < TLI \leq 70$ 为中度富营养, $TLI > 70$ 为重度富营养。

采用物种优势度指数(Y)对大莲湖浮游植物优势度进行评价,计算公式参考文献[20];采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 物种丰富度指数(D)对大莲湖浮游植物群落多样性进行评价,详细计算公式参考文献[21]至文献[23]。评价标准为: $H' > 3$ 为无污染或清洁, $3 \geq H' > 1$ 为中污染, $1 \geq H' > 0$ 为重污染; $0.8 \geq J > 0.5$ 为无污染或清洁, $0.5 \geq J > 0.3$ 为中污染, $0.3 \geq J > 0$ 为重污染; $D > 3$ 为无污染或清洁, $3 \geq D > 1$ 为中污染, $1 \geq D > 0$ 为重污染。

2 结果与分析

2.1 大莲湖水体水质特征和变化规律

从大莲湖水体 3 个年份的水质监测结果(见表 1)可知,2014、2016、2017 年大莲湖 DO 均值分别为 6.91、4.80、5.22 mg/L,且均表现为枯水期 > 平水期 > 丰水期;SD 均值分别为 0.82、0.48、0.38 m,呈逐年递减趋势,且均以枯水期透明度最高;BOD₅ 均值分别为 2.79、2.81、2.06 mg/L,平水期、枯水期 BOD₅ 高于丰水期;高锰酸盐指数均值分别为 4.34、4.08、3.65 mg/L,呈现出逐年递减趋势;SS 均值分别为 9.5、14.3、14.8 mg/L,2014 年本底浓度显著低于 2016 年和 2017 年($p < 0.05$);TP 均值分别为 0.06、0.12、0.11 mg/L,呈现先增后降趋势;TN 均值分别为 1.35、1.85、2.22 mg/L,呈现逐年递增趋势;氨氮均值分别为 0.13、0.23、0.33 mg/L,与 TN 变化规律一致;Chl-a 均值分别为 9.52、9.11、5.05 $\mu\text{g/L}$,呈逐年递减趋势;TLI 均值分别为 49.84、54.66、53.16,说明大莲湖水质处于中营养和轻度富营养水平,水质呈轻度富营养化趋势。

表 1 大莲湖不同年份不同水期的水质特征

Table 1 Characteristics of water quality in different periods of Dalian Lake in different years

项目	2014 年			2016 年			2017 年		
	丰水期	平水期	枯水期	丰水期	平水期	枯水期	丰水期	平水期	枯水期
DO/(mg · L ⁻¹)	5.81	6.75	8.18	4.03	4.95	5.43	4.72	5.17	5.76
SD/m	0.81	0.80	0.86	0.43	0.48	0.53	0.37	0.35	0.43
BOD ₅ /(mg · L ⁻¹)	2.60	2.94	2.84	1.96	3.26	3.20	1.94	2.00	2.24
高锰酸盐指数/(mg · L ⁻¹)	5.76	3.70	3.57	3.96	3.98	4.30	3.88	3.86	3.20
SS/(mg · L ⁻¹)	8.5	11.6	8.4	15.2	15.0	12.6	13.2	16.0	15.2
TP/(mg · L ⁻¹)	0.06	0.08	0.05	0.12	0.14	0.10	0.10	0.13	0.09
TN/(mg · L ⁻¹)	1.10	1.14	1.80	1.47	1.54	2.54	1.35	1.76	3.55
氨氮/(mg · L ⁻¹)	0.09	0.08	0.22	0.23	0.20	0.25	0.10	0.19	0.71
Chl-a/(μg · L ⁻¹)	9.98	11.70	6.88	9.64	10.21	7.48	5.92	4.89	4.33
TLI	49.99	50.62	48.90	54.70	54.86	54.42	52.61	53.89	52.99

2.2 大莲湖水体浮游植物变化特征

2.2.1 浮游植物种类组成及优势种

调查结果表明,2014 年共采集到浮游植物 8 门 55 属 106 种,其中,绿藻门(Chlorophyta)42 种、硅藻门(Bacillariophyta)28 种、蓝藻门(Cyanophyta)16 种、裸藻门(Euglenophyta)12 种、金藻门(Chrysophyta)3 种、隐藻门(Cryptophyta)3 种、甲藻门(Pyrrophyta)1 种和黄藻门(Xanthophyta)1 种,全年第 1、2、3 优势种分别为绿藻门的斯诺衣藻(*Chamydomonas snowiae*)、硅藻门的模糊直链藻(*Melosira ambigua*)以及隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*),Y 值分别为 0.18、0.17、0.09。2016 年共采集浮游植物 8 门 52 属 98 种,其中绿藻门 38 种、硅藻门 27 种、蓝藻门 15 种、裸藻门 11 种、金藻门 2 种、隐藻门 3 种、甲藻门 1 种和黄藻门 1 种,全年第 1、2、3 优势种分别为绿藻门的空球藻(*Eudorina elegans*)、斯诺衣藻和球衣藻(*Chamydomonas globosa*),Y 值分别为 0.17、0.15、0.12。2017 年共采集到浮游植物 7 门 47 属 78 种,其中,绿藻门 32 种、硅藻门 19 种、蓝藻门 10 种、裸藻门 10 种、隐藻门 4 种、甲藻门 2 种和金藻门 1 种,全年第 1、2、3 优势种分别为蓝藻门的点形平裂藻(*Oscillatoria punctata*)、硅藻门的模糊直链藻以及绿藻门的小球藻(*Chlorella vulgaris*),Y 值分别为 0.15、0.14、0.12。

2.2.2 浮游植物丰度变化特征

调查结果表明,2014、2016 和 2017 年浮游植物丰度平均值分别为 6.36×10^6 、 1.05×10^7 、 1.89×10^7 个/L,呈逐年递增趋势。2014 年,浮游植物丰度占比排序为绿藻门>硅藻门>蓝藻门>隐藻门>裸藻门>甲藻门>金藻门>黄藻门;2016 年,浮游植物丰度占比排序为绿藻门>蓝藻门>隐藻门>硅藻

门>裸藻门>甲藻门>黄藻门>金藻门;2017 年,浮游植物丰度占比排序为绿藻门>隐藻门>硅藻门>蓝藻门>裸藻门>甲藻门>金藻门。从年际变化来看,绿藻门丰度占比呈先增后降趋势,硅藻门和隐藻门呈先降后增趋势,蓝藻门占比呈逐年递增趋势。浮游植物的丰度变化表明水体存在富营养化趋势,与水质评价结果较为一致。

2.2.3 浮游植物多样性指数变化特征

浮游植物多样性指数变化特征见图 2。就 Shannon-Wiener 多样性指数而言,S1~S5 点位 2014 年 H' 的年均值分别为 2.77、2.71、2.51、2.71 和 1.99,2016 年各点位 H' 的年均值分别为 2.84、2.68、2.66、2.45 和 2.29,2017 年各点位 H' 的年均值分别为 3.33、3.04、2.52、2.41 和 2.43,评价结果显示,2014 年和 2016 年各点位水质均处于中污染水平,2017 年 S1、S2 点位水质为清洁水平,其他点位为中污染水平;就 Pielou 均匀度指数而言,S1~S5 点位 2014 年 J 的年均值分别为 0.49、0.48、0.44、0.46 和 0.40,2016 年各点位 J 的年均值分别为 0.53、0.48、0.48、0.45 和 0.42,2017 年各点位 J 的年均值分别为 0.65、0.61、0.48、0.46 和 0.53,评价结果显示,2014 年各点位和 2016 年 S2~S5 点位水质处于中污染水平,2017 年 S1、S2、S5 点位水质为清洁水平,S3、S4 点位为中污染水平;就 Margalef 物种丰富度指数而言,S1~S5 点位 2014 年 D 的年均值分别为 2.25、2.17、2.15、2.42 和 1.40,2016 年各点位 D 的年均值分别为 1.93、2.06、1.98、1.79 和 1.87,2017 年各点位 D 的年均值分别为 1.47、1.35、1.49、1.52 和 1.01,评价结果显示,3 个年份各点位水质均处于中污染水平。由此可以看出,3 种多样性指数评价结果具有较高的一致性,2017 年水质为清洁水平的点位有所增加,但从各点位年均值来看,大莲湖整体水质仍处于中污染水平。

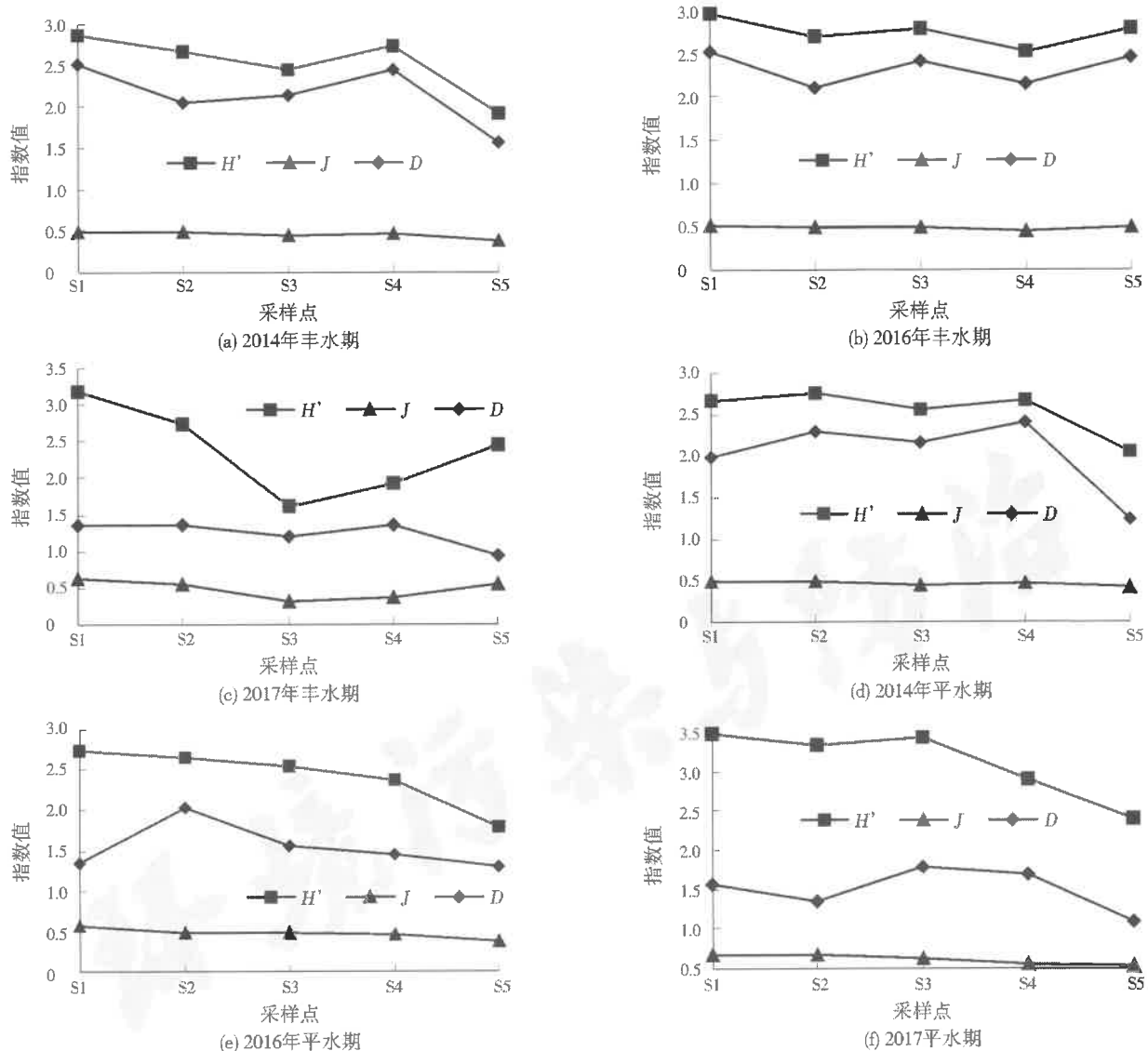


图 2 大莲湖浮游植物多样性指数
 Fig.2 Phytoplankton diversity index of Dalian Lake

2.3 大莲湖水体浮游植物与环境因子的关系

对大莲湖水体浮游植物与环境因子的关系进行冗余分析(RDA),分析结果分别见表 2、图 3。可以看出,基于种类数,主成分轴 1、轴 2 共解释了 27.5% 的浮游植物物种情况。主成分轴 1、轴 2 与环境因子相关性分别为 0.785、0.627,两轴与环境相关性的累积解释率为 72.3%。Chl-a、SD、TN 与轴 1 的相关系数(与轴 1 正向夹角的余弦值)分别为-0.52,-0.48、0.46,说明轴 1 基本反映了 Chl-a、SD、TN 的变化趋势;轴 2 与 DO 和 BOD₅ 的相关系数(与轴 2 正向夹角的余弦值)分别为 0.43 和 0.42,基本反映了 DO 和 BOD₅ 的变化趋势。RDA 蒙特卡罗检验前向选择检验结果表明,Chl-a 和 SD 对浮游植物响应有显著性解释, p 值分别为 0.02、0.05,其解释量占所有环境因子解释量的 43%。Chl-a、SD 与甲藻门种

类数呈负相关,而与其他各门藻种类数呈正相关。

表 2 环境因子与 RDA 排序轴的 RDA 排序总结
 Table 2 RDA ranking of environmental factors and RDA axes

项目	种类数		丰度	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.176	0.099	0.465	0.099
与环境的相关性	0.785	0.627	0.832	0.776
物种累积解释率/%	17.6	27.5	46.5	56.4
与环境相关性的累积解释率/%	46.3	72.3	75.0	91.0

从丰度上看,主成分轴 1 和轴 2 共解释了 56.4% 的浮游植物物种情况。主成分轴 1 和轴 2 与环境因子相关性分别为 0.832、0.776,两轴与环境相关性的累积解释率为 91.0%。轴 1 与 SD 和 TN 相关系数分别为-0.39、-0.35,基本反映了 SD 和 TN 的变化趋势;轴 2 与 SS 和 TP 的相关系数分别为

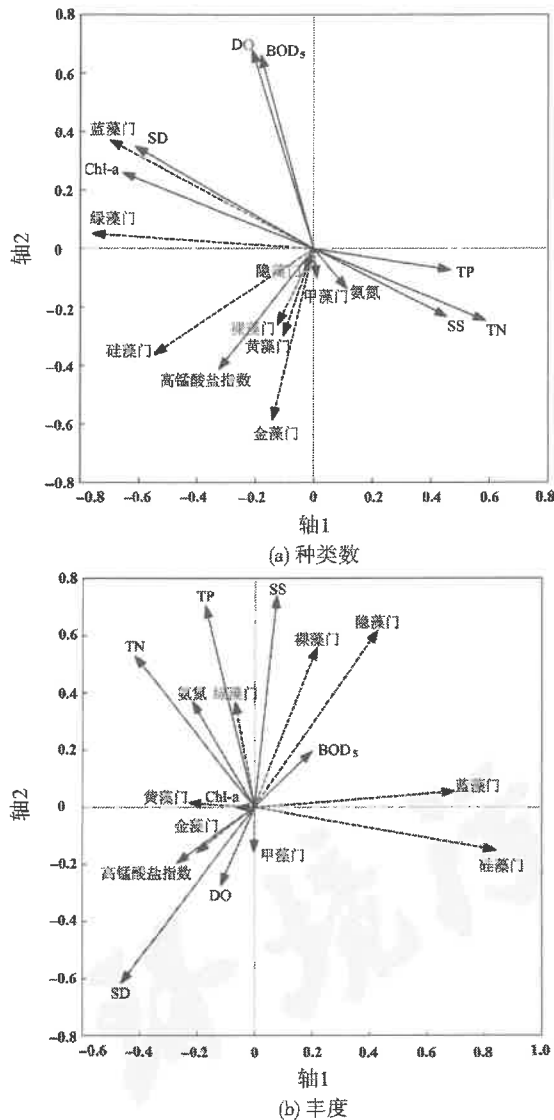


图3 浮游植物种类及丰度与环境因子的 RDA 图

Fig.3 RDA of phytoplankton species, abundance and environmental factors

0.57、0.55, 基本反映了 SS 和 TP 的变化趋势。RDA 蒙特卡罗检验前向选择检验结果表明, SD 和 TN 对浮游植物响应有显著性解释 (p 值均小于 0.01), 其解释量占有环境因子解释量的 68%。SD 与金藻门、硅藻门和甲藻门藻类丰度呈正相关关系, 而与其他各门丰度呈负相关关系; TN 浓度与黄藻门、绿藻门、金藻门丰度呈正相关关系, 与其他各门丰度呈负相关关系。

3 讨论

3.1 大莲湖区域浮游植物群落变化

与历史调查结果^[24-25]比较发现, 大莲湖区域浮游植物种类具有一定的上升趋势。种类数由 1982 年的 71 种上升到此次调查的近 110 种。其中, 裸藻

门种类数上升明显, 从未检出上升到此次调查的 13 种, 裸藻门喜生长于有机质较丰富的静水水体中, 多数耐有机污染; 此外, 蓝藻门种类数也有所增加, 蓝藻通常生长在含氮较高、有机质丰富的碱性水体中。优势种组成也发生了较大的变化, 但没有形成单一的优势种群, 蓝藻门优势种从无到有, 这也表明 30 多年来由于生态环境变化引起了种类更替和群落结构变化。从 3 个年度调查结果来看, 大莲湖种类数呈逐年递减趋势, 丰度呈逐年递增趋势, 各类多样性指数值评价结果均显示大莲湖水质基本处于中污染水平, 表明青西郊野公园建设工程对大莲湖水体造成了一定的影响, 水体呈现出有机物污染和轻度富营养化趋势。值得一提的是虽然出现了蓝藻门优势种, 但并不是水华代表种, 表明建设过程中采取的环境保护措施起到一定作用, 大莲湖水质没有达到恶化程度, 但应持续引起重视加以控制。

3.2 环境因子对浮游植物群落的影响

就浮游植物种类而言, RDA 分析结果表明 Chl-a 和 SD 对物种种类有显著影响。2014 年大莲湖水体 Chl-a 和 SD 浓度普遍高于 2016、2017 年, 而其值均与除甲藻门外的其他各门种类数呈正相关, 且甲藻门在 3 个年度出现频率均很低, 因此, 浮游植物种类数以 2014 年最多。青西郊野公园近期建设范围共涉及工程项目 16 项, 包括土地整治、水系治理、生态保育区、恢复区、垂钓区建设等, 可以看出, 项目涉及到的河道护岸、田间小道整治、新建护岸、防汛通道建设过程中都会造成河道岸坡植被的破坏, 引起水土流失, 虽然建成后及时补种植物, 但其水土保持功能需要时间恢复。同时生态保育区建设和低洼圩区治理等工程项目也会引起一定程度的水土流失。此外, 水系治理过程中清除水葫芦的同时将大部分挺水和沉水植物一并打捞, 导致水生植物群落结构遭到破坏, 水体自净能力降低。外源输入的增加及系统内部消纳能力的降低使得 SD 呈下降趋势, 水体透光性减弱, 浮游植物光合作用受到影响, 因此浮游植物种类数有所下降。光合作用受限在一定程度上导致浮游植物生物量下降, 进而使得反映水体浮游植物生物量的重要指标 Chl-a 浓度下降。

就丰度而言, RDA 分析结果表明 TN 和 SD 对浮游植物物种丰度有显著影响。TN 浓度与绿藻门、黄藻门、金藻门丰度呈正相关关系, SD 与金藻门、硅藻门和甲藻门藻类丰度呈正相关关系, 3 个年度大莲湖水体 SD 呈递减趋势, 而 TN 浓度呈递增

趋势,从各门类丰度占比情况来看,各年度各点位均以绿藻门占比明显高于其他各门类,因此,TN浓度最高的2017年度浮游植物丰度也最高。生态垂钓区各类标准养殖区的分区建设过程中涉及的池塘清淤、进排水渠修建、池埂宽度和护坡改造以及池塘防汛设施建设过程中会对底泥造成较大的扰动,而多年的养殖过程中肥料、饵料残渣和鱼类粪便的积累造成底泥的营养盐富集,扰动后通过地表径流进入水体,使得水体氮磷浓度升高。大量研究认为营养盐浓度是浮游植物生长分布的限制因素^[26-28]。有报道认为,TN/TP(质量比)决定了浮游植物群落变化是受氮磷的单独限制或者协同作用^[29-30]。本研究中,大莲湖水体中氮磷浓度存在较大的季节变化,丰、平、枯水期 TN/TP 均值分别为 14.3、13.3 和 34.2。RDA 分析结果表明浮游植物变化主要受氮限制,而相关性分析显示 TP 与 TN 呈极显著正相关关系(相关系数 0.76, $p < 0.01$),这也在一定程度上表明氮和磷会协同影响浮游植物的变化。此外,研究中监测到的环境因子分别解释了浮游植物种类和丰度的 27.5%、56.4%,表明还有其他环境因子对浮游植物种类和丰度变化产生影响,如 pH^[31]、温度^[32]、光照^[33] 以及水生植物和水生动物群落结构^[34] 等。因此,浮游植物生长并非单一因子作用,而是受多种因子的协同影响,要得出明确的结论尚需更深入的实验研究。

4 结 论

(1) 综合水质理化指标、营养状态指数及浮游植物多样性指数等多种方法分析发现,2014、2016、2017 年大莲湖水质呈现轻度富营养化趋势,表明青西郊野公园建设工程对大莲湖水体造成了一定的影响,在郊野公园后续管理中应引起重视。

(2) 近 3 个年度调查结果显示浮游植物种类数呈逐年递减趋势,丰度呈逐年递增趋势,多样性指数 H' 和均匀度指数 J 呈逐年递增趋势,而丰富度指数 D 则呈逐年递减趋势。RDA 分析结果表明 Chl-a、SD 和 TN 是影响大莲湖浮游植物种类和丰度的重要环境因子,其中,Chl-a 和 SD 对浮游植物种类有显著影响,TN 和 SD 对浮游植物丰度有显著影响,表明水体透明度的控制应引起重视。

参考文献:

[1] 石崧,凌莉,乐芸.香港郊野公园规划建设经验借鉴及启示[J].上海城市规划,2013,21(5):62-68.

- [2] 马唯为.新型城镇化下郊野公园农田林网景观设计方法研究[J].中国城市林业,2018,16(3):15-19.
- [3] CHAN C S, YUEN S K, DUAN X, et al. An analysis of push-pull motivations of visitors to country parks in Hong Kong[J]. World Leisure Journal, 2018, 60(3): 191-208.
- [4] BROTHERTON D I. The development and management of country parks in England and Wales[J]. Biological Conservation, 1975, 7(3): 171-184.
- [5] GONG L, MAO B, QI Y D, et al. A satisfaction analysis of the infrastructure of country parks in Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 480-489.
- [6] 潘兰平,刘利锋.大数据支持下的上海郊野公园建设成效动态监测与评估[J].城乡规划,2018,32(5):47-56.
- [7] O'NEIL J M, DAVIS T W, BURFORD M A, et al. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change[J]. Harmful Algae, 2013, 14(1): 313-334.
- [8] PADISAK J, BORICS G, GRIGORSZKY I, et al. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: the assemblage index[J]. Hydrobiologia, 2006, 553(1): 1-14.
- [9] KATSIAPIS M, MOUSTAKA GOUNI M, SOMMER U. Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCoI - a new phytoplankton community index[J]. Ecological Informatics, 2016, 31(8): 22-29.
- [10] 庄军莲,许铭本,张荣灿,等.广西防城港湾周年浮游植物生态特征[J].应用生态学报,2011,22(5):1309-1315.
- [11] SALMASO N. Long-term phytoplankton community changes in a deep subalpine lake: responses to nutrient availability and climatic fluctuations[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(4): 825-846.
- [12] 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[J].生态学报,2019,39(3):787-798.
- [13] 范小晨,代存芳,陆欣鑫,等.金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子[J].生态学报,2018,38(16):5726-5738.
- [14] KATSIAPIS M, MOUSTAKA GOUNI M, MICHALOUDI E, et al. Phytoplankton and water quality in a Mediterranean drinking-water reservoir (Marathonas Reservoir, Greece)[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011, 181(1/2/3/4): 563-575.
- [15] SPATHARIS S, ROELKE D L, DIMITRAKOPOULOS P G, et al. Analyzing the (mis) behavior of Shannon index in eutrophication studies using field and simulated phytoplankton assemblages[J]. Ecological Indicators, 2011, 11: 697-703.
- [16] 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[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 吴易雯,李莹杰,张列宇,等.基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J].湖泊科学,2017,29(5):1091-1102.
- [18] 何勇凤,李昊成,朱永久,等.湖北长湖富营养化状况及时空变化(2012—2013年)[J].湖泊科学,2015,27(5):853-864.
- [19] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [20] 刘林峰,周先华,高健,等.神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J].湖泊科学,2018,30(2):417-430.
- [21] 王俊莉,刘东燕,古滨河,等.基于浮游植物群落的安徽太平湖水环境生态评价[J].湖泊科学,2014,26(6):939-947.

(下转第 911 页)