

朱 浩,刘兴国,陈晓龙,等. 大莲湖湿地修复区浮游植物群落结构与水质环境因子分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(11):270-274.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.11.052

大莲湖湿地修复区浮游植物群落结构与水质环境因子分析

朱 浩^{1,2}, 刘兴国¹, 陈晓龙¹, 刘云飞¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092)

摘要:为了解大莲湖湿地修复区浮游植物及水体富营养化状况,在 2018 年 1—5 月对大莲湖湿地修复区的浮游植物群落结构,包括浮游植物的种类构成、密度、生物量优势度及生物多样性进行调查研究,调查期间共鉴定出 28 种浮游植物,隶属 5 门 25 属;其中优势种 2 个门类,共 3 种。浮游植物群落结构以绿藻为主,其密度占总数的 64.95%。冗余分析结果表明,氮营养盐含量是绿藻群落分布的主要影响因子;溶氧含量、pH 值以及氮营养盐含量是蓝藻群落分布的主要影响因子;运用多样性指数与水体污染程度的关系对大莲湖生态修复区水体污染情况进行综合评价,结果表明,该区域处于轻度到中度污染状态。

关键词:大莲湖;浮游植物;多样性指数;冗余分析;群落结构

中图分类号: S963.21⁺3; S718.54⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)11-0270-05

浮游植物是淡水生态系统中重要的初级生产者,在淡水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用^[1-2]。浮游植物在藻类密度、群落结构和功能等方面会随着水体水质的改变而产生相应的变化,可以指示水体的营养状态^[3-5]。

大莲湖生态修复区位于上海市青浦区西部,地理坐标为 121°00'E、31°04'N,位于淀山湖下游,是黄浦江上游重要的水源地保护区^[6]。2008 年 12 月至 2009 年 5 月,上海市林业局野生动植物保护站组织多家单位和公司,对大莲湖生态修复区一期工程进行了面积为 41.67 hm² 的地型塑造、水系灌通等一系列生态修复工程^[7],目前距生态修复工程实施完工后已满 10 年,笔者所在课题组于 2018 年 1—5 月对大莲湖生态修复区水域的浮游植物和环境因子进行了调查,比较分析浮游植物的群落结构和种群密度,评价生态修复区内的水质状况,并使用冗余分析(RDA)方法探讨浮游植物分布对环境因子的响应,以期为大莲湖生态修复区的进一步管理提供

一定的数据支持。

1 材料与方法

1.1 样点布设及采样时间

于 2018 年 1—5 月对大莲湖生态修复区进行采样调查,5 个月共采样 5 次。在大莲湖湿地修复区共设 3 个采样点,即进水口、湖中区、出水口,分别记为 S1、S2、S3(图 1)。

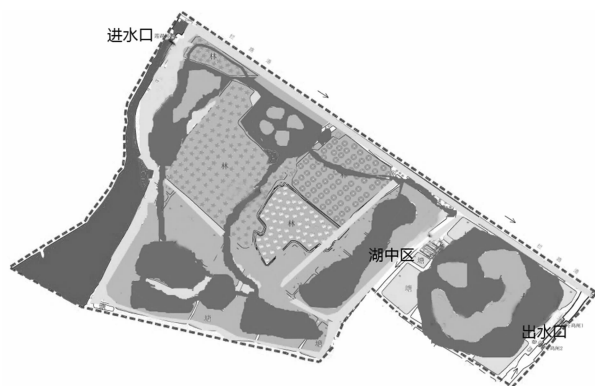


图1 大莲湖采样点分布

1.2 样品采集和处理

采用有机玻璃采水器采集距表层 1 m、离底 0.5 m 的各层混合水 5 L,其中 1 L 水样加 15 mL 鲁哥氏液固定,用于浮游植物定量分析,其余水样用于测定水体理化因子。然后采用 25 号浮游植物网在表层水体呈“∞”形来回缓慢拖动数次,捞取浓缩

收稿日期:2019-07-06

基金项目:农业技术试验示范与服务支持(编号:2018LK Y007)。

作者简介:朱 浩(1985—),男,江苏句容人,硕士,助理研究员,主要从事生态工程方面的研究。E-mail: zhu hao0511@163.com。

通信作者:刘兴国,博士,研究员,主要从事生态工程方面研究。

E-mail: liu xg1223@163.com。

藻样并加适量鲁哥氏液进行现场固定,用于浮游植物定性分析。浮游植物的定性、定量样本依据《淡水浮游生物研究方法》^[8]进行分析,浮游植物种类鉴定主要依据《中国淡水藻类》^[9]。水温、溶解氧含量以及浮游植物种类数、密度和生物量、多样性指数等指标均采用上、中、下 3 层数据的平均值,水深、透明度为 3 次测定的平均值。水环境因子的监测参考《水和废水监测分析方法》^[10]。

1.3 指标的测定与计算

浮游植物的优势种根据各个种的优势度(Y)值来确定。

$$Y = N_i / N \times f_i$$

式中: N_i 为*i*种类的个体数; N 为所有种类总的个体数; f_i 为*i*种类个体出现的频率。 $Y > 0.02$ 的种类为优势种。

Margalef 丰度指数(D)计算公式为

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中: D 为 0~1 时,表示重污染; D 为 1~2 时,表示严重污染; D 为 2~4 时,表示中污染; D 为 4~6 时,表示轻污染; $D > 6$ 时,表示清洁。 S 为物种数。

Shannon - Weaver 多样性指数(H')计算公式为

$$H' = - \sum (N_i / N) \ln (N_i / N)$$

式中: H' 为 0~1 时,表示重污染; H' 为 1~2 时,表示

中污染; H' 为 2~3 时,表示轻污染; $H' > 3$ 时,表示清洁。

Pielou 均匀度指数(J)计算公式为

$$J = H' / \ln S$$

式中: J 为 0~0.3 时,表示重污染; J 为 0.3~0.5 时,表示中污染; $J > 0.5$ 时,表示轻污染或无污染。

1.4 数据处理

运用 SPSS 13.0 和 Excel 2010 对测定数据进行统计分析和绘图。采用 Canoco 5.0 软件对浮游植物与环境因子之间的关系进行冗余分析。据其第 1 轴长度确定分析类型[大于 4 时使用典型相关分析(CCA),小于 3 时使用 RDA,处于 3~4 之间时二者均可]^[11-12]。

2 结果与分析

2.1 水质指标

由表 1 可知,高锰酸盐指数(COD_{Mn})变化较大,总体呈降低的趋势,总氮(TN)、总磷(TP)、氨态氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、溶解氧(DO)含量以及 pH 值的年平均值均达到了国家Ⅲ类水质标准。综合表明,大莲湖生态修复区水质全年整体处于国家Ⅲ类水质状态。

表 1 大莲湖生态修复区理化因子特征

采样时间 (月-日)	TN 含量 (mg/L)	TP 含量 (mg/L)	COD_{Mn} 含量 (mg/L)	$\text{NH}_3 - \text{N}$ 含量 (mg/L)	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量 (mg/L)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 (mg/L)	DO 含量 (mg/L)	pH 值
01-02	0.50 ± 0.09	0.09 ± 0.04	36.75 ± 3.77	0.07 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.63 ± 0.17	10.17 ± 0.35	9.61 ± 0.11
02-04	1.21 ± 0.60	0.19 ± 0.03	19.50 ± 2.88	0.07 ± 0.07	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01	11.07 ± 0.41	9.2 ± 0.36
03-27	1.13 ± 0.23	0.19 ± 0.02	8.38 ± 3.46	0.08 ± 0.04	0.01 ± 0.01	0.47 ± 0.21	9.55 ± 1.24	8.23 ± 0.41
04-25	0.48 ± 0.28	0.28 ± 0.07	16.50 ± 7.33	0.15 ± 0.15	0.01 ± 0.01	0.22 ± 0.10	6.41 ± 1.37	7.73 ± 0.11
05-07	0.35 ± 0.16	0.25 ± 0.03	15.25 ± 3.28	0.08 ± 0.04	0.01 ± 0.01	0.19 ± 0.03	6.03 ± 0.93	7.59 ± 0.26

2.2 浮游植物种类组成

在调查期间,大莲湖湿地修复区 3 个采样点共鉴定出 28 种浮游植物,隶属 5 门 25 属(表 2)。由表 2 可见,绿藻门种类最多,共 13 种,占总种数的 46%;蓝藻门次之,共 6 种,占总种数的 21%;硅藻门共 5 种,占总种数的 18%;黄藻门 3 种;甲藻门 1 种;绿藻门浮游植物种类数的变化决定着大莲湖湿地修复区浮游植物种类数的变化。从浮游植物的密度和分布来看,本次调查的浮游植物共出现 2 个门类的优势种,共 3 种,具体见表 3。

2.3 浮游植物密度与生物量

大莲湖生态修复区浮游植物平均密度和生物

表 2 大莲湖浮游植物群落结构

浮游植物	种数	比例
硅藻门	5	0.18
黄藻门	3	0.11
甲藻门	1	0.04
蓝藻门	6	0.21
绿藻门	13	0.46
合计	28	1.00

量组成见表 4 和表 5。由表 4 可见,大莲湖生态修复区浮游植物的总密度为 1 112 220 cells/L;在密度组成中,绿藻门的密度最高,为 722 348 cells/L,占

表 3 大莲湖浮游植物优势种

优势种	优势度
针状蓝纤维藻	0.02
四尾栅藻	0.04
小球藻	0.31

总密度的 64.95%；之后依次是蓝藻门，为

274 892 cells/L, 占总密度的 24.72%，硅藻门，为 64 118 cells/L, 占总密度的 5.76%，黄藻门 47 259 cells/L, 甲藻门 3 603 cells/L。由表 5 可见，浮游植物总的生物量为 219.00 μg/L, 在生物量组成中绿藻门最高，为 96.00 μg/L, 其次依次是硅藻门 69.00 μg/L, 黄藻门 23.00 μg/L, 甲藻门 22.00 μg/L, 蓝藻门 9.00 μg/L。

表 4 大莲湖浮游植物密度

采样时间 (月-日)	平均生物密度 (cells/L)				
	硅藻门	黄藻门	甲藻门	蓝藻门	绿藻门
01-02	9 080 ± 4 836	9 120 ± 2 586	0	20 854 ± 14 515	41 961 ± 33 946
02-04	6 060.61	900	0	25 347 ± 14 861	41 310 ± 23 051
03-27	14 008 ± 2 058	9 368 ± 4 501	3 603	43 933	51 283 ± 50 149
04-25	11 881	6 410	0	21 496 ± 3 204	27 428 ± 21 875
05-07	0	2 970	0	16 453 ± 11 024	78 799 ± 78 705
合计	64 118	47 259	3 603	274 892	722 348
总计	1112 220				

注:表中合计数据为各采样点调查期间所有月份鉴定的各藻门密度计数之和,总计数据为调查期间所有月份浮游植物密度之和。表 5 同。

表 5 大莲湖浮游植物生物量

采样时间 (月-日)	平均生物量 (μg/L)				
	硅藻门	黄藻门	甲藻门	蓝藻门	绿藻门
01-02	4.85 ± 2.90	1.20 ± 0.42	0.00	0.80 ± 0.50	6.60 ± 6.69
02-04	12.10 ± 0.00	0.90 ± 0.00	0.00	0.90 ± 0.56	0.80 ± 0.46
03-27	11.70 ± 56.60	7.00 ± 7.92	21.60 ± 0.00	1.60 ± 0.35	11.20 ± 12.74
04-25	23.80 ± 0.00	2.50 ± 1.41	0.00	0.45 ± 0.35	1.90 ± 1.61
05-07	0.00	3.00 ± 0.00	0.00	0.37 ± 0.06	11.40 ± 10.94
合计	69.00	23.00	22.00	9.00	96.00
总计	219.00				

2.4 多样性指数

2018 年大莲湖浮游植物多样性指数见表 6。Shannon - Wiener 多样性指数变化范围为 0.85 ~

1.43, 平均值为 1.25, Margalef 丰富度指数变化范围为 0.27 ~ 0.46, 平均值为 0.38; Pielou 均匀度指数变化范围为 0.63 ~ 0.88, 平均值为 0.79。

表 6 大莲湖浮游植物多样性指数

采样时间 (月-日)	Shannon - Wiener 多样性指数	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数
01-02	1.43 ± 0.36	0.42 ± 0.20	0.88 ± 0.12
02-04	0.85 ± 0.29	0.27 ± 0.14	0.63 ± 0.05
03-27	1.41 ± 0.29	0.46 ± 0.12	0.80 ± 0.02
04-25	1.18 ± 0.59	0.31 ± 0.17	0.84 ± 0.11
05-07	1.39 ± 0.26	0.44 ± 0.11	0.79 ± 0.12
平均值	1.25	0.38	0.79

2.5 浮游植物群落与环境因子 RDA 分析

经 Canoco 5.0 软件对浮游植物与环境因子之间的关系进行分析可知,第 1 轴长度为 3.2 (小于

4), 选择线性模型 RDA, 分析结果显示, 前 2 个排序轴的特征值分别为 0.22、0.14, 共解释了浮游植物数据 59.2% 的方差值, 解释变量分别为 21.59、

35.53, 物种与环境相关性轴 1 特征值为 0.976 6, 轴 2 为 0.871 2, 前 2 个轴中物种与环境关系的累积百分比为 57.12%, 说明 2 个排序轴能较好地反映大莲湖生态修复区浮游植物与各环境因子之间的相互关系。图 2 显示, DO 含量、pH 值、COD_{Mn} 含量与轴 1 呈负相关, 因此轴 1 与环境因子有关; TN、TP、

NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 含量与轴 2 正相关, 小球藻与水生集胞藻主要集中在第 2 象限, 与 NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN 正相关, 因此轴 2 与水体的营养状况有关; 极小拟小椿藻、湖沼色球藻、狭形纤维藻、针杆藻与 DO、pH 值、COD 正相关。

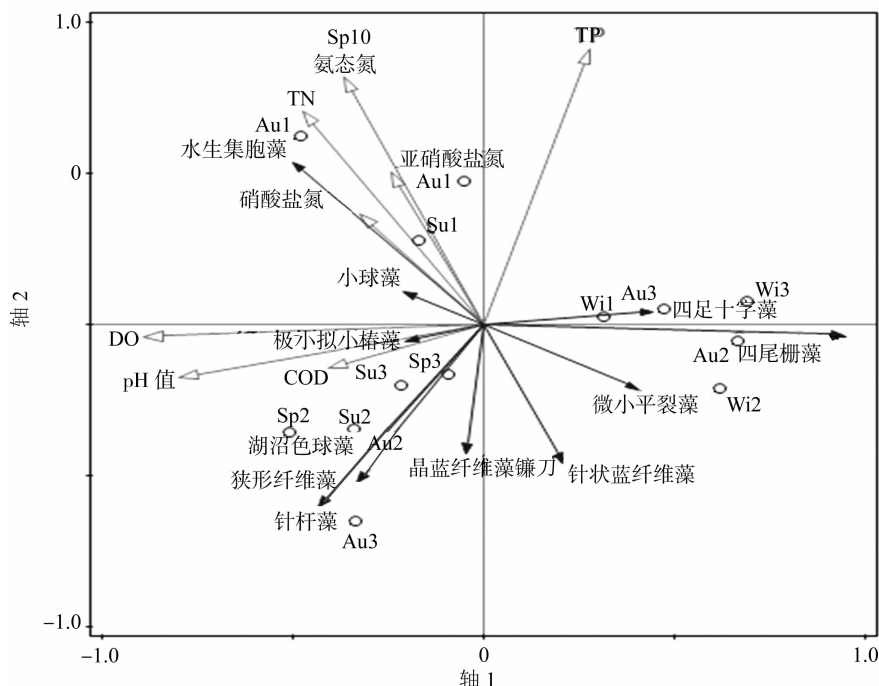


图2 浮游植物与环境因子之间的 RDA 分析

3 讨论

3.1 大莲湖生态修复区浮游植物群落结构及其变化

大莲湖生态修复区的水主要来自外源拦路港, 外源水从进水口进入大莲湖, 在湖区中央停留一段时间后从排水口排出^[13], 生态修复区内湖泊的换水频率达到 2 个月 1 次。水体交换量大, 因此, 水体中总氮、硝态氮含量波动较大, 本次调查发现, 生态修复区内浮游植物群落以绿藻为主, 其个体数量占优势。对大莲湖生态修复区的调查结果表明, 浮游植物的种类组成与往年的调查结果^[14-15]相比, 经过这些年的治理, 有机污染已经得到了较大的改善。

3.2 环境因子与大莲湖生态修复浮游植物群落的关系

浮游植物群落结构受环境因素的综合影响, 5 次采样中测得的理化因子变化较大且对应的浮游植物群落结构也存在差异, 说明环境因子对大莲湖浮游植物群落演替起着较重要的作用。RDA 结果

初步反映了生态修复区浮游植物与主要环境因子的相关性。在测得的理化因子中, 小球藻和水生集胞藻与氨态氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮正相关, 极小拟小椿藻、湖沼色球藻与 DO、pH 值、COD_{Mn} 含量正相关。金磊等研究发现, 水体中的氮磷营养盐和透明度是影响绿藻和蓝藻分布的主要环境因子^[16]。本次调查发现, 大莲湖生态修复区浮游植物主要受氮营养盐、水中溶解氧含量以及水体 pH 值限制。有研究得出, 浮游藻类生长的最佳氮磷比为 16 : 1, 当大于 16 : 1 时, 主要受磷限制, 当小于 16 : 1 时, 主要受氮限制^[17-18]。但 Steinberg 等的研究表明, 在总磷浓度超过 10 μg/L 时, 蓝藻的生长在很大程度上受物理因子的影响^[19]。孔繁翔等提出, 水文条件、气象因素是引起藻类水华的主要原因^[20]。宗梅等的研究表明, 巢湖发生水华后, 微囊藻与水温相关性最高^[21]。本研究中, 绿藻主要受氮营养盐含量的影响, 蓝藻受溶解氧含量、pH 值以及氮营养盐含量的影响, 与上述研究结果相一致。薄香兰等的研究表明, 氮磷比为 34.60 : 1 时, 小球藻叶绿素含量

和细胞密度最高,从藻类营养需求上也证明了这一点^[22]。

3.3 大莲湖生态修复区水质评价

大莲湖生态修复区的水源为拦路港,拦路港与黄浦江航运河道相通,外源水体中总氮、总磷含量以及高锰酸盐指数均较高^[12]。有研究指出,生物多样性指数越高,其群落结构越复杂,稳定性越大,水质越好^[23];而当水质受到污染时,敏感性种类消失,多样性指数降低,群落结构趋于简单,稳定性变差,水质下降^[24]。运用多样性指数与水体污染程度的关系^[25]来判断水体污染程度,大莲湖 Shannon - Wiener 多样性指数变化范围为 0.85 ~ 1.43, Margalef 丰富度指数变化范围为 0.27 ~ 0.46; Pielou 均匀度指数变化范围为 0.63 ~ 0.88,说明大莲湖生态修复区处于轻度到中度污染状态。

从水质方面来评价,大莲湖生态修复区总氮含量小于等于 1.21 mg/L,总磷含量小于等于 0.28 mg/L,处于轻度富营养化状态。化学评价与生物学评价得出的水质等级较为接近,综合评价结果表明,大莲湖生态修复区属于轻度污染状态,相比于 2008 年^[13],大莲湖生态修复区经过治理后,水质得到明显的改善。

参考文献:

- [1] Lepisto L, Holopainen L L, Vuoristo H. Type - specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes[J]. *Limnologia*, 2004, 34(3): 236 - 248.
- [2] Świerzowski A, Godlewska M, Poltorak T. The relationship between the spatial distribution of fish, zooplankton and other environmental parameters in the Solina reservoir, Poland [J]. *Aquatic Living Resources*, 2000, 13(5): 373 - 377.
- [3] Arimoro F O, Olisa H E, Keke U N, et al. Exploring spatio - temporal patterns of plankton diversity and community structure as correlates of water quality in a tropical stream[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 216 - 223.
- [4] Marchetto A, Padedd B M, Mariani M A, et al. A Numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs [J]. *Journal of Limnology*, 2009, 68(1): 106 - 121.
- [5] 陶志英, 余智杰, 陈文静, 等. 军山湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(14): 274 - 279.
- [6] 刘兴国, 刘兆裴, 裴恩乐, 等. 上海大莲湖水源地污染的生物学评价与生态修复建议[J]. *资源科学*, 2011(2): 280 - 285.
- [7] 朱 浩, 刘兴国, 裴恩乐, 等. 大莲湖生态修复工程对水质影响的研究[J]. *环境工程学报*, 2010(8): 1790 - 1794.
- [8] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [9] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 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.
- [11] Beyene A, Addis T, Kifle D, et al. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(2): 381 - 392.
- [12] Muyllaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium) [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 673 - 687.
- [13] 刘兴国, 徐 皓, 朱 浩, 等. 大莲湖水源地浮游动物和底栖动物的污染生物学特征与污染分析[J]. *水产学报*, 2013, 37(4): 556 - 564.
- [14] 朱 浩, 刘兴国, 吴宗凡, 等. 上海市大莲湖生态修复区富营养化评价及氮磷平衡研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 157 - 160.
- [15] 朱 浩, 张拥军, 裴恩乐, 等. 大莲湖生态修复工程对浮游植物群落结构的影响[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(10): 2391 - 2395.
- [16] 金 磊, 李林钰, 周 杨, 等. 白洋淀三大典型水域浮游植物群落及水质评价[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 329 - 336.
- [17] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: cambridge university press, 2006.
- [18] 葛 蔚, 汪 芳, 柴 超. 氮和磷浓度对中肋骨藻和锥状斯氏藻种间竞争的影响[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 697 - 704.
- [19] Steinberg C E W, Hartmann H M. Plankton bloom - forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers [J]. *Freshwater Biology*, 1988, 20(2): 279 - 287.
- [20] 孔繁翔, 高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 589 - 595.
- [21] 宗 梅, 郑西强, 王翔宇. 巢湖万年埠沿岸浮游植物与环境因子关系[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(27): 102 - 105.
- [22] 薄香兰, 刘 兴, 窦 勇, 等. 不同氮磷比对小球藻叶绿素荧光参数及生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(2): 169 - 172.
- [23] 李广玉, 鲁 静, 何拥军. 胶州湾浮游植物多样性及其与环境因子的关系[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(4): 10 - 13.
- [24] 俞秋佳, 徐凤洁, 蒋 跃, 等. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4): 450 - 457.
- [25] 李 磊, 李秋华, 焦树林, 等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4436 - 4443.