

溇湖轮虫群落结构及其与水环境因子的关系^{*1}

杨洋^{1,2} 张玮^{1,2} 潘宏博^{1,2} 顾琬雯¹ 郝瑞娟¹ 熊春晖¹ 王丽卿^{1,2*}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学教育部水产种质资源发掘与利用重点实验室, 上海 201306)

【摘要】: 为研究溇湖轮虫群落结构特征及其与环境因子的关系, 于2013年对该湖轮虫群落和相关环境因子按季度进行了调查研究。共鉴定出轮虫23属55种, 富营养化指示种44种。全年优势种为: 矩形龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫、广布多肢轮虫、长肢多肢轮虫、萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、长三肢轮虫和前节晶囊轮虫。轮虫年均密度和生物量分别为1 820.0 ind./L和2.93 mg/L。季节上, 秋季密度(3 555.0 ind./L)最高, 春季生物量(6.31 mg/L)最高; 空间上, 南部密度(2 655.0 ind./L)最高, 北部生物量(3.26 mg/L)最高。轮虫群落在季节上差异较大, 而在空间上差异不明显。相关性分析和多元回归分析显示总氮和COD_{Mn}是对溇湖轮虫群落结构变化起关键性作用的非生物因子。另外, 通过轮虫优势种指示种和轮虫多样性指数等参数, 得出2013年溇湖营养程度为富营养水平。

【关键词】: 溇湖; 轮虫; 群落结构; 环境因子; 水质评价

【中图分类号】: Q958.8; X824 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)06-0832-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201706005

轮虫是淡水浮游动物重要组成部分之一, 它们能直接利用悬浮的有机物质为食物^[1], 并通过摄食细菌和原生动物间接消耗溶解有机物质^[2], 轮虫在淡水食物链中占据着重要的位置^[3]。由于轮虫繁殖周期短、周转快, 其对水环境变化的反应比其他浮游动物类群更为迅速^[4], 被视为反应最敏感的群体^[5], 经常作为水体的指示生物^[6,7]。一般而言, 影响湖泊中轮虫群落结构时空变化的因素包括生物的和非生物的, 生物因素主要包括捕食和竞争以及食物资源等^[8~10], 非生物因素则主要包括营养盐、温度、溶解氧等^[11]。

溇湖(119° 44' ~119° 53' E, 31° 29' ~31° 42' N)位于太湖上游, 江苏五大湖泊之一, 纵跨武进区和宜兴两市(区), 是江苏苏南地区仅次于太湖的第二大淡水湖, 目前水面面积为166 km², 2013年年均水深达到1.71 m。溇湖主要承担着旅游、防洪、灌溉、运输、水产养殖和调节气候等多种功能。近年来溇湖周边地区工农业的发展和人口的增长, 使溇湖依然面临着严峻的考验。20世纪90年代以来, 已陆续有学者对溇湖浮游藻类^[12]、沉水植物^[13]、底栖动物^[14]和鱼类^[15]等群落结构进行过研究, 但涉及溇湖轮虫的研究报道较少, 仅有1篇^[16]。

¹ 收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2016-12-28

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-007) [National Science and Technology Major Project on Water Pollution Control and Treatment (2012ZX07101-007)]

作者简介: 杨洋(1991~), 女, 硕士研究生, 主要从事浮游动物生态学方面的研究。E-mail: aquayangy@163.com

通讯作者 E-mail: lqwang@shou.edu.cn

笔者调查了 2013 年溇湖轮虫群落结构, 分析了溇湖轮虫与水体环境因子的关系, 并结合指示生物和多样性指数对溇湖水质进行生态学评价, 以期为溇湖的生态修复和可持续发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样点设置和采样时间

利用 GPS 定位的方法, 在溇湖内设置了 20 个采样点。并根据地理位置、湖区修复及水生植物分布情况, 将湖区分成了北部 (ST1 - ST6)、中部 (ST7 - ST15) 和南部 (ST16 - ST20) 3 个部分 (图 1)。

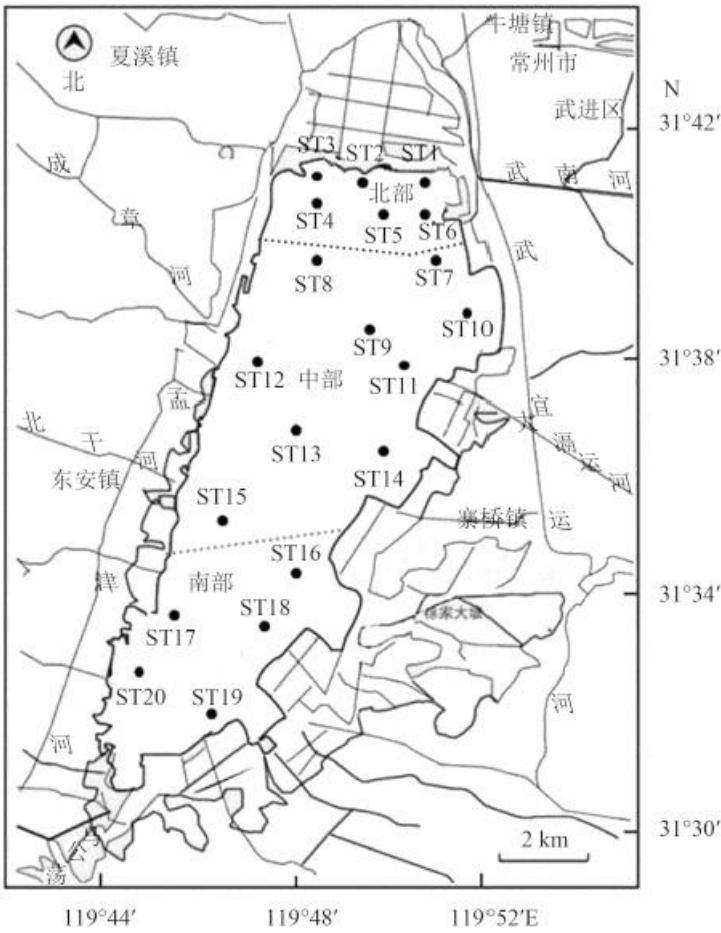


图 1 2013年溇湖采样点位置

Fig.1 Location of the Sampling Sites in Lake Gehu, 2013

北部湖区于 2010 年开展过前置库入湖污染负荷控制、底泥疏浚、大型仿生式机械捞藻和水生植被重建等整治工作^[17]。调查期间, 中部湖区和南部湖区均有水生植物分布, 中部湖区水生植物覆盖率低于南部湖区^[14]。

于 2013 年分季度采样, 时间分别是 2013 年 1 月 (冬季)、4 月 (春季)、7 月 (夏季) 和 10 月 (秋季)。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 定性样品

轮虫定性样品的采集与处理：用 25 号筛绢网(孔径 64 μm)在水面下 0.5 m 处做“ ∞ ”形反复拖拽，然后将定性样品倒入贴有标签的样品瓶中，4%福尔马林溶液固定^[18]。

1.2.2 定量样品

轮虫定量样品用 5 L 采水器自表层而下每隔 0.5 m 采集水样，混合均匀后取 1 L 水，用 1.5%鲁哥氏碘液和 4%福尔马林溶液固定，静置 48 h 后浓缩至 50 mL，室内取 1 mL 浓缩液于计数框内，在 100 倍显微镜下计数。种类鉴定参照 Koste^[19]、王家楫^[20]等人的著作，轮虫生物量测定方法参考黄祥飞^[21]的著作。轮虫不同营养级指示种的划分参考 Sládeček 等人的著作^[16, 22, 23]。枝角类与桡足类定量样品用 5 L 采水器自表层而下每隔 0.5 m 采集水样 20 L，混合后经 13 号浮游动物过滤网(孔径 112 μm)过滤，用 4%的福尔马林溶液固定，浓缩后在 100 倍显微镜下全部计数，种类鉴定参照文献^[24, 25]。

1.2.3 理化因子

水样采集与生物样品的采集同步进行。水温(WT)、溶解氧(DO)、pH 等指标用 YSI-pro plus(美国)现场测定；另外，采集 0.5 m 和 1.5 m 的混合水样 500 mL，4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存，3 h 内送回实验室检测。总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})及磷酸盐(PO_4^{3-})等指标的具体测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[26]。

1.3 数据处理

1.3.1 优势度计算

$$Y = (N_i/N) f_i$$

式中： N_i 为第 i 种的个体数； N 为所有种类的总个体数； f_i 为第 i 种在各站点中出现的频度；当 Y 大于 0.02 时，确定为优势种。

1.3.2 多样性指数

Shannon-Wiener 多样性指数(H')

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

Margalef 丰富度指数(D)

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

式中 S 为浮游动物种类数。

采用 SPSS18.0 软件对环境因子、轮虫密度和生物量等数据进行单因子方差分析、相关性分析和多元逐步回归分析；应用 Origin8.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 主要水质参数

漏湖主要环境因子四季变化和分区差异如下：总磷(TP)在 0.03~0.29 mg/L 之间变化，年均 0.11mg/L；总氮(TN)在 1.44~6.26 mg/L 之间变化，年均 3.37 mg/L；叶绿素 a(Chl-a)在 4.2~94.6 μ g/L 之间变动，波动较大，年均值为 31.71 μ g/L；高锰酸钾指数(COD_{Mn}) 在 2.9~9.1 mg/L 之间变动，年均 4.95mg/L，氮磷比(N/P)在 9.96~80.65 之间变动，年均 36.65；枝角类在 0~407.6 ind./L 之间变动，年均 33.0 ind./L；桡足类在 0~73.2 ind./L 之间变动，年均 5.0 ind./L。桡足类中的剑水蚤成体在 0~6.5 ind./L 之间变动，年均 0.6 ind./L，哲水蚤成体在 0~58.8 ind./L 之间变动，年均 1.0 ind./L。单因素方差分析表明，漏湖主要环境因子季节间差异均极显著(P<0.01)，空间上仅 TN、CODMn 和 Chl-a 浓度呈极显著差异(P<0.01)。

表 1 漏湖主要环境因子的时空变化(平均值±标准差)

Tab.1 Temporal and Spatial Variation of Main Environmental Factors in Lake Gehu (Mean±SD)

季节/分区	TP(mg/L)	TN(mg/L)	Chl-a(μ g/L)	COD _{Mn} (mg/L)	N/P	枝角类(ind./L)	桡足类(ind./L)	剑水蚤成体(ind./L)	哲水蚤成体(ind./L)
冬季	0.12±0.04	4.43±0.64	7.38±2.71	4.01±0.57	37.83±8.52	0.1±0.11	0.3±0.40	0.1±0.13	0.0±0.05
春季	0.08±0.02	4.11±0.81	55±23.91	5.06±0.85	51.57±14.19	0.1±0.15	2.1±2.29	0	0.6±1.03
夏季	0.13±0.07	2.77±0.61	38.20±23.07	4.89±1.06	37.08±14.46	30.4±63.29	5.6±16.19	0.5±0.78	3.1±13.12
秋季	0.11±0.03	2.17±0.54	26.29±17.86	5.86±1.71	20.11±2.84	101.3±130.43	12.0±10.33	1.9±1.63	0.3±0.63
北部	0.11±0.04	3.83±1.00	15.15±10.14	3.90±0.54	40.31±21.54	30.3±73.32	6.6±14.98	0.6±0.91	2.7±11.96
中部	0.12±0.06	3.38±1.14	32.84±22.92	5.26±1.09	32.21±15.07	49.1±105.03	5.5±9.55	0.8±1.53	0.4±0.80
南部	0.09±0.04	2.79±1.08	49.57±30.38	5.35±1.50	35.21±15.10	7.1±12.90	2.3±2.79	0.3±0.55	0.1±0.20

2.2 轮虫群落结构变化

2.2.1 轮虫种类组成

在调查期间共鉴定出轮虫 23 属 55 种。北部湖区、中部湖区和南部湖区分别检出轮虫 33、44 和 38 种，中部湖区的轮虫种类数最多，经单因子方差分析，轮虫种类的空间分布格局呈现的差异不显著(P>0.05)。冬季、春季、夏季和秋季分别检出轮虫 23、13、24 和 40 种，其中秋季轮虫种类最多，春季轮虫种类最少，季节间差异显著(P<0.05)。

2.2.2 不同湖区污染指示种的比较

2013 年共检出 44 种指示种。北部湖区、中部湖区和南部湖区各检出污染指示种 27、35 和 35 种(表 2)。南部湖区的寡污型种类所占比例最高，分别高出北部湖区 16.77%和中部湖区 1%；北部湖区的 β 中污型种类、寡污至 β 中污型、 β 中污型至寡污型和 β 中污型至 α 中污型种类所占比例均高于中部湖区和南部湖区。北部湖区的寡污至清洁型种类所占比例同样也高于中部和南部湖区，但所占比例很小；未检出多污型种类。

表 2 轮虫指示种的空间分布

Tab.2 Spatial Distribution of Indicator Rotifer Species

污染指数等级	北部湖区		中部湖区		南部湖区	
	种类数	百分比(%)	种类数	百分比(%)	种类数	百分比(%)
o	5	18.52	12	34.29	12	35.29
β	10	37.04	10	28.57	10	29.41
o- β	7	25.93	7	20.00	7	17.65
β -o	1	3.70	1	2.86	1	2.94
β - α	3	11.11	3	8.57	3	8.82
ρ	0		1	2.86	1	2.94
o-x	1	3.70	1	2.86	1	2.94
合计	27		35		35	

注: x为清洁型、o为寡污型、 β 为 β 中污型、 α 为 α 中污型、o- β 为寡污至 β 中污型、 β -o为 β 中污型至寡污型、 β - α 为 β 中污型至 α 中污型、 ρ 为多污型、o-x为寡污至清洁型。

2.3 轮虫密度和生物量的变化

漏湖轮虫年均密度和年均生物量分别为 1 820.00 ind./L 和 2.93 mg/L(图 2)。从季节分布来看,生物量在春季最高,密度在秋季最高,各季节间密度和生物量差异均较大($P=0.000$, $P=0.000$);从空间分布来看,生物量在北部湖区最高,密度在南部湖区最高,各区域间轮虫密度($P=0.119$)和生物量($P=0.854$)差异均不显著。

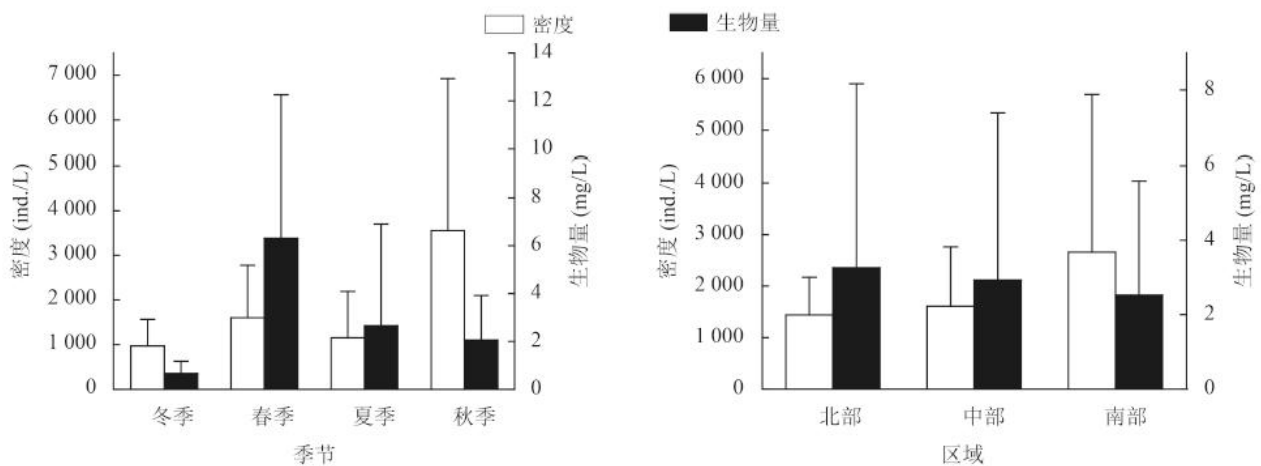


图 2 漏湖轮虫密度的时空变化

Fig.2 Temporal and Spatial Variation of Rotifer Abundance in Lake Gehu

2.4 优势种

2013 年全年有 14 种轮虫为优势种(如图 3)。矩形龟甲轮虫(*Keratella quadrata*)、长三支轮虫(*Filinia longiseta*)、广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)为冬季主要优势种,分别占本季轮虫总密度的 17.53%、20.62%和 22.68%,春季轮虫优势种主要为广布多肢轮虫、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、蓴花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*),分别占本季节轮虫总密度的 23.09%、16.07%、15.44%和 18.72%。广布多肢轮虫和角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)为夏季主要优势种,分别占本季节轮虫总密度的 20.39%和 17.79%。秋季,轮虫优势种主要为广布多肢轮虫和长肢多肢轮虫(*Polyarthra dolichoptera*),分别占本季节轮虫总密度的 24.75%和 26.09%。

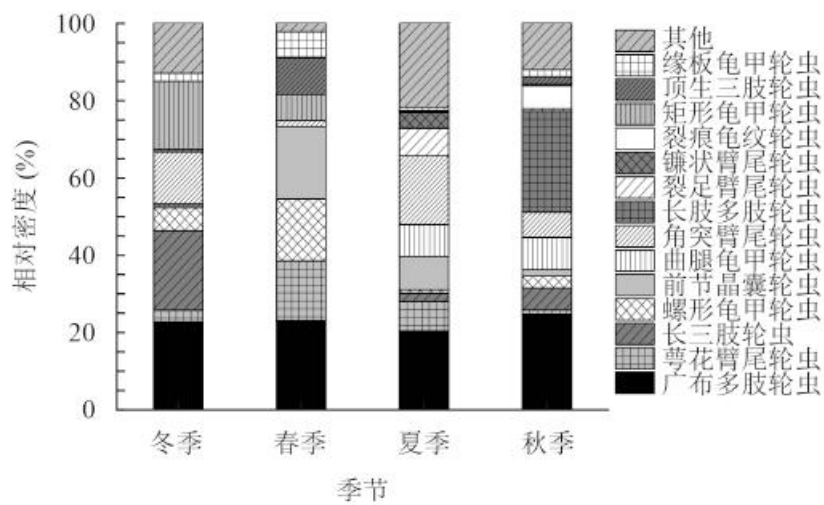
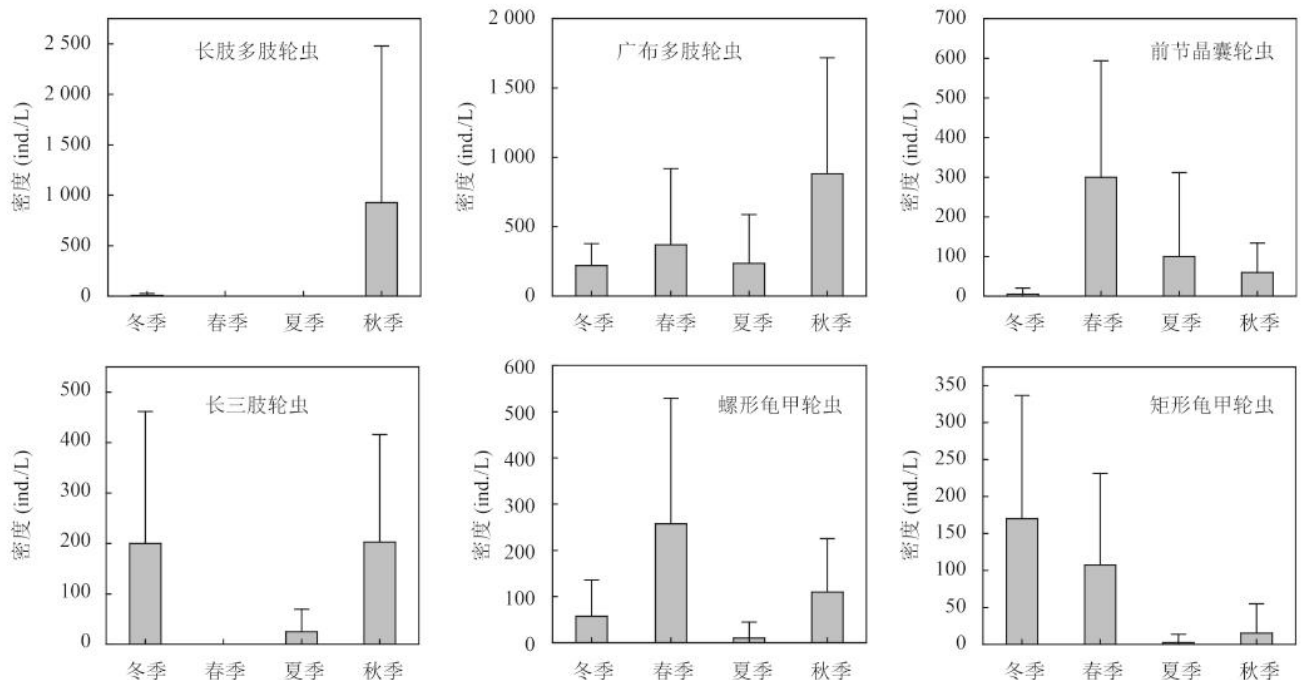


图 3 漏湖轮虫优势种密度比例的季节变化

Fig.3 Seasonal Variation of Proportion of the Dominant Rotifer Species Density in Lake Gehu

轮虫优势种密度的季节分布见图 4。萼花臂尾轮虫、螺形龟甲轮虫和前节晶囊轮虫在春季密度达到最高。广布多肢轮虫、长三肢轮虫、角突臂尾轮虫和长肢多肢轮虫在秋季密度达到最高；矩形龟甲轮虫在冬季密度达到最高。



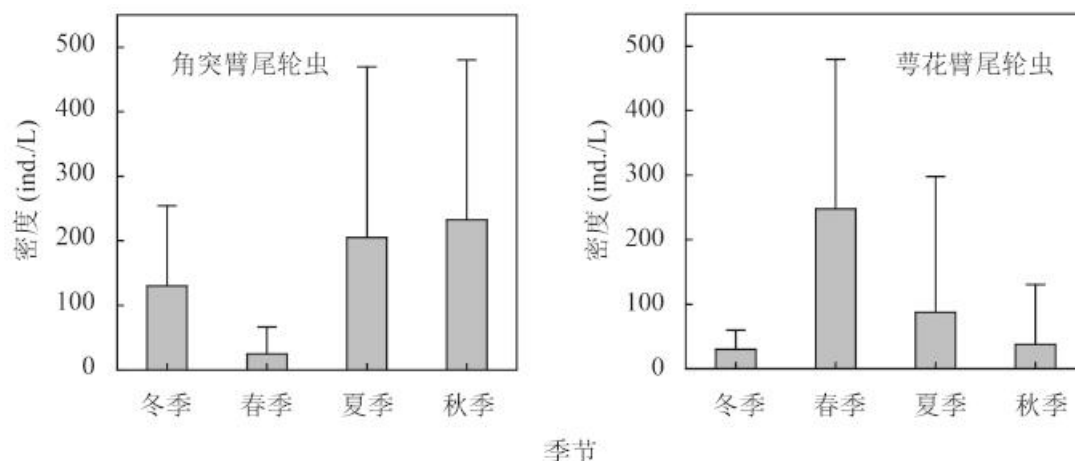


图 4 漏湖主要优势种密度的季节变化

Fig.4 Seasonal Variation of Abundance of the Dominant Rotifer Species in Lake Gehu

2.5 轮虫多样性指数

漏湖轮虫 Shannon-Wiener 指数 H' 的范围为 0~2.357; 轮虫 Margalef 指数 D 值的变化范围为 0~1.997。如图 5 所示, H' 值和 D 值均在冬季最低, 秋季最高, 秋季的 H' 值与冬季、春季和夏季均存在显著差异 ($P < 0.05$), 而冬春夏三季之间差异不存在显著性。从空间上看, H' 和 D 值自北向南呈现增加的趋势。Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数在各区之间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

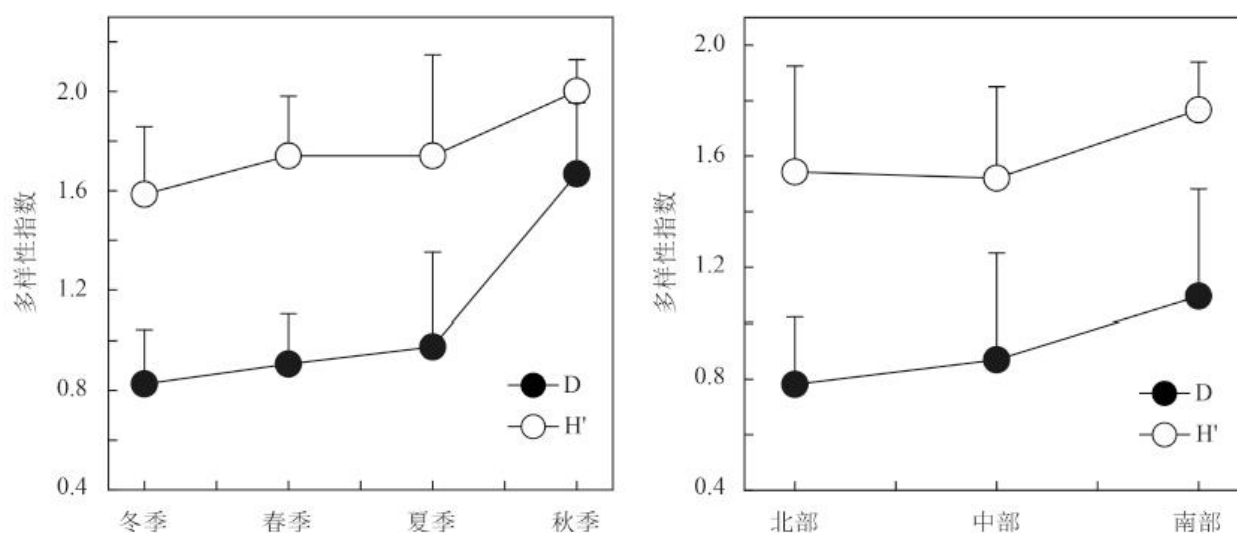


图 5 漏湖轮虫多样性指数的季节变化和空间变化

Fig.5 Seasonal and Spatial Changes of Rotifer Diversity Index in Lake Gehu

2.6 轮虫与环境因子的关系

2.6.1 相关性分析

Pearson 相关分析表明, 轮虫密度与 TN 呈极显著负相关, 与 Chl-a 呈显著正相关, 与 COD_{Mn} 呈极显著正相关; 轮虫生物量与 Chl-a 和 N/P 比分别呈极显著和显著正相关(表 3)。

表 3 轮虫与环境因子相关性分析

Tab.3 Pearson Correlation Analysis of Species Number, Density of Rotifers and Environmental Factors

	WT	TN	TP	Chl-a	COD_{Mn}	N/P	枝角类	剑水蚤成体	哲水蚤成体
轮虫密度	0.108	-0.357**	-0.073	0.259*	0.597**	-0.218	0.107	0.197	-0.098
轮虫生物量	0.129	0.160	-0.047	0.387**	0.135	0.238*	-0.027	-0.057	-0.085

注: *在0.05水平(双侧)上显著相关, **在0.01水平(双侧)上显著相关, 表中数据为相关系数。

2.6.2 多元回归分析

通过多元回归分析筛选出对漏湖轮虫种类数、密度以及多样性指数变化相对重要的环境因子。由表 4 可知, 漏湖轮虫总密度的回归方程有 COD_{Mn} 1 个因子入选; 轮虫种类数的回归方程有 COD_{Mn} 、 PO_4^{3-} 和 DO 3 个因子入选; 漏湖轮虫 Margalef 丰富度指数的回归方程有 TN、 PO_4^{3-} 和 pH 3 个因子入选; Shannon-Wiener 多样性指数的回归方程有 TN、 PO_4^{3-} 和 DO 3 个因子入选。其中, COD_{Mn} 和 TN 分别在前后两个回归方程中均入选, 表明 COD_{Mn} 和 TN 是对漏湖轮虫群落结构变化起关键性作用的水质因子。经 F 检验, 方差分析 F 值的显著水平 $P < 0.001$, 表明回归极显著。

表 4 轮虫与环境因子多元逐步回归方程

Tab.4 Stepwise Multiple Regression Among Rotifer and Environmental Factors

多元逐步回归方程	F	P
$\ln ZLS = 1.139 \ln COD_{Mn} + 0.441 \ln PO_4^{3-} + 0.640 \ln DO - 0.333$	10.903	<0.001
$\ln MD = 1.913 \ln COD_{Mn} + 3.987 \ln D - 0.592 \ln TN + 0.448 \ln PO_4^{3-} + 4.546 \ln pH - 0.802$	18.045	<0.001
$\ln H' = -0.305 \ln TN + 0.180 \ln PO_4^{3-} + 0.367 \ln DO + 0.384$	14.231	<0.001
	7.135	<0.001

注: ZLS 为种类数、MD 为轮虫密度、D 为丰富度、H' 为香农威纳指数。

表 5 不同时期轮虫指示种比例的比较

Tab.5 Comparison of the Ratio of Indicator Species Between Different Periods

污染等级	2004~2006年(%)	2009~2010年(%)	2013年(%)
o	25.6	17.24	36.36
α	5.1	1.72	
β	28.2	29.31	27.27
o- β	25.6	18.97	22.73
β -o		6.90	2.27
β - α	15.4	8.62	6.82
ρ			2.27
o-x			2.27
数据来源	[16]	(本实验室未发表数据)	(本研究)

3 讨论

3.1 轮虫与环境因子的关系

本次调查的轮虫种类数与 20 世纪 90 年代的调查结果[27]相比, 种类组成变化较大, 一些喜生活在沉水植物丰富的水体中的轮虫种类消失或减少, 如真足哈林轮虫(*Harringia eupoda*)、大肚须足轮虫(*Euchlanis dilalata*)、单趾轮虫(*Monostylasp.*)、腔轮虫(*Lecane sp.*)、盘镜轮虫(*Testudinellapatina*)等。可能是由于 1998 以前至 2009 年间漏湖沉水植物覆盖率由 80%以上锐减至不足全湖的 1%^[28], 2010 年仅在漏湖北部进行过水生植被重建^[17], 总体覆盖率依然很低, 加上水质的恶化^[29]所致。另外, 本次调查的轮虫密度介于 1997 和 1998 年的调查结果, 而生物量却高于上述两年, 说明一些大型轮虫种类, 如晶囊轮虫所占比例增加, 其中前节晶囊轮虫占本次调查晶囊轮虫总密度的 90.29%, 前节晶囊轮虫为 β 中污型种类^[16, 23], 所以漏湖的这种变化可能跟水质的恶化有关^[29], 也可能与鱼类的种类组成和丰度的变化相关。

调查结果显示, 不同季节其密度由大到小依次为秋季、春季、夏季和冬季。水温是群落季节演替的主要原因^[30~32]。在一定温度范围内, 水温的升高可以提高轮虫休眠卵的孵化率, 缩短卵的孵化时间, 轮虫种群的周转速率得以提高, 从而形成密度高峰。漏湖的 8 种主要优势种中有 7 种轮虫的密度均在春季或秋季达到峰值(图 4)。春季和秋季各站点水温的变化范围分别为 14.6~17.6 °C 和 18.5~20.8 °C, 可能是该温度范围有利于上述 7 种轮虫休眠卵的孵化, 加上丰富的食物供给(表 1), 所以本次调查的漏湖轮虫在春秋季出现数量高峰。与章宗涉等^[18]调查结果略有不同。因为水温并非唯一决定性因素^[32], 任何一个因素的差异都会导致不同水体甚至同一水体不同时期的调查结果出现差异^[33]。

捕食和竞争也是影响轮虫密度的因素^[8]。枝角类和哲水蚤与大多数轮虫都是滤食性动物, 它们之间为食物竞争关系, 剑水蚤成体和晶囊轮虫是大多数轮虫的捕食者。然而, Pearson 相关性分析却显示轮虫密度和生物量与枝角类、哲水蚤和剑水蚤成体密度均无显著的相关性, 轮虫总密度(不包括晶囊轮虫)与晶囊轮虫密度也无显著相关性($r=0.173$, $P>0.05$), 可能是因为漏湖 2013 年检出的枝角类(33.0 ind./L)、哲水蚤成体(1.0 ind./L)和剑水蚤成体(0.6 ind./L)以及晶囊轮虫(128.8 ind./L)年均密度较低(表 1), 因此它们对轮虫群落产生的影响较小。

轮虫的高密度与水环境中存在充足可供其利用的食物有着密切的关系^[9, 10]。Pearson 相关性分析表明, Chl-a 和 COD_{Mn} 对轮虫密度的季节变化有重要影响, 多元逐步回归分析结果也显示 COD_{Mn} 是对漏湖轮虫群落结构变化起关键性作用的水质因子, 并且轮虫密度与 COD_{Mn} 均表现为秋>春>夏>冬的变化趋势。轮虫多以藻类和有机碎屑为食, 较高的有机质含量可以为轮虫提供更高的食物来源。叶绿素 a 是表征浮游植物现存量的重要指标^[34], COD_{Mn} 与轮虫密度的这种极显著相关性尚少有报道, COD_{Mn} 代表水体中有机

物含量^[35],在一定程度上或许可以反映浮游动物的饵料资源状况。漏湖 COD_{mn}变幅在 2.9~9.1 mg/L,分析可能 COD_{mn}含量该范围内的升高,在一定程度上反映了饵料资源的增加,使轮虫密度表现增加趋势。

漏湖轮虫群落结构不仅季节变化明显,在空间上也存在差异。都雪等^[36]在对洪泽湖的研究中,认为产生这种差异的原因是各区水体营养状况的差异。虽然 2010 年北部湖区开展了大规模的整治工作,治理效果也已逐步显现,但是水质富营养化情况仍然十分严重^[17],修复后的北部湖区的营养盐浓度(N、P)仍然高于未经修复的中部和南部湖区(表 1)。轮虫密度的空间分布中,北部湖区密度最小;TN 和 TP 的空间变化趋势分别为北部>中部>南部和中部>北部>南部。根据 Rhee^[37]的研究,N/P>30 时,会出现 P 抑制。本次调查中,漏湖 3 个湖区的 N/P 均大于 30,其中北部湖区(40.31)显著高于其它两个湖区,分析可能 N/P 越大,P 的抑制效果越显著,所以北部湖区叶绿素浓度最低从而间接抑制了轮虫的生长繁殖。漏湖北部有两条入湖河道扁担河和夏溪河是漏湖污染物的主要来源^[38],由这两条河流进入漏湖北部的污染物可能对轮虫生长产生一定的影响。另外,漏湖北部湖区在 2010 年进行过底泥疏浚^[17],所以北部湖区轮虫密度最低,可能是因为轮虫的休眠卵在此过程中受到影响。

3.2 生物指示作用和水质评价

本文将指示生物和多样性指数结合起来对漏湖水质的分析。从 3 个分区不同污染等级的轮虫种类占各自总数的比例来看,北部湖区的污染程度要高于中部和南部(表 2)。从不同时期不同污染等级的轮虫种类占总数的比例以及比例的变化情况来看,漏湖水体仍然受到一定程度的污染,但是较往年有所好转(表 5)。从水质的变化趋势来看,2004 年 4 月~2005 年 4 月,总磷年均值为 0.209mg/L^[39];2010 年总氮和总磷的年均值分别为 4.65 和 0.147 mg/L^[40];而本次调查的总氮和总磷年均值分别为 3.37 和 0.11 mg/L,与生物评价结果吻合。另外,依据 10 种典型的水质富营养化指示种^[5],在本次调查的 14 种优势种中,出现了 6 种,占有优势种种类的 42.9%。

根据多样性指数对水质的评价标准^[41],H' 值显示漏湖全年各湖区均处于中污染状态;D 值显示漏湖全年各湖区均处于 α -中污染状态。综合优势种指示生物法和多样性指数法,得出 2013 年漏湖整体水质处于 α -中污状态,营养程度为富营养水平,较 2004~2006 年有轻微好转。

4 结论

(1) 近年来,由于漏湖沉水植物覆盖率的锐减和水质的恶化,漏湖轮虫种类的组成发生变化,一些喜生活在沉水植物丰富的水体中的轮虫种类消失或减少。

(2) 轮虫群落结构季节变化主要受温度和食物(Chl-a 和 COD_{mn})的影响;空间上,北部湖区轮虫的密度最低可能与北部湖区 N/P 比,由北部湖区两条入湖河道引入的污染物以及于 2010 年进行的底泥疏浚有关。

(3) 轮虫的多样性指数及污染指示种显示漏湖北部湖区污染程度最高,漏湖整体水质较 2004~2006 年有轻微好转。

参考文献:

[1] POURRIOT R. Recherches sur l'écologie des rotifères[J]. Vie et Milieu, 1965, 21: 1-224.

[2] ARNDT H. Rotifers as predators on components of the microbial web(bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates)-a review[J].Hydrobiologia, 1993, 255-256(1): 231-246.

[3] 杨丽丽,周小玉,刘其根,等.新疆布伦托海轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2011,23(5):806

【YANG L L, ZHOU X Y, LIU Q G, et al. Community structure of rotifer and its relation to environment factors in Lake Buluntuohai[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5): 806-812.】

[4] JI G H, WANG X Y, WANG L Q. Planktonic rotifers in a subtropical shallow lake: succession, relationship to environmental factors, and use as bioindicators[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 702942.

[5] GANNON J E, STEMBERGER R S. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality[J]. Transactions of the American Microscopical Society, 1978, 97(1): 16-35.

[6] CHEN L J, LIU Q, PENG Z R, et al. Rotifer community structure and assessment of water quality in Yangcheng Lake[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(1): 47-58.

[7] COSTA B N S, PINHEIRO S C C, DE OLIVEIRA LIMA M, et al. Microzooplankton as an indicator of environmental quality at an industrial complex in the Brazilian Amazon[J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 220-229.

[8] HERZIG A. The analysis of planktonic rotifer populations: a plea for long-term investigations[J]. Hydrobiologia, 1987, 147(1): 163-180.

[9] DUMONT H J. Biogeography of rotifers[J]. Hydrobiologia, 1983, 104(1): 19-30.

[10] GULATI R D. Zooplankton structure in the loosdrecht lakes in relation to trophic status and recent restoration measures[J]. Hydrobiologia, 1990, 191(1): 173-188.

[11] RADWAN S. The influence of some abiotic factors on the occurrence of rotifers of Łęzna and Włodawa Lake District[J]. Hydrobiologia, 1984, 112(2): 117-124.

[12] 曹方意, 夏 霆, 龙 建. 漏湖浮游藻类分布特性及水质评价[J]. 西南给排水, 2014, 36(5): 49-53.

【CAO F Y, XIA T, LONG J. Characteristics of phytoplankton distribution in Lake Gehu and water quality assessment[J]. Southwest Water & Wastewater, 2014, 36(5): 49-53.】

[13] 黄 峰, 李 勇, 潘继征, 等. 夏季富营养化漏湖中沉水植物群落重建及水质净化效果[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(10): 9-14, 28.

【HUANG F, LI Y, PAN J Z, et al. Reconstruction and water purification of submerged macrophytes community in eutrophicated Gehu Lake during summer[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(10): 9-14, 28.】

[14] 熊春晖, 张瑞雷, 季高华, 等. 江苏漏湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 927-936.

【XIONG C H, ZHANG R L, JI G H, et al. Community structure of macrozoobenthos and its relationship with

environmental factors in Lake Gehu, Jiangsu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 927 - 936.】

[15] 唐晟凯, 张彤晴, 孔优佳, 等. 太湖鱼类学调查及渔获物分析[J]. 水生生态学杂志, 2009, 2(6): 20 - 24.

【TANG S K, ZHANG T Q, KONG Y J, et al. Ichthyological survey and fish yield analysis of Lake Gehu[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(6): 20 - 24.】

[16] 陈立婧, 顾 静, 彭自然, 等. 太湖轮虫群落结构与水质生态学评价[J]. 动物学杂志, 2008, 43(3): 7 - 16.

【CHEN L J, GU J, PENG Z R, et al. The community structure of rotifer and ecological assessment of water quality of Lake Gehu[J]. Chinese Journal of Zoology, 2008, 43(3): 7 - 16.】

[17] 高 亚, 潘继征, 李 勇, 等. 江苏太湖北部区整治后浮游植物时空分布及环境因子变化规律[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 649 - 656.

【GAO Y, PAN J Z, LI Y, et al. Spatio-temporal distribution of phytoplankton and environmental factors in the north part of Lake Gehu (Jiangsu) after multi-treatment[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 649 - 656.】

[18] 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: 358 - 362.

【ZHANG Z S, HUANG X F. Research methods on freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991: 358 - 362.】

[19] VOIGT M, KOSTE W. Rotatoria: die rädertiere mitteleuropas: ein bestimmungswerk: überordnung monogononta[M]. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1978: 1 - 235.

[20] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961: 1 - 288.

【WANG J J. Fauna sinica of Chinese freshwater rotifera[M]. Beijing: Science Press, 1961: 1 - 288.】

[21] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国科学出版社, 2000: 72 - 79.

【HUANG X F. Survey, observation and analysis of lake ecology[M]. Beijing: Science Press, 2000: 72 - 79.】

[22] SLÁDEČEK V. Rotifers as indicators of water quality[J]. Hydrobiologia, 1983, 100(1): 169 - 201.

[23] 李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 169 - 176.

【LI G G, YU Z M. Community structure of rotifera and ecological assessment of water quality in Qiandao Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(2): 169 - 176.】

[24] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志-节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 79 - 273.

【JIANG X Z, DU N S. Chinese fauna-freshwater cladocera[M]. Beijing: Science Press, 1979: 79 - 273.】

-
- [25] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志-节肢动物门甲壳纲 淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 53 - 420.
- 【Crustacean Research Group, Institute of Zoology, Chinese Academy of Science. Chinese fauna-freshwater copepod[M]. Beijing: Science Press, 1979: 53 - 420.】
- [26] 国家环境保护总局. 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: 220 - 284.
- 【State Environmental Protection Administration. The monitor and analysis methods of water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002: 220 - 284.】
- [27] 葛家春, 盛建明. 溇湖浮游动物数量生物量动态研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(S): 142 - 145.
- 【GE J C, SHENG J M. Study on zooplankton dynamics for Gehu Lake[J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(S): 142 - 145.】
- [28] 陶 花, 潘继征, 沈耀良, 等. 溇湖沉水植物概况及退化原因分析[J]. 环境科技, 2010, 23(5): 64 - 68.
- 【TAO H, PAN J Z, SHEN Y L, et al. Overview and degradation reasons of submerged Macrophytes of Gehu Lake[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 23(5): 64 - 68.】
- [29] 汪院生. 溇湖水环境演变及其原因分析[J]. 水利规划与设计, 2013(8): 37 - 40, 55.
- 【WANG Y S. The aquatic environmental evolution and its reason analysis in Gehu Lake[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(8): 37 - 40, 55.】
- [30] MAY L. Rotifer occurrence in relation to water temperature in Loch Leven, Scotland[J]. Hydrobiologia, 1983, 104(1): 311 - 315.
- [31] HAVENS K E, BEAVER J R. Composition, size, and biomass of zooplankton in large productive Florida lakes[J]. Hydrobiologia, 2011, 668(1): 49 - 60.
- [32] HOFMANN W. The Influence of abiotic environmental factors on population dynamics in planktonic rotifers[J]. Archives of Hydrobiology Beih, 1977, 8: 77 - 83.
- [33] 饶利华, 吴芝瑛, 徐 骏, 等. 杭州西湖轮虫的群落结构及与水体环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2013, 25(1): 138 - 146.
- 【RAO L H, WU Z Y, XU J, et al. Relationship between environmental factors of the water and rotifer community structure in West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(1): 138 - 146.】
- [34] REYNOLDS C S. The ecology of freshwater phytoplankton[M]. London: Cambridge University Press, 1984: 37.

-
- [35] 祁 峰, 马燕武, 李 红, 等. 博斯腾湖枝角类群落结构特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3516 - 3522.
- 【QI F, MA Y W, LI H, et al. Cladocera in Bosten Lake: community characteristics and driving factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3516 - 3522. 】
- [36] 都 雪, 王齐东, 张超文, 等. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 269 - 276.
- 【DU X, WANG Q D, ZHANG C W, et al. Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(2): 269 - 276. 】
- [37] RHEE G Y. Effects of N: P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake[J]. Limnology and Oceanography, 1978, 23(1): 10 - 25.
- [38] 张毅敏, 段金程, 晁建颖, 等. 河口前置库系统在漏湖富营养化控制中的应用研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 273 - 277.
- 【ZHANG Y M, DUAN J C, CHAO J Y, et al. Application of estuary pre-dam to eutrophication control in Gehu Lake[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(3): 273 - 277. 】
- [39] 彭自然, 陈立婧, 江 敏, 等. 漏湖水质调查与富营养状态评价[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(3): 252 - 258.
- 【PENG Z R, CHEN L J, JIANG M, et al. Water quality investigation and eutrophication status evaluation in Gehu Lake[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(3): 252 - 258. 】
- [40] 李爱权, 宋晓兰. 漏湖富营养化进程及其综合整治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 85 - 87, 92.
- 【LI A Q, SONG X L. Eutrophication status of Gehu Lake and comprehensive control countermeasures[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8): 85 - 87, 92. 】
- [41] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87 - 91.
- 【KUANG Q J, MA P M, HU Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(2): 87 - 91. 】