

# 五里湖人工基质上着生藻类群落结构及其影响因子研究

周彦锋, 周游, 尤洋

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 江苏 无锡 214081)

**摘要:**对五里湖人工基质上着生藻类进行了初步研究,以期了解五里湖着生藻类群落结构生态特征并丰富该湖水生生物研究。2012年5月使用载玻片作为人工基质,采用挂片收集法对五里湖着生藻类建群模式进行为期4周的研究,同步测定水体理化指标用以分析建群过程的影响因子。结果表明:建群过程共鉴定出藻类5门35属51种,以硅藻门为优势种类,共12属26种,占总数的51.0%;第一优势种为瞳孔舟形藻(*Navicula pupula*),优势度 $Y=0.439$ ;群落密度变化范围为 $4.96 \sim 23\,870.63$ 个/ $\text{mm}^2$ ,平均值为 $(10\,682.47 \pm 8\,365.09)$ 个/ $\text{mm}^2$ ;生物量变化范围为 $9.30 \times 10^{-6} \sim 7.10 \times 10^{-2}$  mg/ $\text{mm}^2$ ,平均值为 $(3.16 \pm 2.50) \times 10^{-2}$  mg/ $\text{mm}^2$ ;两者的第1次峰值均出现在第11天。群落香农-威纳指数( $H$ )变幅 $1.54 \sim 2.57$ ,平均值 $2.14 \pm 0.29$ ,均匀度指数( $J$ )变幅 $0.49 \sim 1$ ,平均值 $0.69 \pm 0.11$ ,丰富度指数( $D$ )变幅 $1.24 \sim 2.52$ ,平均值 $1.91 \pm 0.32$ 。多样性指数评价并结合水质分析显示,研究水域处于中度富营养水平,总体为中度污染。根据藻类群落密度和生物量的变化趋势,五里湖着生藻类群落发展过程也可划分为延迟期、指数生长期、成熟衰退期和再次生长期等4个阶段;Pearson相关性分析显示,水体理化指标中TP、TN、SD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为群落发展的主要影响因子。

**关键词:**着生藻类;群落结构;环境因子;人工基质;五里湖

**中图分类号:**S932.7, Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)02-0057-08

五里湖,又称蠡湖,是太湖梅梁湾东北部伸入无锡市的一片水域,东西长约6.1 km,南北宽0.3~1.5 km,面积约8.6  $\text{km}^2$ ,是典型浅水城郊湖泊(杨红军等,2008)。20世纪80年代以来,随着人类活动增强,其遭受的污染日益严重。至90年代初,湖内大型水生植物几乎绝迹,浮游植物大量繁殖,大型底栖动物也基本消失(李文朝,1996)。本世纪初,五里湖蓝藻水华频发,成为太湖水体富营养化最为严重的水域(孟顺龙等,2009)。自2003年以来,无锡市政府对其实施生态恢复工程,采取了退渔还湖、全湖清淤、沉水植被重建等一系列综合治理措施,使水体状态得到极大改善,水生态系统得以初步恢复(俞海桥等,2007)。

着生藻类(periphytic algae),或称周丛藻类,是指生长于水中各类基质表面的藻类(陈重军等,2009),其种群多,分布广,且具有巨大的生物膜面积,能与水体迅速实现物质交换(马沛明,2005)。着生藻类的萌发、发展和成熟会在一定空间上逐步

发展形成一个成熟、稳定的群落(韩大勇等,2011)。该群落是一个小而简单的模式生物系统,周转率快(况琪军等,2007),对水体营养状况变化响应迅速,尤其是在应答水体中氮、磷等无机营养盐变化方面表现灵敏(顾詠洁等,2005),因此被广泛作为水体富营养化和环境变化的指示生物。此外,着生藻类营固着生活,可收获性强,具有工程化应用的潜力。国外已开发出利用着生藻类进行水体净化工程系统,其中较成熟的有藻丛刷系统(ATS)、着生藻类-生物膜系统(PBS)、着生藻类水产养殖系统(PAS)等(Mulbry et al,2008;Komer & Vermaat,1998;Rectenwald & Drenner,2000)。本研究对五里湖人工基质上着生藻类进行了初步研究,以期了解五里湖着生藻类群落结构生态特征并丰富该湖水生生物研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 地点选择与人工基质制作

选择五里湖宝界桥附近淤泥底质、着生藻类容易发生的沿岸区域为实验地点。采用实验室常用载玻片作为人工挂片,规格为54 mm × 26 mm,用透明胶带将两端粘起,再用细鱼线将两端系住,使其能被另一根约2 m的细线吊起,示意图见图1。载玻片实验前洗净,用蒸馏水浸泡48 h,以减少系统误差。

收稿日期:2015-11-15

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303056-02);江苏省自然科学基金(BK2011183)。

作者简介:周彦锋,1979年生,男,助理研究员,研究方向为水生生物学。E-mail:zhouyf@ffrc.cn

通信作者:尤洋,1967年生,男,研究员。E-mail:yoyu@ffrc.cn

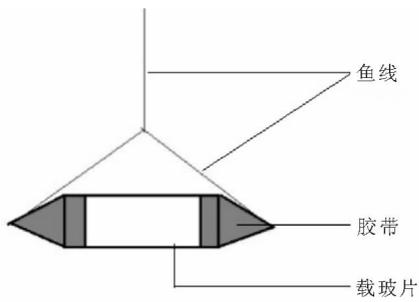


图1 人工基质示意

Fig. 1 Schematic diagram of the artificial substrate made using glass slides

## 1.2 样品采集与处理

选取制作好的人工基质约 100 片,天气良好时将细线的自由端用订书钉固定在木桥上,使人工基质垂直伸入水面以下 10 ~ 20 cm,放置工作在同一日完成。次日起开始采样观察,每日随机抽取 3 片人工基质用于镜检。用硬毛牙刷将基质表面的藻类刮至 200 mL 烧杯中,用蒸馏水少量多次冲洗基质和硬毛牙刷,一并注入烧杯,现场加入鲁哥氏液固定并定容至 500 mL,带回实验室静置 24 h 后浓缩至 50 mL 供镜检。硅藻的预处理参照邓培雁等(2015)的方法,每片镜检视野数不少 200 个。种类鉴定参照《中国淡水藻类》(胡鸿钧等,2006)、《中国淡水生物图谱》(韩茂森等,1995)和《淡水生物学》(大连水产学院,1983)进行,按种计数。藻类密度取 2 片基质平均值作为实验结果。若 2 片计数结果相差 15% 以上,则进行第 3 片计数,取密度相近的 2 片平均作为最终密度。生物量计算采用细胞体积转化法计算单位面积内藻类生物量,假定藻类比重为 1。

pH、水温(T)和透明度(SD)使用 HACH HQ 11D 型 pH 计和塞氏盘等便携式仪器现场测定。总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素 a(Chl-a)等理化指标,参照《水和废水监测分析方法(第四版)》(国家环境保护总局,2002 a)采集,并按《中华人民共和国地表水环境质量标准》(国家环境保护总局,2002 b)进行平行样测定。

## 1.3 数据统计与分析

选用 Shannon-Weiner 多样性指数( $H$ ) (Shannon & Weaver, 1963)、Pielou 均匀度指数( $J$ ) (Pielou, 1966)、Margalef 丰富度指数( $D$ ) (Soballe & Kimmel, 1987)、Menaughton 优势度指数( $Y$ ) (杨关铭等, 1998)和综合营养状态指数 TLI( $\Sigma$ ) (王明翠等, 2002)对着生藻类群落生态特征和水质状态进行评价,相关计算公式如下:

$$H = - \sum P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J = H/H_{\max} \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (3)$$

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (4)$$

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j TLI(j) \quad (5)$$

式中: $P_i$  为第  $i$  种的个体数与总个体数的比值,  $H_{\max} = \log_2 S$ ,  $n_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为所有个体的总个体数,  $f_i$  为该种的站位出现频率,  $N$  为样品中所有物种的总体个数,  $S$  为样品中的藻类物种总数,  $W_j$  为第  $j$  种参数的相关权重, TLI( $j$ ) 代表第  $j$  种参数的营养状态指数。TLI( $j$ ) 分级标准: TLI( $\Sigma$ )  $\leq 30$ , 贫营养;  $30 < TLI(\Sigma) \leq 50$ , 中营养;  $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ , 轻度富营养;  $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ , 中度富营养; TLI( $\Sigma$ )  $> 70$ , 重度富营养。数据统计分析采用 SPSS 20.0 平台进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体理化指标

研究期间水体理化指标变化见表 1。水温 17.4 ~ 26.1°C, 总体呈上升趋势; pH 7.87 ~ 8.54, 整体呈下降趋势; 透明度(SD) 45 ~ 55 cm, 无明显变化; 总氮(TN) 1.73 ~ 1.87 mg/L, 呈升高趋势; 总磷(TP) 0.055 ~ 0.066 mg/L, 无显著变化; 氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 0.23 ~ 0.29 mg/L, 整体有轻微升高趋势; 磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P) 0.002 ~ 0.005 mg/L, 变动较为显著但规律不明显; 高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>) 4.25 ~ 4.65 mg/L, 逐渐增大; 叶绿素 a(Chl-a) 21.45 ~ 38.42  $\mu$ g/L, 也呈升高趋势。结果显示, 该水域水体综合营养状态指数变化范围为 52.83 ~ 55.43, 平均值为 54.26  $\pm$  6.81, 据分级标准评定为轻度富营养化, 水质为轻度污染。

### 2.2 群落结构及优势种

研究期间共鉴定着生藻类 5 门 35 属 51 种。其中硅藻门最多, 12 属 26 种, 占藻类总数的 50.98%; 绿藻门次之, 17 属 18 种, 占 35.29%; 蓝藻门 4 属 4 种, 占 7.84%; 隐藻门 1 属 2 种, 占 3.92%; 裸藻门最少, 仅 1 属 1 种, 占 1.96%。种类构成见表 2。

研究过程中, 藻种类数变化趋势为: 第 1 ~ 13 天, 藻种类数逐渐增加, 并在第 13 天达最大值, 为 32 种; 第 13 ~ 19 天, 藻种类数呈下降趋势, 至第 19 天种数减少至 19 种, 降幅为 40.63%; 第 19 天至研究末期, 种类数小幅增加之后较为稳定。

表 1 水体理化指标变化趋势

Tab. 1 Variation of water quality parameters in Wuli Lake

时间	T/ ℃	pH	SD/ cm	TN/ mg · L <sup>-1</sup>	TP/ mg · L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ mg · L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/ mg · L <sup>-1</sup>	COD <sub>Mn</sub> / mg · L <sup>-1</sup>	Chl-a/ μg · L <sup>-1</sup>
day1	20.6	8.42	45	1.78	0.060	0.24	0.002	4.34	22.08
day2	20.3	8.27	45	1.78	0.063	0.23	0.003	4.30	21.45
day3	20.3	8.39	48	1.79	0.055	0.23	0.003	4.33	21.47
day4	19.4	8.35	46	1.75	0.061	0.24	0.003	4.35	22.68
day5	20.7	8.23	51	1.76	0.064	0.24	0.003	4.30	22.71
day6	21.6	8.20	55	1.75	0.058	0.25	0.004	4.25	22.55
day7	24.3	8.18	53	1.73	0.063	0.25	0.003	4.26	23.69
day8	24.5	8.18	46	1.74	0.064	0.25	0.002	4.37	23.61
day9	19.6	8.25	48	1.78	0.064	0.26	0.002	4.29	22.68
day10	22.3	8.33	50	1.80	0.064	0.25	0.003	4.26	22.79
day11	23.1	8.26	47	1.81	0.065	0.24	0.003	4.30	24.78
day12	19.8	8.39	45	1.81	0.065	0.24	0.003	4.34	24.89
day13	19.3	8.40	48	1.83	0.065	0.24	0.004	4.37	25.68
day14	17.4	8.48	46	1.83	0.064	0.26	0.003	4.32	25.54
day15	20.6	8.54	50	1.83	0.066	0.26	0.004	4.38	24.62
day16	24.1	8.35	52	1.82	0.066	0.26	0.004	4.40	25.87
day17	25.2	8.20	48	1.82	0.065	0.25	0.004	4.41	26.89
day18	26.1	8.12	46	1.84	0.065	0.25	0.003	4.45	27.72
day19	24.3	8.08	45	1.84	0.066	0.26	0.005	4.47	27.88
day20	25.6	7.92	47	1.85	0.066	0.25	0.005	4.49	28.91
day21	21.7	7.90	48	1.84	0.064	0.26	0.004	4.53	28.86
day22	22.4	7.87	50	1.84	0.065	0.27	0.003	4.55	32.67
day23	22.1	7.96	48	1.83	0.063	0.27	0.004	4.52	34.87
day24	20.6	8.03	52	1.84	0.065	0.27	0.004	4.50	34.52
day25	22.1	8.20	48	1.83	0.057	0.26	0.005	4.52	35.68
day26	19.2	8.22	46	1.85	0.065	0.25	0.004	4.49	38.42
day27	20.4	8.35	46	1.87	0.056	0.29	0.003	4.49	37.66
day28	21.2	8.33	51	1.86	0.066	0.26	0.004	4.65	37.54
均值	21.7 ± 2.2	8.23 ± 0.17	48 ± 6	1.81 ± 0.04	0.063 ± 0.003	0.25 ± 0.01	0.004 ± 0.001	4.40 ± 0.14	27.45 ± 5.46

研究早期,基质上出现的主要是一些小型藻类,如瞳孔舟形藻、四尾栅藻和色球藻等;第3天逐渐出现意大利直链藻、弱细颤藻等中型藻类;第12天开始出现优美胶毛藻和优美毛枝藻等大型藻类。个别藻种呈“点状发生”,仅在某天或某几天出现,如美丽舟形藻仅在第3天出现,中华盒形藻和卵形双菱藻只在第13天出现,湖生卵囊藻也只在第10、26天出现。藻种类数变化情况如图2。

以优势度  $Y \geq 0.02$  定为优势种,建群过程共鉴定优势种类 10 种,分别为意大利直链藻、双头针杆藻、双头舟形藻、瞳孔舟形藻、胡斯特桥弯藻、缢缩异极藻、缢缩异极藻头状变种、微细异极藻、线形菱形藻和扁圆卵形藻,均隶属于硅藻门。其中瞳孔舟形藻为第1优势种,优势度  $Y = 0.439$ ;双头舟形藻为第2优势种,优势度  $Y = 0.099$ 。统计结果显示,硅藻门藻类在整个研究过程中占据绝对优势,且五里湖中瞳孔舟形藻是最易在玻璃基质上附植的藻种。

以藻类群落为研究对象来看,各研究日藻类优势种类有所不同。前2天,种类、数量稀少,并未出

现绝对优势种;第3~4天,双头针杆藻为第1优势种,瞳孔舟形藻为第2优势种;自第5天起,瞳孔舟形藻取代双头针杆藻成为第1优势种并持续至研究结束;第7天,微细异极藻取代双头针杆藻成为第2优势种;而在第15天,双头舟形藻又取代微细异极藻成为第2优势种并持续至研究末期。优势种变化情况见表3。

### 2.3 密度与生物量

结果显示,研究期间藻类密度变化范围为  $4.96 \sim 23\ 807.63$  个/ $\text{mm}^2$ ,平均值为  $(10\ 682.47 \pm 8\ 365.09)$  个/ $\text{mm}^2$ ,最小值出现在第2天,最大值出现在第11天。第1~11天,密度呈上升趋势,先慢后快,其中第1~9天的日均增幅为  $157.89$  个/ $\text{mm}^2$ 、第9~11天的日增幅达  $11\ 193.30$  个/ $\text{mm}^2$ ;第12~13天密度大幅下降,可能与第11天夜间恶劣天气有关;第14~19天,密度再次大幅增长;第20~24天呈下降趋势;第24天至研究结束,密度稍有增加后趋于稳定。

表2 五里湖着生藻类群落结构组成

Tab.2 Species composition of periphytic algae in Wuli Lake

种 类	种 类
<b>硅藻门 Bacillariophyta</b>	简单衣藻 <i>Chlamydomonas simplex</i>
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	粘四集藻 <i>Palmella mucosa</i>
意大利直链藻* <i>Melosira italica</i> (0.027)	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	优美胶毛藻 <i>Chaetophora elegans</i>
钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	粗状鼓藻 <i>Cosmarium crassumscut</i>
双头针杆藻* <i>Synedra amphicephala</i> (0.055)	韦氏藻 <i>Westella botryoides</i>
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	脆弱刚毛藻 <i>Cladophora fracta</i>
细布纹藻 <i>Gyrosigma kiitzingii</i>	尾丝藻 <i>Uronema confervicolum</i>
尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>
双头舟形藻* <i>Navicula bicapitellata</i> (0.099)	优美毛枝藻 <i>Stigeoclonium amoenum</i>
美丽舟形藻 <i>Navicula spectabilis</i>	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricanda</i>
线形舟形藻 <i>Navicula graciloides</i>	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>
瞳孔舟形藻* <i>Navicula pupula</i> (0.439)	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>
胡斯特桥弯藻* <i>Cymbella hustedtii</i> (0.024)	四角藻 <i>Tetraedron</i> sp.
细小桥弯藻 <i>Cymbella pusilla</i>	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i>
披针桥弯藻 <i>Cymbella lanceolata</i>	空球藻 <i>Pandorinamorum</i>
纤细桥弯藻 <i>Cymbella gracilis</i>	月牙藻 <i>Selenastrum dibraianum</i>
缢缩异极藻* <i>Gomphonema constrictum</i> (0.021)	单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>
缢缩异极藻头状变种* <i>Gomphonema constrictum</i> var. <i>capitata</i> (0.024)	<b>蓝藻门 Cyanophyta</b>
微细异极藻* <i>Gomphonema parrulum</i> (0.035)	针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis raphioides</i>
线形菱形藻* <i>Nitzschia linearis</i> (0.020)	弱细颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>
新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.
扁圆卵形藻* <i>Cocconeis placentula</i> (0.023)	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>
卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>	<b>隐藻门 Cryptophyta</b>
中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>
粗壮双菱藻 <i>Surirella robusta</i>	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>
卵形双菱藻 <i>Surirella ovata</i>	<b>裸藻门 Euglenophyta</b>
<b>绿藻门 Chlorophyta</b>	尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuris</i>

注:标\*为优势种,()内为优势度。

Note: The symbol \* means dominated species, and values in the parentheses represent their dominance.

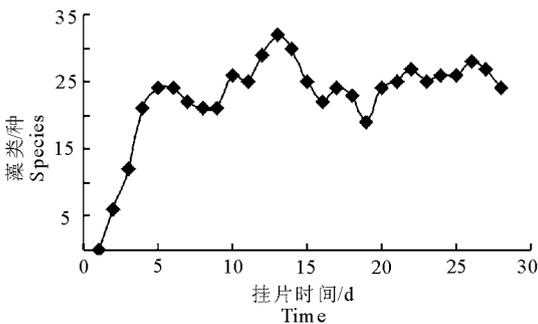


图2 着生藻类藻种类数变化趋势

Fig.2 Variation in the number of periphytic algae species during the experiment

藻类群落生物量变化范围为  $9.30 \times 10^{-6} \sim 7.10 \times 10^{-2} \text{ mg/mm}^2$ , 平均值为  $(3.16 \pm 2.50) \times 10^{-2} \text{ mg/mm}^2$ , 最小值出现在第2天, 最大值出现在第22天, 且生物量的变化趋势与密度的基本一致。各门藻类的密度和生物量变化趋势分别见图3和图4。结果显示, 在研究期内硅藻门在藻类群落密度、

生物量中始终占据绝对优势, 且总量趋于稳定; 绿藻门和蓝藻门次之; 隐藻门和裸藻门最少。

## 2.4 多样性与水质状态评价

结果显示, 藻类群落多样性指数 ( $H$ ) 变化范围为  $1.54 \sim 2.57$ , 平均为  $2.14 \pm 0.29$ 。根据评价标准,  $1 < H < 3$ , 表明水体状态为中度污染。均匀度指数 ( $J$ ) 相对较高, 变化区间为  $0.49 \sim 1$ , 平均为  $0.69 \pm 0.11$ , 最大值出现在第2天, 但由于建群初期种类很少, 表征意义不大, 最小值出现在第28天。根据评价标准,  $0.5 < P < 0.8$ , 表明水体为轻度或无污染。丰富度指数 ( $D$ ) 变化范围是  $1.24 \sim 2.52$ , 平均值为  $1.91 \pm 0.32$ 。根据评价标准,  $1 < D < 3$ , 水体为中度污染。综合3项多样性指数的评价结果, 评价该水域水体处于中度污染状态, 这与综合营养状态指数评价结果显示的轻度污染略有出入, 表明运用不同评价标准得到的评价结果有可能不同。各多样性指数变化趋势见图5。

表 3 优势种变化趋势

Tab.3 Changes of the dominant species in Wuli Lake

时间	day 3~4	day 5~6	day 7~14	day 15~28
第 1 优势种	双头针杆藻 (0.309)	瞳孔舟形藻 (0.294)	瞳孔舟形藻 (0.362)	瞳孔舟形藻 (0.505)
第 2 优势种	瞳孔舟形藻 (0.149)	双头针杆藻 (0.141)	微细异极藻 (0.117)	双头舟形藻 (0.126)

注:()内为优势度。

Note: Values in the parentheses represent their dominance.

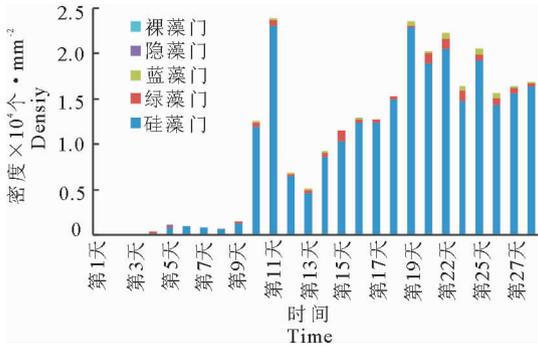


图 3 不同种类密度累加

Fig.3 Periphytic algae density on each day of the experiment

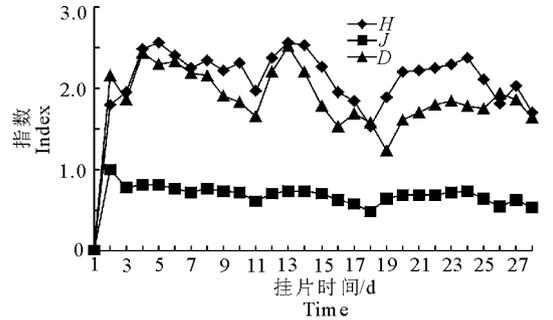


图 5 着生藻类生物多样性变化趋势

Fig.5 Daily variations in the Shannon-Wiener index ( $H$ ), Pielou index ( $J$ ) and Margalef index ( $D$ ) for the periphytic algae community

2.5 对水环境因子的响应关系

运用 SPSS 20.0 对藻类密度、生物量、种类数等与水温(T)、pH、磷酸盐( $PO_4^{3-}-P$ )等水质理化指标进行 Pearson 相关性分析,相关性矩阵见表 4。

着生藻类密度与藻类生物量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),二者分别与水环境因子中的  $COD_{Mn}$ 、SD、TN、TP 和  $PO_4^{3-}-P$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ );与  $NH_4^+-N$  呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与水体 pH 呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与其他水体理化指标的相关性不显著。藻种类数与 TP、 $NH_4^+-N$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 SD、TN 显著正相关( $P < 0.05$ )。

图 4 不同种类生物量累加

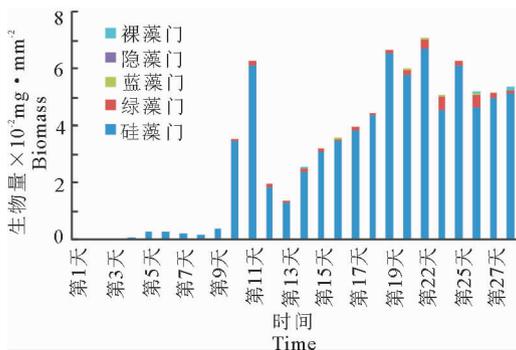


Fig.4 Periphytic algae biomass on each day of the experiment

表 4 五里湖着生藻类密度、生物量及藻种数与水环境因子的相关性

Tab.4 Correlations of periphytic algae density, biomass and species number with water quality parameters in Wuli Lake

指标	藻密度	生物量	藻种数	T	pH	$COD_{Mn}$	SD	TN	TP	$NH_4^+-N$	$PO_4^{3-}-P$	Chl-a
藻密度	1											
生物量	0.994 **	1										
藻种数	0.435 *	0.438 *	1									
T	0.170	0.153	0.032	1								
pH	-0.413 *	-0.418 *	-0.020	-0.512 **	1							
$COD_{Mn}$	0.778 **	0.811 **	0.294	0.160	-0.562 **	1						
SD	0.700 **	0.719 **	0.418 *	-0.247	-0.620	0.709 *	1					
TN	0.772 **	0.796 **	0.426 *	-0.070	-0.141	0.742 **	0.607 **	1				
TP	0.537 **	0.528 **	0.498 **	0.199	0.024	0.415 *	0.296	0.675 **	1			
$NH_4^+-N$	0.404 *	0.446 *	0.602 **	0.049	-0.283	0.583 **	0.646 **	0.482 **	0.298	1		
$PO_4^{3-}-P$	0.604 **	0.622 **	0.267	0.122	-0.205	0.596 **	0.340	0.644 **	0.529 **	0.291	1	
Chl-a	0.060	0.084	-0.008	-0.294	0.100	0.029	0.067	0.003	-0.052	-0.158	-0.007	1

注:\*\*,在 0.01 水平(双侧)显著相关;\* ,在 0.05 水平(双侧)显著相关。

Note: \*, significant correlation (bilateral,  $P < 0.05$ ); \*\*, highly significant correlation (bilateral,  $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 着生藻类群落生态学特征

着生藻类泛指附着在水体中各种基质表面的藻类,相较于浮游植物而言,其营固生生活。着生藻类种类多,分布广泛,是淡水生态系统中重要的初级生产者,是水域生态系统中重要的组分之一(吴述园等,2013),其拥有庞大的生物膜表面积,与水体物质交换迅速(梁霞,2007)。

本研究过程中共鉴定藻类5门35属51种,以硅藻门为主要优势种类,占51.0%,其次为绿藻门,占35.3%。陈家长等(2009)对五里湖的研究结果显示,共鉴定浮游植物7门64种,绿藻门占据绝对优势。对比显示五里湖着生藻类和浮游藻类在群落组成上存在一定差异,这可能是因为2种类型藻类的生活方式不同。硅藻门藻类附着能力较强,有些可分泌细胞胶质利于附植(刘彩等,2013),更易着生成优势类群,这有助于解释本研究中鉴定的优势种都为硅藻门。袁信芳等(2006)对太湖不同类型湖区着生藻类的调查结果显示,太湖着生藻类在种类分布上以绿藻门最多,但各采样点的优势种类也都集中在硅藻门,这可能与其调查周期较长有关,长周期调查可以鉴定到更丰富种类。

有研究表明,人工基质经过2~4周的培养,可代表天然基质上的着生藻类群落(Collins & Weber, 1978)。本研究选用统一规格的载玻片作为人工基质,来研究五里湖着生藻类群落发展过程中群落结构特征,有效规避了天然基质间差异对建群过程的影响。裴国凤(2006)研究认为,着生藻类在不同条件下的发展过程,基本上可以较清晰地划分为4个阶段。延迟期:生物量低,增加缓慢;指数生长期:生物量在短时间内迅速增长,并达到最高峰值;成熟衰退期:生物量明显减少;二次生长期:生物量再次呈上升趋势并趋于稳定。这一过程与微生物的Logistic生长曲线类似。结合本研究结果(图2),第1~9天为延迟期,密度、生物量增至 $14.21 \times 10^2$ 个/ $\text{mm}^2$ 和 $0.39 \text{ mg}/\text{mm}^2$ ;第9~11天为指数生长期,密度和生物量均迅速增加,并达到峰值;而在第12~13天急剧下降,在第14~19天再次快速增长并达到峰值,可能是由于第11天夜间恶劣天气形成的物理扰动对其产生了较大影响,致使密度和生物量均骤降;第20~24天群落进入成熟衰退期,第24天之后群落进入二次生长期并趋于稳定。根据2次峰值的大小几乎一致的情况可以推测本次建群过程群落经历

了2次指数生长期。

裴国凤(2006)认为群落的生物多样性与发展期间的群落演替并不具有相同的规律,因多样性会受多种因素的影响,如培养时间、取样频率以及群落的组成、结构和演替等。本研究中藻类群落的Shannon-Weiner多样性指数( $H$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和Margalef丰富度指数( $D$ )均表现为整体下降的趋势,可能是由于在群落形成早期,藻种少且密度低,此时的多样性指数并不能较好地表征群落生态特征;研究后期,各指数趋于稳定,表明群落组成和结构已相对稳定,人工基质上着生过程,本就是环境筛选藻类的过程,在人工基质、自然环境和生物竞争等多种因素的作用下,最终留在基质上稳定生长的藻类群落才是最适合在该环境下生长的藻类。且此阶段藻类群落生物量大,若此时对着生藻类进行适当收获,可有效移除水体中氮、磷等营养盐类,这正是着生藻类应用于工程化生态修复的重要原因之一。

#### 3.2 影响着生藻类群落结构的环境因子

着生藻类群落发展过程会受到多种因素的干扰,例如类型基质和表面粗糙程度等会导致藻类着生难易程度存在差异,从而影响群落构成。念宇等(2009)选取不同天然基质和人工基质作为采样工具,结果表明不同基质上着生藻类的种类组成基本相似,且均以硅藻门和绿藻门为主,这与本研究中群落主要由硅藻和绿藻构成的结果较为一致。

选用不同基质,藻类群落达到生物量峰值所需的时间有可能不同,在本研究中藻类密度和生物量达到首次峰值的时间为第11天。关于浮游植物群落结构及其影响因子的研究已有大量报道,普遍认为温度、pH、氮磷营养盐浓度等水质因子是其关键影响因素,而有关着生藻类群落影响因子的报道则相对较少,宋玉芝等(2014)研究发现不同氨氮浓度会对藻类群落的优势种类产生影响,在本研究结果中,水环境因子中SD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等均与藻类密度或生物量呈显著或极显著相关关系,这表明着生藻类群落发展过程中与水质理化指标密切相关,这正是着生藻类用作水体健康监测指示生物的原因所在。结果还显示,二者与水体pH呈显著负相关,这可能是由于着生藻类的大量增殖,藻类呼吸作用所产生的 $\text{CO}_2$ 使水体pH降低有关,具体原因仍有待进一步研究。对于透明度(SD),其应主要是通过改变光照强度来影响藻类光合作用,从而影响藻类群落组成。裴国凤(2006)研究表明水体的富营养程度对藻类建群周期有影响,

在营养水平相对较高的水体中,着生藻类建群延迟期短,生物量高;且达到生物量峰值的时间要短,这可能是由于刚刚“接种”到新基质的藻类在高营养水体中更易获得生长增殖所需的营养物质且生长茂盛。物理扰动也可影响着生藻类群落发展进程。本研究中,经历第 11 天的不良天气后,密度和生物量均锐减,而第 22 天再次遇下雨天气,却未受影响。由此推测,着生藻类群落发展早期结构不够稳定,易受物理扰动等因素的影响;而在研究后期群落结构较稳定,可能已具备了一定的抗干扰能力。

### 参考文献

陈重军,韩志英,朱荫湄,等,2009. 周丛藻类及其在水质净化中的应用[J]. 应用生态学报,20(11):2820-2826.

陈家长,孟顺龙,尤洋,等,2009. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报,18(4):1358-1367.

邓培雁,张婉,王旭涛,等,2015. 水质对东江流域附着硅藻群落的影响研究[J]. 生态学报,35(6):1852-1861.

大连水产学院,1983. 淡水生物学[M]. 北京:农业出版社:5-83.

顾洁洁,王秀芝,廖祖荷,2005. 利用着生生物群落动态变化监测水质的研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (4):87-94,109.

国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社.

国家环境保护总局,2002. 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社.

胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类[M]. 北京:科学技术出版社.

韩茂森,束蕴芳,1995. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:海洋出版社:2-130.

韩大勇,杨永兴,杨杨,等,2011. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式[J]. 生态学报,31(20):5946-5955.

况琪军,凌晓欢,马沛明,等,2007. 着生刚毛藻处理富营养化湖泊水[J]. 武汉大学学报(理学版),53(2):213-218.

李文朝,1996. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变[J]. 湖泊科学,8(Z1):37-45.

梁霞,2007. 周丛藻类环境响应与水质处理应用研究[D]. 上海:华东师范大学.

刘彩,刘道辰,陈诗越,等,2013. 附着硅藻的研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),26(3):47-51.

马沛明,2005. 利用着生藻类去除 N、P 营养物质的研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所).

孟顺龙,陈家长,范立民,等,2009. 2007 年太湖五里湖浮游植物生态学特征[J]. 湖泊科学,21(6):845-854.

念宇,韩耀宗,杨再福,2009. 不同基质上着生生物群落生态学特性比较研究[J]. 环境科技,22(5):14-17.

裴国凤,2006. 淡水湖泊底栖藻类的生态学研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所).

宋玉芝,赵淑颖,杨美玖,等,2014. 氨氮浓度及基质对附着藻类群落组成的影响[J]. 环境科学学报,34(5):1173-1177.

吴述园,葛继稳,苗文杰,等,2013. 三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素[J]. 生态学报,33(21):7023-7034.

王明翠,刘雪芹,张建辉,2002. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测,18(05):47-49.

杨红军,2008. 五里湖湖滨带生态恢复和重建的基础研究[D]. 上海:上海交通大学.

俞海桥,方涛,夏世斌,等,2007. 不同生态修复措施下太湖西五里湖沉积物氮磷形态的时空分布[J]. 湖泊科学,19(6):683-689.

杨关铭,何德华,王春生,1998. 浙江省海岛海域环境生态特征 I. 浮游动物种类优势度与水体生态性质[J]. 海洋环境科学,17(4):48-53.

袁信芳,施华宏,王晓蓉,2006. 太湖着生藻类的时空分布特征[J]. 农业环境科学学报,25(4):1035-1040.

Collins G B, Weber C I,1978. Phycoperiphyton as indicators of water quality [J]. Tran Amer Microsc Soc, (Algae) 97(1):36.

Komer S, Vermaat J E,1998. The relative importance of *Lemna gibba* L, bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater [J]. Water Research,32:3651-3661.

Mulbry W W, Kondrad S L, Pizarro C, et al, 2008. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers [J]. Bioresource Technology,99:8137-8142.

Pielou E C, 1966. The measurements of diversity in different types of biological collections [J]. Journal of Theoretical Biology, (13):131-144.

Rectenwald L L, Drenner R W, 2000. Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system [J]. Environmental Science & Technology,34:522-526.

Shannon C E, Weaver W, 1963. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: Univ of Illinois Press.

Soballe D M, Kimmel B L, 1987. A large-scale comparison of factor influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes and impoundments [J]. Ecology,68(6):1943-1954.

## Community Structure and Factors Affecting Periphytic Algae on an Artificial Substrate in Wuli Lake

ZHOU Yan-feng, ZHOU You, YOU Yang

(Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, P. R. China)

**Abstract:** Wuli Lake is an extension of Meiliang Bei, Taihu Lake in Wuxi City and is a typical shallow urban lake. In May, 2012, we conducted a four-week preliminary investigation of periphytic algae colonization in Wuli Lake using glass slides as an artificial substrate. The aim of the study was to better understand ecological characteristics of the periphytic algae community and add to the research base on aquatic organisms in Wuli Lake. On day 1 of the experiment, 100 glass slides were placed horizontally into the water at a depth of 10–20 cm. Beginning on day 2, three glass slides were randomly collected each day and all algae on the slide was used for species identification and biomass determination. Physiochemical parameters were measured daily in the study area and included chlorophyll-a, pH, water temperature, Secchi disk depth (SD), permanganate index ( $COD_{Mn}$ ), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). Results were used to analyze the relationship of water parameters with the periphytic algae community. A total of 51 periphytic algae species from 35 genera and 5 phyla were identified, dominated by diatoms (26 species, 12 genera and 51.0% of the total periphytic algae species). The most dominant species was *Navicula pupula*, with a dominance of 0.439. The range of periphytic algae community density was 4.96–23 870.63 ind/mm<sup>2</sup> with an average value of (10 682.47 ± 8 365.09) ind/mm<sup>2</sup>. The community biomass range was 9.30 × 10<sup>-6</sup>–7.10 × 10<sup>-2</sup> mg/mm<sup>2</sup> with the average value of (3.16 ± 2.50) × 10<sup>-2</sup> mg/mm<sup>2</sup>. The first peak in community density and in biomass occurred on day 11. The ranges of the Shannon-Wiener index (*H*), Pielou evenness index (*J*) and Margalef index (*D*) were 1.54–2.57, 0.49–1.00 and 1.24–2.52, with average values of (2.14 ± 0.29), (0.69 ± 0.11) and (1.91 ± 0.3), respectively. Water quality in the study area was mesotrophic and moderately polluted, as indicated by the diversity index of periphytic algae community and the water quality parameters. Based on variations in density and biomass of the periphytic algae, the colonization process of periphytic algae in Wuli Lake can be divided into four stages: the lag phase, exponential growth phase, mature-decline phase and the secondary growth phase. Pearson correlation analysis shows that TP, TN, SD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were the major environmental factors affecting development of periphytic algae community.

**Key words:** periphytic algae; community structure; environmental factors; artificial substrate; Wuli Lake