

氨氮浓度对附植藻类在菹草上定植及演替的影响

宋玉芝, 杨 旻, 杨美玖, 赵淑颖, 王 敏

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要:为了更好地认识附植藻类群落在水体富营养化过程中的定植及群落演替规律,利用显微计数法,通过室内静态模拟实验,研究了水体不同氨氮水平对太湖常见沉水植物菹草上附植藻类的影响。结果表明:附植藻类在不同氨氮浓度下建群速度和时间是不同的,并且不同的氨氮浓度会改变附植藻类的群落结构,最终演变成低浓度下以硅藻门为绝对优势种,高浓度下以绿藻门为优势种的局势;某些附植藻类只在特定的氨氮环境下表现出优势,如绿藻门的新月藻只在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低浓度组和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高浓度组才表现出优势,而硅藻门的针杆藻只在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的中浓度组表现出优势;低浓度范围内营养盐的增加会促进附植藻类生物量的积累,但过高则会抑制生物量;中等浓度的氨氮营养盐中附植藻类的生物量最大,此时的种类也最多。该研究表明氨氮营养盐对附植藻类的群落演替影响显著,附植藻类或许是沉水植物衰退的一个重要因素。

关键词:氨氮浓度;附植藻类;优势种;菹草

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)02-0375-08 doi:10.11654/jaes.2014.02.024

Response of Colonization and Community Succession of Epiphytic Algae on *Potamogeton Crispus* L. to Ammonia Loads

SONG Yu-zhi, YANG Min, YANG Mei-jiu, ZHAO Shu-ying, WANG Min

(College of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Science Information & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To better understand colonization process and community succession of epiphytic algae during the water eutrophication, a static incubation experiment and macroscopic counting method were used to investigate the effects of increasing ammonia loads on epiphytic algae attaching to common submerged macrophyte *Potamogeton Crispus* L. of Taihu. The results showed that colonization process and community composition of epiphytic algae varied with ammonia levels. The climax succession showed that *Bacillariophyta* was dominated at low ammonia concentrations and *Chlorophyta* prevalent at high ammonia concentrations in epiphytic algae assembly. In addition, some dominant species of epiphytic algae only appeared in specific ammonia concentrations. For example, *Closterium* of *Chlorophyta* appeared as dominant species only at ammonia concentrations of $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, while *Synedra* of *Bacillariophyta* appeared only at ammonia concentration of $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The epiphytic algae biomass also showed variation with ammonia loads. When ammonia concentrations were lower ($\leq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), epiphytic algae biomass increased with increasing ammonia concentrations, but was inhibited when the concentrations were higher ($\geq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The maximum biomass and highest species richness of epiphytic algae were observed at the medium ammonia concentration ($2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, group C). The results indicate that ammonia concentrations have significant effects on the community colonization and succession of epiphytic algae and epiphytic algae may cause the decline of submerged macrophyte.

Keywords: ammonia nitrogen; epiphytic algae; dominant species; *Potamogeton crispus* L.

沉水植物在富营养化水体的修复过程中具有极其重要的作用^[1],但近年来关于沉水植物衰退的报道

日益增多,也因此引发了更多人对衰退原因的探讨。以往的研究中有人认为是富营养化水体中高浓度的氮、磷营养盐对沉水植物的生长造成了直接影响^[2]。而近年来的研究更多的是把焦点放在了附植藻类上,认为水体营养盐浓度的升高促进了沉水植物表面附植藻类的过度繁殖与生长^[3],使得附植藻类在生存资源上与宿主沉水植物存在一定的竞争^[4],从而影响沉

收稿日期:2013-05-12

基金项目:国家自然科学基金(41071341);国家科技重大专项(2012ZX 07101-013-01)

作者简介:宋玉芝(1970—),女,河南信阳人,博士,副教授,主要研究方向为污染环境的生态修复。E-mail:syz70@nuist.edu.cn

水植物的分布、种群组成^[5-6],引发沉水植物的衰退^[7]甚至死亡。因此研究附着藻类的生长及生理活动对于指导沉水植物的恢复工作至关重要。附着藻类是指附着在浸没于水体基质表面生长的藻类,又叫底栖藻类,周丛藻类。附着藻类是附着藻类的一种,生长在水生植物和其他大型藻类上^[8],其生长及发展受周围诸多环境因子的影响。有研究表明,附着藻类的种类在不同季节有所区别^[9];在不同的光照强度下,附着藻类的生物量也会受到影响^[10]。氮磷等营养物质作为引起水体富营养化的关键因子,常被作为研究对象,研究其对附着藻类生长的影响^[11-12]。但关于营养盐的研究多数是集中在附着藻类对磷的响应^[11,13-14],或是研究不同氮磷比对附着藻类生长的影响^[15]。已有的研究表明,营养盐的变化会引起附着藻类群落结构^[16-18]以及生物量的变化^[19-20],但对于附着藻类定植速率以及演替的规律没有明确的阐述,而这一点对于了解附着藻类在不同营养水平下的生长习性尤为重要,也是有效控制附着藻类生长的关键。本研究通过设定不同浓度的氨氮营养盐,探索在此环境下附着藻类在沉水植物菹草上的定植和演替情况,以便进一步研究其对沉水植物生长的影响,探讨引发沉水植物逐渐消亡的原因,为富营养浅水湖泊的生态修复和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2011 年 2 月下旬将采自太湖梅梁湾人工围隔区的菹草种子播种于培养箱中预培养,待成苗后移栽于塑料箱中(40 cm×30 cm×50 cm)进行培养备用。2011 年 4 月中旬从中选取长势相近、株长约 10 cm 左右的菹草,将其表面的附着藻类轻轻刷洗去除,移植到已装满洗净细沙、底部穿孔的一次性塑料杯中(200 mL),每杯 4 株,把已种植植物的杯子放入装有 14 L 培养液的玻璃缸(21 cm×31 cm×41 cm)中,每缸 20 杯。培养液以自来水为基础,配置 1/40 的 Hoagland 营养液,在光线良好的室内预培养 10 d。接种的附着藻类来源于太湖梅梁湾沉水植物,将采集的沉水植物用软毛刷刷洗植株叶片表面,刷洗液定容,一部分留属种鉴定所用,另一部分接种到处理组中。经鉴定所采集的太湖梅梁湾沉水植物上附着藻类样品 Q 共有 5 门 20 属(图 1),包括硅藻门的舟形藻、羽纹藻、脆杆藻、针杆藻、曲壳藻、异极藻、桥弯藻、双眉藻、小环藻、直链藻;绿藻门的毛枝藻、栅藻、纤维素藻、新月藻、叉管

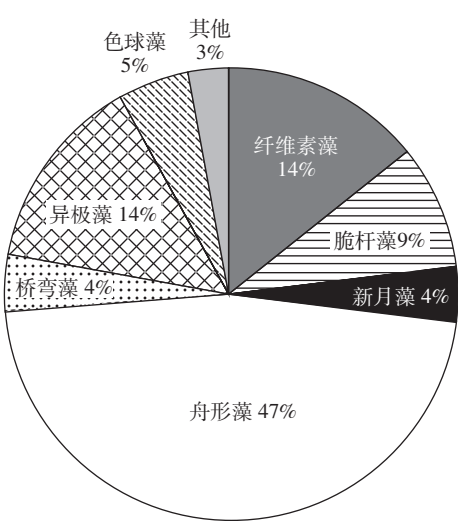


图 1 样品 Q 的藻类组成比例
Figure 1 Percent composition of different algae in the sample Q

藻;蓝藻门的微囊藻、鱼腥藻、色球藻;隐藻门的隐藻;裸藻门的裸藻。

1.2 实验设计

根据太湖水体氨氮水平^[21],并考虑附着藻类对高浓度氨氮营养盐可能的耐受性,设置不同浓度的氨氮水平(表 1),人为将 A、B 组定义为低浓度组,C 组定义为中等浓度组,D、E 组定义为高浓度组。2011 年 4 月 25 日,将适应培养 10 d 的植株随机分成 5 组,营养液按照 1/40 的 Hoagland 方法配置,其中氮的浓度用氯化铵按表 1 进行处理。将已收集的附着藻类等量均匀接种于培养液中,每缸接种附着藻类约 87 g,每个处理设 3 个重复。培养 4 d 后开始采集附着藻类,每次每缸取一株菹草,刷洗面积 40 cm²,刷洗液定容备用。为了保持各处理组水体中氨氮浓度,采样后更换培养液,以后每 4 d 采一次样并更换一次培养液。

1.3 附着藻类的鉴定和计数

测量前用软毛刷将植株上附着的所有附着藻类用蒸馏水刷洗下来,加入鲁哥试剂,定容备用。藻类属种的鉴定依据中国淡水藻类^[22]鉴定到属。生物量的测算采用体积换算法^[23]。藻类相对丰度 $P_i=N_i/N\times100$,式中 N_i 为第 i 物种的个体数, N 为总个体数;以相对丰度大于 1% 的物种为优势种^[24]。

表 1 实验处理中氮的浓度(mg·L ⁻¹)					
Table 1 Ammonium concentrations used in experimental treatments(mg·L ⁻¹)					
处理组	A	B	C	D	E
NH ₄ 浓度	0.5	1.5	2.5	5	10

2 结果与分析

2.1 氨氮浓度对附植藻类定植速率的影响

由初始藻类组成(图1)和4 d后在菹草上第一次测定的藻类组成及相对丰度(表2)可以看出,附植藻类在不同氨氮浓度组中定植速率有明显差异,其中舟形藻、脆杆藻和栅藻在A、D、E组中均较快定植并成为优势种,而异极藻则在C、D、E组迅速定植成为优势种。与图1的优势种群相比,可以发现:只有硅藻门的舟形藻、异极藻和脆杆藻在实验初期最先定植;而绿藻门的纤维素藻、新月藻和蓝藻门的色球藻以及硅藻门的桥弯藻均定植缓慢,在实验初期没有成为优势种。此外,不同于初始藻类组成的是栅藻由原先的非优势种在实验初期成为次优势种。

表2 4 d后各组附植藻类的组成及相对丰度(%)

Table 2 Composition and relative abundance of epiphytic algae in each treatment group after four days(%)

样品	A	B	C	D	E
舟形藻	83±8	*	*	29±4	40±5.5
脆杆藻	8±4	*	*	31±3	30±1.4
异极藻	*	*	96±2	30±7	22±3
色球藻	*	*	*	*	*
栅藻	8±5	*	*	7±0.3	6±1.4
新月藻	*	*	*	*	*
针杆藻	*	*	*	*	*
纤维素藻	*	*	*	*	*
其他	*	*	*	*	*

注: * 表示非优势种。

实验初期形成的优势群落的相对丰度也因氨氮浓度的不同而有所差异。表2横向比较可以看出舟形藻的相对丰度在A组达到最大,并随着氨氮浓度升高出现波动,但整体呈现降低趋势。而脆杆藻相对丰度则在高浓度组达到最大。异极藻相对丰度在C组达到最大,并随着浓度升高而降低。栅藻相对丰度在各组比较一致,但均低于其他优势种。不同的附植藻类在相同环境下定植速率也有先后。表2纵向比较可以看出A组中舟形藻定植速率明显快于脆杆藻和栅藻;B、C组附植藻类整体定植较为缓慢,只有异极藻在C组表现明显优势;而在D、E组除了栅藻外,其他几种优势种定植速率相差不大。

2.2 氨氮浓度对附植藻类种群演替的影响

由于藻类间存在着一定的生存竞争,各自定植的速率又有所差异,导致部分藻类的丰度极其匮乏,不

足以形成优势种群,因此在每个实验组中只选取优势种群(相对丰度大于1%),并对其演替规律进行分析(图2)。在A组(图2a)的整个演替过程中可以看出,4 d后附植藻类中首先成为优势种的有舟形藻、脆杆藻和栅藻;在8 d后的采样中发现色球藻也成为了优势种群;12 d后异极藻也逐渐成为优势种;16 d后观察发现大多数藻类丰度已经趋于稳定,只有脆杆藻还有增长的趋势;20 d后脆杆藻丰度在实验周期内达到最大,并形成与舟形藻、异极藻、色球藻和栅藻共存的主要稳定群落。从附植藻类的相对丰度来看(图2a),舟形藻丰度处于优势地位,虽然整体呈现下降趋势,但丰度值仍保持较高水平,说明低浓度的氨氮营养盐比较利于舟形藻的生长;脆杆藻、异极藻和色球藻的丰度均缓慢上升直至趋于稳定状态,整体水平还比较低;而栅藻在整个演替过程中一直处于稳定水平,但丰度低于其他几种附植藻类。

B组(图2b)几种附植藻类的定植速率均低于A组(图2a),在4 d后未出现优势种,这可能是跟氨氮营养盐浓度设置有关。在第8 d的鉴定中发现舟形藻、脆杆藻、异极藻、色球藻最先成为优势种;12 d后栅藻、新月藻逐渐成为优势种;16 d后附植藻类生长逐渐趋于稳定,形成以硅藻门的舟形藻、脆杆藻、异极藻,绿藻门的栅藻、新月藻和蓝藻门的色球藻为主的稳定群落。从相对丰度来看(图2b),此时的舟形藻丰度明显低于A组,在演替过程中也有起伏;而脆杆藻和色球藻均是在第8 d达到最大值后就开始衰减,但丰度水平高于同时期的A组;异极藻从第8 d成为优势种后就保持稳定水平;栅藻和新月藻较其他藻类增长缓慢,但在12 d后丰度值也逐渐上升并趋于稳定。

在C组(图2c)附植藻类种群演替过程中可以看出,4 d后最先成为优势种的只有异极藻,并且丰度值处于绝对优势地位;8 d后舟形藻、脆杆藻和针杆藻也表现出优势;色球藻和栅藻增长速率有些迟缓,在12 d后才逐渐表现优势;而此时异极藻、舟形藻、脆杆藻和针杆藻已经趋于稳定状态。从相对丰度来看(图2c),C组中表现最为优势的便是异极藻,较之前的A、B组有很大提高,说明异极藻比较适合在中高浓度的氨氮营养盐中生长;此外舟形藻虽仍是优势种,但丰度值较A、B组而言呈现下降趋势。

附植藻类在D组(图2d)中的优势种群最多,但各种藻类定植速率依旧存在先后。4 d后观察发现舟形藻、脆杆藻、异极藻和栅藻最先成为优势种;8 d后优势种群依然没有变化,但脆杆藻丰度急剧下降;12

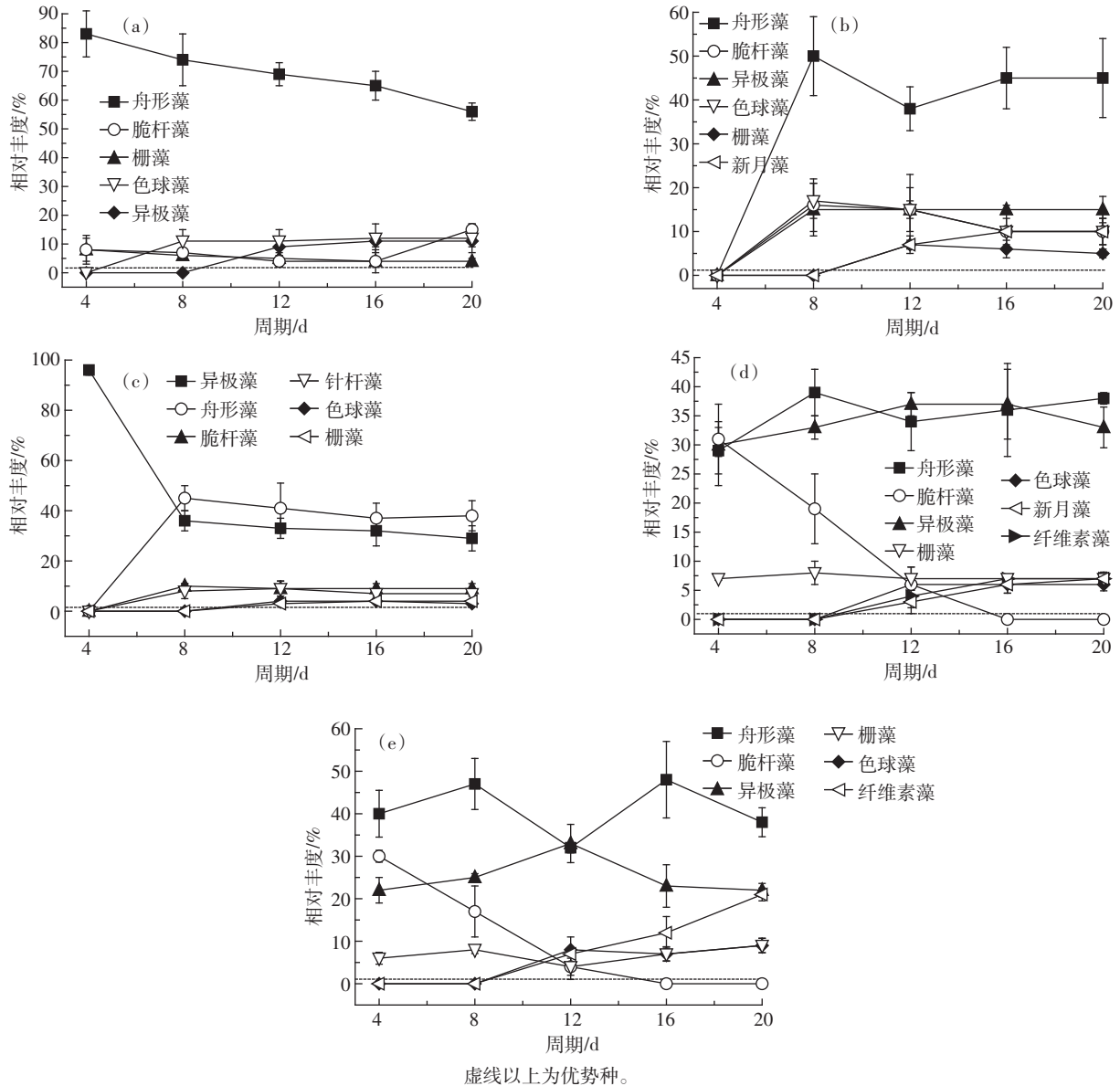


图2 各组附植藻类定植及演替过程

Figure 2 Process of colonization and succession of epiphytic algae in each treatment group

d 后色球藻、新月藻和纤维素藻才表现优势,并且丰度较低;16 d 后开始逐渐形成以硅藻门的舟形藻、异极藻,绿藻门的栅藻、新月藻、纤维素藻和蓝藻门的色球藻为主的稳定群落。从相对丰度来看(图 2d),仍然是硅藻门的舟形藻和异极藻表现出极强的优势,相反同为硅藻门的脆杆藻由于不能很好地适应较高浓度的氨氮营养盐,在 16 d 后已经被淘汰出优势种群;此外绿藻门的纤维素藻出现在 D 组的优势种群中,说明其比较适应较高浓度的氨氮营养盐。

E 组(图 2e)附植藻类在 4 d 后最先成为优势种的有舟形藻、脆杆藻、异极藻、栅藻;直到 12 d 后才出现新的优势种色球藻和纤维素藻;16 d 后脆杆藻已经

退出优势种群;20 d 后逐渐形成以硅藻门的舟形藻、异极藻,绿藻门的栅藻、纤维素藻和蓝藻门的色球藻为主的稳定群落。从相对丰度来看(图 2e),E 组附植藻类中舟形藻、异极藻虽然有较大变化,但依然处于优势地位;脆杆藻和 D 组情况类似,不能适应高浓度的氨氮营养盐,丰度逐渐递减;而栅藻和纤维素藻却在高浓度氨氮营养盐下表现出优势。

2.3 氨氮浓度对菹草上附植藻类生物量变化的影响

通过体积换算法计算附植藻类生物量,5 组的采样结果如图 3 所示。

经字母标记法^[25]对菹草上附植藻类生物量的多重比较分析(表 3、表 4)可知, C 与 B 及 A、E 处理间

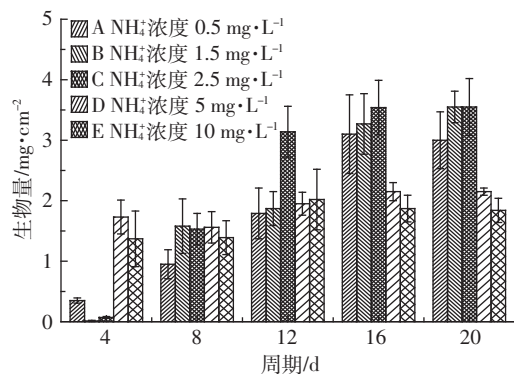


图 3 各组附植藻类生物量的变化
Figure 3 Changes in biomass of epiphytic algae in each treatment group

表 3 不同氨氮处理组附植藻类生物量的变化
Table 3 Effect of ammonium concentrations on epiphytic alga biomass

处理组	生物量/mg·cm ⁻²	差异显著性(0.05)
C	2.366	a
B	2.057	b
D	1.908	ab
A	1.831	c
E	1.698	bc

表 4 不同时间段附植藻类生物量的变化
Table 4 Changes in epiphytic alga biomass during different periods

周期/d	生物量/mg·cm ⁻²	差异显著性(0.01)
20	2.818	A
16	2.786	A
12	2.154	B
8	1.402	C
4	0.700	D

均有显著差异($P<0.05$),A 与 B、D 处理间也存在显著差异($P<0.05$),各组附植藻类生物量的比重为 $C>B>A>D>E$ (图 3),表明低浓度组比较高浓度组更易于附植藻类生物量的积累,这可能是因为很多藻类的生长受到高浓度营养盐的抑制。附植藻类生物量除了在 16 d 和 20 d 无显著差异外,在其余各时期均有极显著差异($P<0.01$),并且随着时间的推移呈现递增的趋势,直到最后两次趋于稳定,这表明藻类的整体生物量水平已基本稳定。在重复测量方差分析^[26]中可以得出氨氮浓度和不同时间段之间存在交互效应($F=45.971, P<0.01$),附植藻类最大值(3.55 ± 0.47) $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 出现在 20 d 后的 C 组,最小值(0.013 ± 0.01) $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 出现在 4 d 后的 B 组(图 3)。这表明中等浓度下的氨氮营养盐更加适合附植藻类的生长。

3 讨论

3.1 附植藻类定植及影响因素

由于附植藻类在生长过程中主要从水体吸收营养物质,因此水体营养盐是其生长的主要环境因子。而在对营养盐的吸收利用上,考虑到大多植物对氨氮营养盐的优先选择性^[27],侧重分析氨氮对附植藻类定植的影响,实验表明不同氨氮营养盐环境下,各种附植藻类无论是在建群时间还是群落结构方面都有着显著的差别。表现为低浓度下以硅藻门为绝对优势,高浓度下以绿藻门为绝对优势,这和已研究的关于浮游藻类的优势种在低浓度和高浓度下分别是硅藻门和绿藻门的变化规律一致^[18],李秋华等^[28]研究也表明氨氮浓度与水体中的硅藻和绿藻生物量密切相关。本文研究还表明硅藻门的舟形藻、脆杆藻在 A、D、E 组均较快定植,但在 B、C 组定植缓慢,这说明具有相同种群组成的藻类在不同浓度的氨氮营养盐中定植速率有所不同,其原因有待进一步研究。硅藻门的舟形藻、脆杆藻、异极藻在各组中附着速率快,并表现出广泛的适应性,说明硅藻门中的一些藻属具有强劲的附着力和生命力,这与念宇等^[29]在研究不同基质上附植藻类时发现硅藻门始终都是优势藻的观点一致。另外硅藻门之所以成为主优势种,一方面可能与硅藻本身属于附植藻类的主要种类有关,另一方面有可能跟硅藻繁殖季节有关,一般集中在初春和秋末冬初^[17]。但就丰度而言,舟形藻还是在低浓度的氨氮营养盐中有较好的适应性;而脆杆藻在定植初期在中高浓度的氨氮营养盐中优势明显,但随着演替时间的推移,逐渐退出优势群落,而在低浓度氨氮营养盐中一直表现出优势;异极藻在中高浓度氨氮营养盐中不仅附着速率快,而且丰度优势明显。绿藻门的栅藻和纤维素藻在中高浓度的氨氮营养盐中表现出优势,但各自附着时间有先后,栅藻略快一些。其他一些藻属如蓝藻门的色球藻在低浓度氨氮营养中优势明显,而硅藻门的针杆藻只在 C 组中表现出优势,但并不是主优势种,这跟已有的研究结果一致,一些底栖硅藻对水体营养浓度并不直接响应,像针杆藻属的一些种类主要受潮水透光条件影响,而受营养盐的影响较小^[30]。而绿藻门的新月藻的优势种群分别出现在 B、D 组,没有明显的规律性,可能是由于其对特定浓度的氨氮营养盐较敏感,还有待进一步研究。

3.2 影响附植藻类生物量变化的因素

不同的氨氮浓度对附植藻类的生物量影响显著,较之前的样品 Q 来看,硅藻门的舟行藻在实验后仍占绝对优势,但整体丰度呈现随着氨氮浓度升高而降低的趋势,经过生物量的计算,在 A 组中舟行藻生物量约占 1% 而在 E 组只占 0.5% 左右。这说明低浓度范围内营养盐的增加会促进舟形藻生物量的积累,过高则会抑制生物量。此外实验中发现中等浓度的氨氮营养盐中附植藻类的生物量达到最大,同时也可以从丰度上看出此时附植藻类的种类也最多,说明中浓度的营养盐对于大部分藻类来说属于最适生态位,这在裴国凤等^[31]对不同湖泊底栖藻类研究中也得到说明。实验还发现蓝藻门的色球藻在各组中均有附着,虽丰度不高,但由于自身体积较大,经换算后其生物量达到整体的 50% 左右,因此也称得上是优势种。

从实验中可以得出附植藻类在定植过程中受到氨氮营养盐不同程度的影响,除此之外宿主植物菹草也有可能产生一些化感物质来抑制藻类的生长,有研究表明,沉水植物苦草对铜绿微囊藻的生长有明显的抑制作用^[32]。这种抑制作用在一定程度上势必会影响附植藻类的附着、增长,从而可能引起其群落结构的改变。但对于不同的宿主植物而言,其各自的抑制程度则需要进一步研究。由文辉^[33]的研究表明,宿主植物对于附植藻类的附着密度和生物量有一定的影响。苏胜奇等^[34]的研究也表明,菹草上的着生藻类的平均密度不尽相同,以硅藻门最大,其次是绿藻门、蓝藻门、裸藻门和黄藻门。在本实验中宿主菹草上主要附着有硅藻门、绿藻门以及蓝藻门,和上述研究结论基本一致。

虽然宿主植物会对藻类有一定的抑制作用,但在实验过程中还是观察到叶片表面附着大量附植藻类的菹草生长状况较差,会过早凋零死亡,沉水植物所处的水体也比较混沌。这可能和 Rogers 等^[35]的观点一致,附植藻类的增加极大地削弱了到达植物表面的光照和营养物浓度,从而影响沉水植物光合作用。随着附着生物量的增加,对沉水植物的抑制程度就越严重。由文辉^[33]的研究中同样表明沉水植物在分布和生长方面受着生藻类丰度影响很大。在本实验中,各种附植藻类因适应的浓度有所差异,因此在每组中种类有所不同,但每组均有一定量的优势种群出现,并且具有较高的相对丰度,尤其是在中等浓度($2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下,附植藻类种类最多、生物量更是达到最大值,可见中等浓度的氨氮营养盐对附植藻类的大量繁殖起到

促进作用,从而引发沉水植物的衰退。

4 结论

附植藻类在沉水植物上定植受到诸多环境因素的影响,本研究主要从不同氨氮水平出发,探讨附植藻类在菹草上定植及演替的规律,旨在为富营养化水体中沉水植物的恢复工作提供一定的理论依据。主要有以下几个结论:

(1) 各种附植藻类在不同氨氮浓度下建群速度和时间是不同的,整体上呈现低浓度下以硅藻门为绝对优势、高浓度下以绿藻门为优势的趋势。

(2) 不同的氨氮浓度会改变附植藻类群落结构,实验中发现硅藻门的某些藻属具有广泛的适应性。

(3) 某些附植藻类只在特定的氨氮环境下表现出优势,如绿藻门的新月藻只在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低浓度组和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高浓度组才表现出优势,而硅藻门的针杆藻只在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的中浓度组表现优势。

(4) 低浓度范围内营养盐的增加会促进附植藻类生物量的积累,但过高则会抑制生物量。中等浓度($2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的氨氮营养盐中附植藻类的生物量最大,种类也最多,由此可见中等浓度氨氮是导致沉水植物消亡的一个重要因素。

参考文献:

- [1] Herrera-Silveira J A, Morales-Ojeda S M. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(1-3): 72-86.
- [2] Cao T, Xie P, Li Z Q, et al. Physiological stress of high NH_4^+ concentration in water column on the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* L. [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3): 296-299.
- [3] Jaschinski S D, Brepohl C. The trophic importance of epiphytic algae in a freshwater macrophyte system (*Potamogeton perfoliatus* L.): Stable isotope and fatty acid analyses[J]. *Aquatic Sciences*, 2010, 73(1): 91-101.
- [4] 刘玉超, 罗非鱼-附着藻-沉水植物相互关系研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2511-2514.
- LIU Yu-chao. Relationship among tilapia, periphyton and submerged macrophyte: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2511-2514.
- [5] 宋玉芝, 秦伯强, 高 光. 附着生物对太湖沉水植物影响的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 928-932.
- SONG Yu-zhi, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Effects of epiphyte on submerged macrophyte in Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 928-932.
- [6] Irfanullah H M, Moss B. Factors influencing the return of submerged

- plants to a clear-water, shallow temperate lake[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 80(3):177-192.
- [7] 曹永旭, 曹诗林. 不同浓度富营养化水体中附着藻类对苦草生长影响的初步研究[J]. 人民珠江, 2009(3):17-20.
- CAO Yong-xu, CAO Shi-lin. Effects of epiphytic algae on *Vallisneria* in different concentrations of eutrophic water[J]. *Pearl River*, 2009(3):17-20.
- [8] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- LIU Jian-kang. Advanced hydrobiology[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] 王丽卿, 张 玮, 范志锋, 等. 淀山湖生态示范区附着藻类季节动态变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8):1596-1602.
- WANG Li-qing, ZHANG Wei, FAN Zhi-feng, et al. Seasonal dynamics of periphyton community in the ecologic demonstration area of Lake Dian-shan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1596-1602.
- [10] Asaeda T, Sultana M, Manatunge J, et al. The effect of epiphytic algae on the growth and production of *Potamogeton perfoliatus* L. in two light conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(3):225-238.
- [11] 刘玉超, 刘正文. 亚热带富营养型湖泊中磷对附植藻类的影响[J]. 华南农业大学学报, 2011, 32(3):119-121.
- LIU Yu-chao, LIU Zheng-wen. Impact of phosphorus on periphyton communities in a subtropical eutrophic lake[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, 32(3):119-121.
- [12] 宋玉芝, 秦伯强, 高 光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2):125-130.
- SONG Yu-zhi, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton[J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(2):125-130.
- [13] Bowes M J, Smith J T, Hilton J, et al. Periphyton biomass response to changing phosphorus concentrations in a nutrient impacted river: A new methodology for phosphorus target setting[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(2):227-238.
- [14] 张 强, 刘正文. 附植藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6):930-934.
- ZHANG Qiang, LIU Zheng-wen. Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6):930-934.
- [15] 张秋节. 浮游藻类和附着藻类生长特性的对比研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- ZHANG Qiu-jie. The comparative study of growth characteristics about phytoplankton and attached algae[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [16] 陈宇炜, 高锡云, 秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4):35-40.
- CHEN Yu-wei, GAO Xi-yun, QIN Bo-qiang. The summer phytoplankton species composition in the northern part of west Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(4):35-40.
- [17] 王丽卿, 施 荣, 季高华, 等. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J]. 生物多样性, 2011, 19(1):48-56.
- WANG Li-qing, SHI Rong, JI Gao-hua, et al. Phytoplankton community structure and its succession in Dianshan Lake[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(1):48-56.
- [18] 潘继征, 熊 飞, 李文朝, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子[J]. 生态学报, 2009, 29(10):5377-5385.
- PAN Ji-zheng, XIONG Fei, LI Wen-chao, et al. Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5377-5385.
- [19] Liboriussen L, Jeppesen E. Structure, biomass, production and depth distribution of periphyton on artificial substratum in shallow lakes with contrasting nutrient concentrations[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(1):95-109.
- [20] 牡丹江支流河源湿地水生生态环境现状调查研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1):69-75.
- Gao J H, Shu J M, Song F, et al. Investigation of water quality and hydrobiontes in Bayou Headwater Wetland of the Mudan River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1):69-75.
- [21] 王秋娟. 太湖北部三个湖区氮污染状况及其底泥疏浚量的确定[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012.
- WANG Qiu-juan. Analysis of nitrogen pollution condition and sediment dredging volume of sediment in three lake regions of north of Taihu Lake[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [22] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [23] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- CHEN Wei-min, HUANG Xiang-fei, ZHOU Wan-ping. The observation methods of lake ecosystem[M]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [24] 何剑锋, 王桂忠, 李少菁, 等. 北极拉普捷夫海春季冰藻和浮游植物群落结构及生物量分析[J]. 极地研究, 2005, 17(1):1-10.
- HE Jian-feng, WANG Gui-zhong, LI Shao-jing, et al. Community structure and biomass of ice algae and phytoplankton in the Laptev Sea (arctic) in spring[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2005, 17(1):1-10.
- [25] 张国安. 方差分析中的多重比较方法[J]. 湖北植保, 1995(2):27-28.
- ZHANG Guo-an. Multiple comparison method in ANOVA[J]. *Hubei Plant Protection*, 1995(2):27-28.
- [26] 陈平雁. 定量数据重复测量的方差分析[J]. 中华创伤骨科杂志, 2003, 5(1):67-70.
- CHEN Ping-yan. Analysis of variance of repeated measure data[J]. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 2003, 5(1):67-70.
- [27] 方云英. 不同水生植物吸收去除水体氮效果及机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- FANG Yun-ying. Efficiency and mechanism of uptaking and removing nitrogen from eutrophicated water using aquatic macrophytes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [28] 李秋华, 何伟添, 陈 椽. 澳门湿地浮游植物群落特征[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4):689-697.

- LI Qiu-hua, HE Wei-tian, CHEN Chuan. Characteristics of the phytoplankton community in wetlands of Macau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4):689-697.
- [29] 念宇, 韩耀宗, 杨再福. 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, 2009, 2(5):14-17.
- NIAN Yu, HAN Yao-zong, YANG Zai-fu. Ecological characteristics of periphyton communities on different kinds of substrates and comparison[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 2(5):14-17.
- [30] Bennion H A. Diatom-phosphorus transfer function for shallow eutrophic ponds in southeast England[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 275:391-410.
- [31] 裴国凤, 刘国祥. 长江中游湖泊沿岸带的底栖藻类群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2):239-240.
- PEI Guo-feng, LIU Guo-xiang. Community structure characters of benthic algae community on littoral zone of the lakes in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(2):239-240.
- [32] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2):147-151.
- CHEN Wei-min, ZHANG Qing-min, DAI Shu-gui. The mutual allelopathy of *Vallisneria spiralis* Linn. and *Microcystis aeruginosa*[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2):147-151.
- [33] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征[J]. 环境科学, 1999, 20(5):59-62.
- YOU Wen-hui. The species composition and quantitative features of the periphytic algae communities in Dianshan Lake[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(5):59-62.
- [34] 苏胜齐, 沈盎绿, 姚维志. 菹草着生藻类的群落结构与数量特征初步研究[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(3):255-258.
- SHU Sheng-qi, SHEN Ang-lü, YAO Wei-zhi. Species composition and quantitative features of periphytic algae communities on *Potamogeton Crispus* L.[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(3):255-258.
- [35] Rogers K H, Breen C M. An investigation of macrophyte, epiphyte and grazer interactions in periphyton of freshwater ecosystems[J]. *The Hague: Junk Publishere*, 1983, 217-226.