

基质氮磷含量对荇菜(*Nymphoides peltatum*) 生长及其水质的影响

杨鑫, 张启超, 孙淑云, 施娴, 陈开宁*

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:选取太湖东、西山之间水域底泥作为基质,以该基质(TN 1 520.12 mg·kg⁻¹, TP 544.27 mg·kg⁻¹)为本底,加入 KNO₃ 和 K₂HPO₄ 以及泥沙,配置 5 个不同营养水平基质:A(TN 627.47 mg·kg⁻¹, TP 237.38 mg·kg⁻¹);B(TN 1 094.23 mg·kg⁻¹, TP 317.72 mg·kg⁻¹);C(原位底泥);D(TN 2 047.83 mg·kg⁻¹, TP 738.37 mg·kg⁻¹);E(TN 2 537.20 mg·kg⁻¹, TP 942.37 mg·kg⁻¹)。通过分析 5 种营养条件下荇菜(*Nymphoides peltatum*)形态变化及水质参数变化,探讨不同营养水平基质对荇菜生长及其对水质的影响。试验结果表明:原位底泥 C 处理下荇菜植株生物量、叶片数、总叶片面积等形态指标(除根系生物量)均优于其余 4 个处理,且差异显著($P<0.05$)。高营养基质 E 中荇菜生长明显受到抑制;不同处理下荇菜对水质影响的差异较大,高营养水平 E 下水质状况明显差于 A~D 处理下,其中水体溶解氧、叶绿素 a 含量以及浊度均达到显著水平($P<0.05$)。每个处理下,水体 TN、TP 去除率在荇菜生长初期快、中期下降;A~D 处理下,后期去除率提高;高浓度 E 处理下,后期荇菜腐烂速率快于生长速率,水体 TN、TP 去除率进一步下降,水质恶化。结果分析可知,基质营养较低或较高均不利于荇菜生长且荇菜环境效应差,而如今太湖的基质营养适中,可能导致荇菜种群在太湖进一步扩张,由此带来的生态问题需得到重视。

关键词:富营养化;荇菜生长;基质氮磷;生物量;形态响应

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)06-1197-07 doi:10.11654/jaes.2014.06.021

Influence of Sediment Nitrogen and Phosphorus on Growth of *Nymphoides peltatum* and Water Quality

YANG Xin, ZHANG Qi-chao, SUN Shu-yun, SHI Xian, CHEN Kai-ning*

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Sediments can release nutrients into the water and thus impact the growth of floating plants. An experiment was carried out to investigate the influence of sediment nitrogen and phosphorus on the growth of floating-leafy macrophyte *Nymphoides peltatum* and water quality. Sediments were collected between Dongshan and Xishan of East Taihu Lake. Five levels of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were obtained by adding KNO₃, K₂HPO₄ and sand. They were (A): TN 627.47 mg·kg⁻¹ and TP 237.38 mg·kg⁻¹; (B): TN 1 094.23 mg·kg⁻¹ and TP 317.72 mg·kg⁻¹; (C): TN 1 520.12 mg·kg⁻¹ and TP 544.27 mg·kg⁻¹ (in situ sediment); (D): TN 2 047.83 mg·kg⁻¹ and TP 738.37 mg·kg⁻¹; and (E): TN 2 537.20 mg·kg⁻¹ and TP 942.37 mg·kg⁻¹. The results showed that aboveground biomass, leaf number and leaf area of *N. peltatum* were significantly higher in the sediment C than in other four sediments ($P<0.05$). However, the growth of *N. peltatum* was inhibited in the sediment E. Water quality of sediment E was worst with dissolved oxygen (DO), chlorophyll a (Chl. a) content and turbidity significantly different from the others ($P<0.05$). Removal rates of TN and TP from water by *N. peltatum* were greater at the early growth stage, less at later stage, and even negative at final stage. Our results indicate that sediments with lower or higher TN and TP would be unfavorable for the growth of *N. peltatum*. Best growth of *N. peltatum* in the situ sediments from Taihu Lake is the reason that caused its expansion in East Taihu Lake. Therefore, attention should be paid to the resultant ecological problems.

Keywords: eutrophication; *Nymphoides peltatum*; nitrogen and phosphorus; biomass; morphological responses

收稿日期:2013-09-25

基金项目:国家自然科学基金(41171413)

作者简介:杨鑫(1990—),男,硕士研究生,主要从事水生植物学研究。E-mail: yxin15@foxmail.com

*通信作者:陈开宁 E-mail: knchen@niglas.ac.cn

随着水体富营养化的加剧,水生植被衰退和消失的现象在世界范围内普遍出现^[1-3]。影响水生植物生长的因素有很多^[4],其中氮、磷营养盐是水生植物生长的主要影响因素之一^[5-6],过高营养水平会影响水生植物生理功能从而抑制水生植物生长。但国内外就富营养化引起水生植物衰退和消失现象的研究主要针对沉水植物(Submersed macrophytes),而有关浮叶植物(Floating-leaved macrophytes)生长响应却鲜有报道,浮叶植物是否会同沉水植物一样衰退和消失?还是具有促进作用?需要相关研究给予阐明。沉积物中氮磷的释放是水体富营养化的重要原因之一^[7],沉积物不仅为水生高等植物提供固着基质,还提供了植物生长所需的大量营养元素^[8]。已有研究表明,根着水生植物生长所需氮、磷主要来源于沉积物,而枝叶只能从水中吸收微量元素和少量氮、磷营养供植物生长所需^[9-11],故研究沉积物不同营养水平对浮叶植物生长的影响具有重要意义。

荇菜属植物是根着浮叶植物,在太湖中主要为荇菜(*Nymphaea peltatum*)和金银莲花(*Nymphaea indica*)。据2004年和2008年5月至2009年4月的现场调查,随着太湖富营养化加剧,荇菜和金银莲花种群在太湖东南部水域(除东太湖,其受人类活动强烈干扰而覆盖面积较小)覆盖面积已达76.70 km²,占全湖面积3.47%,局部湖区(如:胥口湾和东西山之间)覆盖度已接近40.00%,从全湖范围看,较2004年调查时扩大了63.70%。荇菜和金银莲花种群在太湖的迅速扩张已严重影响到东南部水域航运和渔业生产,浮叶植物的茂密生长将严重影响阳光对水下照射,使得下层的沉水植物不能正常进行光合作用,可能对沉水植物带来毁灭性影响,进而会对水质乃至整个水域生态系统产生巨大的负面影响。因此,迫切需要研究随着太湖水体富营养化程度的加剧,特别是沉积物氮磷浓度增加,荇菜属植物的生长响应。

本试验以太湖东、西山之间荇菜属植物较多区域现有底泥营养盐水平为参考,以荇菜作为研究对象,排除了种间竞争、风浪、人类活动等不利因素对荇菜生长的影响,利用室外微宇宙系统,研究基质不同氮磷水平下荇菜生长(形态指标、生物量分配以及对水质影响)的响应机制,为优化管理太湖浮叶植物提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选取太湖东、西山之间的水域(31.12076°N,

120.39241°E)浮叶植物优势种——荇菜(*N. peltatum*)为研究对象。试验所用克隆株(一个带叶芽的匍匐茎)截取于成熟株匍匐茎,该无性繁殖体的平均湿重为(1.35±0.17)g。试验底泥采自太湖东、西山之间荇菜群落立地的表层10 cm的沉积物。试验用沙购买于市场,试验用水为经曝气24 h后的自来水。

1.2 试验设计

本试验为室外模拟控制试验,从2012年8月1日到8月31日,在15根有机玻璃管中进行,试验装置及相关参数如图1。

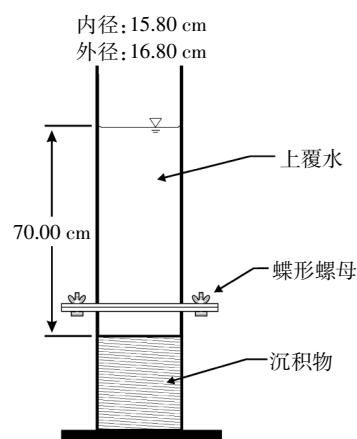


图1 试验装置和相关参数

Figure 1 Experimental device and its parameters

依据试验底泥本底值和TN:TP比值,参考现有关于富营养化湖泊底泥TN、TP浓度的研究^[12],通过计算加入一定量KNO₃、K₂HPO₄以及泥沙,均匀混合,配置5个TN、TP浓度梯度(表1),每个梯度重复3次。将底泥注入有机玻璃管底座中(泥高约20 cm),组装好成为一个独立系统,每个系统内加入等量经24 h曝气后的自来水(水位70 cm),静置1周(8月7日),待系统稳定,再各种植一株荇菜克隆株,固定好试验装置,放置于室外自然光照条件下培养。待试验完成,拆除系统,取出荇菜,洗净,分根、茎、叶片和叶柄保存,带回实验室分析。

1.3 试验指标

测定的水质指标有浊度、溶解氧、叶绿素a、TN、TP;沉积物TN、TP;测定的植物指标包括植物的总干重、根、茎、叶干重,根系总长度,茎直径,叶片数,叶总投影面积,主根数,根表面积等。

水质指标依据《水和废水监测分析方法》测定^[13],溶解氧、浊度等采用HYDROLAB DS5X多功能水质分析仪(哈希公司)测定;沉积物TN、TP的测定参照《湖泊生态调查观测与分析》^[14];叶片数和主根数等形

表 1 材料和试验前基质 TN、TP 浓度(实测)

Table 1 Concentrations of TN and TP in materials and sediments used in experiment(mean±SD)

项目		TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹
材料	太湖底泥	1 520.12±144.15	544.27±62.35
	沙	502.17±48.29	162.58±34.92
	自来水	2.18±0.20	0.04±0.01
试验基质	A($V_{\text{湖泥}}:V_{\text{沙}}=1:2$)	627.47±28.19	237.38±26.21
氮磷水平	B($V_{\text{湖泥}}:V_{\text{沙}}=1:1$)	1 094.23±83.43	317.72±32.44
	C(原位湖泥)	1 520.12±144.15	544.27±62.35
	D(13.85 gKNO ₃ , 3.35 g KH ₂ PO ₄)	2 047.83±103.61	738.37±63.45
	E(28.28 gKNO ₃ , 6.59 g KH ₂ PO ₄)	2 537.20±127.12	942.34±59.56

态指标采用计数法;叶片投影面积以及根表面积、体积等采用根系扫描软件(WinRhizo Pro 2007, Régent Instruments, Québec, Canada)分析获得。洗净植物样,分根、茎、叶片和叶柄保存,经自然风干后,于 80 ℃下烘 48 h 至恒重,利用电子天平称得各干重。

去除率(%)=(取样时的浓度-上次采样时的浓度)/上次采样时的浓度×100%

1.4 数据分析方法

单因素方差分析(One-way ANOVA)采用 SAS 9.1 统计分析软件;多重比较采用 Tukey Test 方法;图形绘制采用 Origin 9.0 绘图软件。

2 结果与分析

2.1 基质营养水平对荇菜生长的影响

2.1.1 对叶的影响

从图 2 和表 2 可以看出,基质不同营养水平对荇菜叶(叶片和叶柄)的生长具有明显影响,较低营养 B、C 下叶片长势明显优于高营养 E 下叶片,其中叶片总干重、叶片总投影面积、最大叶片面积和叶片数差异显著($P<0.05$)。随着基质营养水平由 A 增加到 E,荇菜叶片数先增多后减少,原位底泥下达到最大 17 片,高营养 E 处理下最少,仅 8 片($P<0.05$);平均叶片总投影面积由原位底泥 C 处理下的 540.58 cm² 下降到高营养 E 处理的 162.56 cm²(69.93%, $P<0.05$);高营养 E 下荇菜叶片面积小,最大叶片面积仅有 41.03 cm²,不及原位底泥 C 处理下的 2/3 ($P<0.05$),并且生命周期比较短(小于 20 d),极易腐烂。在高营养 E 处理下,叶柄干重仅为原位底泥 C 处理下的 1/3($P<0.01$)。

2.1.2 对茎的影响

由图 2 和表 2 看出,基质不同营养水平下荇菜茎生长差异明显,不同处理下茎生物量、茎直径、匍匐茎长度差异均显著($P<0.05$)。高营养 E 处理下,荇菜茎营养不良、长势差,平均茎生物量(干重)0.17 g,约为

D 处理下(0.47 g)的 1/3、原位底泥 C 处理下(0.69 g)的 1/4($P<0.01$);E 处理下,荇菜茎平均直径 0.18 cm,约为原位底泥 C 处理下的 1/3($P<0.05$);随着基质营养水平由低到高(A 到 E),荇菜平均匍匐茎长度分别为 31.67、104.91、109.80、56.10、28.21 cm,差异显著($P<0.05$),说明基质较高营养 E 处理下,荇菜生长和扩张受到一定抑制。

2.1.3 对根系的影响

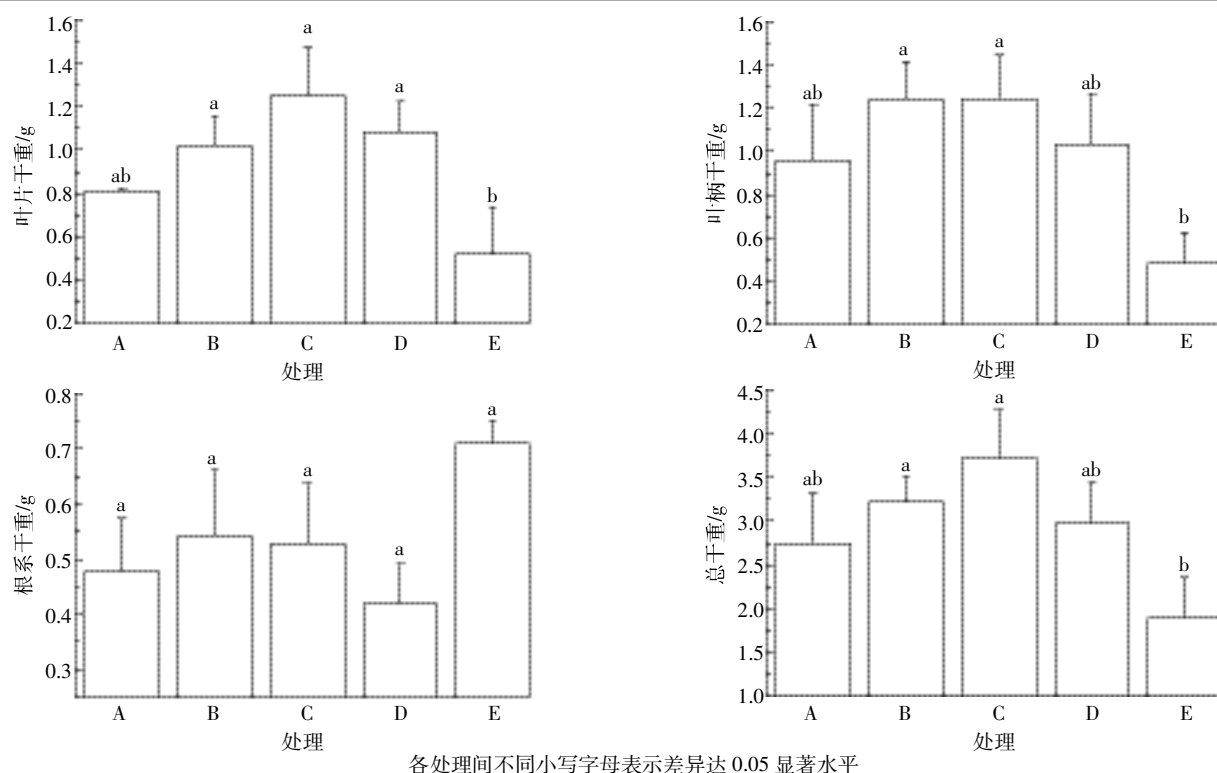
由图 2 和表 2 可知,在高营养 E 下,荇菜根系长势明显好于其他 4 个处理,平均根系生物量(干重)、根系表面积和根系总长度均最大,分别达到 0.71 g、738.75 cm² 和 9 138.51 cm,而原位底泥 C 处理下,平均根系生物量(干重)为 0.52 g,平均根系表面积和根系长度均最小,仅有 324.80 cm² 和 2 331.05 cm。不同处理对根系干重的影响不显著($P>0.05$),对根系表面积和根系长度的影响达到显著水平($P<0.05$)。

2.1.4 对生物量以及生物量分配的影响

不同营养水平对荇菜植株生物量(干重)的影响达到显著性水平($P<0.05$),营养水平由 A 提高到 C 时,平均生物量(干重)由 2.74 g 增加到 3.71 g(35.40%),营养水平再提高,荇菜生物量(干重)开始下降,降到 E 处理下的 1.90 g(48.79%),不及原位底泥 C 处理下的 1/2。不同营养水平在影响生物量的同时也影响着荇菜植株生物量的分配。随着基质营养水平由 A 增加到 D,为了获得更多营养,荇菜分配更多的生物量到根系,根冠比由 0.21 降到了 0.15(表 2);而在最高营养水平 E 处理下出现了转折,根冠比增大到 0.65。随着营养水平由 A 增加到 E,叶片与叶柄生物量的比值由 0.82 增加到 1.31,说明荇菜植株分配更多的生物量到叶片。

2.2 各形态指标相关性分析

由表 3 可知,总干重与叶片干重、叶柄干重、茎干重、地上生物量呈现显著正相关,与根冠比显著负相



各处理间不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平

图 2 不同处理下叶片、叶柄和根系干重以及总干重

Figure 2 Dry weights of leaves, petioles and roots and total dry weight of *N. peltatum* in different treatments

表 2 不同处理下荇菜生长形态指标

Table 2 Morphological characteristics of *N. peltatum* in different treatments (mean±SD)

指标	生长状态	参数	A	B	C	D	E
叶	处理 E 下, 叶片面积小, 易腐烂	叶片数(片)或叶柄数/个	11.67±0.58b	12.67±2.51b	18.88±1.52a	14.67±0.67ab	7.33±0.88c
		最大叶长/cm	5.78±0.76bc	8.54±0.45a	8.73±0.39a	6.83±0.50b	4.49±0.31c
		最大叶片面积/cm ²	43.92±3.25bc	62.88±5.49a	65.27±5.05a	53.16±5.31ab	39.26±3.43c
		叶片总投影面积/cm ²	308.66±41.68bc	417.63±88.19ab	540.58±131.42a	508.06±15.63ab	162.56±51.51c
茎	处理 E 下, 茎秆细发黑, 易腐烂; 匍匐茎少而短	匍匐茎数/根	1.00±1.00a	2.00±0.00a	2.00±0.00a	1.33±0.58a	0.67±0.58a
		匍匐茎长度/cm	31.67±31.50b	104.91±22.15ab	109.79±44.66a	56.08±50.85ab	28.21±25.12b
		茎(包括匍匐茎)干重/g	0.49±0.24a	0.42±0.04a	0.69±0.05a	0.47±0.06a	0.17±0.10b
		平均茎直径/cm	0.33±0.08b	0.31±0.12bc	0.49±0.06a	0.24±0.10bc	0.18±0.07d
根	处理 E 下, 根系发黑, 死根烂根较多	主根数/根	49.67±5.51a	57.33±3.06a	48.00±8.72a	51.33±9.50a	46.00±13.53a
		根系总表面积/cm ²	255.41±21.29c	464.16±66.87bc	258.14±24.52c	571.78±172.17ab	792.08±43.16a
		根系总长度/cm	4 603.02±459.84c	3 748.5876±654.92c	2 664.38±256.42c	7 498.97±325.57b	11 138.51±1 686.23a
比值		根冠比(R:S)	0.21±0.01b	0.22±0.06b	0.17±0.02b	0.15±0.02b	0.65±0.21a
		叶片干重:叶柄干重(L:P)	0.82±0.22a	0.85±0.07a	1.00±0.05a	1.06±0.10a	1.31±0.15a

注:同一行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

关,而与根干重相关性弱,不显著;根系表面积不依赖于根系干重,相关性不显著;主根数只与叶片/叶柄密切负相关。

2.3 基质不同营养水平下荇菜对水质的影响

由表 4、表 5 可知,荇菜生长能明显改善水质。荇菜生长不仅可以吸收水体氮、磷等营养盐,而且降低了水体的浊度。由于荇菜生长与藻类竞争营养,抑制藻类生长,导致 E 处理下水体叶绿素 a 含量较其他 4

个处理分别提高了 190.06%、228.64%、342.48%、233.50% ($P<0.05$);由于光合作用,C 处理下水体的含氧量显著高于另外 4 个处理 ($P<0.05$)。但在不同营养化水平下,荇菜的环境效应具有明显差异,随着基质营养水平由 A 增加到 D,水体 TN、TP 初始浓度也随之提高,TN 平均去除率也由 46.44% 提高到 81.54%,TP 平均去除率由 59.26% 提高到 82.29%。但在高营养水平处理 E 下,TN、TP 平均去除率降到了 27.22%、

表 3 叶片总投影面积、生物量以及根系相关指标的相关性分析

Table 3 Correlation between leaf and root project area, dry weights of the leaves, petioles, roots and stems, biomass, and ratios of root to aboveground and leaves to petioles

	叶片总投影面积	叶柄干重	叶片干重	根系表面积	根干重	总干重	茎干重	主根数	地上生物量	根冠比	叶片/叶柄
叶片总投影面积	1.00										
叶柄干重	0.73**	1.00									
叶片干重	0.84**	0.87**	1.00								
根系表面积	-0.48	-0.55*	-0.49	1.00							
根干重	-0.54*	-0.27	-0.36	0.49	1.00						
总干重	0.73**	0.96**	0.93**	-0.54*	-0.16	1.00					
茎干重	0.61*	0.79**	0.76**	-0.72**	-0.27	0.87**	1.00				
主根数	0.25	0.33	0.17	0.04	0.08	0.21	-0.08	1.00			
地上生物量	0.79**	0.96**	0.95**	-0.60*	-0.32	0.98**	0.88**	0.19	1.00		
根冠比	-0.69**	-0.78**	-0.81**	0.38	0.70**	-0.74**	-0.73**	-0.09	-0.83**	1.00	
叶片/叶柄	-0.06	-0.46	-0.01	0.26	-0.08	-0.29	-0.24	-0.56*	-0.26	0.08	1.00

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

表 4 实验后各处理水体理化指标

Table 4 Physical and chemical quality of water after experiment(mean±SD)

指标	A	B	C	D	E
溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.63±0.24c	6.94±0.09bc	7.73±0.14a	7.08±0.12b	5.15±0.20d
叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.33±0.20b	2.06±0.15bc	1.53±0.25c	2.03±0.15bc	6.77±0.40a
浊度/NTU	1.59±0.05b	1.38±0.07bc	0.73±0.05d	0.96±0.07cd	2.56±0.19a

表 5 水体中 TN、TP 去除率的变化

Table 5 Removal rates of TN and TP in different treatments(mean±SD)

指标	日期	A	B	C	D	E
TN 去除率/%	8.7—8.14	23.75±1.29c	56.10±2.43a	50.77±4.44a	53.89±3.80a	42.22±1.93b
	8.14—8.21	6.30±1.62b	5.12±0.71b	19.56±1.85a	23.67±1.74a	7.06±1.65b
	8.21—8.28	23.71±6.77a	24.43±2.82a	20.91±3.98a	31.42±2.26a	-10.98±2.44b
	8.7—8.28	46.44±2.94cd	59.38±10.59bc	69.38±9.89ab	81.54±6.60a	27.22±2.99d
TP 去除率/%	8.7—8.14	12.44±1.79b	59.57±7.91a	60.39±8.97a	50.90±4.04a	26.61±3.01b
	8.14—8.21	17.31±1.05ab	16.29±2.07b	19.69±1.82ab	22.56±3.79a	16.47±1.27b
	8.21—8.28	42.52±4.04a	38.46±4.71a	21.59±2.18b	22.68±4.19b	-11.59±5.89c
	8.7—8.28	59.26±7.82b	69.58±4.28ab	73.39±3.09ab	82.29±4.65a	32.71±1.63c

32.71%。由表 5 可知,在高营养处理 E 下,TN、TP 去除率出现了负值,其可能原因是荇菜腐烂,营养盐重新释放到水中。分析数据显示,TN、TP 去除率有一定的规律性,TN、TP 的初始去除率与水体各自初始浓度正相关,且在实验初期 TN、TP 去除率大,中期去除率小,后期随着荇菜的生长发育成熟,环境效应加强,在 A 到 D 处理下,TN、TP 浓度去除率上升,而在高营养化水平 E 处理下,后期则相反,TN、TP 去除率进一步下降。出现以上现象的主要原因可能是不同营养化水平下荇菜生长情况差异较大,导致荇菜环境效应差异亦较大。由此可知,在高营养化水平下,水生植物腐烂,不能正常生长,导致水环境恶化,如此恶性循环,

水环境将很难得到改善。

3 讨论

3.1 不同基质营养水平对荇菜生长的影响

在水生植物的形态上起着重要作用的器官是叶片和叶柄^[5]。叶片是水生植物进行光合作用的主要器官,叶片的多少、叶面积的大小以及叶片的配置等空间结构特征直接影响着叶片的受光量、光照强度和光谱成分等,进而决定水生植物的光能利用效率。叶柄的主要功能一是叶片的支撑体,并决定着叶片的空间分布;二是连接叶片与主茎,并担负着它们之间的水分和营养物质的输送。通过试验,分析不同营养基质

对浮叶植物荇菜叶生长影响的结果可见,在一定范围内(前4个处理),随着基质营养水平的提高,荇菜叶长势越来越好,但在高营养水平下,荇菜叶生长将受到抑制,导致荇菜植株能量供应不足,营养物质运输通道受阻,最终必然导致荇菜植物生长发育受到抑制。Christiansen等^[16]通过试验研究 *Littorella uniflora* (L.) Aschers 发现,在一定范围内,随着底泥 TP 浓度的提高,叶片生物量显著增加,而 TN 影响并不显著。而浮叶植物荇菜是否存在相同的响应机制,还需要进一步试验验证。

在 E 处理下,荇菜茎长势不好,相同部位茎直径差异显著($P<0.05$),由于水生植物茎起到支撑植株和传输物质等作用,造成物质(包括氧气)传输受阻。水生植物匍匐茎起到汲取营养和扩张根植范围等作用^[17],在高营养 E 处理下,匍匐茎长度仅达到原位底泥 C 处理下的 1/5,说明高营养 E 处理下荇菜汲取营养以及扩大根植范围的能力远远弱于相对低营养 C 处理下,即高营养水平不利于荇菜的根植和扩张。

根系是水生植物吸收养分与水分的最重要器官,根系的好坏对水生植物的长势有较大影响,根系不好的水生植物,其植株的长势必然不好。但本研究结果显示,在高营养水平 E 下,根系生物量最大,而为什么荇菜地上生物量最小呢?这可能是因为在高营养水平下,根系受到生理伤害,造成内部组织结构紊乱^[18]或物质代谢发生变化,在试验过程中发现 E 处理下荇菜根系发黑,根系腐烂较多,可能导致根系活力减弱,造成营养盐吸收受阻,荇菜植株为了获得更多能量达到稳定根植,必须加大对根系的投入。这也解释了为什么根冠比在高营养水平 E 处理下出现了跃升这一异常现象。基质不同营养水平对荇菜根系生物量(干重)影响不显著($P>0.05$),而对根系表面积影响显著($P<0.05$),进一步说明影响根系对营养物质的吸收更重要的因子是根的表面积、内部结构及底泥的性质,而不是根的生物量^[9]。

分析试验结果发现,较高营养水平 D 中荇菜生长情况虽不及原位底泥中荇菜,但总生物量、叶柄叶片生物量等一系列形态指标差异均不显著($P>0.05$),说明较高营养水平 D 同样适合荇菜生长,依据太湖底泥分布^[19-20],表层基质营养适中,荇菜种群可能会进一步扩张,由此带来的生态环境以及经济问题,需引起相关部门的重视。

3.2 各形态指标相关性分析

由于荇菜地上各器官相互支撑,地上生长指标之

间显著正相关;总生物量与地上生物量显著正相关,而与地下生物量即根生物量显著负相关,说明荇菜生物量主要来自于地上生物量,定期刈割地上部分,可以显著削减水体氮磷等营养盐。

3.3 不同基质营养水平下荇菜对水质影响的差异

水生植物在维持水体生态平衡中发挥着重要作用^[21-22]。已有研究表明,水生植物繁茂的湖泊,水体具有较高清澈度、较高的溶解氧,较低的叶绿素 a 含量、营养盐浓度以及藻类生物量^[23-25],与本实验结果吻合。但若想达到最大环境效应,则必须要在一定的环境条件下才能实现。王沛芳等^[26]通过实验研究苦草对水中不同浓度氮的净化贡献率,得出了当水体中氮浓度低于 $60.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苦草表现为对水体中氮的净化作用,且当水体氮浓度为 $60.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苦草对其净化贡献值最高,而当超过 $80.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苦草的净化作用受到抑制,对水体氮净化贡献率急剧下降。张志勇等^[27]通过实验证明了凤眼莲对 TN 的去除率随着 TN 初始浓度的升高而降低,两者间呈极显著负相关关系($P<0.01$)。以上研究结果反映了在一定范围内,水生植物去除 TN、TP 速率随着初始营养水平的提高而加快,但高于一定浓度后,净化速率则急剧下降,与本实验结果相同。但出现这一现象究竟是因为在高营养水平下水生植物无法正常生长,导致氮磷削减减弱,还是由于某种离子浓度过高,如 K^+ 、 NO_3^- 等,阻碍了水生植物对氮磷的吸收,尚有待进一步验证。在本实验中发现去除率在植物生长初期大,而随着植物生长越来越小,这一现象在理论上可以应用于实际,如在湖泊富营养化治理中,可以在种植水生植物后一定时间内收割,但实际效果强弱以及可操作性,还有待进一步研究。

4 结论

(1)荇菜生长要在适宜营养水平下,较高或较低营养水平均不利于荇菜生长,目前太湖水体营养适中,荇菜种群可能进一步扩张,由此带来的问题,应得到足够重视。

(2)反映荇菜生长情况的各个形态指标存在一定的相关性。荇菜总生物量与地上生物量显著正相关,说明荇菜生物量主要来源于地上生物量,这为太湖荇菜属植物刈割提供了理论依据。

(3)荇菜生长对水质影响显著。适宜基质营养下,不仅可以削减水体氮磷,还可以降低水体浊度、叶绿素 a 等水质指标。但高营养下,由于荇菜腐烂,可能出

现负面影响,使水质进一步恶化。

(4)向基质添加泥沙,虽降低了基质营养水平,但基质粒径分布也随之改变,基质不同粒径分布是否对荇菜生长有影响,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395: 181-190.
- [2] Mäemets H, Palmik K, Haldna M, et al. Eutrophication and macrophyte species richness in the large shallow North-European Lake Peipsi[J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(4): 273-280.
- [3] Egertson C J, Kopaska J A, Downing J A. A century of change in macrophyte abundance and composition in response to agricultural eutrophication[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 524(1): 145-156.
- [4] Barko J W, Adams M S, Clesceri N L. Environmental factors and their consideration in the management of submersed aquatic vegetation: A review[J]. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1986, 24(1): 1-10.
- [5] Van Donk E, Gulati R D, Iedema A, et al. Macrophyte-related shifts in the nitrogen and phosphorus contents of the different trophic levels in a biomanipulated shallow lake[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 251(1): 19-26.
- [6] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [7] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [8] Barko J W, Gunnison D, Carpenter S R. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics[J]. *Aquatic Botany*, 1991, 41(1): 41-65.
- [9] Barko J W, Smart R M. Sediment-based nutrition of submersed macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 1981, 10: 339-352.
- [10] Huebert D B, Gorham P R. Biphasic mineral nutrition of the submersed aquatic macrophyte *Potamogeton pectinatus* L.[J]. *Aquatic Botany*, 1983, 16(3): 269-284.
- [11] Barko J W, Smart R M. Mobilization of sediment phosphorus by submersed freshwater macrophytes[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 10(3): 229-238.
- [12] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 703-709.
WANG Pei, LU Shao-yong, WANG Dian-wu, et al. Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lake side zones of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4): 703-709.
- [13] 魏复盛. 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]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-257.
- [14] 黄祥飞, 孙鸿烈, 刘光菘. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 72-79.
- [15] 李伟, 钟扬. 水生植被研究的理论与方法[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992: 54-57.
- [16] Christiansen R, Skovmand Friis N J, Søndergaard M. Leaf production and nitrogen and phosphorus tissue content of *Littorella uniflora* (L.) Aschers. In relation to nitrogen and phosphorus enrichment of the sediment in oligotrophic Lake Hampen, Denmark[J]. *Aquatic Botany*, 1985, 23(1): 1-11.
- [17] 王艳红, 王珂, 邢福. 匍匐茎草本植物形态可塑性、整合作用与觅食行为研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 70-74.
WANG Yan-hong, WANG Ke, XING Fu. Advances of studies on the morphological plasticity, intergration and foraging behavior of stoloniferous herbaceous plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 70-74.
- [18] 熊汉锋, 谭启玲, 刘艳玲. 不同营养状态下苦草的生理响应[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(4): 442-445.
XIONG Han-feng, TAN Qi-ling, LIU Yan-ling. Physiological responses of *Vallisneria spiralis* under different nutritional status[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(4): 442-445.
- [19] 袁旭音, 许乃政, 陶于祥, 等. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. *资源调查与环境*, 2003, 24(1): 20-28.
YUAN Xu-yin, XU Nai-zheng, TAO Yu-xiang, et al. Spatial distribution and eutrophic characteristics of bottom sediments in Taihu Lake[J]. *Resources Survey & Environment*, 2003, 24(1): 20-28.
- [20] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 359-366.
FANG Cheng-xin, YANG Long-yuan, ZHANG Lu. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(4): 359-366.
- [21] Phillips G L, Eminson D, Moss B. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated freshwaters[J]. *Aquatic Botany*, 1978, 4: 103-126.
- [22] Blindow I, Andersson G, Hargeby A, et al. Long term pattern of alternative stable states in two shallow eutrophic lakes[J]. *Freshwater Biology*, 1993, 30(1): 159-167.
- [23] Schriver P, Bøgestrand J, Jeppesen E, et al. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton phytoplankton interactions: Large-scale enclosure experiments in a shallow eutrophic lake[J]. *Freshwater Biology*, 1995, 33(2): 255-270.
- [24] 包先明, 陈开宁, 范成新. 浮叶植物重建对富营养化湖泊氮磷营养水平的影响[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 807-811.
BAO Xian-ming, CHEN Kai-ning, FAN Cheng-xin. Effects on nutrient level of a eutrophic lake with reconstructing of floating-leaved aquatic vegetation[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 807-811.
- [25] Bucak T, Saraoğlu E, Lev E E, et al. The influence of water level on macrophyte growth and trophic interactions in eutrophic Mediterranean shallow lakes: A mesocosm experiment with and without fish[J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57(8): 1631-1642.
- [26] 玉沛芳, 王超, 王晓蓉, 等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 890-895.
YU Pei-fang, WANG Chao, WANG Xiao-rong, et al. Purification effects on nitrogen under different concentration and nitrogen conformation transform principles by *Vallisneria spiralis* L.[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 890-895.
- [27] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 152-157.
ZHANG Zhi-yong, ZHENG Jian-chu, LIU Hai-qin, et al. Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 152-157.