

漏湖底质特性对菹草 (*Potamogeton crispus*) 和伊乐藻 (*Elodea nattalii*) 生长的影响*

陶 花¹, 潘继征^{2**}, 沈耀良^{1,3}, 李文朝², 黄 峰¹

(1: 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

(2: 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)

(3: 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215011)

摘 要: 通过模拟试验, 研究漏湖 3 种沉积物(表层湖泥、硬底湖泥、表层覆岸泥)对菹草和伊乐藻生长的影响. 结果表明, 生长于表层湖泥、硬底湖泥、表层覆岸泥的菹草和伊乐藻生物量分别为 4.07、1.98、3.69 kg/m² 和 1.86、1.27、1.74 kg/m², 表层湖泥较适合这两种沉水植物生长. 3 种沉积物对菹草和伊乐藻的干湿比影响显著, 硬底湖泥 > 表层湖泥 > 表层覆岸泥. 在表层覆岸泥和表层湖泥中, 两种沉水植物的叶绿素含量均较高, 伊乐藻在不同沉积物中差别最大, 叶色区别明显. 丙二醛的测定结果进一步表明硬底湖泥不适宜植物生长. 试验结果表明菹草和伊乐藻在漏湖不同的沉积物上能够正常生长, 表现出良好的适应性, 菹草适合在表层湖泥中生长, 伊乐藻更适合在表层覆岸泥中生长, 通过对漏湖不适宜的底质环境进行改造, 以利于沉水植物的生长繁殖, 为漏湖生态修复中的基质修复与沉水植被重建提供理论指导.

关键词: 漏湖; 沉积物; 沉水植物; 基质修复

Effects of substrate character of Lake Gehu on the growth of *Potamogeton crispus* and *Elodea nattalii*

TAO Hua¹, PAN Jizheng², SHEN Yaoliang^{1,3}, LI Wenchao² & HUANG Feng¹

(1: School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, P. R. China)

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

(3: Provincial Key Lab of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, P. R. China)

Abstract: Using mesocosm experiment, this paper studied the effects of three different sediments (surface mud, hard mud and surface mud of bank sediment) of Lake Gehu on the growth of two submerged macrophytes, *Potamogeton crispus* and *Elodea nattalii*. When grown on surface mud, hard mud and surface mud of bank sediment, the mean biomass of *P. crispus* and *E. nattalii* were 4.07, 1.98, 3.69 kg/m² and 1.86, 1.27, 1.74 kg/m², respectively. All the tested species grown on hard mud had the lowest biomass and shoot height. The wet and dry ratio of *P. crispus* and *E. nattalii* was affected significantly by the sediments followed with an order of hard mud > surface mud > surface mud of bank sediment. The contents of chlorophyll-a and chlorophyll-b on the surface mud with bank sediment and surface mud were both higher than those cultured on the hard mud. The difference of leaf colour of *E. nattalii* between the three sediments was remarkable. The measurement of malondialdehyde further suggested that hard mud was not good for the growth of the two submerged macrophytes. Finally the results showed that the two submerged macrophytes were able to grow normally under conditions of different sediments from Lake Gehu. *P. crispus* grew well on surface mud while *E. nattalii* was

* 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418005)、国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07101-007-05)和江苏省科技厅社会发展项目(BE2009697)联合资助. 2010-08-17 收稿; 2010-09-16 收修改稿. 陶花, 女, 1986年生, 硕士研究生; E-mail: tao_hua_2002@sina.com.

** 通讯作者; E-mail: jzhp@niglas.ac.cn.

more adapted to surface mud of bank sediment. Sediment rehabilitation should be made in order to facilitate the growth of submerged macrophytes of Lake Gehu and give a guide on sediment rehabilitation and the submerged macrophytes restoration of Lake Gehu.

Keywords: Lake Gehu; sediment; submerged macrophytes; sediment rehabilitation

沉水植物是浅水湖泊生态系统的重要组成部分,具有吸收和固定水体中氮磷营养物质、增加空间生态位、抑制生物性和非生物性悬浮物、改善水下光照和溶解氧条件、净化水质和为其他水生生物提供多样化的生境等功能^[1-3]。然而,随着水体富营养化进程的加快,沉水植物衰退和消失的现象普遍出现。沉水植物的生长、分布受到一系列环境因素的影响,除了与营养盐、悬浮物、光照、透明度、水位、风浪、溶解氧和 pH 值等有一定关系外^[4-9],与沉积物也有相当紧密的联系。不同沉积物的理化性质有所差异,对沉水植物生根、繁殖与生长也会产生不同程度的影响^[10-13]。雷泽湘等^[14]研究了太湖梅梁湾湖泥(高营养)、岸泥(低营养)两种沉积物对苦草、黑藻、马来眼子菜三种沉水植物生长的影响,研究表明苦草更适合在湖泥、浅水区生长;马来眼子菜更适合在硬泥质、深水环境的环境中生长;黑藻的生存能力最强,在两种沉积物中生长情况都较好。李文朝^[15]选择经过清洗的粗沙、坚硬贫瘠的黄泥、松软肥沃的湖底淤泥及鱼塘淤泥四种底质,结果表明鱼塘淤泥存在低氧化还原电位和高含水率等不利因素,但伊乐藻仍可以适应其环境条件,其成活率与生物量高于前 3 种底质试验组,说明沉积物对水生植物的生长有着重要作用。

溇湖(31°29′-31°42′N, 119°44′-119°53′E)位于长江三角洲太湖流域西部,常州市武进区西南部,总面积 164km²,平均水深 1.27m^[16]。溇湖现处于富营养化阶段,全湖水质为劣 V 类,蓝藻水华频发,近年来湖泊生态系统急剧退化,水生植物消亡,降低了对底泥的固着作用。湖泊沉积物是湖泊营养物质的重要蓄积库,经过一系列物理、化学及生物作用,其中一部分沉积于湖底,并且含有多种有机物和无机营养物质,可以为沉水植物提供营养元素以及微量元素,但不同沉积物中所含的营养元素、微量元素及有机质不同,影响着沉水植物的生长和发展。本文研究了溇湖 3 种沉积物对两种沉水植物生长的影响,以期对溇湖生态修复中的基质修复与沉水植被重建提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究材料

所选择的试验沉水植物为水生态修复中常用的菹草(*Potamogeton crispus*)及伊乐藻(*Eloдея nattalii*),这两种植物生命力都较强,人工栽培容易成活,且分布广泛,种苗来源多。菹草为眼子菜科多年生沉水草本,主要生长在静水池沼中或缓流的河水中,是一种较为耐寒的水生植物,对水质有较强的净化能力。伊乐藻是水鳖科一年生沉水草本,适应性和繁殖能力强,人工栽培很容易成活,其断枝可随水流漂移,能在水中形成不定根^[17]。菹草和伊乐藻可生长在从贫营养到富营养的多类水体中,对水质状况有着较宽的耐受范围,是治理污染水体较好的水生植物^[18]。

1.2 试验设计

菹草石芽和伊乐藻幼苗购于江苏高邮,2009 年 11 月 10 日在溇湖小庙港湖边陆上水池进行引种。试验容器均采用同一型号的塑料桶:上部直径(内径)40cm;底部直径(内径)33cm;高 55cm,容积 60L。预先选择生长一致、健壮的菹草石芽和伊乐藻幼苗,等数量种植,每桶扦插菹草石芽 22 颗,伊乐藻幼苗 22 株。2009 年 12 月 18 日将桶搬运至溇湖太溇运河河口沿岸,为降低昼夜温差,采用半埋式,每个桶留有 15cm 在底质外。

选取溇湖重污染区小庙港中的典型沉积物进行试验,第 1 组为表层湖泥,第 2 组为硬底湖泥,第 3 组为表层覆岸泥(表层湖泥覆湖岸黄泥),每组设 3 个重复,用溇湖原水自然条件下培养,在 3 月底沉水植物进入生长旺盛期时收获。

1.3 测定项目及方法

栽培前对 3 种沉积物进行取样,测定其营养元素的含量。收获前分别采用 pH 110 便携式 pH/ORP 计和 YSI500 溶氧仪测定沉积物的 pH 和氧化还原电位(Eh)以及培养水的 pH、Eh 和溶解氧(DO)。收获时将沉水植物从桶中慢慢取出,用水冲洗掉底泥,将样品带回室内,测定生物量、形态学参数、干湿比、叶片的叶绿

素^[19]和丙二醛(MDA)^[20]. 而后每桶取底质风干, 研磨过筛后测定底泥的 N、P 含量, 总氮(TN)采用凯氏定氮法分析, 总磷(TP)采用酸溶钼锑比色法, 总有机碳(TOC)采用重铬酸钾-硫酸氧化法^[21].

1.4 数据分析方法

采用 SPSS18.0 统计软件对数据差异进行 ANOVA 分析.

2 结果与分析

2.1 试验沉积物背景值

3 种不同类型的沉积物氮、磷及有机质含量存在显著差异($P < 0.001$). 表层湖泥的 TN、TP 及 TOC 含量最高, 表层覆岸泥次之, 硬底湖泥的含量最低(表 1), 表明表层湖泥中的营养元素含量较高, 其次是表层覆岸泥, 而硬底湖泥较贫瘠, 氮磷营养缺乏.

2.2 不同沉积物对两种沉水植物的生物量、分枝数、株高的影响

3 种沉积物生长的菹草的生物量和分枝数存在显著差异($P < 0.01$), 而不同处理的伊乐藻差异不显著($P > 0.01$). 生长于表层湖泥、硬底湖泥、表层覆岸泥的菹草和伊乐藻生物量分别为 4.07、1.98、3.69 kg/m² 和 1.86、1.27、1.74 kg/m², 在硬底湖泥上的菹草和伊乐藻的生物量、分枝数都最低, 其中以菹草的差别最为显著($P < 0.01$). 生长在表层覆岸泥上的菹草和伊乐藻的生物量略低于表层湖泥, 表层湖泥上菹草的分枝数最多, 而表层覆岸泥上伊乐藻的分枝数最多. 表层湖泥中菹草的生物量为硬底湖泥中的 2 倍(图 1, 表 2). 同时观察到生长在硬底湖泥上的菹草植株矮小, 叶片发黄.

3 种沉积物上的菹草株高差异不显著($P > 0.01$), 生长在表层湖泥上的菹草最高, 硬底湖泥上的最低, 比表层湖泥上的低 8 cm. 3 种沉积物上的伊乐藻株高有显著差异($P < 0.01$), 表层覆岸泥中最高, 硬底湖泥中最低. 生长在硬底湖泥上的菹草和伊乐藻株高差异不显著($P > 0.01$), 生长在表层湖泥和表层覆岸泥上的菹草和伊乐藻有显著差异($P < 0.01$)(图 2a). 植物株高的测定结果说明菹草适合在表层湖泥中生长, 伊乐藻适合在表层覆岸泥中生长.

2.3 不同沉积物对两种沉水植物的干湿比的影响

干湿比可以反映植株体内干物质积累情况, 进而判定植株的生长状况. 在植物生长初期, 鲜嫩的植物干湿比小, 生命活动强烈; 而植物生长后期, 老龄植物干物质会增加, 植物生长缓慢. 3 种沉积物对菹草和伊乐藻的干湿比影响显著($P < 0.01$), 表现为硬底湖泥 > 表层湖泥 > 表层覆岸泥(图 2b), 这与植物生物量、株高的变化是基本一致的.

2.4 不同沉积物对两种沉水植物的叶绿素含量的影响

叶绿素是叶片光合作用的物质基础, 叶绿素含量多少与光合能力密切相关, 通常测定干物(DW)叶绿素质量分数来表征植物的生长状况^[22]. 叶绿素 a(Chl. a)、叶绿素 b(Chl. b)和总叶绿素(Chl. a + Chl. b)质量分

表 1 3 种沉积物中 TN、TP 及 TOC 含量

Tab. 1 Contents of TN, TP and TOC in three types of sediments

沉积物	TN(g/kg)	TP(g/kg)	TOC(g/kg)
表层湖泥	3.752 ± 0.006	1.022 ± 0.003	18.921 ± 0.028
硬底湖泥	2.333 ± 0.007	0.858 ± 0.005	12.787 ± 0.035
表层覆岸泥	3.362 ± 0.003	0.927 ± 0.002	17.320 ± 0.030

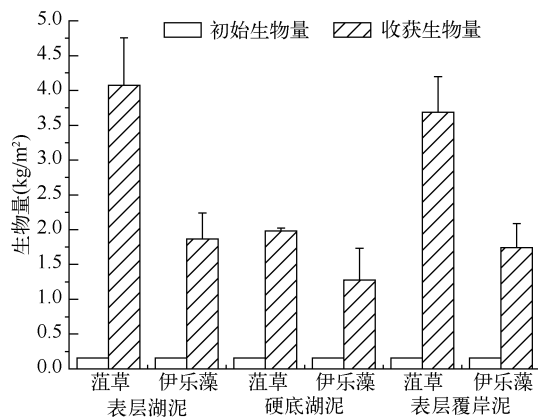


图 1 不同沉积物上两种沉水植物生物量变化

Fig. 1 Biomass variations of the two submerged macrophytes on different types of sediments

表 2 不同沉积物上两种沉水植物的收获分枝数

Tab. 2 Branches harvested in two submerged macrophytes on different types of sediments

沉水植物	表层湖泥	硬底湖泥	表层覆岸泥
菹草	8.5 ± 1.5	5.5 ± 1.5	6.5 ± 0.5
伊乐藻	4.5 ± 0.5	4.0 ± 1.0	5.5 ± 0.5

数表明,3种不同沉积物中的菹草和伊乐藻的叶绿素含量有显著差异($P < 0.01$),在表层覆岸泥和表层湖泥中,两种沉水植物的叶绿素含量均较高(表3).收获时观察到伊乐藻在3种不同沉积物中的差别最大,叶色区别明显;菹草的叶片大部分为浅黄绿色.

表3 不同沉积物中两种沉水植物叶中叶绿素的质量分数

Tab.3 Contents of chlorophyll in leaves of two submerged macrophytes on different types of sediments

沉积物	菹草			伊乐藻		
	Chl. a (mg/g(DW))	Chl. b (mg/g(DW))	Chl. a + Chl. b (mg/g(DW))	Chl. a (mg/g(DW))	Chl. b (mg/g(DW))	Chl. a + Chl. b (mg/g(DW))
表层湖泥	2.740 ± 0.025	0.957 ± 0.036	3.697 ± 0.061	2.144 ± 0.061	0.917 ± 0.044	3.061 ± 0.106
硬底湖泥	2.160 ± 0.122	0.900 ± 0.053	3.060 ± 0.176	1.716 ± 0.002	0.744 ± 0.001	2.460 ± 0.002
表层覆岸泥	2.153 ± 0.235	1.174 ± 0.120	3.327 ± 0.356	2.573 ± 0.085	1.076 ± 0.040	3.649 ± 0.125

2.5 不同沉积物对两种沉水植物的丙二醛的影响

丙二醛(MDA)是植物膜系统保护酶,植物在受到环境胁迫时其含量升高以去除膜系统活性氧,保护膜免受破坏.硬底湖泥上生长的菹草和伊乐藻的MDA最高,表层湖泥上菹草的MDA最低,表层覆岸泥上伊乐藻的MDA最低(图2c).结果表明,表层湖泥适合菹草的生长,表层覆岸泥适合伊乐藻生长,而硬底湖泥不适宜菹草和伊乐藻生长,对植物的生长已产生了不利影响.

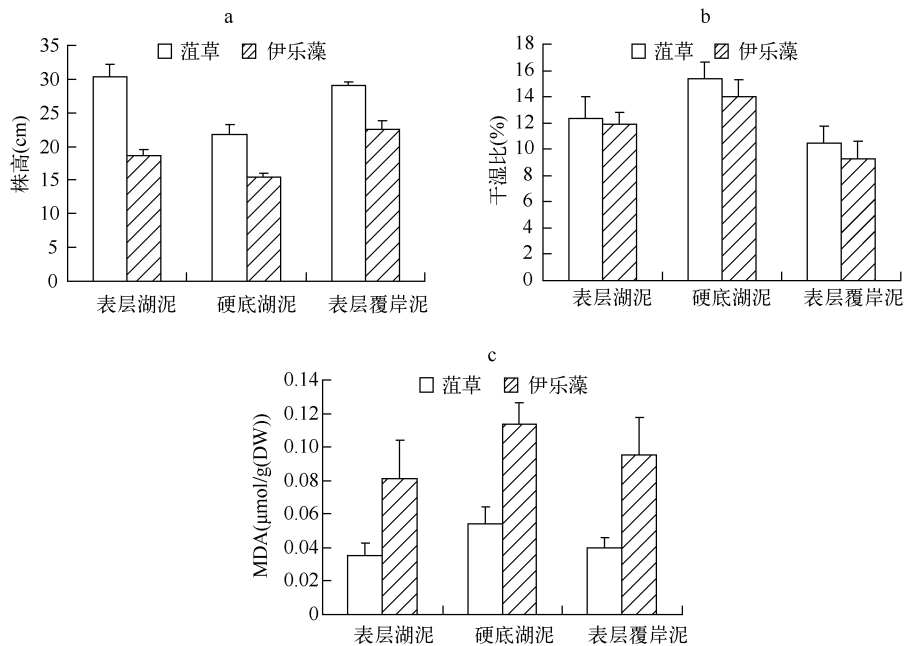


图2 不同沉积物上两种沉水植物株高(a)、干湿比(b)、丙二醛(c)变化

Fig.2 The height (a), ratio of dry to wet (b) and MDA (c) of two submerged macrophytes on different types of sediments

2.6 沉积物 pH、Eh 及剩余营养物的含量比较

在沉水植物收获后,对不同沉积物的 TN、TP、TOC、pH、Eh 进行了测定.与初始值比较,两种沉水植物沉积物中的 TN、TP 含量都有一定变化,在表层湖泥中,以菹草对沉积物中 TN、TP 吸收量最大;硬底湖泥中,两种沉水植物沉积物中的 TN、TP 含量变化不大;在表层覆岸泥中,伊乐藻对沉积物的 TP 吸收最大.菹草和伊乐藻对 3 种沉积物的 Eh 影响差异明显,伊乐藻对 3 种沉积物呈较高的还原状态(表4).这可能与植物生长

性有关,伊乐藻对沉积物的泌氧能力较大,且伊乐藻生长的培养水的 DO、pH 都要比菹草的高(表 5). 沉水植物能有效控制沉积物中的 TN、TP 的释放,菹草和伊乐藻对不同沉积物中的 TN、TP 吸收也不同.

表 4 收获后不同沉积物的 TN、TP、TOC、pH、Eh

Tab. 4 TN, TP, TOC, pH and Eh values of different types of sediments in the end

沉积物	植物类型	TN(g/kg)	TP(g/kg)	TOC(g/kg)	pH	Eh(mV)
表层湖泥	菹草	3.120 ± 0.007	0.750 ± 0.002	15.372 ± 0.026	7.24	-81.8
	伊乐藻	3.462 ± 0.006	0.802 ± 0.004	17.883 ± 0.036	7.53	-175.1
硬底湖泥	菹草	2.208 ± 0.005	0.782 ± 0.005	11.476 ± 0.031	7.52	-76.4
	伊乐藻	2.268 ± 0.004	0.782 ± 0.005	10.238 ± 0.029	7.85	-119.5
表层覆岸泥	菹草	2.901 ± 0.006	0.721 ± 0.003	15.368 ± 0.027	7.28	-98.5
	伊乐藻	2.976 ± 0.007	0.704 ± 0.002	16.326 ± 0.031	7.81	-181.7

表 5 结束时沉水植物生长的培养水的 pH、Eh 和 DO 均值

Tab. 5 Mean values of pH, Eh and DO in water for the growth of submerged macrophytes in the end

沉积物	菹草			伊乐藻		
	pH	Eh(mV)	DO(mg/L)	pH	Eh(mV)	DO(mg/L)
表层湖泥	10.18	64.8	14.61	10.28	81.3	16.25
硬底湖泥	10.06	62.2	13.66	10.10	77.8	15.56
表层覆岸泥	10.09	61.5	13.98	10.41	65.5	16.41

3 结论与建议

(1) 不同沉积物对沉水植物的生长有明显影响,表层湖泥中两种沉水植物的生物量最高,硬底湖泥中的两种沉水植物的生物量、株高最低,干湿比、MDA 都最大. 结果表明硬底湖泥营养水平较低,对植物生长产生一定的负面影响.

(2) 菹草和伊乐藻在漏湖不同的沉积物上能够正常生长,表现出良好的适应性. 但在不同的沉积物条件下,其生长状况差异显著,菹草适合在表层湖泥中生长,伊乐藻更适合在表层覆岸泥中生长,因此可以在漏湖对不适宜的底质环境进行一定的改造,以利于沉水植物的生长繁殖.

(3) 在漏湖沉水植被重建过程中,需要根据不同沉水植物适应基质的差异性来构建水生植物群落,对不适宜沉水植物生长的基质进行一定的修复. 沉水植物的种类较多,需要对其他沉水植物适应基质做进一步研究,以保证沉水植物能够良好的生长,进而实现湖泊沉水植被重建和生态系统的恢复.

4 参考文献

- [1] Jeppesen E, Sondergaard M, Sondergaard M *et al.* The structuring role of submerged macrophytes in lakes. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **26**(2):230-232.
- [2] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidevesi. *Water Research*, 2003, **37**:4468-4474.
- [3] Faafeng BA, Mjelde M. Clear and turbid water in shallow Norwegian lakes related to submerged vegetation. *Ecological Studies*, 1998, **131**:361-368.
- [4] 秦伯强,高 光,胡维平等. 淡水湖泊生态系统修复的理论与实践思考. *湖泊科学*, 2005, **17**(1):9-16.
- [5] Irfanullah HM, Moss B. Factors influencing the return of submerged plants to a clear-water, shallow temperate lake. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(3):177-191.
- [6] Scheffer M. Shallow lakes revisited: Various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 2007, **584**:455-466.
- [7] Jeppesen E. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake

- size and climate. *Hydrobiologia*, 2007, **581**:269-285.
- [8] 古滨河. 美国 Apopka 湖的富营养化与生态修复. 湖泊科学, 2005, **17**(1):1-8.
- [9] Havens KE, Sharfstein B, Brady MA *et al.* Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA. *Aquatic Botany*, 2004, **78**(1):67-82.
- [10] Barko JW, Smart RM. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. *Ecology*, 1986, **67**:1328-1340.
- [11] Barko JW, Adams MS, Clesceri NL. Environmental factors and their consideration in the management of submersed aquatic vegetation; A review. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1986, **24**:1-10.
- [12] Barko JW, Gunnison DG, Carpenter SR. Sediment interactions with submerged macrophytes growth and community dynamics. *Aquatic Botany*, 1991, **41**:41-65.
- [13] Ni LY. Stress of fertile sediment on the growth of submerged macrophytes in eutrophic waters. *Acta Hydrobiological Sinica*, 2001, **24**(4):399-405.
- [14] 雷泽湘, 谢贻发, 刘正文. 太湖梅梁湾不同沉积物对 3 种沉水植物生长的影响. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, **40**(2):260-263.
- [15] 李文朝. 五里湖底质条件与水生高等植物的适应性研究. 湖泊科学, 1996, **8**(增刊):30-36.
- [16] 高亚岳, 周俊, 陈志宁等. 溧湖富营养化进程中沉水植被的演替及重建设想. 江苏环境科技, 2008, **21**(4):21-24.
- [17] 连光华, 张圣照. 伊乐藻等水生高等植物的快速营养繁殖技术和栽培方法. 湖泊科学, 1996, **8**(增刊):11-16.
- [18] 王文林, 王国祥, 李强等. 菹草-伊乐藻群落对富营养化水体水质的净化效果. 南京师范大学学报(自然科学版), 2006, **29**(4):111-116.
- [19] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨. 光谱实验室, 2002, **19**(4):478-481.
- [20] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术. 北京:化学工业出版社, 2006:76-78.
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京:科学出版社, 2000:146-185.
- [22] Geider RJ. Responses of the photosynthetic apparatus of *Dunaliella teritolecta* (Chlorophyceae) to nitrogen and phosphorus limitation. *European Journal of Phycology*, 1998, **33**(4):315-322.