

沉积物理化性质与沉水植物鲜重、多样性指数及种的饱和度相关性*

黄蔚^{1,2}, 陈开宁^{1**}

(1: 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)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 在沉水植物的生活史中, 沉积物提供植物固着基质和所需的大量营养元素, 对沉水植物的兴衰有长期且深远的影响. 对太湖沉积物理化性质与沉水植物生物量、种的饱和度和物种多样性之间的相关关系进行研究. 数据的典型相关分析表明, 两组数据的第一典型相关系数为 0.795, 达到显著水平. 最后的典型变量冗余分析显示, 沉水植物指标形成的第一典型分量能解释沉积物指标变化的 26.75%. 但是, 沉水植物指标的变化中的 56.52% 不能被沉积物的第一典型分量解释. 沉水植物的第一典型变量对沉积物氮磷比有一定预测能力(多重相关的平方 0.5258), 而对含水率几乎没有预测能力(0.0280). 来自沉积物的第一典型变量对沉水植物的鲜重(0.7503)、香农-威纳指数(0.4841)和种的饱和度(0.4613)都有一定预测能力. 中层沉积物(5-10cm)和底层沉积物(10-15cm)理化性质与沉水植物的相关指标分析结果显示, 数据之间相关性不显著. 表明中下层沉积物对沉水植物影响不明显.

关键词: 沉水植物; 沉积物; 粒度; 氮磷比; 香农-威纳指数; 典型相关分析; 太湖

The correlation between the physics-chemical properties of sediments and species saturation, fresh weight and diversity index of submerged macrophytes

HUANG Wei^{1,2} & CHEN Kaining

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

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: In the life history of submerged macrophyte, they obtain most of their nutrients from the sediment. The properties of sediment exert an important effect on the growth of aquatic plant. We analyzed the correlations between the physics-chemical properties of sediments and submerged macrophyte parameters. The correlation analysis showed that physics-chemical properties of sediments explained 56.52% variations of submerged macrophyte, while characteristics of submerged macrophyte only explain 26.75% variations of physics-chemical properties of sediments. The first canonical variables of the submerged macrophytes explained variation of TP/TN to some extent (Squared multiple correlations is 0.5258), but could not explain variation of water content well (0.0280). Variations of Fresh weight (0.7503), Shannon-Wiener index (0.4841) and Species saturation (0.4613) could be explained by the first canonical variable of the surface sediment parameters well. Additionally, Canonical Correlation Analysis revealed that only weak correlation existed between subsurface sediment parameters (5-15cm depth) and submerged macrophyte parameters.

Keywords: Submerged macrophyte; sediment; grain size; total nitrogen/total phosphorus; Shannon-Wiener index; Canonical Correlation Analysis; Lake Taihu

沉水植物在维持水生生态系统结构和功能方面具有重要作用, 而沉积物的理化性质对沉水植物的兴衰有不可忽视的影响^[1]. 沉积物不但提供沉水植物的附着基质, 还供应沉水植物生长发育所需的大量元素^[2].

* 江苏省科技厅社会发展项目(BE2008690、BS2007161)、国家自然科学基金项目(30670373)、国家科技支撑规划项目(2006BAC10B03)和国家水污染治理专项巢湖项目(2008ZX07103-005)联合资助. 2009-09-14 收稿; 2009-11-18 收修改稿. 黄蔚, 男, 1985年生, 硕士; E-mail: amwuanff@163.com.

** 通讯作者; E-mail: knchen@niglas.ac.cn.

然而,沉积物性质究竟如何影响沉水植物的生长发育?目前尚存在一定的分歧.

研究显示,随着沉积物中有机质含量的增加,大量无机还原物会对植物根系产生毒害作用,沉水植物生长受到抑制^[3];Barko 和 Smart 的研究也得出两者关系呈负相关的结论^[4]. Carr^[5] 和 Short^[6] 分别证明了沉水植物生物量与沉积物总磷和总氮总量呈显著正相关.然而也有一些不同的观点:认为沉积物理化性质与沉水植物生长之间关系不密切. Robach 等证实植物组织氮磷与沉积物总磷之间相关性未达到显著水平,表明沉水植物还可以通过其他途径吸收营养元素^[7]. 随后, Demars 等通过大量数据表明沉水植物的分布与沉积物的理化性质没有必然的联系,只与沉水植物的繁殖策略和生活史相关^[8].

许多研究是在室内受控条件下进行的,沉水植物的生长状况与不同沉积物类型之间有较好的响应模式^[2,9]. 自然条件下,多种影响因素共同作用,相互影响,两者的相关性可能变得模糊. 鉴于此,本文研究了自然条件下太湖沉水植物的生长与表层沉积物的理化性质之间的相关性,如果两者显著相关,哪些参数是起主导作用?此外,同时研究了次表层(5-15cm)沉积物与沉水植物生长之间的关系,目的是为沉水植物恢复时适应何种类型沉积物提供参考.

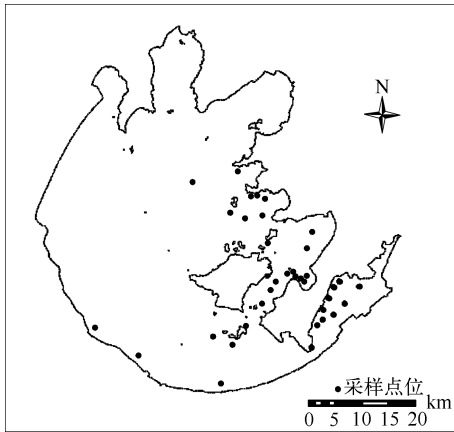


图1 太湖采样点位置图

Fig. 1 Location of sampling points in Lake Taihu

1 实验与方法

1.1 野外调查取样

2008年8月下旬至9月上旬对太湖沉水植物及根际沉积物进行调查. 样地设在典型沉水植物群落中心部分,避免选在两个植被类型的过渡地带. 本次调查样地数为34个(图1). 本实验设计的样地中,水生植物皆为自然生长,人类干扰相对较小.

用重力采样器采集柱状泥样,泥样从表层向下分成0-5cm、5-10cm、10-15cm三份,装入塑料袋,存入便携式冰箱. 每个采样点采集两个平行泥样. 随后用水草夹采集沉水植物,样方大小0.4m×0.5m. 每个样方重复采样两次. 漂洗样方内的植物,分类并称量. 随后用抓钩进行2-3次沉水植物定性采样,以准确反映沉水植物的分布与群落特征. 本次调查的水生植物范围限于 Braun-Blanquet^[10]的生活型系统中的根着沉水植物.

1.2 含水率和有机质含量测定

沉积物样过2mm的网筛,取40-50g土样,在105℃下烘干至恒重,测含水率;取3-4g沉积物样品(干重),在550℃的条件下烧2h,测定烧失量^[11].

1.3 沉积物粒度测定

取沉积物样品0.2-0.5g,加入10ml浓度为10%的双氧水,在加热板上加热使其充分反应以有效地除去样品中的有机质,之后加入10ml浓度为10%的盐酸并煮沸使其充分反应除去碳酸盐. 将烧杯中注满蒸馏水并静置一夜,去掉上层清液,加入10ml浓度为0.05mol/L的六偏磷酸钠分散剂并用超声波清洗机振荡10min后使用Malvern Mastersize 2000粒度仪进行测量^[12]. 本文选用最能反映沉积物样品粒径的中值粒径进行数据分析.

1.4 沉积物总氮和总磷测定

新鲜沉积物自然风干,研磨并过100目筛. 总氮的测定参照重铬酸钾-硫酸消化法,总磷测定选用高氯酸-硫酸消化法^[13].

1.5 物种多样性指数计算

物种多样性指数按照 Shannon-Wiener 指数公式计算,计算公式中 log 选用 2 为底,单位为 bit.

1.6 数据分析方法

为了比较全面的反映沉水植物及群落生长状况,选用三个指标:种的饱和度,物种多样性指数和群落生物量(鲜重). 至于沉积物理化性质方面,选用含水率、烧失量、粒度、总氮、总磷和氮磷比六个指标.

对两组数据进行典型相关分析. 分析时, 典型相关分析程序从各组中找出具有最高典型相关的一对典型变量, 称为第一典型变量. 然后程序在找出具有次典型相关的另一对典型变量, 称为第二典型变量, 如此反复多次. 重复次数等于含较少变量那一组的变量数目. 统计分析中的显著水平, 除特别标注的, 全设为 0.05. 分析采用 SAS 8.0.

2 实验结果

2.1 表层(0-5cm)沉积物理化特征与沉水植物指标的典型相关分析

沉积物和沉水植物的相关指标的描述性统计见表 1. 两组变量共 9 个指标间相关系数统计结果显示(表 2), 在沉积物理化指标中, 除总磷与氮磷比值之间的相关系数较大外, 其他的指标之间相关性处于中等水平. 表明本研究选用的沉积物指标冗余信息较小, 能很好的反映湖区内沉积物之间差异. 而沉水植物指标间的相关系数略高于沉积物指标间的相关系数. 尤其是种的饱和度和物种多样性指数达到了 0.843. 两组变量之间的相关性中, 值得注意的是, 沉积物的氮磷比和总氮与沉水植物的所有指标呈正相关, 而总磷与沉水植物所有指标之间均为负相关.

表 1 9 个参数间的描述性统计
Tab. 1 Descriptive statistics of characteristics of nine parameters

参数	含水率 (%)	粒度 (μm)	烧失量 (%)	总氮 (g/kg)	总磷 (g/kg)	氮磷比 TN/TP	种的饱和度	鲜重 (kg/m^2)	物种多样性指数 (bit)
平均	44.16	15.22	4.00	1.43	0.35	4.11	3.91	3.22	1.35
标准差	7.51	0.94	0.74	0.06	0.00	0.18	0.39	0.28	0.14
最小值	29.74	9.46	2.76	0.73	0.31	2.11	0.00	0.00	0.00
最大值	50.88	33.43	5.92	2.16	0.37	6.21	9.00	6.57	2.89

表 2 9 个参数间的皮尔森相关系数
Tab. 2 Pearson's correlation coefficients of nine parameters

参数	含水率 (%)	粒度 (μm)	烧失量 (%)	总氮 (g/kg)	总磷 (g/kg)	氮磷比 TN/TP	种的饱和度	鲜重 (kg/m^2)
粒度 (μm)	0.045							
烧失量 (%)	0.201	-0.443 **						
总氮 (g/kg)	0.496 **	-0.225	0.504 **					
总磷 (g/kg)	0.337	0.180	-0.110	0.106				
氮磷比 (TN/TP)	0.443 **	-0.253	0.521 **	0.990 **	-0.034			
种的饱和度	0.242	-0.207	0.398 *	0.635 **	-0.213	0.675 **		
鲜重 (kg/m^2)	0.107	-0.168	0.685 **	0.585 **	-0.354 *	0.645 **	0.598 **	
多样性指数	0.290	-0.307	0.453 **	0.698 **	-0.218	0.735 **	0.843 **	0.628 **

** 显著性 $P < 0.01$; * 显著性 $P < 0.05$ (双尾检验).

典型相关分析的结果显示(表 3), 第一典型相关系数的平方是 0.795, 比沉积物和沉水植物指标间任何一个相关系数都大, 相关系数达到显著水平 ($P < 0.001, \alpha = 0.01$), 而第二、第三典型相关系数均未通过显著检验 ($P = 0.3122, P = 0.867$).

表 3 表层沉积物理化指标和沉水植物指标的典型相关分析

Tab. 3 Canonical Correlation Analysis between surface sediment parameters and submerged macrophyte parameters

典型变量编号	典型相关系数	修正典型相关系数	近似标准差	典型相关系数的平方
1	0.891743	0.869177	0.03565	0.795206
2	0.548564	0.456475	0.121694	0.300922
3	0.236612	0.079839	0.164332	0.055985

由于选用的9个指标单位不一致,所以选用标准化的典型变量系数来构建典型相关变量公式,来自沉积物指标的第一典型变量为方程(1).这一典型变量主要反映的是氮磷比和总氮等化学指标,而含水率的影响可以忽略不计.

$$\text{沉积物第一典型变量} = -0.0083 \text{ 含水率} + 0.2058 \text{ 粒度} + 0.4994 \text{ 烧失量} - 7.8136 \text{ 总氮} + 0.7480 \text{ 总磷} + 8.3668 \text{ 氮磷比} \quad (1)$$

来自沉水植物指标的第一典型变量为方程(2).这一典型变量主要反映的是生物量,其次是种的饱和度和,最后反映的是物种多样性指数.

$$\text{沉水植物第一典型变量} = 0.1737 \text{ 种的饱和度} + 0.7749 \text{ 鲜重} + 0.1474 \text{ 物种多样性指数} \quad (2)$$

沉积物原始变量与沉积物典型变量的相关关系(图2a),结合前面标准化典型变量的系数的分析结果,说明除了氮磷比和烧失量符号前后一致外,其他指标的系数前符号出现反号,表明其他4个指标为抑制变量,平衡参数的波动幅度.而沉水植物指标参数未出现相反的现象,即没有抑制变量的存在(图2b).

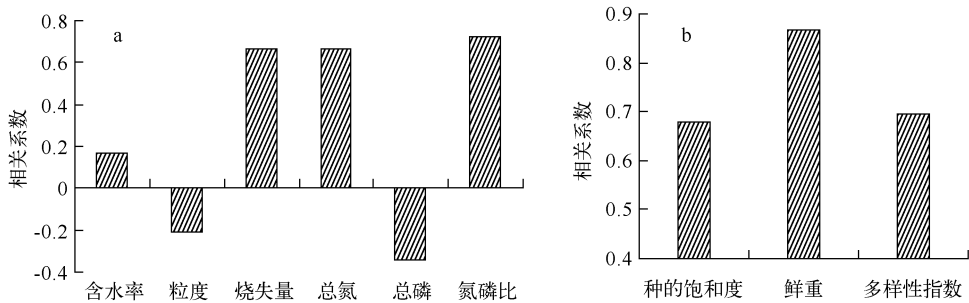


图2 表层沉积物原始变量与沉积物典型变量的相关关系(a);
沉水植物原始变量与沉水植物典型变量的相关关系(b)

Fig. 2 Correlations between the surface sediment parameters and their canonical variables(a);
correlations between the macrophyte parameters and their canonical variables(b)

典型变量冗余分析(表4)结果显示,沉水植物指标形成的第一典型分量能解释沉积物指标变化的26.75%,由于第二和第三典型分量统计学上检验不显著,仅供参考.然而,沉水植物指标的变化中有56.52%能被沉积物的第一典型分量解释.

表4 变量被对应的那一组变量解释的标准化比例

Tab. 4 Standardized variance of the parameters explained by the opposite canonical variables

典型变量编号	沉积物典型变量的方差被沉水植物典型变量解释		沉水植物典型变量的方差被沉积物典型变量解释	
	比例	累计比例	比例	累计比例
1	0.2675	0.2675	0.5652	0.5652
2	0.0484	0.3158	0.0647	0.6299
3	0.0046	0.3204	0.0042	0.6341

多重相关系数的平方数据显示(图3),沉水植物的第一典型变量对氮磷比(多重相关的平方0.5258),烧失量(0.4444)和总氮(0.4439)有一定预测能力,而对含水率(0.0280)几乎没有预测能力.来自沉积物的第一典型变量对鲜重(0.7503),多样性指数(0.4841)和种的饱和度(0.4613)都有一定预测能力.

2.2.5 -10cm 和 10-15cm 沉积物理化特征与沉水植物指标的典型相关分析

考虑到部分根着沉水植物根系发达,分析次表层(5-15cm)沉积物的理化特性与沉水植物的相关指标之间的关系,结果见表5.典型相关分析显示在沉积物深度为5-10cm,两组数据的第一典型变量的相关系

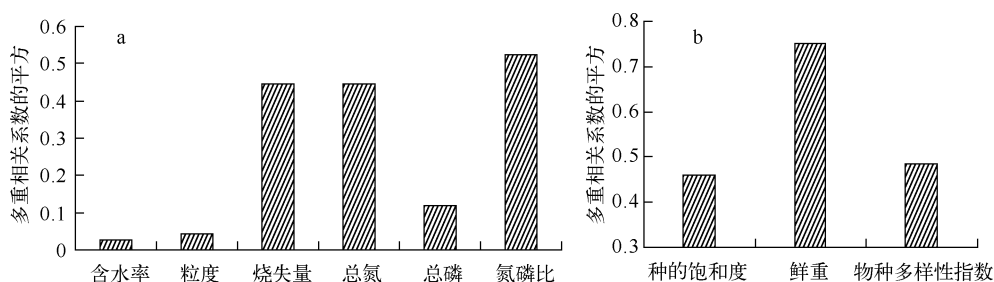


图3 表层沉积物参数与沉水植物指标典型变量间的双重相关系数的平方(a);
沉水植物指标与表层沉积物指标典型变量间的双重相关系数的平方(b)

Fig. 3 Squared multiple correlations between the surface sediment and the first canonical variables of the macrophyte (a); squared multiple correlations between the macrophyte and the first canonical variables of surface sediment (b)

数仅为 0.5976; 在 10-15cm 的情况下, 两组数据的第一典型变量相关系数仅为 0.5175, 都没有通过检验. 表明中层(5-10cm)以及底层(10-15cm)沉积物对根生沉水植物影响小于表层沉积物.

表 5 5-10cm、10-15cm 沉积物理化指标和沉水植物指标的典型相关分析的结果

Tab. 5 Canonical Correlation Analysis between sediment parameters at 5-10cm, 10-15cm depth and submerged macrophyte parameters

深度(cm)	典型变量编号	典型相关系数	修正典型相关系数	近似标准差	典型相关系数的平方
5-10	1	0.597623	0.425651	0.117367	0.357154
	2	0.489242	0.415868	0.138874	0.239358
	3	0.272401	0.164485	0.169027	0.074202
10-15	1	0.517500	0.096639	0.159778	0.267806
	2	0.454060	-	0.173228	0.206170
	3	0.315078	-	0.196554	0.099274

3 讨论

氮是除碳、氢、氧外在植物体内含量最多的元素, 参与很多蛋白质和酶的合成. 氮源充足与否直接影响植物生长和分布. 氮元素在很多生态系统中是一个重要的限制因子^[14]. 本研究的结果表明, 沉积物的总氮与沉水植物鲜重、多样性指数和种的饱和度呈正相关, 与 Short^[6] 的报道类似. 缺氮会导致植物叶绿素含量下降, 叶片变黄, 植物光合能力显著下降^[15], 植株瘦弱, 发育不良. 反之, 沉水植物生物量和生物多样性显著提高. 若沉水植物长期处于氮不足的生境中, 群落结构可能趋于简单, 系统稳定性降低, 若遇突发事件(如洪水, 强风)常诱发沉水植物大面积死亡.

磷没有挥发性, 在生态系统中属于沉积型循环, 循环的起点源于岩石的风化, 终于水中沉积. 由于人类不断加强磷矿的开采, 导致大量磷随着水流进入湖海, 大部分沉积在底泥中. 除了鸟类和对鱼的捕捞, 磷没有回到陆地的有效途径, 于是沉积物中的总磷含量逐年上升^[16]. 沉水植物生长所需的磷主要从沉积物中吸取^[17-18], 所以, 沉水植物很少出现缺磷症状. 本研究结果显示, 沉水植物的生物量、种的饱和度和物种多样性都与总磷呈负相关, 其中磷与沉水植物鲜重的负相关达到显著水平(表 2). 这是否由于植物根系吸收磷所造成的现象还有待进一步研究.

皮尔森相关系数显示烧失量与沉水植物鲜重、种的饱和度和多样性指数呈正相关, 而在典型相关分析中, 烧失量的权重不高, 表明沉积物中有机质增加能促进沉水植物的生长, 但沉积物的氮磷含量对沉水植物的影响更大. 这与前人的研究结果存在差异, 其原因是本研究较高的沉积物有机质并没有达到对植物产生负面影响的程度. 邱东茹等曾指出, 高有机质含量的沉积物对沉水植物根系有毒害作用^[19]. 沉积物的物理结

构同样与植物生长有关,如沙质土壤往往营养元素贫瘠、有机质含量低,影响植物的密度和生物量^[20-21]. Baattrup-Pedersen 等证实沙土和粘土混合的生境中,生物多样性指数才会增加^[22]. 本实验却显示他们与沉水植物的相关性不高. 可能的原因是,这几个参数在调查的湖区内波动小(表 1),尚未对沉水植物的生长构成胁迫,所以在统计分析的结果中的权重偏低.

来自沉积物的第一典型变量对鲜重的预测能力较好,而对多样性指数和种的饱和度预测能力略有下降,表明沉水植物的生物量受到沉积物理化性质的影响较大;植物物种多样性则表现出更高的不可预测性,可能是由于多种生态学过程参与其中所致,如种内和种间竞争关系影响着物种丰度和多度^[23].

本研究发现沉积物指标能很好预测沉水植物生长状况(56.52%),沉水植物对沉积物指标的预测能力不高(26.75%). 这一现象与陆地生态系统中环境与植被的关系类似,植被和环境是不可分割的统一体^[24]. 环境是相互作用的物理因子和生物因子的综合体,它为植物的生长提供了最低条件,在决定植被类型上起着决定作用. 植被基本上是严格的生态环境选择的结果,但植被也影响着生境,创造着特有的内部环境. 水域生态系统的沉水植被也是如此,强烈地受到调查湖区生境的影响. 而沉积物是沉水植被生境的重要组成部分之一. 因此,沉积物第一典型变量能解释半数以上的沉水植物第一典型变量的变化. 水生植物对沉积物也产生影响,水生植物是土壤形成的参与者,植物体最终不易分解的部分是土壤的重要组成部分;沉水植物改变水文条件,增加了悬浮物沉降速率^[25];根系泌氧改变沉积物的氧化还原条件^[26]等等,这些必然引起沉积物理化特征的变化. 鉴于沉水植物在物质循环方面影响,部分植物甚至成为环境变化的指示种^[32]. 然而,短时间尺度上,沉水植物对沉积物理化性质的影响是微弱的,如根际氧的扩散范围小于 1cm^[27]. 因此沉水植物对环境预测能力是有限的.

生境中其他环境因子是导致两者预测能力无法提高的重要原因. 研究表明,水深变化会改变水下光环境影响植物的总体分布^[28];水体中的氮磷浓度也会导致沉水植物分布出现波动^[1];水上运输和旅游加速物种的扩散^[29]等等. 另外,沉水植物与沉积物之间的响应滞后也降低两组数据的相关性水平.

次表层沉积物的理化性质与沉水植物相关参数的统计分析显示,两组数据相关性不显著. 综合表层沉积物的相关分析形式:随着沉积物深度增加,沉积物理化性质对沉水植物的生长影响逐渐减弱. 沉水植物的有性和无性繁殖体基本分布在沉积物的表层,为满足植物体营养的需求和植株的固定,根系不断向下发展,但表层沉积物对沉水植物早期萌发和生长起决定作用. 沉水植物一旦成功定植,会凭借其宽生态位、强繁殖能力^[30]迅速建立种群,所以沉水植物很少受到深层土壤影响. 因此,在湖泊生态修复的过程中,若仅考虑恢复沉水植物,只需重点考虑表层沉积物的理化性质改良即可,避免盲目改造深层基底,造成不必要的资金浪费.

4 参考文献

- [1] Hough RA, Fornwall MD, Negele BJ *et al.* Plant community dynamics in a chain of lakes-principal factors in the decline of rooted macrophytes with eutrophication. *Hydrobiologia*, 1989, **173**(3): 199-217.
- [2] Barko JW, Smart RM. Sediment-based nutrition of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 1981, **10**(4): 339-352.
- [3] Carpenter SR. Submersed vegetation: An internal factor in lake ecosystem succession. *American Naturalist*, 1981, **118**(3): 372-383.
- [4] Barko JW, Smart RM. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1328-1340.
- [5] Carr GM. Macrophyte growth and sediment phosphorus and nitrogen in a Canadian prairie river. *Freshwater Biology*, 1998, **39**(3): 525-536.
- [6] Short FT. The seagrass, *Zostera Marina* L.: plant morphology and bed structure in relation to sediment ammonium in izembek lagoon, Alaska. *Aquatic Botany*, 1983, **16**(2): 149-161.
- [7] Robach F, Hajsek I, Eglin I *et al.* Phosphorus sources for aquatic macrophytes in running waters: Water or sediment? *Acta Botanica Gallica*, 1995, **142**(6): 719-731.
- [8] Demars BOL, Harper DM. Distribution of aquatic vascular plants in lowland rivers: Separating the effects of local environmental conditions, longitudinal connectivity and river basin isolation. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(3): 418-437.

- [9] Barko JW. The growth of *Myriophyllum spicatum* L in relation to selected characteristics of sediment and solution. *Aquatic Botany*, 1983, **15**(1) :91-103.
- [10] Braun-Blanquet J. Pflanzensozologie. New York :Springer-Verlag, 1964.
- [11] Håkanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology. New York :Springer-Verlag, 1983.
- [12] An Z, Kukla G, Porter S *et al.* Late quaternary dust flow on the Chinese loess plateau. *Catena*, 1991, **18**(2) :125-132.
- [13] 金相灿, 屠清璞. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [14] Vitousek PM, Howarth RW. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, **13**(2) : 87-115.
- [15] Field C, Mooney H. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants // On the economy of plant form and function. Harvard: Cambridge University Press, 1986: 25.
- [16] Delaney ML. Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, **12**(4) :563-572.
- [17] Carignan R, Kalf J. Phosphorus sources for aquatic weeds: Water or sediments? *Science*, 1980, **207**(4434) :987-989.
- [18] Rattray MR, Howard-Williams C, Brown JMA. Sediment and water as sources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes. *Aquatic Botany*, 1991, **40**(3) :225-237.
- [19] 邱东茹, 吴振斌. 武汉东湖湖水和底泥对黄丝草生长的影响. 植物资源与环境, 1997, **6**(4) :45-49.
- [20] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟民等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. 应用生态学报, 2006, **17**(8) :1511-1516.
- [21] Mengel K, Kirkby EA. Principles of plant nutrition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [22] Baattrup-Pedersen A, Riis T. Macrophyte diversity and composition in relation to substratum characteristics in regulated and unregulated Danish streams. *Freshwater Biology*, 1999, **42**(2) :375-385.
- [23] Cody M, Diamond J. Ecology and evolution of communities. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of the Harvard University Press, 1975.
- [24] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [25] Gacia E, Granata TC, Duarte CM. An approach to measurement of particle flux and sediment retention within seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows. *Aquatic Botany*, 1999, **65**(1-4) :255-268.
- [26] Frederiksen MS, Glud RN. Oxygen dynamics in the rhizosphere of *Zostera marina*: A two-dimensional planar optode study. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(2) :1072-1083.
- [27] Schaumburg J, Schranz C, Hofmann G *et al.* Macrophytes and phytobenthos as indicators of ecological status in German lakes—a contribution to the implementation of the water framework directive. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2004, **34**(4) :302-314.
- [28] Seabloom EW, van der Valk AG, Moloney KA. The role of water depth and soil temperature in determining initial composition of prairie wetland coenoclines. *Plant Ecology*, 1998, **138**(2) :203-216.
- [29] Johnstone IM, Coffey BT, Howard-Williams C. The role of recreational boat traffic in interlake dispersal of macrophytes: A New Zealand case study. *Journal of Environmental Management*, 1985, **20**(3) :263-279.
- [30] Santamaría L. Why are most aquatic plants widely distributed? Dispersal, clonal growth and small-scale heterogeneity in a stressful environment. *Acta Oecologica*, 2002, **23**(3) :137-154.