

沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响*

包先明^{1,2}, 陈开宁¹, 范成新^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采集未破坏沉积物结构的柱状沉积物样品, 通过室内 41 d 的培养实验, 研究了沉水植物生长过程对间隙水中 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的浓度的动态影响, 分析了沉水植物生物量与沉积物中氮磷释放通量的对应关系。结果表明: 随沉水植物生长和生物量增加, 上部 0–5 cm 沉积物垂向各层间隙水中 NH_4^+ -N 含量呈逐步降低, 表现出沉积物–水界面氮的释放通量与沉水植物生物量存在负相关性; 而间隙水 PO_4^{3-} -P 含量则随沉水植物生长呈单峰型变化, 磷释放通量与生物量相关性不明显。初步反映沉水植物在沉积物的生长过程中对氮磷吸收的生物地球化学机制是不同的。

关键词: 沉水植物生长; 间隙水; 氮和磷; 释放; 生物地球化学

Effects on nitrogen and phosphorus distribution in interstitial water and sediment-water nitrogen and phosphorus release with growing of submerged macrophytes

BAO Xianming^{1,2}, CHEN Kaining¹ & FAN Chengxin¹

(1: Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

Abstract: Effect with growing of submerged macrophytes on NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P concentration in the interstitial water was studied by using undisturbed core samples in Lake Taihu, and analyzed the relationship between biomasses of submerged macrophytes and amount of nitrogen and phosphorus release. The results showed that concentration of NH_4^+ -N from 0–5 cm in interstitial water was gradually reduced by the biomasses increase of submerged macrophytes, and amount of nitrogen release is distinctly negative correlated with biomasses of submerged macrophytes; The PO_4^{3-} -P concentration in interstitial water change was me peak tendency by the growing of submerged macrophytes, indicating that there was no distinct correlations between amount of phosphorus release and biomasses of submerged macrophytes. There might exist different biogeochemical mechanism of the absorption of nitrogen and phosphorus by submerged macrophytes.

Keywords: Submerged macrophytes; interstitial water; nitrogen and phosphorus; release; biogeochemistry

水生植被的恢复和重建作为浅水湖泊生态调控和污染负荷控制的重要手段, 近年来已被较广泛应用, 并逐步涉及到对其调控和控制机理的探索性研究中^[1–3]。但现有的研究手段而言, 几乎多采用的是在现场围隔实验栽培或在分散性底泥上进行的种植, 这样外部干扰性因素相对难以排除, 另一方面在层理结构受损的分散沉积物面上进行实验植物生长实验, 几乎不能得到过程中物质迁移的实际通量, 因而难以真实反映出水生植物的生长(包括恢复和重建)对底泥内源的控制效果。这些研究也多集中在水生植物的恢复对上覆水养分的影响方面^[4,5], 而对于沉水植物生长中对间隙水中养分变化的影响, 以及对沉积物–水界面营养物释放通量的影响则尚未见文献报道。由于间隙水中营养物的变化直接与沉积物的内源负荷有直接

* 国家 973 计划(2002CB412307)、国家高技术研究发展计划 863 项目(2002AA601013)和中国科学院知识创新项目(KZCX 3–SW–348、KZCX1–SW–12)联合资助。2005–08–01 收稿, 2005–11–11 收修改稿。包先明, 男, 1983 年生, 博士研究生。

** 通讯联系人; E-mail: cxfan@niglas.ac.cn.

关系^[6-8],因此作者考虑在不扰动沉积物样品下进行室内水生植物栽培实验,以期从生物地球化学角度探讨沉水植物的生长对间隙水中营养物变化的影响,以及与沉积物-水界面营养物释放通量的对应关系,为采用生态修复工程治理湖泊污染提供科学依据。

太湖北部的五里湖是无锡市城郊湖泊,该湖面积约 5.6 km²,平均水深 2 m,底泥深约 1.3 m, pH8.5 左右,水体中 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 及总磷和总氮水平多年来为全太湖各湖区最高,未疏浚区氮、磷的夏季释放速率平均为 158.2 mg/(m²·d) 和 2.05 mg/(m²·d)^[2],是一典型的内外源负荷均较显著、底泥氮磷含量较高的湖泊。2001 年 5 月起在五里湖部分水域开展了底泥疏浚和以种植水生植物为主的水体生态修复示范工程,本文以该工程为研究平台在五里湖边进行了相关实验。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与准备

1.1.1 沉积物与水样 根据沉积物分布特点,于 2004 年 8 月 4 日用 GPS 在东五里湖水域选取一个未经疏浚采样点。用装有 φ110 mm × 500 mm 有机玻璃管的柱状采样器采集湖底底泥,取样深度不小于 20 cm。共采集 84 根柱状沉积物,样品上层用湖水注满,上下两端用橡皮塞塞紧,垂直放置,小心带回实验室。

1.1.2 沉水植物 实验选用 6 种沉水植物,均采自太湖东五里湖水域,是土著物种,它们包括:苦草 (*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、马莱眼子菜 (*Potamogeton malaianus* Miq.)、伊乐藻 (*Eloidea canadensis*)、石龙尾 (*Limnophila sessiliflora* Blume)、轮叶黑藻 (*Hydrillia verticillata* Royle)。

1.2 实验和分析方法

1.2.1 生物生长实验 实验于 2004 年 8 月 5 日起在五里湖岸边实验基地开始进行。将上述 6 种沉水植物以等起始质量(3g)植入柱状沉积物中,84 个柱状沉积物样分为 6 组,每组沉水植物有 14 个重复。各样管垂直放置于铁搁架内,于露天自然光照下进行培养,逐日测定昼夜水温,并注意控制在 25℃ 左右,并保持沉积物上覆水水位处于指定刻度(水分挥发后用原水样添加使保持在原来刻度)。

1.2.2 样品采集 9 月 15 日结束(共 41d)。除 8 月 5 日种植外,取样间隔为 5-10d/次的频率,分别选择在 8 月 15 日,8 月 21 日,8 月 27 日,9 月 5 日,9 月 10 日,9 月 15 日各取出 6 种不同沉水植物柱状培养样一组,分别抽取距沉积物-水界面 5 cm 处上覆水 200 ml;水生植物(水草)取样是将柱状底泥从有机玻璃管的上部取出,小心将水草植株与沉积物剥离,然后洗净、吸湿;沉积物则按 0-1、1-2、2-3、3-4 和 4-5 cm 间隔分层,取上部 5 层样,分别装入塑料袋中保存;将沉积物样离心(4000 转/min,20min),得间隙水,体积不小于 2 ml。

1.3 测定项目

水体(包括间隙水)中氨态氮、磷酸根磷和叶绿素 a 均采用《湖泊富营养化调查规范》^[9]中规定的方法;吸湿后的水草尽快测定长度、湿重以及干重;分层沉积物用体积法分析获得孔隙率。

1.4 实验结果计算(间隙水扩散通量模型)

沉积物间隙水溶解物的扩散和沉积物颗粒的沉积都会产生物质的释放或迁移现象。这与在垂直方向上沉积物-水界面受扩散作用和沉积作用支配的输送有关^[10]。为求的稳定的沉积物界面上的物质释放,可忽略孔隙水和沉积物向下对流所损失的通量,这时释放量仅与界面处间隙水的浓度梯度 $\frac{dc}{dz}$ 有关,即

$$F_0 = -\phi D_s \left. \frac{dc}{dz} \right|_{z=0} \quad (1)$$

扩散系数 D_s 由自由状态下的 D_0 表达:

$$D_s = \frac{D_0}{\phi^m} \quad (2)$$

式中, ϕ 为表层沉积物的孔隙率($0 < \phi < 1$); D_s 为孔隙水溶液扩散系数(cm^2/s); Z 为垂直距离坐标,从界面($z=0$)向下增加为正; C 为孔隙水中的浓度(mg/cm^3); D_0 为无限稀释条件下只与溶质有关的溶质扩散系数(cm^2/s),对于 HPO_4^{2-} 离子, $D_0 = 7.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$; 对于 NH_4^+ , $D_0 = 9.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (25℃ 时), f 为表层沉积物的形态阻碍因子 $f = 1/\phi^m$, m 为指数因子,当 $\phi \geq 0.7$ 时, $m = 2.5 - 3$; 当 $\phi < 0.7$ 时 $m = 2$ 。

2 结果与分析

2.1 水草在沉积物上的生长过程

在平均水温大约 25°C 左右的环境下,受试的 6 种沉水植物被移栽到未破坏的原状底泥中均能获得良好的生长(图 1)。据观察,在实验初期,初始水草生物量植入底泥后 7d 便可观察到有新叶或新芽萌出,长度以及生物量都有明显的增加。沉水植物生物量在生长的前 15d 左右普遍有很大的增长,其中苦草、马来眼子菜和黑藻增长较为明显。此后则都有经历一个相对缓慢的增长期甚至是停滞期(大约在 10-30d 间),其原因可能是因为水草的快速生长,对底泥维持其根系的物化要求增加,同时也要适应上覆水体环境。30d 后对于金鱼藻、苦草和黑藻出现了再一次生物量急速增长阶段。

不同水草生物量的增长过程差异,与水草对周围环境的适应性有关,每种水草所处的空间与实际湖体中不同,被限制在直径为 11 cm 的柱状空间中生长。实验初期,芽叶较小对空间要求不高;大致在达到 12g 左右生物量时,空间对水草生长可能产生一定影响,结果表现为生物量增加平缓。但伊乐藻和石龙尾在整个实验期间生物量均处于逐步增加,但实验结束两者生物量也未达到 12g 这一可能的空间限制,因此推测,该两种水草生长相对缓慢可能与对底泥和上覆水环境的适应性较差有关。

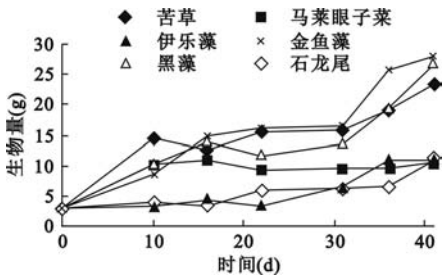


图 1 沉水植物的生物量变化情况

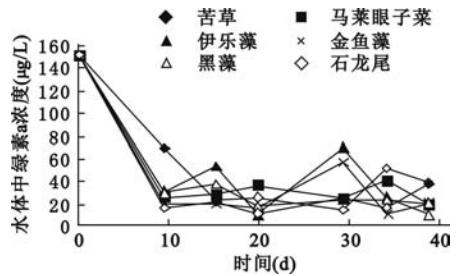


图 2 沉水植物生长对水体叶绿素 a 的影响

Fig. 1 Biomass changing of submerged macrophytes Fig. 2 Effects of Chl. a with the submerged macrophytes growing

沉水植物的生长对同为初级生产者的藻类抑制在初期就较明显(图 2)。在开始的阶段,叶绿素 a 的含量降低较快,由初始的近 150 ug/L 下降到 10d 时的约 20 ug/L。沉水植物和浮游藻类在营养物质和光能的利用上均是竞争者,由于沉水植物生命周期长,吸收和储存营养盐的能力比较强,抑制浮游植物的生长,从而降低藻类的现存量^[10]。另一方面与藻类不适宜在静水条件下生长也许有关,在 0-10d 阶段处于不适环境下的藻类纷纷死亡、分解,而此时水草则生长旺盛,白天的光合作用强烈,水体处于富氧甚至过饱和状态,一些悬浮颗粒被分解,实验管中水体逐渐清澈,表明藻类受到明显抑制。

2.2 沉水植物的生长对间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的影响

2.2.1 间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 铵态氮在沉积物中通常以吸附态和游离态形式存在^[11],吸附态氨氮(又叫固定铵)是湖泊沉积物全氮的主要部分之一,占到全氮的 13% 左右^[12]。吸附于沉积物上的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的主要来源,由于沉水植物的生长,必然吸收作为生物可利用性氮主要形态的铵氮,从而随生物量增加使得间隙水中游离的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量减少。根系的发达程度与间隙水中铵氮的变化有重要的关系。在生长过程中沉水植物的光合作用,可使上覆水体富含氧,氧可部分向沉积物-水界面下扩散,同时通过茎、叶和根系等也可向沉积物中输送氧,结果使沉积物中氧化还原电位升高,一方面促进氮的硝化作用,另一方面也抑制了沉积物下层氨化作用进行,使间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度逐渐降低。

图 3 和图 4 分别是表层 0-5 cm 深度间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度随采样时间以及生物量变化情况。可以看出,随着沉水植物生长过程的进行,同一层间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度随沉水植物生长时间延长以及生物量的增加而逐渐降低,显然沉水植物生长对间隙水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量产生了影响或有某种联系。

伊乐藻和石龙尾在生长初期(0-20 d),生物量增加不大(图 1),同时也观察到两植物的根系不发达,

须根较小,因此根系对间隙水中的养分吸收应较其它水生植物弱;生物量小根系输氧作用不显著,所以间隙水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度变化就小;随着 20d 后生物量的增大,伊乐藻和石龙尾根系也逐渐发达,通过根系对间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸收能力的增强, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度已开始出现明显下降. 苦草、马莱眼子菜、金鱼藻和黑藻在开始 0-10d 生长迅速,生物量迅速的增加,但是间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度没有明显的变化(图 4),这主要是由于生长环境的适宜,养分供应充裕,使沉水植物沉积物-水界面以上部分的茎、叶部分增长迅速,但是沉积物下根系生长还处于一个适应期,所以根系对间隙水中养分影响不大, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度变化不明显;10d 后,由于生长空间的限制,沉水植物在沉积物以上茎、叶部分的生长受到一定的抑制,但是沉积物以下根系的生长反而逐渐的增强,所以根系对沉积物间隙水中的养分的吸收影响增大,间隙水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度开始明显的下降,同时由于上覆水中氧向下扩散以及通过植物茎的输送使沉积物中氧含量增大,硝化作用增强,间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度逐渐降低.

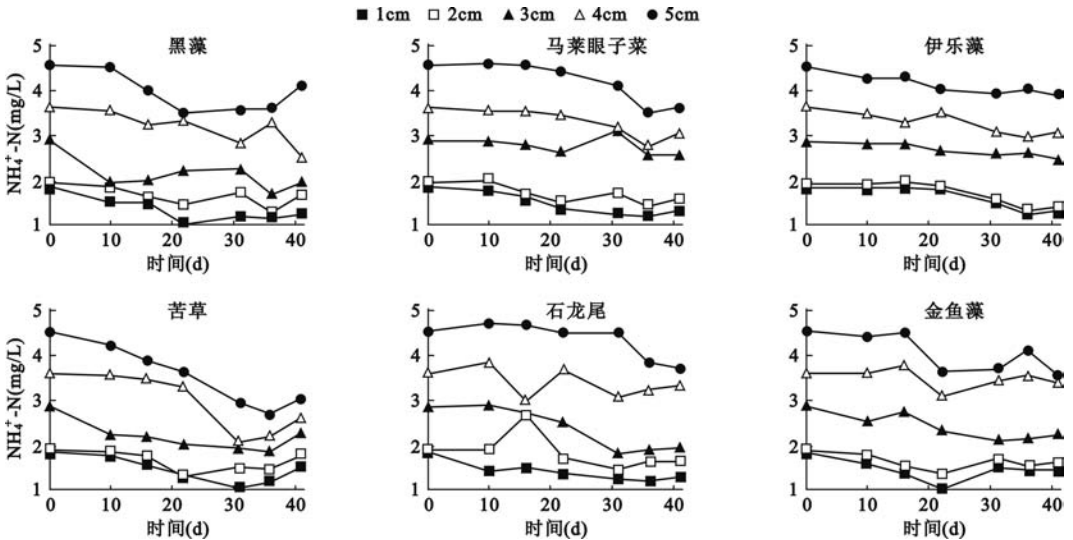


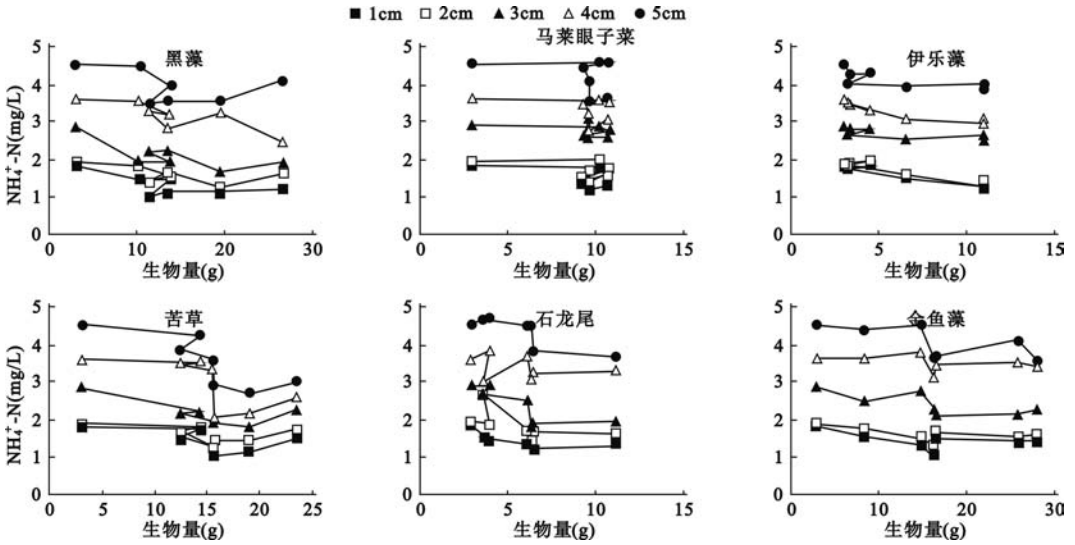
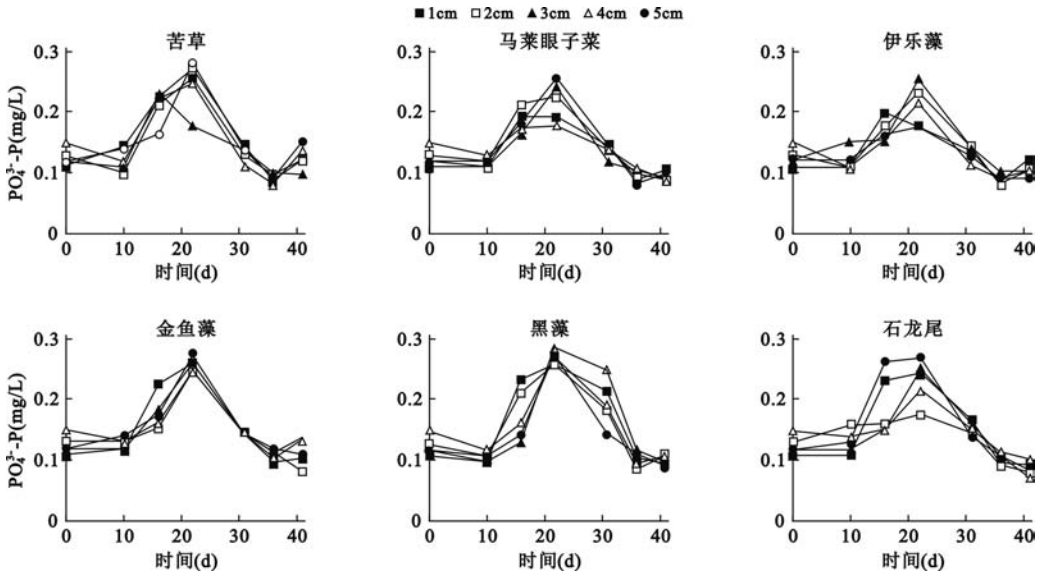
图 3 不同沉水植物的生长对间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响

Fig. 3 Effects of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the interstitial water with six species submerged macrophytes growing

在植物生长 30-36d 时间里间隙水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度下降分别达到一个最低值后,间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度开始有所回升,这可能与沉水植物根系的生长,在沉水植物根系周围形成了根系网络,为微生物的附着、栖生、繁殖提供了场所和条件,从而构成了一个起多种生化作用的微生物生态系统,在微生物作用下进行消化-反硝化和有机质的降解,向间隙水中释放了大量氨氮和硝态氮等,导致间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度有所增加^[13].

2.2.2 间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 图 5 和图 6 分别是 0-5 cm 间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度在不同沉水植物生长实验过程中随时间和生物量的变化情况,从图 5 中可以看出,间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度随时间变化均呈现出一个单峰型变化,峰值均位于第四次采样的 8 月 27 日(22d),且在垂直方向上各泥层间 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度差异不明显. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度随沉水植物生物量的变化中可以看出, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度和生物量之间没有明显的对应关系,也是出现一个单峰型变化. 通过这些现象初步推测:沉水植物生长虽然也吸收沉积物间隙水中的磷,但这不是间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度变动的主要原因. 8 月 27 日前较高的气温环境对沉积物间隙水中磷含量的增加有一定的增强作用.

22d(8 月 27 日)以后,间隙水中磷酸盐含量逐步减低,其原因可能为:(1)由于沉水植物根系逐渐的发达,通过根系对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的直接吸收增强;(2)沉水植物生长过程中为了满足淹没于水中根部呼吸需要,通过体内发达的通气系统使氧从茎叶向根处转移,呼吸消耗剩余的氧气,就会直接释放到水中,在根区周围形

图4 沉水植物生物量变化对间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响Fig. 4 Effects of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the interstitial water with submerged macrophytes biomass changing图5 不同沉水植物生长对间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的影响Fig. 5 Effects of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in the interstitial water with six species submerged macrophytes growing

成有氧的环境^[14],同时由于水草生长旺盛,光合作用强烈,水体几乎都是处于富氧甚至过饱和状态,这些游离的氧逐渐向沉积物扩散,进入沉积物中,使上层沉积物由还原态向氧化态转化,导致了沉积物中的 Fe^{2+} 逐渐向 Fe^{3+} 转化,磷酸根与 Fe^{3+} 结合,以 FePO_4 的形式沉淀下来^[15]; (3) 水温的降低,减弱了微生物解磷活性,也使游离磷从沉积物上的解离量减少。

2.3 沉水植物生长与沉积物-水界面氮磷释放通量的关系

沉积物中氮磷的释放受到多种因素的影响和制约,机制也各不相同,但普遍认为释放的物质向沉积物

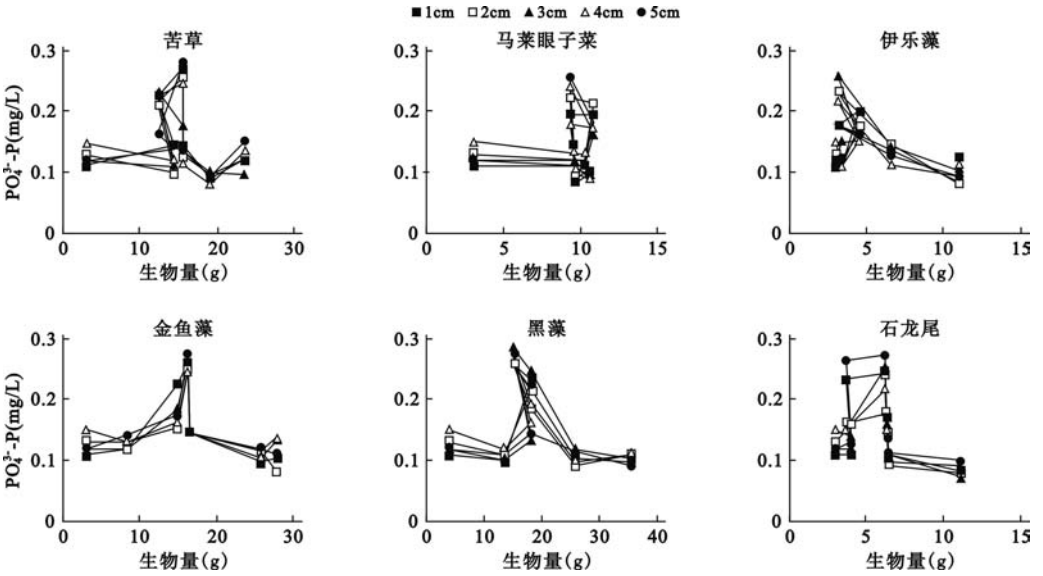


图 6 沉水植物生物量变化对间隙水中 $PO_4^{3-}-P$ 的影响

Fig. 6 Effects of $PO_4^{3-}-P$ in the interstitial water with submerged macrophytes biomass changing

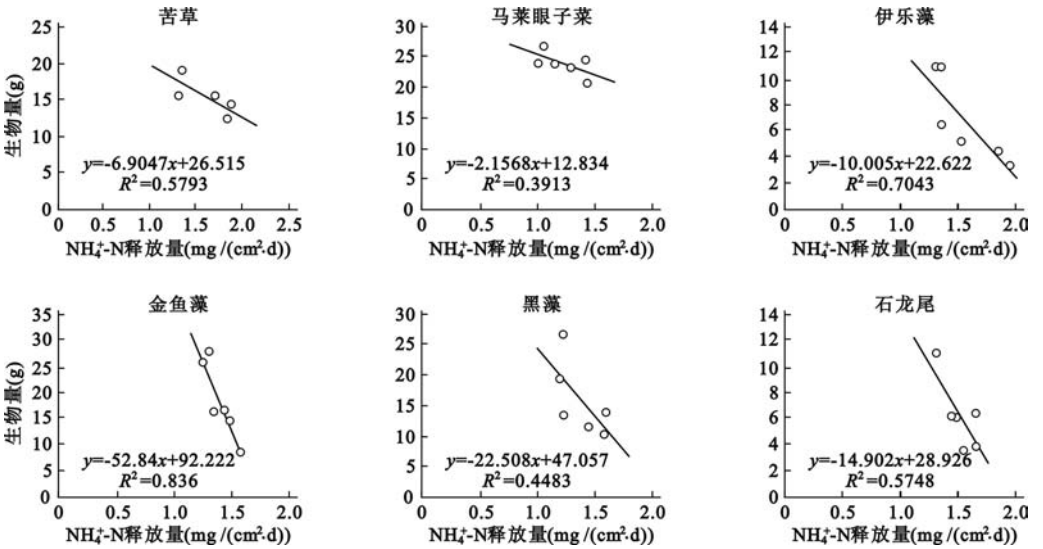


图 7 不同沉水植物的生物量与沉积物氮释放通量的相关关系

Fig. 7 Correlation of biomasses of the submerged macrophytes with ammonia release

表面扩散以及进入湖泊上覆水混合扩散的过程, 主要是由浓度差支配^[16]. 通过前面的分析已知, 沉水植物的生长将会影响沉积物中氮磷的矿化分解以及改变沉积物中的氧化还原电位, 从而影响沉积物中氮磷的释放; 另外沉水植物的生长过程, 改变沉积物-水界面两边的浓度差, 也影响着沉积物营养物质的释放.

2.3.1 NH_4^+-N 的释放 利用孔隙水扩散模型, 计算了本实验下 NH_4^+-N 的释放通量, 并结合相应的沉水植物生物量进行相关性分析(图 7), 由图可见, 沉积物-水界面上氮的释放通量与生长着的沉水植物生物量间存在负相关关系, 其相关系数(R^2)在 0.3913 - 0.836 之间. 而且不同沉水植物种类, 其生物量与对应沉

积物释放量相关曲线斜率(k)也各不相同. 其中氮释放速率对金鱼藻生物量的敏感性较低($k = -52.85$), 而马莱眼子菜则敏感性较高($k = -2.16$), 敏感性高说明该类水生植物的生长对底泥 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 的释放有较强的抑制能力. 据对图 4 初步分析可见, 太湖五里湖水生植物生长对底泥 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 释放的控制能力按如下次序排列: 马莱眼子菜 > 苦草 > 伊乐藻 > 石龙尾 > 黑藻 > 金鱼藻.

2.3.2 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 的释放 同样利用孔隙水扩散模型计算 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 的释放通量, 将沉积物中磷的释放通量与不同沉水植物生物量的对应关系作图发现, 除马莱眼子菜外, 所有其它沉水植物两者间均没有出现明显的相关性关系(图 8 和表 1), 这一结果与前面分析的各沉积物层的间隙水中 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 含量与水生植物生物量关系不明显结论基本吻合. 这也与沉积物或间隙水中游离态磷的浓度几乎不受系统内实验水生植物的生长控制有关. 沉积物-水界面的物理化学条件在控制形态磷的作用方面比总溶解磷的浓度梯度更重要. 沉积物中可溶性磷的交换通量对上覆水体的氧化状况是非常的敏感, 在厌氧条件下可产生很大的磷通量^[17]. 沉积物表层几厘米的氧化还原反应对磷的化学行为起着重要的作用, 在好氧状态下, 沉积物氧化层的吸附和沉淀作用控制磷的交换, 而不是还原层的扩散作用. 另外, 沉水植物生长时对磷的吸收量要明显小于 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 量, 而且沉积物(和间隙水)可能也不是水生植物体内磷的唯一摄入来源.

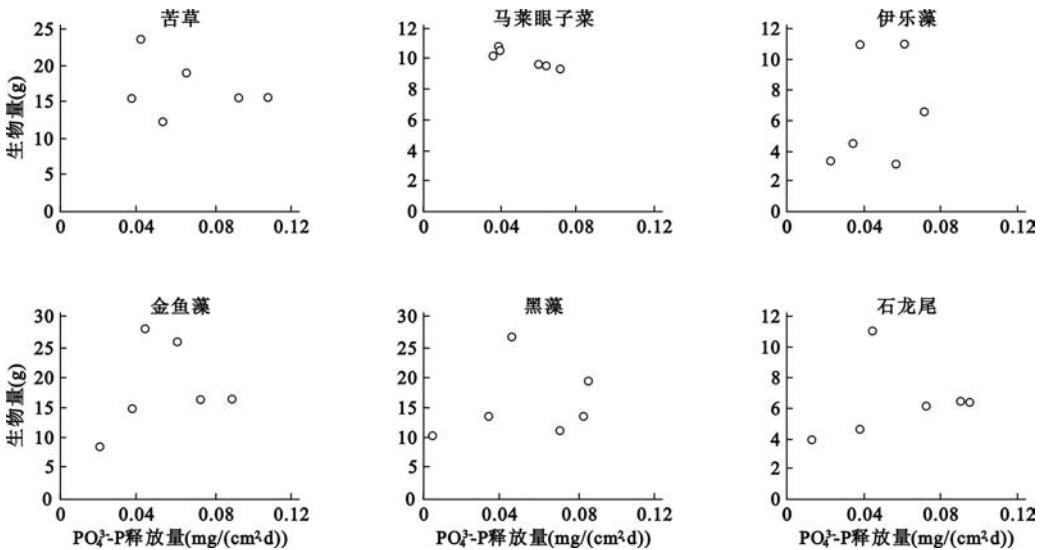


图 8 不同沉水植物的生物量与沉积物磷释放通量的相关关系

Fig. 8 Correlation of biomass of six species submerged macrophytes with amount of phosphorus release in sediments

表 1 不同沉水植物的生物量与磷的释放量的相关关系

Tab. 1 Correlation of biomasses of six species submerged macrophytes with amount of phosphorus release in sediments

| 沉水植物 | 关系表达式 | R^2 | 沉水植物 | 关系表达式 | R^2 |
|-------|-------------------------|--------|------|------------------------|--------|
| 苦草 | $y = -38.361x + 19.481$ | 0.0786 | 金鱼藻 | $y = 77.684x + 14.134$ | 0.0714 |
| 马莱眼子菜 | $y = -37.245x + 11.92$ | 0.8547 | 黑藻 | $y = 40.641x + 13.675$ | 0.0442 |
| 伊乐藻 | $y = 54.236x + 4.054$ | 0.0775 | 石龙尾 | $y = 14.879x + 5.5377$ | 0.0374 |

3 结论

沉水植物正常生长下会使沉积物间隙水中 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 浓度明显降低, 并继而产生对沉积物-水界面氮释放抑制, 因此污染水体可通过适度种植或重建水生植被来控制底泥内源氮污染负荷; 但由于生物地球化学

行为的差异,用种植沉水植物的方法对沉积物间隙水中磷含量的影响作用并不明显,尤其在水草种植的初期或高温季节,采用种植水生植物的方法控制沉积物磷释放,在太湖地区可能不会达到预期效果. 由于缺少对细菌和酶学的研究结果,因此在水生植物生长过程中沉积物磷释放的变化方面还有一些机理无法解释,这有待于以后进行深入研究.

致谢:在进行本研究中,得到了胡红云、徐海、兰策介、吕洪顺等在物化分析和样品采集方面的大力帮助,在此一并表示感谢.

4 参考文献

- [1] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 367 - 377.
- [2] 范成新, 刘元波, 陈荷生. 太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨. *上海环境科学*, 2000, **19**(2): 72 - 75.
- [3] 贺 锋, 吴振斌. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用. *植物学通报*, 2003, **20**(6): 641 - 647.
- [4] 李文朝. 浅型富营养化湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验. *湖泊科学*, 1996, **8**(增刊): 2 - 9.
- [5] 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.
- [6] Garber K J, Hartman R T. Internal phosphorus loading to shallow Edinbro Lake in northwestern Pennsylvania. *Hydrobiologia*, 1985, **122**(1): 45 - 42.
- [7] Lambertus L. Phosphorus accumulation in sediments and internal loading. *Hydrobiol Bull*, 1986, **20**(1 - 2): 213 - 214.
- [8] 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关性分析. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 359 - 366.
- [9] 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 165 - 187, 268 - 270.
- [10] 范成新, 张 路, 杨龙元等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(4): 370 - 377.
- [11] De Lange G J. Distribution of exchangeable, fixed, organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Maderia Abyssal plain, eastern North Atlantic. *Marine Geology*, 1992, **109**: 95 - 114.
- [12] 王雨春, 万国江, 尹澄清等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 301 - 309.
- [13] Rattray M R C, Howad Williams & Brown J M A. Sediment and water resources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes. *Aqua Bot*, 1991, **40**: 225 - 237.
- [14] James F Reilly. Nitrate removal from a drinking water supply with large free - surface constructed wetlands prior to groundwater recharge. *Ecological Engineering*, 2000, **14**: 33 - 47.
- [15] 吴晓雷. 人工湿地废水处理机制. *环境科学*, 1995, **16**(3): 83 - 86.
- [16] 尹大强. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响. *湖泊科学*, 1994, **6**(3): 240 - 244.
- [17] 高 丽, 周建民. 磷在富营养化湖泊沉积物 - 水界面的循环. *土壤通报*, 2004, **35**(4): 512 - 515.