

## 沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对沉积物中磷赋存形态的影响\*

吴强亮, 谢从新\*\*, 赵 峰, 张 念, 刘丰雷  
(华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

**摘 要:** 湖泊富营养化是世界面临的重大环境问题, 磷在沉积物-水界面的循环在富营养化过程中起关键作用, 因此, 研究沉水植物对沉积物-水界面磷循环的作用及其机理具有重要的理论和实践意义. 本实验通过在水泥池中(4.0 m × 7.0 m × 1.5 m) 种植苦草 (*Vallisneria natans*), 并采用定期更换原位置上覆水的方式模拟自然状态下的水体交换, 研究了沉水植物苦草从定植到生长末期沉积物中不同形态磷含量的变化, 以期揭示期间苦草对沉积物中磷赋存形态的影响. 结果表明, 本实验条件下苦草经历了两个生长阶段, 在约 1 个月的快速生长期能显著降低沉积物中的总磷 (TP) 含量, TP 含量降低了 78.79 mg/kg, 其中有机磷 (Org-P) 含量降低 49.99 mg/kg, 对 TP 降低的贡献度为 62.67%, 而钙结合态磷 (Ca-P) 比对照组减少 2.20%, 因此, 苦草可能主要通过促进 Org-P 的矿化向水柱和间隙水中释放磷的方式降低沉积物中 TP 含量, 其次苦草可促进 Ca-P 的分解; 此外, 苦草为满足植株生长, 所吸收的沉积物铁结合态磷 (Fe-P) 和铝结合态磷 (Al-P) 分别为 2.99 和 4.10 mg/kg, 但苦草对沉积物中闭蓄态磷 (Oc-P) 含量没有显著影响. 在缓慢生长阶段, 苦草促进有机物的沉降以及 Fe-P 和 Oc-P 的形成, Fe-P 和 Oc-P 含量分别增加 14.82 和 101.53 mg/kg. 苦草对 Al-P 的形成也略有促进作用, 其含量升高 7.39%. 研究结果表明, 苦草在不同生长阶段对沉积物中磷形态的转化以及各形态磷的迁移方向具有不同的影响. 在快速生长期苦草转化吸收高活性磷, 将其固定到植株体内; 缓慢生长阶段则促进水体中的磷转化成沉积物中难分解态的磷, 对磷的沉降表现出积极促进作用.

**关键词:** 苦草; 沉水植物; 沉积物; 磷形态分级; 有机物

## Effects of *Vallisneria natans* on the occurrence characteristic of phosphorus fractions in sediment

WU Qiangliang, XIE Congxin, ZHAO Feng, ZHANG Nian & LIU Fenglei  
(College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China)

**Abstract:** Lake eutrophication is a global environment problem. Phosphorus exchanging at the water-sediment interface plays a key role in eutrophication process. We cultured *Vallisneria natans* in a 4.0 m × 7.0 m × 1.5 m concrete tank under a natural state which water exchanges all the time by replacing overlying water frequently. Different phosphorus fractions in sediment were determined to reveal their response to *V. natans* from the beginning of planting to the end of growth stage. In this experiment condition, *V. natans* went through two growth stage and the results show that *V. natans* significantly reduced total phosphorus (TP) through promoting the mineralize of organophosphates (Org-P) and resolve of calcium phosphorus (Ca-P). TP reduced 78.79 mg/kg which account for 8.44% of initial content. Org-P reduced 49.99 mg/kg that contribute 62.67% for decrease of TP. On the other hand, a portion of iron/aluminum phosphorus (Fe/Al-P) were absorbed for the request of the plant growth, 2.99 and 4.10 mg/kg decreased, respectively, but occluded phosphate (Oc-P) was not affected. While *V. natans* grown to the highest biomass, it promote settlement of organic matter and formation of Fe-P and Oc-P, increment of which were 14.82 and 101.53 mg/kg, respectively. It also resulted in a Al-P content increase of 7.39%. In a word, *V. natans* make the phosphorus in water transfer into sediment. The result indicates that effect of *V. natans* on the leading direction of phosphorus transformation varies with different growth stages. Highly reactive phosphorus was absorbed and accumulated in plant as stable fraction during rapid growth stage, while absorption capacity of sediment increased during slow growth stage, exhibiting a promoted phosphorus settlement.

\* 国家大宗淡水鱼类产业技术体系项目 (nycytx-49-09) 和水产养殖行业专项项目 (201203083) 联合资助. 2013-02-27 收稿; 2013-05-24 收修改稿. 吴强亮 (1989~), 男, 硕士研究生; E-mail: akwqlcs@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: xiecongxin@mail.hzau.edu.cn.

**Keywords:** *Vallisneria natans*; submerged plant; sediment; phosphorus fractions; organic matter

富营养化是淡水生态系统面临的一个严重环境问题,而磷是造成水体富营养化的主要营养物质,是浮游植物和大型植物初级生产的限制因子,因此磷在沉积物-水界面的循环对于富营养化的治理起着关键作用<sup>[1-2]</sup>. 沉水植物在磷循环中具有重要意义,其可通过直接吸收、促进悬浮物沉降、氧气释放改变底泥界面理化条件等机制,抑制底泥中磷的释放,降低水和底泥中磷营养盐的浓度<sup>[3-4]</sup>. 近年来,利用沉水植物修复富营养化水体以其良好的净化效果、独特的经济效益、能耗低、简单易行以及有利于重建和恢复良好的水生生态系统等特点,正日益受到人们的关注<sup>[5]</sup>.

苦草(*Vallisneria natans*)隶属于水鳖科苦草属,是一种多年生无茎沉水草本植物<sup>[6]</sup>. 国内外研究表明,利用苦草进行富营养水体的生态修复具有很好的效果<sup>[7-8]</sup>. 目前,已有一些关于苦草对沉积物磷形态迁移转化的机理性问题的研究<sup>[9-10]</sup>,但是封闭条件下的实验环境与自然状况有所差异,不同底质和水质状况都影响苦草的生长<sup>[11]</sup>,而野外调查实验影响因素较多<sup>[12]</sup>. 本研究通过在户外水泥池中培养苦草,利用频繁更换上覆水的方法模拟了自然条件下苦草的生长,比较清晰地对沉积物磷形态进行了分类,进而探讨了苦草从定植到生长末期对沉积物中磷形态迁移转化的影响,为利用苦草进行富营养化治理提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验于2011年8月4日至11月7日在湖北省荆州市公安县崇湖渔场进行. 实验开始前,在10.0 m × 4.0 m × 1.5 m 铺有底泥的水泥池中引种渔场沟渠中的野生苦草,预培养20 d后用于实验,期间每7 d抽换沟渠水.

培养苦草的底泥从沟渠中挖取,去除块状杂物并均匀混合后用于实验;底泥从挖起、筛选混匀到实验开始,暴露在空气中的时间不超过1 d,以避免底泥的暴晒和变质.

### 1.2 实验设计

选取水泥池2个,大小同苦草预培养池,池中摆放20个50 cm × 30 cm × 50 cm 规格的玻璃缸. 距池边1 m 摆放,以防止池壁的遮荫. 玻璃缸间距50 cm,摆放2排,每排10个. 放好后将同等重量处理后的底泥平铺于每个玻璃缸中,使厚度不低于15 cm. 上述过程完成后向水泥池中抽入沟渠水至水深60 cm,分别设为苦草组和对照组.

待池水沉降2 d后,于8月4日上午从苦草培养池拔取长势均匀的苦草若干,此时苦草长度约为15 cm,每株鲜重4 g左右,冲洗掉叶片及根部的泥沙,用吸水纸擦干后称取41.5 ± 0.5 g 苦草20份,均匀地移植到苦草池的20个玻璃缸中,移植完毕后分别加灌沟渠水至1.2 m.

实验期间注意去除苦草表面和池壁附着的螺类,防止其啃食苦草. 每次采样后放空池水并重新灌入沟渠水,使用玻璃缸培养的目的在于防止换水时水流对沉积物的冲刷和对苦草的损伤.

### 1.3 样品采集及测定分析

待苦草生长30 d后于2011年9月4日开始采样,此时苦草生长茂盛,基本达到最大生物量. 使用柱状采泥器采集靠近根部的沉积物,每缸均匀采集至少3柱,取上层5 cm 作为样品,混匀后一部分用于离心获得间隙水,一部分80℃烘干测定含水率后在550℃下灼烧5 h 测定烧失率,剩下样品自然风干后用研磨机磨碎,过100目筛保存,用于磷形态分级测定. 间隙水采用离心法获得,测定总磷(TP)和无机磷(TIP),TP减去TIP为间隙水中有机磷(TOP)含量;沉积物TP含量采用消煮法测定,采用化学连续提取法测定沉积物弱吸附态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、闭蓄态磷(Oc-P)和钙结合态磷(Ca-P),总磷减去其他形态磷得出有机磷(Org-P)含量.

每次采集3个苦草缸作为平行,同时统计缸内的生物量,以鲜重计. 以后分别在第40、55、75、95 d 采样,采样时间均为13:00.

采用SPSS 13.0 统计软件进行方差分析,苦草组和对照组之间采用单因素方差分析法, $P < 0.05$  表明具有显著差异,数据用平均值 ± 标准差表示,生物量用鲜重表示.

## 2 结果与分析

### 2.1 苦草生物量的变化

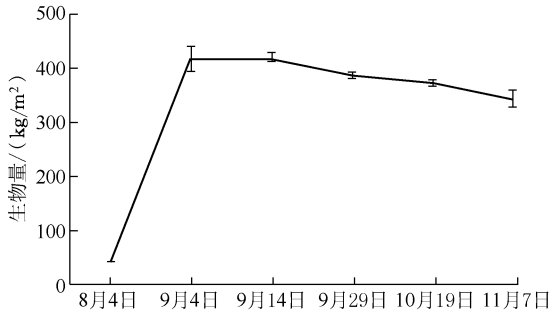


图1 实验期间苦草生物量的变化  
Fig.1 Biomass variations of *V. natans* during the experiment

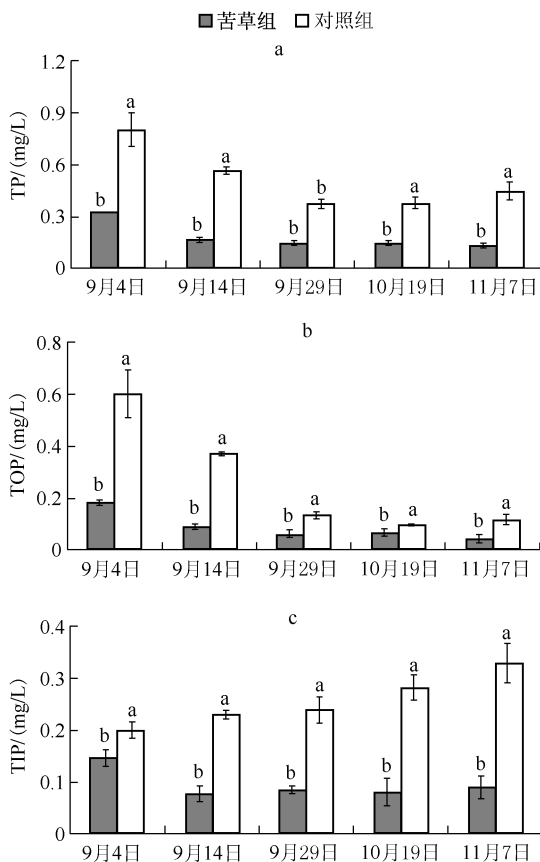


图2 苦草对间隙水中各磷形态的影响  
(不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$ )

Fig.2 Effect of *V. natans* on different phosphorus fractions in pore water

8—9月为苦草快速生长时期,最大生物量出现在9月上中旬,期间由于苦草的无性繁殖,苦草呈蔓延生长,叶片部分快速增长,生物量由实验开始时的  $0.27 \pm 0.01 \text{ kg/m}^2$  增加到  $2.77 \pm 0.08 \text{ kg/m}^2$ ;9月中旬以后,随着温度的下降与苦草的有性生殖,苦草叶片部分停止生长并逐渐衰亡(图1).苦草叶片含水率极高,幼苗期时为  $92.8\% \pm 0.5\%$ ,达到最大生物量时升高到  $99.3\% \pm 0.1\%$ ,到苦草衰败时含水率为  $99.2\% \pm 0.2\%$ .

### 2.2 间隙水中磷形态的变化

苦草显著降低了间隙水中各形态磷的含量 ( $P < 0.05$ ).苦草组 TP、TIP 和 TOP 浓度均呈下降趋势,到实验结束时,分别为  $0.13$ 、 $0.09$  和  $0.04 \text{ mg/L}$ ,较对照组分别下降了  $70.10\%$ 、 $72.61\%$  和  $62.92\%$ ;对照组 TP 和 TOP 浓度也呈下降趋势,TIP 浓度却呈缓慢上升趋势,从实验开始时的  $0.20 \text{ mg/L}$  升高至  $0.33 \text{ mg/L}$ (图2).这说明苦草的生长对间隙水中磷的去除率很高,主要通过吸收利用无机形态磷来降低沉积物间隙水中磷含量.对比第1次采样时间间隙水 TP 浓度,苦草组为  $0.33 \text{ mg/L}$ ,对照组为  $0.80 \text{ mg/L}$ ,而后期变化幅度均不明显,说明间隙水磷含量降低最快的时期为苦草快速生长阶段.

### 2.3 沉积物中磷形态的变化

实验期间沉积物中各磷形态变化见图3.从9月4日的数据对比可以看出苦草生长从沉积物中吸收了大量的磷(图3a),TP 消耗量为  $78.79 \text{ mg/kg}$ ,占初始量的  $8.44\%$ .各形态磷中,Ex-P 含量最低(图3b),苦草组含量为  $8.47 \sim 13.62 \text{ mg/kg}$ ,占 TP 的  $0.8\% \sim 1.6\%$ ,对照组含量为  $8.27 \sim 12.42 \text{ mg/kg}$ ,占 TP 的  $0.9\% \sim 1.4\%$ ,苦草组和对照组 Ex-P 含量均随实验的进行而降低.苦草快速生长阶段(8月4日—9月14日),Ex-P 含量高于对照组,后期与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ ),可见苦草的生长反而增加了弱吸附态磷的含量.

Al-P 和 Fe-P 的变化趋势基本相同,Al-P 含量略高于 Fe-P,苦草组含量呈上升趋势,而对照组呈缓慢下降趋势(图3c、d).9月4日苦草组 Al-P 和 Fe-P 含量均显著低于对照组,说明苦草

的生长利用了一部分的 Al-P 和 Fe-P. 由于对照组变化缓慢, 可以近似认为 9 月 4 日 Al-P 和 Fe-P 含量为沉积物初始值. 由此计算苦草组 Al-P 和 Fe-P 含量分别减少了 2.99 和 4.10 mg/kg, 分别降低了 8.99% 和 17.37%. 当生物量不再积累后, 苦草能明显增加二者含量, 到实验结束时, 分别增加了 9.55 和 14.82 mg/kg, 分别上升了 30.92% 和 69.38%, 而对照组降低量分别为 2.46 和 3.45 mg/kg, 占初始量的 7.39% 和 14.19%, 因此, 说明苦草的存在能促进 Al-P 和 Fe-P 的转化.

Oc-P 占 TP 比例较大 (图 3e), 含量仅次于 Ca-P. 苦草的生长阶段没有对 Oc-P 产生显著影响 ( $P > 0.05$ ), 而后期苦草能明显促进 Oc-P 的转化, 上升速度最快的阶段为 9—10 月上旬. 到实验结束时 Oc-P 增加了 101.53 mg/kg, 增加量为 37.59%. 实验期间, 苦草组和对照组 Ca-P 均呈缓慢上升趋势 (图 3f), 而苦草的生长促进了少量 Ca-P 的转化, 减少量为 9.57 mg/kg, 占初始值的 2.20%, 后期苦草组始终显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ).

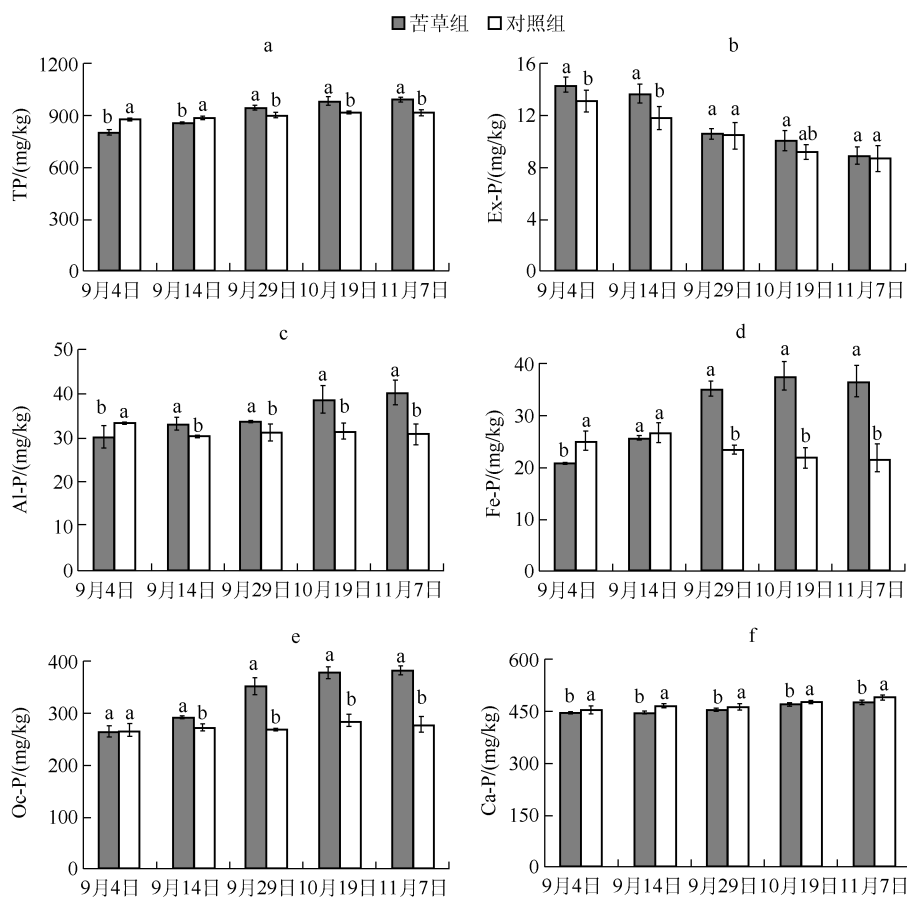


图3 苦草对沉积物中各磷形态含量的影响

Fig. 3 Effect of *V. natans* on different phosphorus fractions in sediment

### 3 讨论

本实验设计下, 苦草在实验期间内经历了两个生长阶段: 8—9 月的快速生长阶段和 10—11 月的慢速生长阶段<sup>[6,13]</sup>. 植物生长期释放出各种有机物质, 如有机酸、酚类、糖类和酶等, 改变了根际微域 pH 值和氧化还原电位 (Eh)<sup>[14]</sup>, 苦草组沉积物 Eh 明显高于对照组, 而 pH 值却低于对照组<sup>[10]</sup>. 通常认为沉积物中易发生还原作用的铁和铝氧化物以及与氢氧化物结合的磷较易于释放, 可被生物利用<sup>[15-16]</sup>, 当 Eh 较低 (< 200 mV)

时,有助于  $\text{Fe}^{3+}$  向  $\text{Fe}^{2+}$  的转化,胶体状的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  转化为可溶性的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe-P}$  溶解释放,使  $\text{PO}_4^{3-}$  脱离沉积物进入间隙水<sup>[17]</sup>,从而被苦草吸收利用. 另外周小宁等<sup>[18]</sup>发现黑藻对沉积物中的磷起到活化的作用,增大了沉积物中潜在可交换性磷的量,这也是前期苦草组的弱吸附态磷高于对照组的原因. 研究认为苦草在快速生长期直接吸收沉积物中的磷,从而有效地降低了沉积物的磷含量<sup>[9-10]</sup>. 而沉积物有机磷多以磷酸酯(包括肌醇六磷酸)、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类以及一些未知的化合物等形态存在<sup>[19]</sup>;在需氧降解过程中肌醇六磷酸被有效地矿化成无机磷<sup>[20]</sup>,其矿化程度和速率与氧化还原条件极为相关<sup>[21]</sup>. Rydin 和 Hantke 等<sup>[22-23]</sup>发现,在其研究的湖泊沉积物磷形态中的有机磷具有部分活性,约 50%~60% 的有机磷可被降解或水解为生物可利用磷形态,是沉积物中重要的“磷蓄积库”. 陈淑珠等<sup>[24]</sup>研究认为沉积物中的有机磷可经细菌生化作用转化为无机磷,细菌的新陈代谢能极大地加速截留在根际的有机胶体或悬浮物的分解矿化,成为沉积物中磷溶出的主要因素;而沉水植物的根系分泌物能促进嗜磷细菌生长<sup>[25]</sup>,并通过其根部放氧影响根际氧化还原状态,因此,对有机磷向无机磷的转化起到重要作用<sup>[26]</sup>. 有研究认为有机磷矿化后向上覆水体<sup>[27]</sup>和间隙水释放磷酸盐,其中释放到间隙水中的磷酸根易被沉积物颗粒吸附,而沉积物的还原状态利于吸附磷的解析<sup>[28]</sup>,矿化释放出的磷酸盐最终被苦草根部和叶片吸收利用. 包先明<sup>[8]</sup>发现 5 种沉水植物生长期对沉积物各形态磷中有机磷的降低最明显,苦草快速生长阶段所需磷的 70% 为有机磷矿化提供;本实验结果表明,9 月 4 日苦草组沉积物有机磷显著低于对照组,有机磷含量降低 49.99 mg/kg,对 TP 降低的贡献度为 62.67%,烧失率结果亦与之吻合(图 4a),与包先明的结论一致. 赵海超等<sup>[29]</sup>的研究表明,黑藻的生长促进钙结合态磷的释放,在酸性条件下底质有机物生物降解产生的  $\text{CO}_2$  会使其溶解度增加,导致磷的释放量增大,由此可以看出苦草快速生长期对沉积物磷的释放有促进作用,主要通过根系分泌物改变根际理化环境和根际细菌对有机磷矿化的分解作用,另外,根系分泌碱性磷酸酶是重要方面<sup>[30]</sup>.

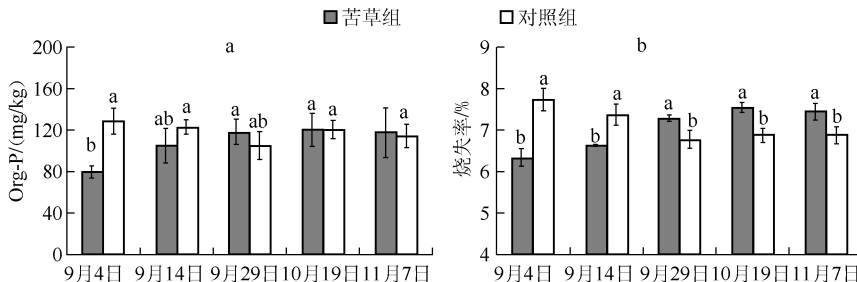


图 4 苦草对沉积物有机磷和烧失率的影响

Fig. 4 Effect of *V. natans* on Org-P and loss on ignition (LOI) of sediment

缓慢生长期苦草生物量不再增加,并且维持较长时间的正常形态. 大型水生植物可通过自身输导组织将氧气通过根部呼吸作用释放到沉积物<sup>[31]</sup>,在溶解氧充足情况下,表层底泥氧化还原电位较高,有利于  $\text{Fe}^{2+}$  转化为  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  与磷酸盐结合成难溶的磷酸铁<sup>[32]</sup>, Kathleen 等<sup>[33]</sup>的研究表明苦草根部分释氧致使底泥中的 Fe 和 Mn 氧化,随后增加了底泥对磷的吸收,这一结论解释了本实验苦草组缓慢生长期铁结合态磷含量快速上升,且大大高于对照组的原因.

有研究表明,植物通过降低流速而延长了滞水时间,致使水体中有机质的沉积量明显增加<sup>[34]</sup>,丰富的沉水植物引起沉积物中有机质的大量蓄积<sup>[35]</sup>,本实验出现了相同的现象(图 4b). 有机质可通过自身及其与铁的相互作用显著提高沉积物对磷的吸附能力,而有机质可能并非吸附位点的主要来源,其作用主要在于结合具有磷固定能力的  $\text{Fe}^{3+}$ ;许多研究认为,腐殖质能和铁、铝形成有机无机复合体<sup>[36]</sup>,提供重要的无机磷吸附位点区域,从而增强对磷的吸附,而闭蓄态磷的实质是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和胶膜所包蔽的还原溶性磷酸铁以及磷酸铝<sup>[37]</sup>,这一效应导致了闭蓄态磷的大量增加. 有研究指出给水过程中,西班牙池塘沉积物中闭蓄态磷含量显著增加<sup>[38]</sup>,本实验与其设计和结果都一致,闭蓄态磷和沉积物有机物含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ). 刘兵钦等<sup>[39]</sup>调查野外菹草对沉积物磷吸附能力时发现铁结合态磷吸附能力的提高可由有机质及其与铁的相互作用部分得到解释,而  $\text{Fe-P}$  和  $\text{Oc-P}$  的极显著关系 ( $P < 0.01$ ) 也能证明这一机制的存在. 水生植物通过促进湖

水中含磷物质的沉降和防止淤积物再悬浮起了促进磷沉积的作用<sup>[40]</sup>,另外水生植物可以大量储存营养物质并将其转移至沉积物中<sup>[41]</sup>.有学者从磷吸附动力学角度研究沉水植物对沉积物的影响.王圣瑞等<sup>[42]</sup>研究发现黑藻提高了沉积物吸附磷的速度和强度,指出沉水植物影响沉积物中有机质和铁铝氧化物的含量是增强沉积物吸附磷强度和速度的重要机理,而这一作用使上覆水中磷浓度维持在较低水平<sup>[43]</sup>.

本实验通过定期排灌上覆水的设计,模仿了自然条件下的水体交换,实验周期包括苦草快速生长阶段和缓慢生长阶段.在苦草高速生长阶段,苦草通过转化吸收沉积物中活性较高的有机磷和铁铝磷,固定到短期难以向水体释放的植物体内,减缓了磷循环速度;而在缓慢生长阶段,苦草通过根系分泌物和改变根际理化环境,以及促进有机物沉降的方式,增强沉积物对磷的吸附能力,使水体中的磷以不易分解的闭蓄态被固定到沉积物中;可见在苦草生命的不同阶段,起主导作用的因素有所不同,但是对磷的沉降和循环速度的控制无疑起到积极作用,其中具体系统的机制仍需要进一步研究.本实验仅从磷形态方面揭示了影响的结果,未对具体的影响机制进行实验设计研究,虽然关于沉水植物的研究很多,但是实验条件各异,分析手段不尽相同,导致了有些结果的差异,而且自然条件下水体状况也有很大区别,如果从机理方面设计实验,对结果进行辅证,那么结果的可靠性和可引用性将大大提高.所以以后在研究不同水体环境中沉水植物对沉积物磷迁移转化的影响时,实验设计应该从影响因子入手,重点包括关键因子的分析,这样才能全面地说明影响机制.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Barko JW, James WF. Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation and resuspension. *Ecological Studies*, 1998, **131**: 197-214.
- [ 2 ] Blindow I. Long- and short-term dynamics of submerged macrophytes in two shallow eutrophic lakes. *Freshwater Biology*, 2006, **28**(1): 15-27.
- [ 3 ] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治.北京:中国环境科学出版社,1988:45-62.
- [ 4 ] David LC. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water: a review. *Journal of Environment Quality*, 1998, **27**: 261-266.
- [ 5 ] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management. *Hydrobiologia*, 1999, **395/396**: 181-190.
- [ 6 ] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会.中国植物志:第8卷.北京:科学出版社,1992:176-180.
- [ 7 ] Emily R, Benson JM, O'Neil WC *et al.* Using the aquatic macrophyte *Vallisneria americana* (wild celery) as a nutrient bioindicator. *Hydrobiologia*, 2008, **596**: 187-196.
- [ 8 ] 包先明.水生植被原位恢复对底泥磷释放的影响.水土保持通报,2011,**31**(2):68-72.
- [ 9 ] 胡俊,丰民义,吴永红等.沉水植物对沉积物中磷赋存形态影响的初步研究.环境化学,2006,**25**(1):28-31.
- [ 10 ] 王立志,王国祥,俞振飞等.苦草 (*Vallisneria natans*) 生长期对沉积物磷形态及迁移的影响.湖泊科学,2011,**23**(5):753-760.
- [ 11 ] Xiao KY, Yu D, Wu ZH. Differential effects of water depth and sediment type on clonal growth of the submersed macrophyte *Vallisneria natans*. *Hydrobiologia*, 2007, **589**: 265-272.
- [ 12 ] Stephen D, Moss B, Phillips G. Do rooted macrophytes increase sediment phosphorus release? *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 27-34.
- [ 13 ] 熊秉红,李伟.我国苦草属 (*Vallisneria* L.) 植物的生态研究.武汉植物学研究,2000,**18**(6):500-508.
- [ 14 ] Sun SJ, Huang SL, Sun XM *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 291-295.
- [ 15 ] Gao JQ, Xiong ZT, Zhang JD *et al.* Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes. *Desalination*, 2009, **242**(1/2/3): 193-204.
- [ 16 ] Wang SR, Jin XC, Zhao HC *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **273**(1/2/3): 109-116.
- [ 17 ] 旷远文,温达志,钟传文等.根系分泌物及其在植物修复中的作用.植物生态学报,2003,**27**(5):709-717.
- [ 18 ] 周小宁,王圣瑞,金相灿.沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响.环境科学,2006,**27**

- (12):2421-2425.
- [19] Zhang RY, Wu FC, Liu CQ *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 366-372.
- [20] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland). *Water Research*, 2003, **37**(18): 4468-4474.
- [21] Benitez-Nelson C, O'Neill ML, Styles RM *et al.* Inorganic and organic sinking particulate phosphorus fluxes across the oxic/anoxic water column of Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Chemistry*, 2007, **105**(1/2): 90-100.
- [22] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. *Water Research*, 2000, **34**(9): 2037-2042.
- [23] Hantke B, Fleischer P, Domany L *et al.* P release from DOP by phosphatase activity in comparison to P excretion by zooplankton. Studies in hard water lakes of different trophic level. *Hydrobiologia*, 1996, **317**: 151-162.
- [24] 陈淑珠, 钱红, 张经等. 沉积物对磷酸盐的吸附与释放. 青岛海洋大学学报, 1997, **27**(3): 413-418.
- [25] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hard water lake of the Baltic Lake district (Germany). *Water Science and Technology*, 1998, **37**(3): 51-58.
- [26] Palomo L, Clavero V, Izquierdo JJ *et al.* Influence of macrophytes on sediment phosphorus accumulation in a eutrophic estuary (Palmones river, Southern Spain). *Aquatic Botany*, 2004, **80**(2): 103-113.
- [27] Pierce A, Gwenaelle C, Pascal L. Phosphorus diagenesis in sediment of the Thau Lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **27**: 447-456.
- [28] Krom MD, Berber RA. The diagenesis of phosphorus in a near shore marine sediment. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, **45**: 207-216.
- [29] 赵海超, 赵海香, 王圣瑞等. 沉水植物对沉积物及土壤垂向各形态无机磷的影响. 生态环境, 2008, **17**(1): 74-80.
- [30] 周易勇, 李建秋, 张敏. 湿地中碱性磷酸酶的动力学特征与水生生物学的关系. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 134-138.
- [31] 彭青林, 敖洁, 曾经. 水生植物塘中的溶解氧变化及对污水处理研究. 长沙电力大学学报: 自然科学版, 2004, (1): 79-81.
- [32] Frankowski L, Bolalek J, Szostek A. Phosphorus in bottom sediments of pomeranian bay (Southern Baltic-Poland). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**(6): 1027-1038.
- [33] Kathleen GH, Thomas JA. Melting of  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$  at the core-mantle boundary of the Earth. *Science*, 1997, **275**(6): 1623-1625.
- [34] Schulz M, Kozerski HP, Pluntke T *et al.* The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany). *Water Research*, 2003, **37**: 569-578.
- [35] Lopez-Pineiro A, Garcia NA. Phosphate sorption in Vertisols of southwestern Spain. *Soil Science*, 1997, **162**(1): 69-77.
- [36] Gerke J, Hermann R. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe complexes and to amorphous Fe-oxide. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1992, **155**: 233-236.
- [37] 蒋柏藩, 沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究. 土壤学进展, 1990, **18**(1): 1-8.
- [38] Diaz-Espejo A, Serrano L, Toja J. Changes in sediment phosphate composition of seasonal ponds during filling. *Hydrobiologia*, 1999, **392**(1): 21-28.
- [39] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响. 武汉植物学研究, 2004, **22**(5): 394-399.
- [40] 李文朝. 东太湖水生植物的促淤效应与磷的沉积. 环境科学, 1998, **18**(3): 9-13.
- [41] 潘慧云, 徐小花, 高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律. 环境科学研究, 2008, **21**: 63-68.
- [42] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超. 沉水植物黑藻对沉积物磷吸附动力学的影响. 地球化学, 2006, **35**(6): 645-650.
- [43] Wang SR, Jin XC, Zhao HC. Effects of *Hydrilla verticillata* on phosphorus retention and release in sediments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **181**: 329-339.