

4 种水生植物根际磷素耗竭效应的比较

王震宇¹, 温胜芳¹, 邢宝山^{1,2}, 高冬梅¹, 李锋民^{1*}, 胡洪营³, Sakoda Akiyoshi⁴, Sagehashi Masaki⁴

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院海洋生态与环境教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. Department of Plant, Soil and Insect Sciences, University of Massachusetts, Amherst MA01003, USA; 3. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 4. 东京大学生产技术研究所, 日本 东京 153-8505)

摘要 利用短期盆栽试验和抖根法研究了喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*)、香蒲 (*Typha latifolia*)、慈姑 (*Sagittaria sagittifolia*) 和芦苇 (*Phragmites communis*) 4 种水生植物的根际磷素耗竭效应, 分析了植物根冠比、根系形态、磷素吸收有效性和磷素利用有效性等差异, 探讨了植物根际磷素耗竭效应的吸收利用调控机制。结果表明, 与非根际土壤 (有效磷含量为 $167.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 相比, 喜旱莲子草、香蒲、慈姑和芦苇根际土壤的有效磷含量分别减少至 80.17、124.37、155.38 和 $161.75 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 水溶性磷含量分别减少了 81%、42%、18% 和 16%。喜旱莲子草根系较小, 但磷素吸收有效性高 ($1.32 \text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$), 其磷素利用有效性不高 ($0.34 \text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$); 香蒲的磷素吸收有效性虽然比喜旱莲子草低许多 ($0.52 \text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$), 但其有强大的根系, 且磷素利用有效性高 ($0.64 \text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$) 根冠比大 (0.35)。喜旱莲子草和香蒲耗竭根际磷素的能力高于慈姑和芦苇。

关键词 根际土壤; 磷素耗竭; 水溶性磷; 根系形态; 磷素吸收有效性; 磷素利用有效性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2475-06

Phosphorus Rhizosphere Depletion Effect of Four Aquatic Plants

WANG Zhen-yu¹, WEN Sheng-fang¹, XING Bao-shan^{1,2}, GAO Dong-mei¹, LI Feng-min¹, HU Hong-ying³, Sakoda Akiyoshi⁴, Sagehashi Masaki⁴

(1. Key Laboratory of Ocean Ecology & Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Department of Plant, Soil and Insect Sciences, University of Massachusetts, Amherst MA01003, USA; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract Four aquatic plants (*Alternanthera philoxeroides*, *Typha latifolia*, *Sagittaria sagittifolia*, *Phragmites communis*) were cultured on P-enriched soil in a pot experiment to assess the phosphorus rhizosphere depletion effect and analysis the ratio of root to shoot, root morphology, phosphorus uptake efficiency and phosphorus use efficiency. An obvious variation in P concentration of the soil in the rhizosphere and non-rhizosphere was observed. Compared with the non-rhizosphere (available P: $167.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), the available P in the rhizosphere soil of *Alternanthera philoxeroides*, *Typha latifolia*, *Sagittaria sagittifolia* and *Phragmites communis* was reduced to 80.17, 124.37, 155.38 and $161.75 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively, with 81%, 42%, 18% and 16% reduction ratio of water-soluble phosphorus. More effective phosphorus depletion was achieved in *Alternanthera philoxeroides* by higher phosphorus uptake efficiency ($1.32 \text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$), while rooting system was small and phosphorus use efficiency was low ($0.34 \text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$). Phosphorus uptake efficiency of *Typha latifolia* is much lower ($0.52 \text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$) than that of *Alternanthera philoxeroides*, however, its strong rooting system enhanced soil exploration, with higher phosphorus use efficiency ($0.64 \text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$) and the ratio of root to shoot (0.35). *Alternanthera philoxeroides* and *Typha latifolia* were more effective in phosphorus depletion of the rhizosphere soil than that in *Sagittaria sagittifolia* and *Phragmites communis*.

Key words: rhizosphere soil; phosphorus depletion; water-soluble P; root morphology; phosphorus uptake efficiency; phosphorus use efficiency

随着非点源磷污染在水体磷污染来源中占的比例日益增加, 磷素污染的监测和控制变得十分困难^[1,2]。湿地作为水陆相互作用形成的独特生态系统, 其截留磷素的能力对邻近水体的水质安全有重要意义^[3]。利用水生植物截留磷素已成为非点源磷污染湿地控制的研究重点和主要措施^[4]。一方面, 水生植物可以通过吸收、吸附和富集等作用直接从水体和湿地土壤中移除磷素, 另一方面, 水生植物

的根系可以通过吸收养分、分泌有机物和输送氧气等过程改变根际土壤的 pH 值和 Eh 等化学特性, 进

收稿日期: 2007-09-26; 修订日期: 2007-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30570340); NSFC-JST 重大国际合作项目 (20510076); “十一·五” 国家科技支撑计划项目 (2006BAC10B03); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 (055128)

作者简介: 王震宇 (1969~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染环境的生物修复, E-mail: wang0628@ouc.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: lfm01@ouc.edu.cn

而影响湿地土壤对可溶性磷的吸附、沉淀和蓄积稳定^[5-8]。由此可见,湿地截留磷素与水生植物的根际磷素效应密切相关。根际磷素效应的研究多集中在低磷条件下的植物根系形态变化、根系生理变化引起土壤难溶性磷素活化和植物对磷素的高效吸收利用上^[9,10],对于水生植物在高磷环境下的根际磷素耗竭效应及其吸收利用调控机制还不清楚。

南四湖是南水北调东线工程的重点调蓄湖泊,其水质决定着工程的成败。然而,南四湖目前已处于中富-富营养化状态,可溶性氮磷之比为 80:1~90:1,属于磷限制性草藻混合型湖泊^[11]。南四湖流域每年通过农田径流进入湖体的总磷占入湖总磷的 68.3%^[12],湿地对磷素的截留净化能力已成为改善水质恢复湖区生态的关键。本研究选取 4 种南四湖流域本土的典型水生植物:喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、香蒲(*Typha latifolia*)、慈姑(*Sagittaria sagittifolia*)和芦苇(*Phragmites communis*)研究其对高磷土壤的根际磷素耗竭效应,探讨植物根际磷素效

应的调控机制,以期为南四湖流域利用水生植物治理磷素富营养化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物培养

供试土壤为中性壤土($\text{pH} = 6.8$),有效磷(Olsen-P)含量 $213.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,土壤的基本理化性质见表 1。土壤经自然风干后过 2 mm 筛备用。供试植物为芦苇(*Phragmites communis*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、慈姑(*Sagittaria sagittifolia*)和香蒲(*Typha latifolia*) 4 种水生植物,采自南四湖人工湿地示范区。

芦苇采用种子发芽,喜旱莲子草、慈姑和香蒲直接进行幼苗移栽。选取株高为 10~15 cm 的幼苗,将根系统一剪到 2 cm 长后移栽入盆中。4 种水生植物在保持土壤淹水 1 cm 高度下、温度 $23^\circ\text{C}/17^\circ\text{C}$ (14 h/10 h)、光照强度 16 500 lx,相对湿度 40% 的环境中生长 90 d 后收获。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil

项目	pH 值	有机质/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	碱解氮/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	有效钾/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	总磷/%	有效磷(Olsen-P)/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
数值	6.8	22.4	155.0	587.8	0.12	213.9	11.2

1.2 土壤和植物分析

用抖根法收取根际土壤,土壤自然风干后过 2 mm 筛用于分析。土壤速效磷(Olsen-P)用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 溶液浸提^[13],水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸提^[14],用磷钼蓝法测定提取液中的磷素含量^[13]。将植株分为地上部和地下部分别称取鲜重,杀青烘干后称取干重。烘干的植物样品在 550°C 下干灰化,用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 溶解,钒钼黄法测定溶解液的磷素含量^[13]。植物根系表面的磷素用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(dithionite-citrate-bicarbonate, DCB)溶液浸提^[15],磷钼蓝法测定浸提液中的磷素含量^[13]。

利用根系分析软件(WinRHIZO Pro. 2005b)分析根系总长、表面积、体积和根尖数等根系形态参数^[16]。

土壤 pH 值的测定采用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸提,用复合 pH 计测定浸提液的 pH 值^[13]。

1.3 植物磷素吸收利用有效性的计算

植物的磷素吸收有效性为植株磷素总量与总根长的比值,磷素利用有效性用植株总生物量与植株磷素总量的比值表示^[17]。

实验数据统计分析采用软件 SPSS12.0,分别用 ANOVA (Student-Newman-Keuls 检验法)和 Bivariate 过程进行方差和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤中磷含量的变化

经过植物 90 d 生长的影响,4 种水生植物的根际土壤有效磷和水溶性磷含量都发生了不同程度的变化(表 2)。与非根际土壤($167.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)相比,喜旱莲子草、香蒲、慈姑和芦苇的根际土壤有效磷含量分别减少至 80.17、124.37、155.38 和 $161.75 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。经统计分析得知,喜旱莲子草和香蒲的根际土壤有效磷含量与非根际土壤有显著差别($p < 0.05$),其耗竭土壤磷素的能力强于慈姑和芦苇。喜旱莲子草根际土壤的水溶性磷含量比非根际减少了 81%,香蒲减少了 42%,慈姑和芦苇减少了不足 20%(表 2)。土壤水溶性磷含量与有效磷含量的统计分析存在极显著正相关($r = 0.975, p < 0.01$,图 1)。

2.2 植株根系的差异

4 种水生植物的根系总长度、表面积、体积和根尖数等根系形态参数如图 2 所示。香蒲的根系总长

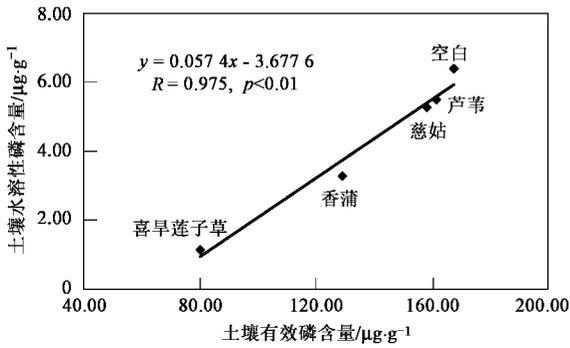
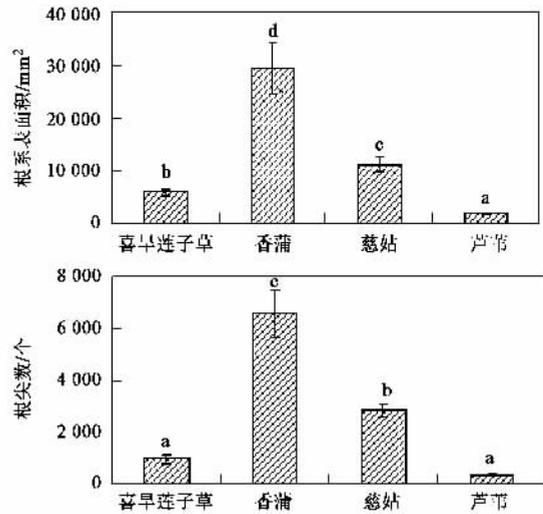
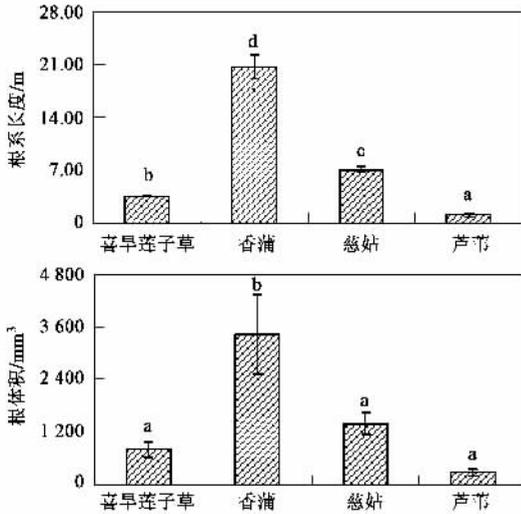


图 1 4 种植物根际和非根际土壤的有效磷含量与水溶性磷含量的关系

Fig.1 Relations between Available P and Water-soluble P of the rhizosphere and non-rhizosphere soil of 4 aquatic plants

最大,达到 20.61 m,其次是慈姑(7.13 m)、喜旱莲子草(3.67 m)和芦苇(1.15 m)。根系表面积表现出了与根长相同的顺序,四者之间有显著差异($p <$



标有相同字母的均值表示它们在 $p < 0.05$ 水平上没有显著差别,下同

图 2 4 种水生植物的单株植物的根形态参数

Fig.2 Root morphology parameters of 4 aquatic plants

另外,通过计算 4 种水生植物的根冠比发现,芦苇和香蒲的根冠比较大,分别为 0.71 和 0.35,而喜旱莲子草和慈姑仅为 0.07 和 0.06(图 3)。

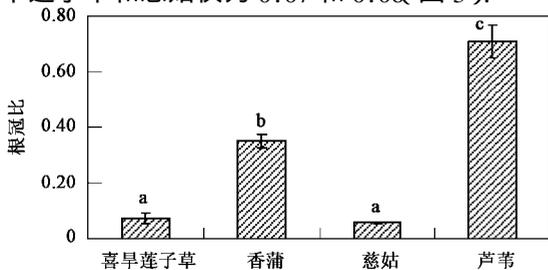


图 3 4 种水生植物的根冠比

Fig.3 Ratio of root to shoot of 4 aquatic plants

0.05)。喜旱莲子草、慈姑和芦苇三者的根体积之间没有显著差异,与香蒲的根体积有显著差异($p < 0.05$)。4 种植物的根尖数顺序是香蒲 > 慈姑 > 喜旱莲子草 = 芦苇($p < 0.05$)。根系总长度、表面积、体积和根尖数等这些根系形态参数都说明香蒲有强大的根系,慈姑次之,喜旱莲子草和芦苇的根系较小。

表 2 4 种水生植物的根际和非根际土壤的有效磷与水溶性磷含量¹⁾

Table 2 Available P and Water-soluble P of the rhizosphere and non-rhizosphere soil of 4 aquatic plants

植物	有效磷含量 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	水溶性磷含量 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	水溶性磷 减少率/%
喜旱莲子草	$80.17 \pm 1.03\text{a}$	$1.25 \pm 0.16\text{a}$	81
香蒲	$124.37 \pm 3.20\text{b}$	$2.16 \pm 0.23\text{b}$	42
慈姑	$155.38 \pm 1.86\text{c}$	$5.25 \pm 0.03\text{c}$	18
芦苇	$161.75 \pm 2.74\text{c}$	$5.39 \pm 0.01\text{c}$	16
空白	$167.53 \pm 1.45\text{c}$	$6.41 \pm 0.18\text{d}$	—

1) 同一列均数中标有的相同字母表示它们在 $p < 0.05$ 水平上没有显著差别,下同

2.3 植物磷素吸收有效性和利用有效性的差异

对植物磷素吸收有效性和利用有效性的计算结果如图 4 所示。喜旱莲子草的磷素吸收有效性最高($1.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$);其次是香蒲($0.52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$);芦苇和慈姑的极低,分别为 0.16 和 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$,不及喜旱莲子草的 1/8。4 种水生植物的磷素利用有效性在 $0.34 \sim 0.64 \text{ g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 之间变化,香蒲和芦苇的较高,与喜旱莲子草和慈姑的有显著差异($p < 0.05$)。

2.4 根际土壤 pH 值的变化

植物经过 90 d 培养后,根际和非根际土壤的 pH 值在 7.27 ~ 7.56 之间变化。统计分析结果表明,

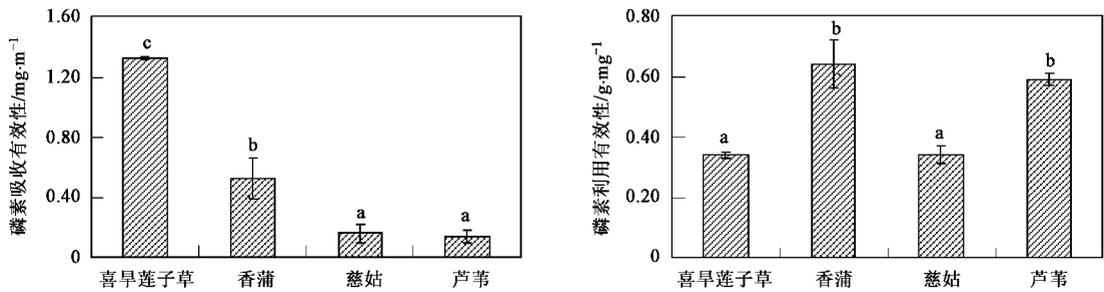


图4 4种水生植物的磷素吸收有效性和磷素利用有效性

Fig. 4 Phosphorus uptake efficiency and phosphorus use efficiency of 4 aquatic plants

喜旱莲子草和慈姑的根际土壤 pH 值与非根际土壤有显著差异, 香蒲和芦苇则没有显著差异 ($p < 0.05$, 表 3)。

3 讨论

大量研究表明, 可以用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸提的磷来评估磷素淋失的风险^[18-20]。Koopmans 等^[21]在集中畜牧区的高磷土壤中种植黑麦草, 使根际土壤的有效磷含量减少了 65%, 而且通过对土壤

磷素的吸附/解吸附试验表明, 土壤有效磷的减少可以有效降低土壤溶液中的磷素, 减少磷素流失的风险。本研究中, 4 种水生植物的根际土壤有效磷含量和水溶性磷含量均有了不同程度的降低(水溶性磷含量减少率在 16% ~ 81% 之间); 同时, 土壤的水溶性磷含量与有效磷含量也表现出了极显著的相关性(图 1, $R = 0.975$, $p < 0.01$), 这与以往研究所发现的高磷范围内土壤水溶性磷和有效磷含量线性相关的结论一致^[19]。

表 3 4 种水生植物的根际和非根际土壤的 pH 值

Table 3 pH of the soil in the rhizosphere and non-rhizosphere of 4 aquatic plants

项目	空白	喜旱莲子草	香蒲	慈姑	芦苇
pH 值	$7.38 \pm 0.01b$	$7.27 \pm 0.01a$	$7.43 \pm 0.02b$	$7.56 \pm 0.07c$	$7.44 \pm 0.02b$

植物对根际土壤有效磷的耗竭效应与植物对磷素的吸收利用密切相关, 植物的根系(根系总长、表面积、体积、根尖数等)磷素吸收有效性(单位根长吸收磷素的能力)植物对磷素的利用有效性和根冠比等因素都调控着植物对磷素的吸收, 不同植物的吸收利用调控机制不尽相同^[17, 22]。根际土壤磷素耗竭能力强的喜旱莲子草和香蒲两者的磷素吸收有效性都相对较高, 喜旱莲子草又高于香蒲(图 4)。然而, 喜旱莲子草植株的根系总长度、表面积、体积和根尖数等都比香蒲小(图 2), 香蒲的强大根系一定程度补偿了根系磷素吸收有效性低的不足。另外, 喜旱莲子草的磷素利用有效性和根冠比都比较低(图 3, 4), 植株将大量的磷素储存在地上部组织中, 并不经济的利用这些磷素来高效生产生物量; 香蒲的磷素利用有效性则较高(图 4), 而且具有较高的根冠比(图 3), 这说明香蒲不但经济的利用吸收的磷素增加生物量, 还支持根系的生长, 通过增大根系吸收表面积从土壤中吸收足够的磷素满足植株生长对磷素的需求。

植物根系分泌有机酸、吸收养分过程中伴随释

放 $\text{H}^+ / \text{HCO}_3^-$ 和呼吸释放 CO_2 等过程都会影响根际土壤的 pH 值。当土壤 pH 值变化时, 土壤中以铁、铝、钙矿物等矿物形态和土壤胶体吸附态等复杂形态存在的无机磷, 会由于磷矿物的沉淀/溶解平衡和磷素的吸附/解吸附平衡改变, 而使土壤溶液中的磷含量发生变化, 进而影响到磷素的有效性^[23]。Murrmann 等^[24]研究证明, 在中碱性钙质土壤条件下, 钙磷的溶解/沉淀过程主导着土壤溶液中的磷含量变化。本试验所用土壤是中性钙质壤土($\text{pH} = 6.8$)。植物经过 90 d 培养后, 其根际和非根际土壤的 pH 值在 7.27 ~ 7.56 之间变化(表 3)。喜旱莲子草的根际土壤 pH 值降低会由于钙磷矿物的溶解使土壤溶液磷含量增加, 这会在一定程度上促进喜旱莲子草根系对磷素的吸收; 然而, 另一方面, 土壤 pH 值降低引起的难溶性钙磷的活化又会部分抵消喜旱莲子草对根际土壤有效磷的耗竭; 慈姑的根际土壤 pH 值升高则会减少土壤溶液的磷含量, 不利于根系对磷素的吸收, 这是慈姑拥有相对较大根系(图 2)却根际磷素耗竭程度较低的一个可能原因。香蒲和芦苇的根际土壤 pH 值则与非根际没有显著

性差异 ($p < 0.05$)。尽管 pH 值变化对土壤水溶性磷含量有一定的影响,然而由于土壤本身是一个巨大的缓冲体系,植物根系对土壤 pH 值的改变非常的小(7.27~7.56 之间),如此微小范围的 pH 值变化并不会剧烈地改变根际土壤的水溶性磷含量^[25]。

在淹水条件下,水生植物具有通过根向根际释放氧气和氧化性物质的能力,这使渍水土壤中大量的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 在植物根系的表面及根外体中被氧化形成铁锰氧化物胶膜^[26,27]。大量研究表明,具有两性胶体性质的铁锰氧化物胶膜对水生植物的根际磷素效应起着重要的调控作用。Zhang 等^[28]认为,水稻根系表面沉积的铁膜在一定厚度范围内可以促进根系对磷素的吸收,超过一定值后这种促进作用就会逐渐减弱;而 Hupfer 等^[29]发现,生长在富含铁和磷的沉积物中的菹草(*Potamogeton crispus* L.),其根表铁锰氧化物胶膜固定的磷素含量占植株截留磷素总量的 59%。本试验中,没有在 4 种水生植物的根系表面观察到明显的铁锰氧化物胶膜,但根系的 DCB 提取液中检测出了磷素,且香蒲根系表面的铁锰氧化物胶膜磷含量($315.63 \mu g \cdot g^{-1}$)明显大于其它 3 种植物。香蒲强大的根系(图 2)使其可能在利用根系表面铁锰氧化物胶膜耗竭土壤磷素上有一定的潜力。需要进一步系统研究植物根系表面铁锰氧化物胶膜的形成及其在植物根际磷素效应中的生态学意义。

4 结论

(1) 在高磷土壤淹水的培养条件下,4 种水生植物的根际土壤有效磷和水溶性磷含量有了不同程度的降低,喜旱莲子草和香蒲耗竭土壤磷素的能力强于慈姑和芦苇。

(2) 根际土壤磷素耗竭程度高的喜旱莲子草和香蒲两者的磷素吸收利用调控机制不同:喜旱莲子草的磷素吸收有效性高,但根系较小、磷素利用有效性低;香蒲的磷素利用有效性不及喜旱莲子草,却拥有强大的根系、较高的磷素利用有效性和较大的根冠比。

参考文献:

- [1] Shigaki F, Sharpley A, Prochnow L I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays [J]. Science of the Total Environment, 2007, **373** (1): 334-343.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. 中国农业科学, 2004, **37**(7): 1008-1017.
- [3] Reddy R K, Robert G W, Robert H K. Biogeochemistry of Phosphorus in wetland [A]. In: Phosphorus: Agriculture and the environment [C]. Solomon: Agronomy Monograph American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005. 264-361.
- [4] Wetzel R G. limnology: Lake and river ecosystem [M]. (Third Edition). San Diego: Academic Press, 2001.
- [5] Begg C B M, Kirk G J D, Mackenzie A F, et al. Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere [J]. New Phytologist, 1994, **128**(3): 469-477.
- [6] Patrick Jr W H, Khalid R A. Phosphate release and sorption by soils and sediments: effect of aerobic and anaerobic conditions [J]. Science, 1974, **186**(4158): 53-55.
- [7] 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磷的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2421-2425.
- [8] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms [J]. Bioresource Technology, 2004, **94**(2): 185-192.
- [9] Jungk A, Claassen N. Ion diffusion in the soil-root system [J]. Advance in Agronomy, 1997, **61**: 53-110.
- [10] Föhse D, Claassen N, Jungk A. Phosphorus efficiency of plants I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species [J]. Plant and Soil, 1988, **110**(1): 101-109.
- [11] 赵群. 南四湖水环境问题以及修复对策的探讨 [J]. 环境科学动态, 2005, **1**: 29-31.
- [12] 金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 274-300.
- [13] Ryan J, Estefan G, Rashid A. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual [M]. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas and National Agricultural Research Center, 2001.
- [14] Schofield R K. Can a precise meaning be given to 'available' phosphorus soil phosphorus [J]. Soils and Fertilizer, 1955, **18**: 373-375.
- [15] Taylor G T, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plant [J]. American Journal of Botany, 1983, **70**: 1254-1257.
- [16] Bauhus J, Messier C. Evaluation of fine root length and diameter measurements obtained using RHIZO Image Analysis [J]. Agronomy Journal, 1999, **91**: 142-147.
- [17] Blair G. Nutrient Efficiency-what do we really mean? [A]. In: Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. 204-213.
- [18] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment [J]. Journal of environmental quality, 1995, **24**: 904-910.
- [19] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. Journal of Environmental Quality, 2000,

- 29** : 105-110.
- [20] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, **23**(12): 2689-2701.
- [21] Koopmans G F, Chardon W J, Ehlert P A I, *et al.* Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched non-calcareous sandy soil [J]. Journal of environmental quality, 2004, **33** : 965-975.
- [22] Wang Z Y, Göttlein A, Rodenkirchen H. Soil exploration, nutrient partitioning, and nutrient efficiency of beech and spruce seedlings in a rhizotrone experiment [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, **166** : 390-391.
- [23] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes : a review [J]. Plant and Soil, 2001, **237** : 173-195.
- [24] Murrmann R P, Peech M. Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1969, **33** : 205-210.
- [25] Morel C, Tiessen H, Moir J, *et al.* Phosphorus transformations and availability due to crop rotations and mineral fertilization assessed by an isotopic exchange method [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58** : 1439-1445.
- [26] Armstrong W. Oxygen diffusion from the root of some British bog plants [J]. Nature, 1964, **204** : 801-802.
- [27] Crowder A, Macfie S M. Seasonal deposition of ferric hydroxide plaque on roots of wetland plant [J]. Canadian Journal of Botany, 1986, **64** : 2120-2124.
- [28] Zhang X, Zhang F, Mao R. Effect of Fe plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phosphorus uptake [J]. Plant and Soil, 1999, **209** : 187-192.
- [29] Hupfer M, Dollan A. Immobilization of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2003, **506**(1): 635-640.