

2 种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响

王震宇¹, 刘利华¹, 温胜芳¹, 彭昌盛¹, 邢宝山^{1, 2}, 李锋民^{*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. Department of Plant Soil and Insect Sciences University of Massachusetts Amherst MA 01003, USA)

摘要: 在田间条件下, 运用土壤溶液原位抽提和毛细管电泳分析等技术, 比较了芦竹 (*Arundo donax* Linn) 和香蒲 (*Typha latifolia*) 根表铁氧化物胶膜数量、土壤根际溶液磷质量浓度、根际土和根际溶液 pH 及根膜比等的差异, 阐明了湿地植物根表铁氧化物胶膜对磷素从非根际土壤-根际土壤-根际溶液-根表铁氧化物胶膜-根系的迁移过程的影响以及在磷素净化中的根际调控机制。结果表明, 芦竹和香蒲根表铁氧化物胶膜数量 (以根系鲜重计) 分别为 20 170.8 和 7 640.3 mg/kg。有铁氧化物胶膜沉积的芦竹、香蒲的根际土有效磷含量分别是 28.85 和 34.99 mg/kg, 各比其无铁氧化物胶膜增加了 46.2%、21.9%。有铁氧化物胶膜沉积的芦竹、香蒲的根际溶液磷质量浓度为 0.65 和 0.56 mg/kg, 分别比其无铁氧化物胶膜沉积高 9.2%、33.9%。芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷占根系吸附吸收磷的 81.7%, 香蒲是 85.7%。根表有铁氧化物胶膜沉积的芦竹磷素利用有效性比无铁氧化物胶膜的植株高 16.5%, 香蒲高 31.4%。有铁氧化物胶膜沉积的芦竹和香蒲植株体内磷含量均比无铁氧化物胶膜高。同时, 铁氧化物胶膜对磷酸盐的吸附提高了磷酸盐从非根际向根际、固相 (根际土壤) 向液相 (根际土壤溶液) 的迁移速率。有铁氧化物胶膜沉积的湿地植物根际土有效磷含量累积, 无铁氧化物胶膜沉积的湿地植物根际土有效磷含量耗竭。

关键词: 湿地植物; 铁氧化物胶膜; 根际溶液; 磷素吸收; 磷素利用有效性

中图分类号: X 171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2010)03-0781-06

Effect of Iron Plaque on Root Surfaces on Phosphorus Uptake of Two Wetland Plants

WANG Zhen-yu¹, LIU Li-hua¹, WEN Sheng-fang¹, PENG Chang-sheng¹, XING Bao-shan^{1, 2}, LI Feng-min¹

(1. 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 MA 01003, USA)

Abstract *In situ* micro-suction cups were used to collect samples of soil solution with *Arundo donax* Linn and *Typha latifolia* from defined segments at rhizosphere in field. The experiment was conducted to elucidate the contribution of iron plaque while wetland plants were used to remove phosphorus. The reddish iron plaque was observed and measured on the surfaces of roots of *Arundo donax* Linn and *Typha latifolia* in the field. 20 170.8 mg/kg (fresh weight) for *Arundo donax* Linn and 7 640.3 mg/kg (fresh weight) for *Typha latifolia* were collected. Olsen-P contents of *Arundo donax* Linn with iron plaque were 28.85 mg/kg, 46.2% more than that of without, 34.99 mg/kg for *Typha latifolia*, 21.9% more than that of without. The phosphate concentrations in the *in situ* rhizosphere soil solution of *Arundo donax* Linn with iron plaque were 0.65 mg/kg, 9.2% more than that of without, 0.56 mg/kg for *Typha latifolia*, 33.9% more than that of without. The phosphorus contents adsorbed by iron plaque were 81.7% for *Arundo donax* Linn and 85.7% for *Typha latifolia* of the wetland plants with iron plaque. Phosphate use efficiency of *Arundo donax* Linn with iron plaque was 16.5% more than that of without, 31.4% for *Typha latifolia*. The contents of phosphorus of single plant of the two wetland plants with iron plaque are higher than that of without. Due to adsorb phosphate with iron plaque, the transfer speeds of phosphate from non-rhizosphere to rhizosphere and from soil to soil solution are increasing. The phosphorus contents with iron plaque accumulated at rhizosphere and depleted at rhizosphere without iron plaque of *Arundo donax* Linn and *Typha latifolia*.

Key words wetland plants; iron plaque; rhizosphere soil solution; phosphate uptake; phosphate use efficiency

长期生长在渍水环境下的湿地植物, 如水稻^[1-3]、芦苇^[4]、香蒲^[5]、眼子菜^[6]、紫苑^[7]、伊乐藻和茳草^[8]等, 可向根际释放氧气, 在根际形成一个局部氧化环境^[9]; 同时, 土壤中大量存在的还原性金属离子, 如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等在根际的微域氧化环境被氧化成铁、锰氧化物, 并在植物根表沉积形成铁氧化物胶膜。这些沉积在湿地植物根表的铁氧化物胶

膜可以吸附生长介质中的重金属, 如镉^[10, 11]、锌^[2, 3]和铜^[4]等, 改变其在介质中的移动性和存在状态,

收稿日期: 2009-04-30; 修订日期: 2009-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30570340); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAC01A13); 长江学者奖励计划项目

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

进而影响其生物效应^[11, 12]. 根表有铁氧化物胶膜的水稻对镉、铜、镍毒性的耐受能力明显高于根表无铁氧化物胶膜的水稻; 但是, 铁氧化物胶膜不影响铜进入根内^[13]. 另有研究发现, 水稻根表铁氧化物胶膜可以吸附生长介质中的镉, 但不影响镉在植物体内的分配, 水稻根系而非铁氧化物胶膜是阻碍镉进入植物体内的因素^[12]. 湿地植物根表铁氧化物胶膜是两性胶体, 对土壤中的磷酸根离子也有强烈的吸附作用, 可以减少土壤中的磷^[12]. 在底质有机质含量低时, 湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成能够阻止空隙水中的磷向根系扩散, 从而抑制植物体对磷的吸收^[14]. 铁氧化物胶膜中和铁结合的磷仍然可以被植物吸收利用. 而生长在富含铁、磷底质中的伊乐藻根表铁氧化物胶膜吸附的磷高于整个植株吸收利用的磷; 根表有铁氧化物胶膜形成的伊乐藻和茳草地上部和根系中磷含量均高于无铁氧化物胶膜的地上部和根系的磷量, 即铁氧化物胶膜促进了植物对磷的吸收^[8]. 研究表明, 水稻根系表面沉积的铁氧化物胶膜在一定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^[2, 3]. 然而, 到目前为止, 在湿地生态系统中不同湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及如何调控植物体对磷的去除机制仍存在着较大争议.

南四湖位于山东省的西南部, 是典型的浅水湖泊. 近 20 年来, 水体磷素污染日益严重, 目前已处于中富-富营养化状态^[17]. 而每年由于“非点源”污染进入湖泊的磷占入湖总磷的 68.3%^[17]. 因此, 磷已成为南四湖富营养化的限制性因素^[17]. 利用湿地去除水体中的磷素污染、净化水质越来越受到人们的关注^[18]. 湿地对磷的去除是土壤和湿地植物相互作用的结果, 其又和湿地植物的根际环境密切相关. 因此, 湿地植物净化效率差异最关键的因素是根际调控能力的差异. 本研究以南四湖湿地植物芦竹和香蒲为供试植物, 首次在田间条件下, 运用土壤溶液原位微量抽提等技术, 分析其根表铁氧化物胶膜的形成及在磷素去除中的贡献, 阐明铁氧化物胶膜在磷素根际调控中的内在机制, 以期为湖泊湿地的磷素去除提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试植物和供试土壤

试验区域为山东省济宁市南四湖, 东经 116°34', 北纬 34°27'. 供试植物为芦竹 (*Arundo donax* Linn) 和香蒲 (*Typha latifolia*), 生长于湿润、偏

砂的环境, 试验时间在 2008 年 6 月.

供试土壤为潮土, pH 8.02, 土壤全磷 165.36 mg/kg, 有效磷 (Olsen-P) 32.72 mg/kg, 有机质 1.2%.

1.2 土壤根际溶液抽提装置

利用微型抽提管 (Rhizosphere Research Products Wageningen, Netherlands) 原位收集土壤根际溶液^[20-22], 其最前端为多孔陶瓷 P80 材料 (孔隙度 48%, 最大孔径为 1 μ m), 其外径为 1 mm. 直接将该抽提管插入湿地植物距根系不同位置, 微型抽提管通过内径 0.75 mm 的聚醚醚酮管与真空收集器相通, 在 -900 kPa 负压下连续抽提 9h. 每个微型抽提管抽出的土壤溶液分别收集于容量为 200 μ L 的聚丙烯瓶 (Agilent) 中^[20-22].

1.3 湿地植物根表铁氧化物胶膜的测定

本研究将可观察到有红棕色沉积的根系认为是有铁氧化物胶膜, 视觉不能观察到的红棕色沉积的根系归为无铁氧化物胶膜^[14]. 取一定量的新鲜根系用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠 (dithionite-citrate-bicarbonate DCB) 溶液浸提, 利用原子吸收测定铁的含量 (DCB-Fe), 来表征湿地植物根表铁氧化物胶膜数量^[19].

1.4 土壤和植物磷素含量的测定

采用抖根法^[20]取得湿地植物根际土, 土壤样品风干过 2 mm 筛备用. 土壤速效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提, 磷钼蓝法测定^[23].

分别将植株地上部和根系称取鲜重后杀青、烘干并称取干物重 (生物量)^[24]. 烘干的植物在 550°C 下灰化, 用磷钼蓝测定植物体内磷素含量^[23]; 植物根表铁氧化物胶膜吸附固定的磷用 DCB 浸提, 磷钼蓝法测定^[23]. 土壤 pH 值的测定采用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液浸提, 用 pH 计 (DELTA320 荷兰) 测定^[24].

1.5 土壤溶液磷素质量浓度的测定

以根表有、无铁氧化物胶膜沉积的芦竹和香蒲为研究对象, 在距离根系 < 5 mm (定义为根际, 抽提样品数 15) 及 > 3 cm (定义为非根际, 抽提样品数 6) 的区域, 利用根际原位抽提系统收集土壤溶液, 利用毛细管电泳仪 (Agilent 3D CE, 德国) 测定土壤溶液中磷含量, 用微量 pH 计 (Entron, 荷兰) 测定土壤溶液 pH^[21, 22].

1.6 不同湿地植物磷素利用有效性的计算

磷素利用有效性为植株总生物量与吸收磷素总量的比值^[24].

用软件 SPSS 12.0 进行数据统计分析, 用 ANOVA (Student-Newman-Keuls 检验法) 对不同湿地植物土壤有效磷含量、土壤 pH、土壤溶液磷质量浓度、土壤溶液 pH、磷在植物体内分配和磷素利用有效性等进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 铁氧化物胶膜量及其吸附的磷量

南四湖田间观察发现, 在砂质土壤及干湿交替的条件下, 芦竹和香蒲根表较易形成橘红色铁氧化物沉积, 并且芦竹根表铁氧化物胶膜的颜色更深些。试验结果发现, 芦竹根表铁氧化物胶膜数量约是香蒲的 2.6 倍 (表 1)。这可能是由于芦竹根系庞大, 根毛发达, 盘根错节^[25]。另外, 芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷 (DCB-P) 明显多于香蒲 ($p < 0.05$)。据报道, 在一定范围内, 湿地植物根表铁氧化物胶膜吸附的磷量和胶膜的数量成显著正相关^[2, 3]。

表 1 芦竹和香蒲根表铁氧化物胶膜量和吸附的磷量¹⁾ /mg·kg⁻¹

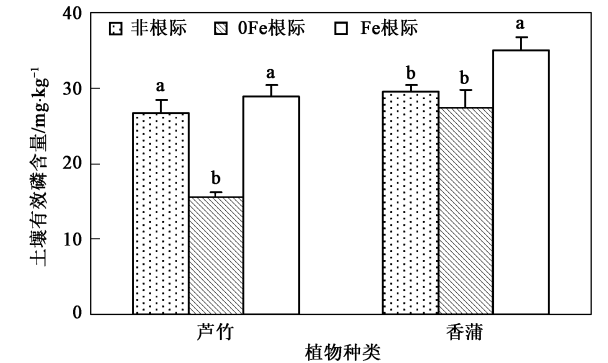
种类	有铁氧化物胶膜		无铁氧化物胶膜	
	phosphorus contents accumulated in iron plaque/mg·kg ⁻¹			
	DCB-Fe	DCB-P	DCB-Fe	DCB-P
芦竹 (<i>Arundo donax</i> Linn)	20 170.8A	673.0a	265.0a	148.8a
香蒲 (<i>Typha latifolia</i>)	7 646.3B	604.5b	318.2b	103.0b

1) 同一列中大写字母表示在 $p < 0.01$ 水平上有极显著差别, 小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上有显著差别, $n = 3$

2.2 铁氧化物胶膜对湿地植物根际土壤有效磷含量的影响

根表有铁氧化物胶膜沉积的芦竹, 根际土有效磷含量比无铁氧化物胶膜的增加了 46.2%, 香蒲增加了 21.9% (图 1)。其根际土有效磷含量变化趋势为: 根表有铁氧化物胶膜的根际土有效磷含量最高, 非根际土次之, 无铁氧化物胶膜形成的最低。研究发现, 湿地植物根表铁氧化物胶膜和土壤中铁氧化物性质相似^[27], 对环境中的磷均有很强的吸附能力^[2, 8, 14, 27]。湿地植物根表铁氧化物胶膜作为根际的一部分, 势必影响着根系对污染物的吸收^[27, 28]。这可能是由于湿地植物根表铁氧化物胶膜吸附了根际土中大量的磷 (芦竹和香蒲的 DCB-P 分别为 673.0 604.5 mg/kg 见表 1), 从非根际到根际形成了一个从高到低的磷浓度梯度, 增加了磷从非根际向根际的迁移速率; 但磷从非根际向根际的迁移速率大于根表铁氧化物胶膜对磷的吸附速率, 因此, 有铁氧化物

物胶膜包被的植物根际土壤有效磷含量增加。另外, 被铁氧化物胶膜包被的根系不是养分吸收的主要区域^[27], 此处磷吸收速率远低于磷从非根际向根际的迁移速率, 使得有铁氧化物胶膜包被的植物其根际土壤中有有效磷含量累积。



标注不同字母表示同种植物在 $p < 0.05$ 水平上有显著差别; 将有铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 Fe, 无铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 0Fe, $n = 3$, 图 2 同

图 1 湿地植物根际土壤有效磷含量
Fig 1 Contents of rhizosphere Olsen-P of wetland plants

图 2 结果显示, 根表有铁氧化物胶膜形成的芦竹和香蒲的根际土 pH 最低。低的 pH 可以增加土壤中被 Ca、Fe 等固定的磷的释放^[29, 30], 释放出来的 PO_4^{3-} 会在根际中累积。另外, 植物根表的铁氧化物胶膜主要沉积在距根尖 1 cm 以上的成熟根区^[14, 27, 31, 32], 在植株根表铁氧化物胶膜沉积过程中, 根尖会分泌大量的有机酸和质子, 从根尖到成熟根段产生 H^+ 梯度, 质子和有机酸向成熟根段迁移, 通过降低成熟根段根际的 pH^[32, 33], 加速被土壤固定的磷的释放, 导致有铁氧化物胶膜包被的湿地植物根际土壤有效磷含量高于根际土和非根际土的有效磷含量。

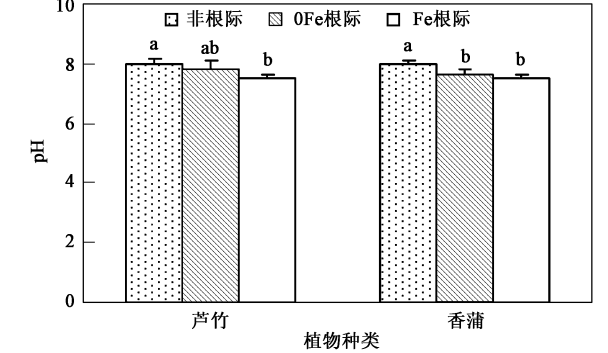
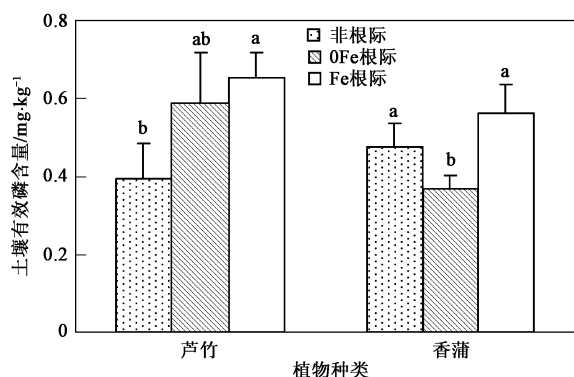


图 2 不同湿地植种类别根际土壤 pH
Fig 2 Values of rhizosphere soil pH of wetland plants

2.3 根际土壤溶液磷酸盐质量浓度差异

土壤溶液中养分含量的变化直接表征着养分强度的变化. 由图 3 可以看出, 根表有铁氧化物胶膜的芦竹根际土壤溶液磷酸盐质量浓度比无铁氧化物胶膜的增加了 9.2%, 香蒲相应地增加了 33.9%. 芦竹有铁氧化物胶膜的根际溶液磷酸盐质量浓度最高, 其次是无铁氧化物胶膜根际溶液, 非根际土壤溶液磷酸盐质量浓度最低. 有铁氧化物胶膜的根际土壤溶液磷素质量浓度和非根际有显著性差异 ($p < 0.05$, 图 3). 香蒲的有、无铁氧化物胶膜的根际溶液磷酸盐质量浓度有显著差异 (图 3). Wang 等^[20]研究发现, 根际与非根际的土壤溶液在化学特性上表现出显著的差异. 植物根际土壤溶液中磷酸盐质量浓度的变化能更直接地反映磷素的根际效应^[21, 22].



标注不同字母表示同种植物在 $p < 0.05$ 水平上有显著差别; 将有铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 Fe 无铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 0Fe; 0Fe 根际和 Fe 根际 $n = 15$ 非根际 $n = 6$, 图 4 同

图 3 湿地植物根际土壤溶液磷质量浓度

Fig 3 Phosphorus concentrations of rhizosphere soil solution of wetland plants

在根际的微域环境中, 根系吸收引起的根际溶液磷酸盐耗竭主要受土壤溶液磷酸盐的质量浓度和扩散速率影响^[22]. 湿地植物根表铁氧化物胶膜的吸附可能增加了磷酸盐的矿化速率, 提高了微域环境中磷酸盐质量浓度. 同时, 根系吸收引起的磷酸盐耗竭又可形成磷酸盐从非根际到根际的浓度梯度^[22]. 没有铁氧化物胶膜沉积的新根根际, 可能根系吸收速率远大于扩散速率, 因此根际土壤溶液磷酸盐质量浓度降低.

有铁氧化物胶膜包被的植物根际土壤和根际溶液 pH 均下降 (图 4). 无铁氧化物胶膜包被的新根是植物主要的养分吸收部位^[27], 当根系的吸收速率大于土壤溶液中磷酸盐向根际的迁移速率时, 无铁

氧化物胶膜根际磷酸盐会出现耗竭. 土壤 pH 值是影响土壤中磷酸盐形态和转化的重要因素. pH 可以明显改变土壤溶液的磷素磷酸盐含量^[35], pH 值的降低有利于土壤磷素向土壤溶液的释放^[30, 35]. 植物在生长过程中其根系会分泌有机酸^[24, 35]和质子^[24], 均可降低根际 pH, 促进磷素的矿化, 增加磷从固相到液相的迁移速率^[34].

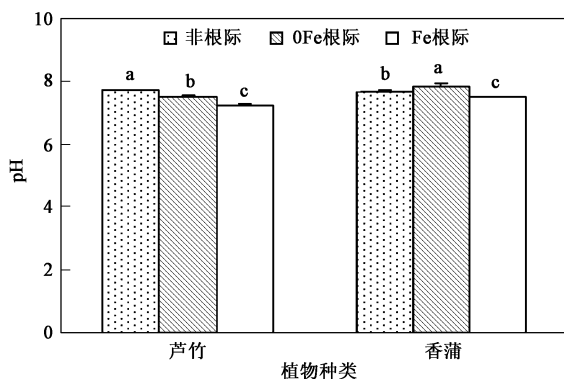


图 4 湿地植物根际土壤溶液 pH

Fig 4 Values of pH of rhizosphere soil solution of wetland plants

2.4 湿地植物体内磷含量

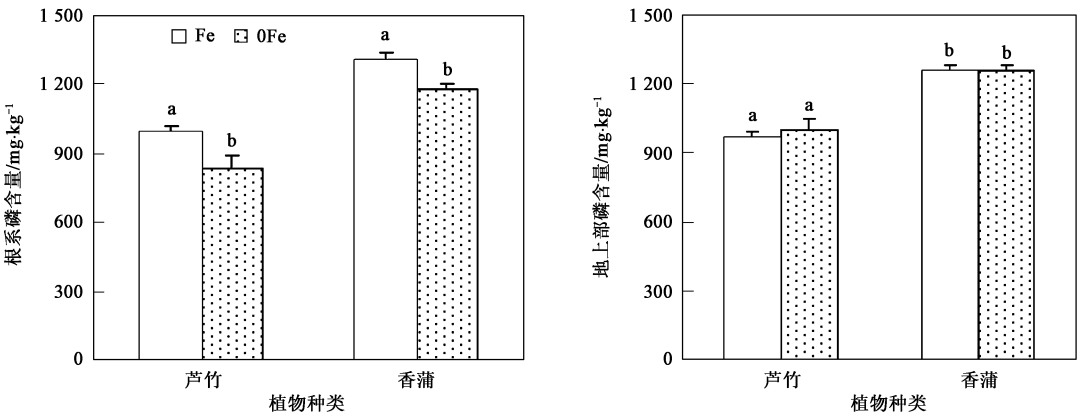
根表有铁氧化物胶膜沉积的芦竹和香蒲, 根系中磷的含量均高于无铁氧化物胶膜沉积的根系磷含量, 芦竹有铁氧化物胶膜根系磷量比无铁氧化物胶膜的磷量增加了 15.9%, 香蒲增加了 10.1%, 均有显著差异 ($p < 0.05$, 图 5). 有、无铁氧化物胶膜的芦竹和香蒲地上部分磷含量没有显著差异. 说明根表铁氧化物胶膜的形成在一定程度上促进了根系对磷的吸收, 而不影响磷素在植物体内的运移.

2.5 不同湿地植物磷素吸收量和利用有效性

通过对芦竹和香蒲植株体内磷素吸收总量和利用有效性的计算, 发现根表有铁氧化物胶膜沉积的香蒲植株吸收的磷素比无铁氧化物胶膜的多 31.4%, 芦竹多 16.5%, 且单株芦竹吸收的磷量比香蒲的少 44.6% (图 6). 虽然香蒲的磷素利用效率不如芦竹高, 但由于其生物量较大, 根系能吸收较多的磷, 这和王震宇等^[24]室内盆栽试验发现香蒲吸收有效性不高但根系发达、磷素移除率高的结果一致.

2.6 磷在湿地植物铁氧化物胶膜和根系中的分配

磷在湿地植物根系和根表铁氧化物胶膜中的含量分配比例称为根膜比^[38]. 通过测定植株根表铁氧化物胶膜和根系中的磷含量, 发现根表有铁氧化物胶膜沉积的芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷占根系



标注不同字母表示同种植物在 $p < 0.05$ 水平上有显著差别; 将有铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 Fe 无铁氧化物胶膜沉积的样品标记为 0Fe $n = 3$ 下同

图 5 湿地植物体内磷含量差异

Fig 5 Contents of phosphorus in roots and shoots of wetland plants

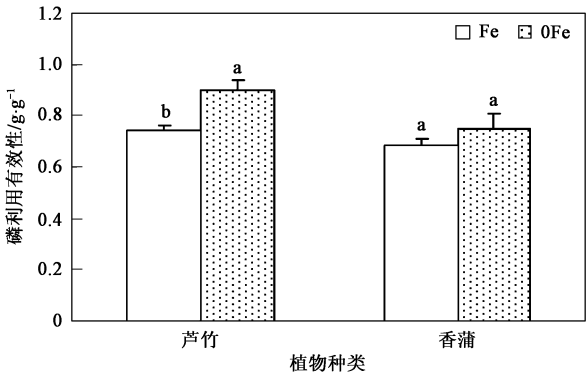


图 6 不同湿地植物磷利用有效性

Fig 6 Phosphorus contents of phosphorus use efficiency of wetland plants

吸收、吸附磷量的 81.7%, 香蒲为 85.7% (图 7); 根表无铁氧化物胶膜沉积的芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷占根系吸收、吸附磷量的 53.6%, 香蒲为 52.8%。湿地植物根表铁氧化物胶膜吸附的磷多, 仅少量的磷累积于根系。Hupfer 等^[8]在研究伊乐藻和茳草根表铁氧化物胶膜对磷的固定时发现, 铁氧化物胶膜吸附的磷超过整个植物体吸收利用的磷。这和刘艳菊等^[38]报道的铅主要累积在水稻根系结果不一致。可能是由于植物根表的铁氧化物胶膜是两性胶体^[12 27], 对阳离子和阴离子的作用机制不一致的原因^[38]。

本研究分析了湿地植物根表铁氧化物胶膜对磷素从非根际土壤-根际土壤-根际土壤溶液-湿地植物根表铁氧化物胶膜-根系的迁移过程, 而铁氧化物胶

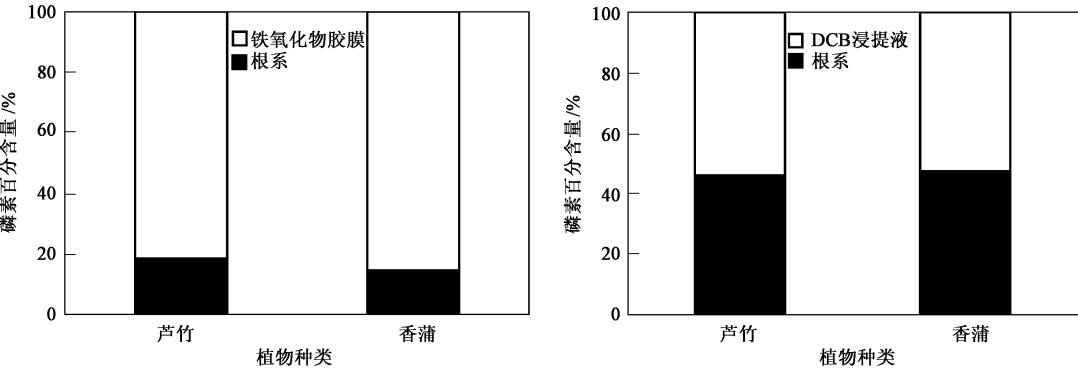


图 7 有、无铁氧化物胶膜包被的植物体内磷的分配

Fig 7 Distribution of phosphorus in different parts of wetland plants with and without iron plaque

膜对磷素在植物体内迁移是否有影响, 以及被湿地植物根表铁氧化物胶膜吸附的磷在什么条件下能被重新释放到环境中或者被植物根系直接吸收进入植株体内, 还需要进一步的深入研究。

3 结论

(1) 芦竹根表铁氧化物胶膜吸附的磷占根系吸收、吸收磷的 81.7%, 香蒲的为 85.7%。

(2) 有铁氧化物胶膜沉积的芦竹和香蒲其根际土有效磷含量、根际溶液磷酸盐质量浓度最高。植物根表的铁氧化物胶膜增加了磷酸盐从非根际土壤向根际土壤、固相(根际土壤)向液相(根际土壤溶液)的迁移速率,并在根际土和根际土壤溶液中出现磷酸盐的累积,而无铁氧化物胶膜包被的新根根际土壤有效磷出现耗竭。

参考文献:

- [1] Greipsson S, Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice (*Oryza sativa*) [J]. Can J Bot 1992, **70**: 842-830
- [2] 张西科, 张福锁, 毛达如. 水稻根表铁氧化物胶膜对水稻吸收磷的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1997, **3**(4): 295-299
- [3] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phosphorus uptake [J]. Plant Soil 1999, **209**: 187-192
- [4] Batty L C, Baker A J M, Wheeler B D, *et al* The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steudel [J]. Ann Bot 2000, **86**: 647-653.
- [5] Macfie S M, Crowder A A. Soil factors influencing ferric hydroxide plaque formation on roots of *Typha latifolia* L. [J]. Plant Soil 1987, **102**: 177-184.
- [6] Armstrong W. The oxidising activity of roots in water-logged soils [J]. Physiol Plantarum, 1967, **20**: 920-926.
- [7] Otte M L, Rozema J, Koster L, *et al* Iron plaque on roots of *Aster tripolium* L. interaction with zinc uptake [J]. New Phytol 1989, **111**: 309-317.
- [8] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia 2003, **506-509**: 635-640
- [9] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(2): 36-40
- [10] 李花粉, 张福锁, 李春俭, 等. Fe对不同品种水稻吸收 Cd的影响 [J]. 应用生态学报, 1998, **9**(1): 110-112.
- [11] Liu H, Zhang J, Christie P, *et al* Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil [J]. Sci Total Environ 2008, **394**: 361-368.
- [12] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁-锰氧化物胶膜 [J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 358-363
- [13] Greipsson S. Effect of iron plaque on roots of rice on growth and metal concentration of seeds and plant tissues when cultivated in excess copper [J]. Commun Soil Sci Plant Anal 1994, **25**: 2761-2769
- [14] Christensen K K, Jensen H S, Andersen F, *et al* Interferences between root plaque formation and phosphorus availability for isoetids in sediments of oligotrophic lakes [J]. Biogeochemistry, 1998, **43**: 107-128.
- [15] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流沉积物中磷的赋存形态研究 [J]. 地球化学, 2008, **37**(3): 290-296
- [16] 金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 274-300.
- [17] 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.
- [18] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择 [J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 91-96.
- [19] Taylor G J, Crowder A A. Use of DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants [J]. Am J Bot 1983, **70**: 1254-1257.
- [20] Wang Z, Gtlein A, Bartonek G. Effects of growing roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) on rhizosphere nutrient chemistry in a forest soil [J]. J Plant Nutr Soil Sci 2001, **164**: 35-41.
- [21] Wang Z Y, Kelly J M, Kovar J L. *In situ* dynamics of phosphorus in the rhizosphere solution of five species [J]. J Environ Qual 2004, **33**: 1387-1392.
- [22] Wang Z Y, Kelly J M, Kovar J L. Depletion of macro-nutrients from rhizosphere soil solution by juvenile common cottonwood and switchgrass plants [J]. Plant Soil 2005, **270**: 213-221.
- [23] Olsen S R, Sommers L E. Phosphorus in methods of soil analysis [M]. Wisconsin Agronomy Monograph American Society of Agronomy and Soil Science Society of America 1982: 403-430
- [24] 王震宇, 温胜芳, 邢宝山, 等. 4种水生植物根际磷素耗竭效应的比较 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2475-2480.
- [25] 韩志萍, 王趁义. 不同生态型芦竹对 Cd Hg Pb Cu 的富集与分布 [J]. 生态环境, 2007, **16**(4): 1092-1097.
- [26] Kuo S. Concurrent sorption of phosphate and zinc, cadmium, or calcium by a hydrous ferric oxide [J]. Soil Sci Soc Am J 1986, **50**: 1412-1419.
- [27] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应 [J]. 应用生态学报, 2004, **15**(6): 1069-1073.
- [28] 刘文菊, 胡莹, 朱永官, 等. 磷饥饿诱导水稻根表铁膜形成机理初探 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(1): 22-27.
- [29] 范晓晖, 刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展 [J]. 土壤通报, 1992, **23**(5): 238-240.
- [30] 吕家珑, 张一平, 马爱生, 等. 石灰性土壤小麦根际 pH 及磷动态变化的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, **5**(1): 32-39.
- [31] Taylor G J, Crowder A A, Rodden R. Formation and morphology of an iron plaque on the roots of *Typha latifolia* L. grown in solution culture [J]. Am J of Bot 1984, **71**(5): 666-675.
- [32] Irving A M, Barbara A K, James A W. Factors controlling the formation of oxidized root channels: a review [J]. Wetlands 1995, **15**: 37-46.
- [33] Chen C C, Dixon J B, Tumer F T. Iron coatings of rice roots: morphology and models of development [J]. Soil Sci Soc Am J 1980, **44**: 1113-1119.
- [34] 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.
- [35] Morel C H, Insinger P. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase [J]. Plant Soil 1999, **211**: 103-110.
- [36] Johnson J F, Alkan D L, Vance C P. Phosphorus stress-induced proteoid roots show altered metabolism in *Lupinus albus* [J]. J Plant Physiol 1994, **104**: 657-665.
- [37] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献 [J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1720-1725.
- [38] 刘艳菊, 朱永官, 丁辉, 等. 水稻根表铁膜对水稻根吸收铅的影响 [J]. 环境化学, 2007, **26**(3): 327-330.