

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.11.013

阳路芳, 陈春秀, 田丽, 等. 外源铁对花叶冷水花根表铁膜及磷吸收的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(11): 165-174.

外源铁对花叶冷水花根表铁膜及磷吸收的影响

阳路芳¹, 陈春秀¹, 田丽¹, 邓仕槐², 胡文¹, 雷建容¹

1. 四川省农业科学院 农业资源与环境研究所/农业农村部西南山地农业环境重点实验室, 成都 610066;

2. 四川农业大学 资源学院, 成都 611130

摘要: 为探讨不同磷质量浓度处理下, 不同质量浓度 Fe^{2+} 对湿地植物根表铁膜形成及磷吸收的影响, 揭示湿地植物根表铁膜在净化磷污染水体中的作用, 以花叶冷水花为试材, 构建了基质外源铁 (Fe^{2+}) 质量浓度分别为 0, 500, 1 000 mg/kg 和污水 P 质量浓度分别为 0, 5, 10, 50, 100 mg/L 的模拟垂直流人工湿地系统, 在系统持续运行 6 周后, 分析各处理下花叶冷水花的株高、干质量、根表铁膜含量, 以及根系、地上部分和根表铁膜对磷的吸收量. 结果表明: 湿地植物根表铁膜的形成受基质中 Fe^{2+} 质量浓度和污水 P 质量浓度的共同影响, 当 P 质量浓度不高于 10 mg/L 时, 铁膜量随 Fe^{2+} 质量浓度增加呈先降低后升高趋势, 当 P 质量浓度不低于 50 mg/L 时, 铁膜量随 Fe^{2+} 质量浓度的增加而增加; 铁膜对磷的吸附量与基质中外源 Fe^{2+} 加入量和污水中 P 质量浓度有关, 当基质中无外源 Fe^{2+} 时, P 质量浓度增大会抑制花叶冷水花根表铁膜的形成, 同时降低铁膜对磷的吸附能力; 根表铁膜与花叶冷水花株高增长量呈显著正相关 ($r=0.713^{**}$, $p<0.01$), 与花叶冷水花地上部分磷吸收量和铁膜磷吸附量也具有显著正相关性, 相关系数分别为 0.386^{**}, 0.476^{**}. 研究表明: 在应用湿地植物花叶冷水花净化高磷污染水体时, 适当加入外源 Fe^{2+} 有利于根表铁膜的形成和花叶冷水花的生长, 并促进花叶冷水花地上部分对磷的吸收, 达到转移污水中磷的作用, 对磷污染水体的植物修复有着重要的意义.

关键词: 铁; 磷; 铁膜; 花叶冷水花; 磷吸收; 富营养化

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)11-0165-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Exogenous Fe Input on Root Iron Plaque Formation and P Absorption in *Pilea cadierei*

YANG Lufang¹, CHEN Chunxiu¹, TIAN Li¹,
DENG Shihuai², HU Wen¹, LEI Jianrong¹

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901400); 四川省财政自主创新专项(2022ZZCX015); 四川省农业科学院“1+9”揭榜挂帅科技攻关项目(1+9KJGG005).

作者简介: 阳路芳, 硕士, 助理研究员, 主要从事环境保护与资源利用研究.

通信作者: 雷建容, 助理研究员.

1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Agricultural Environment in Southwest Mountain Areas of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, China;
2. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: To explore the effects of different concentrations of Fe^{2+} on the formation of root surface iron plaque and phosphorus absorption of wetland plants under different phosphorus concentration treatments, and reveal the role of root surface iron film of wetland plants in purifying phosphorus polluted water bodies, based on a constructed wetland model system, this study systematically investigated the influence of iron plaque on phosphorus uptake and accumulation in a typical wetland plant *Pilea cadierei*. *P. cadierei* plants were treated with Fe^{2+} and P at a loading rate of 0, 500 and 1, 000 mg/kg soil, and 0, 5, 10, 50 and 100 mg/L, respectively in a simulated vertical flow wetland system. The plant height, dry mass, content of iron plaque on root surface, and the concentrations of phosphorus in the roots, shoots and iron plaque on the root surface were analyzed after six weeks of continuous operation. The results show that the formation of iron plaque on the root surface of wetland plants in the constructed wetland system was affected by both the content of iron in the substrate and the concentration of phosphorus in the waste water. When P was less than or equal to 10 mg/L, the amount of iron plaque decreased first and then increased with the increase of Fe^{2+} concentration. When P was greater than or equal to 50 mg/L, the amount of iron plaque increased with the increase of Fe^{2+} concentration. The adsorption capacity of iron plaque on phosphorus was related to the content of exogenous iron in the substrate and the concentration of phosphorus in wastewater. When there was no exogenous iron in the substrate, the increase in phosphorus concentration would inhibit the formation of iron plaque on the root surface of *P. cadierei*, and reduce the adsorption capacity of iron plaque on phosphorus. When exogenous iron was added to the system and the phosphorus concentration was greater than or equal to 50 mg/L, the phosphorus adsorption capacity of the root surface iron plaque increased with the increase of iron concentration. The root surface iron plaque was significantly positively correlated with the plant height growth of *P. cadierei* ($r=0.713^{**}$, $p<0.01$), and significantly positively correlated with the absorption of phosphorus by aboveground of the plant and iron plaque, with correlation coefficients of 0.386^{**} and 0.476^{**}, respectively. Our research shows that when using wetland plants such as *P. cadierei* to purify high phosphorus polluted water bodies, the appropriate addition of exogenous Fe^{2+} is beneficial for the formation of root surface iron plaque and the growth of *P. cadierei*. It also promotes the absorption of phosphorus by the aboveground parts of *P. cadierei*, achieving the function of transferring phosphorus from wastewater. This is of great significance for the phytoremediation of phosphorus polluted water bodies.

Key words: iron; phosphorus; iron plaque; *Pilea cadierei*; phosphorus absorption; eutrophication

磷是所有生物生长所需要的基本营养物质. 但由于化肥、含磷洗涤剂等的使用, 大量的生活污水、农业径流污水流入湖泊、河流及滨海地区, 在一定程度上引发了富营养化等环境污染问题^[1-2]. 植物在生长过程中能吸收大量的磷, 再经生理代谢转化为自身生长需要的有机物质, 而植物从污染水体中通过营养吸收, 使污染水体中的磷转移, 可降低污染水体的磷含量, 达到除污效果^[3], 因此可以利用湿地植物对磷的吸收积累来修复富营养化水体. 文献[4]报道了磷在芦苇(*Phragmites australis*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)和海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)3种湿地植物中的分配和积累. 文献[5]报道了不同湿地植

物对污水总氮、总磷的去除效能及迁移规律, 指出植物对氮、磷含量高的污水去除效果较好。

根表铁膜是植物根系氧化活动的结果, 它在湿地植物中普遍存在, 是湿地植物适应淹水环境而产生的一种防御机制。根表铁膜在植物利用营养元素和防御有害物质方面有着积极的意义^[6-8]。至今, 已发现多种湿地植物根表可形成铁膜^[9]。根表铁膜有着独特的结构特征, 是一种两性胶体, 具有特殊的电化学特性, 可以通过不同方式对土壤中各种成分进行吸附^[10], 其性质与自然界的铁氧化物相似^[11], 对土壤中的一些阴、阳离子有吸附作用, 也是湿地植物阻止重金属等污染物进入植物体内的重要屏障^[12]。

湿地植物根表铁膜对植物养分、重金属元素及其它非金属元素的富集与吸收已进行了大量的研究, 但其作用机制并不明确, 对于根表铁膜究竟是抑制还是促进了 P, Cu, Zn, Pb, Cd, As, Ni 等元素的吸收和运输, 目前仍是一个争议较大的话题^[13-14]。文献[15]等发现杉木幼苗的根表铁膜含量与根系和地上部磷素积累量均呈显著正相关; 文献[16]通过野外调查研究山梗菜时发现, 厚的铁膜降低了植株对 P 的吸收; 文献[17]通过研究 5 种湿地植株根表铁膜与植物吸收重金属的关系发现根表铁膜与植物体内的 Cd, Pb, As 呈极显著负相关关系。关于根表铁膜对湿地植物的生长发育的影响, 也存在不一致的观点。文献[18]研究发现, 根表覆有铁膜的灯芯草根系和地上部的生物量是无铁膜的 2~3 倍; 而文献[19]则发现, 宽叶香蒲(*Typha latifolia*)根系活力与其根表铁膜量呈显著负相关。

此外, 外加铁源对根表铁膜的形成和对元素吸收、运输的影响鲜见报道。鉴于此, 本研究以湿地植物花叶冷水花(*Pilea cadierei*)为研究对象, 采用模拟垂直流人工湿地系统, 研究了不同 P 质量浓度水平下外源铁对花叶冷水花根表铁膜形成的影响, 进一步分析了根表铁膜与花叶冷水花生长状况及根系、地上部分磷素吸收的关系, 旨在探明根表铁膜对湿地植物花叶冷水花在磷污水处理中的作用, 对受磷污染水体的植物修复有着重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

1.1.1 供试材料

花叶冷水花是荨麻科冷水花属多年生草本, 耐阴耐湿, 易于修剪, 对磷有较强富集能力^[20]。本试验所用试材购买于四川省雅安市大兴花卉市场, 试验前用静置 1 d 的自来水将购回的花叶冷水花根部冲洗干净, 然后用蒸馏水清洗, 自然风干 10 min 后称鲜质量, 测定株高, 并从中取样测定植物根系、地下部分初始磷含量、根表铁氧化物胶膜量。

1.1.2 试验装置与湿地基质

模拟垂直流人工湿地试验在高 14 cm、上口直径 20 cm、下口直径 16 cm 的塑料桶中进行, 桶底部布设水管。试验基质从下到上依次是 3 cm 厚(约 0.5 kg)的砾石层(直径 0.5~1.2 cm)和 7 cm 厚(约 1.5 kg)的河沙与土壤的混合层。砾石与河沙采自雅安青衣江, 土壤为紫色土, 取自四川农业大学教学科研园区, 土壤基本理化性质见表 1。河沙与土壤过 2 mm 筛后按 2:1 的比例混合, 为保证植株在生长过程中有充足的养分供应, 每千克沙土中加入 0.3 g 过磷酸钙、0.4 g 尿素和 0.3 g 氯化钾混匀。

表 1 供试土壤主要理化性质

pH	阳离子交换量/ 水:土=2.5:1 (cmol·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效铁/ (mg·kg ⁻¹)	质地 类型
5.78	26.40	42.3	2.62	0.959	10.543	5.71	重壤土

1.1.3 试验地概况

试验在四川农业大学环境学院光照培养室中进行, 培养室白天温度为 25℃, 晚上温度为 20℃, 光照时长分别为白天 14 h、晚上 10 h, 光照强度为 200~230 μmol/(m²·s), 湿度控制在 70%。

1.1.4 模拟含磷污水与外源铁的配制

模拟 P 污水：以 KH_2PO_4 为磷源配置 P 质量浓度分别为 0,5,10,50,100 mg/L 的模拟 P 污水，分别记为 $\text{P}_0, \text{P}_5, \text{P}_{10}, \text{P}_{50}, \text{P}_{100}$ 。

外源铁(Fe^{2+})：将用作基质的沙土分为 3 组，加入一定质量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 固体，充分混合，使基质沙土中 Fe^{2+} 的质量浓度分别为 0,500,1 000 mg/kg，分别记为 $\text{Fe}_0, \text{Fe}_{500}, \text{Fe}_{1\,000}$ 。

1.1.5 试验设计

将长势一致的花叶冷水花分别种植于 3 个 Fe^{2+} 质量浓度基质的试验桶中，每桶种 8 株，初始鲜质量约为 40 g。植株在自来水下稳定 15 d 后，分别用 0,5,10,50,100 mg/L 5 个 P 质量浓度梯度的模拟 P 污水进行处理，每次处理间隔 7 d(即水力停留时间以 7 d 计)。各质量浓度模拟 P 污水的加入量均为 0.8 L，系统水力负荷为 $0.04\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。本试验共持续 6 周，试验期间通过添加蒸馏水补充蒸发、蒸腾等所耗的水分，以保持试验桶中水位。

试验共 15 个处理： $\text{Fe}_0\text{P}_0, \text{Fe}_0\text{P}_5, \text{Fe}_0\text{P}_{10}, \text{Fe}_0\text{P}_{50}, \text{Fe}_0\text{P}_{100}, \text{Fe}_{500}\text{P}_0, \text{Fe}_{500}\text{P}_5, \text{Fe}_{500}\text{P}_{10}, \text{Fe}_{500}\text{P}_{50}, \text{Fe}_{500}\text{P}_{100}, \text{Fe}_{1\,000}\text{P}_0, \text{Fe}_{1\,000}\text{P}_5, \text{Fe}_{1\,000}\text{P}_{10}, \text{Fe}_{1\,000}\text{P}_{50}, \text{Fe}_{1\,000}\text{P}_{100}$ ，每个处理重复 4 次。同时设置无植物的纯基质模拟人工湿地系统，除无需种植植物外，其余处理方法与植物组人工湿地系统相同。

1.2 指标测定

1.2.1 植株生长量的测定

试验结束后，测定植物株高并将植物全株收获，用自来水冲洗干净，风干后称鲜质量，取总根量的 1/2 用于测定植物根表铁氧化物胶膜，余下的根系与植物地上部分于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min，再于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重后称量，记录根系和地上部分干质量。

1.2.2 根表铁氧化物胶膜量及胶膜磷吸附量的测定

采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(dithionite-citrate-bicarbonate, DCB)法提取根表铁膜^[21]，具体方法为：收获后的植物根系用去离子水冲洗干净后放入 250 mL 白色塑料瓶中，加入 0.3 mol/L 柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)40 mL，1 mol/L 碳酸氢钠(NaHCO_3)5 mL 及 5 g 连二亚硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)，浸提根表铁胶膜。然后在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ，280 r/min 的摇床上振荡 3 h，溶液过滤至 100 mL 容量瓶中定容。取出的根在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干，称干质量。用火焰原子吸收分光计(novAA300Analytik Jena AG)测定提取液中的铁，用钼锑抗比色法(722S 型分光光度计)测定提取液中的磷^[22]。

根表铁膜的计算采用 DCB 提取液中铁含量与 DCB 提取后根干质量之比，根表铁膜磷吸附量是 DCB 提取液中含磷量与 DCB 提取后根干质量之比^[23]，单位均为 g/kg 根干质量，简写为 g/kg。

1.2.3 植株根系和地上部分磷含量的测定

植物磷吸收量表示植物从湿地系统中带走的磷素量，是直接反映植物的净化潜力的重要指标。将烘干的植物根系和地上部分样品分别粉碎，过 0.25 mm 筛，采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$ 消煮—钒钼黄比色法(722S 型分光光度计)测定植株根系及地上部分磷含量^[22]。

1.3 数据处理与分析

所有数据均采用 SPSS，Excel 和 Origin 等软件进行统计分析。数值为平均值±标准误差。组间数据进行方差分析并用最小差值法(LSD)进行多重比较，* $p<0.05$ 表示差异显著，** $p<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同 P 质量浓度下外源铁对花叶冷水花根表铁膜形成的影响

植物根表铁膜是长期生长于渍水土壤条件下的植物适应淹水环境的结果，通过耐渍水特有的通气组

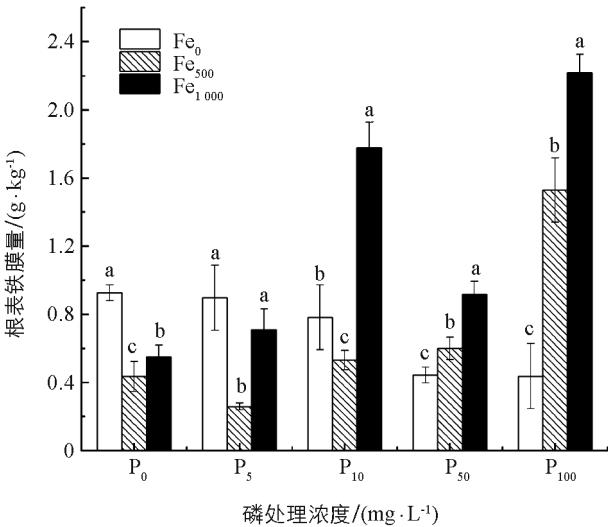
织, 将氧气输送到根系, 从而把 Fe^{2+} 氧化成铁的氧化物、氢氧化物胶膜。因此, 渍水土壤中铁膜的形成必须具备两个条件: ①局部的氧化条件; ②土壤中有一定的可溶性 Fe^{2+} 存在^[24]。本试验以 7 d 为一个换水周期, 使系统一直处于渍水状态。局部氧化状态主要通过植物根系氧化作用保持。 Fe^{2+} 来自于土壤以及外源 Fe^{2+} 。

由图 1 可知, 模拟人工湿地系统基质中外源 Fe^{2+} 的质量浓度对花叶冷水花根表铁膜形成量具有显著性影响。外源 Fe^{2+} 对根表铁膜形成的影响与 P 质量浓度有关: 当 P 质量浓度不超过 10 mg/L 时, 根表铁膜量随 Fe^{2+} 质量浓度增加呈先降低后升高趋势, 基质中外源 Fe^{2+} 为 500 mg/kg 时, 根表铁膜量显著低于不加 Fe^{2+} 和外加 1 000 mg/kg Fe^{2+} 处理的结果; 而当 P 质量浓度不低于 50 mg/L 时, 根表铁膜量随 Fe^{2+} 质量浓度的增加而增加, 尤其是在 P 质量浓度为 100 mg/L 时, 这种变化趋势表现得最为明显。说明在高质量浓度磷处理系统中, 外源 Fe^{2+} 能有效地促进花叶冷水花根表铁膜的形成。此外, 污水中 P 质量浓度对花叶冷水花根表铁膜形成的影响也与基质中 Fe^{2+} 质量浓度有关, 在未加 Fe^{2+} 时, 根表铁膜量随着 P 质量浓度的增加而降低, 在外加 Fe^{2+} 为 500 mg/kg 和 1 000 mg/kg 时, 根表铁膜量随 P 质量浓度的增大呈现整体上升趋势。许多报道认为缺磷能诱导根表铁膜的形成^[25-26], 而通过本试验发现, 磷对铁膜形成的影响与环境中铁离子浓度有关: 当 Fe^{2+} 质量浓度较低时, P 质量浓度增大会抑制根表铁膜的形成; 但外加一定量 Fe^{2+} 后, P 质量浓度的增大不再抑制根表铁膜的形成, 而是起到促进作用。本试验发现, 高铁高磷处理下 ($\text{Fe}_{1\,000}\text{P}_{100}$), 花叶冷水花根表铁膜形成量最大, 为 2.22 g/kg。

2.2 不同 P 质量浓度下外源 Fe^{2+} 对花叶冷水花生长状况的影响

由表 2 可知, 参试植物在有外源 Fe^{2+} 的模拟人工湿地系统中, 经不同质量浓度 P 污水持续处理 42 d 后, P 质量浓度水平对植物株高、鲜质量增长量以及根系和地上部干质量均具有显著影响, 而 Fe^{2+} 对地上部分干质量无显著影响。

从表 2 还可看出, 当模拟人工湿地基质中未加入外源 Fe^{2+} 时, 花叶冷水花株高增长量、根系及地上部干质量随污水 P 质量浓度的增加变化不明显, 而当基质中加入 500 mg/kg 和 1 000 mg/kg 外源 Fe^{2+} 时, 花叶冷水花株高增长量、根系及地上部干质量的较大值均出现在高磷处 (P 质量浓度不低于 50 mg/L), 说明在基质中加入一定量 Fe^{2+} 后, 高质量浓度磷污水并不抑制花叶冷水花生长, 反而起到促进作用, 这与有外源 Fe^{2+} 加入下, 磷可促进花叶冷水花根表铁膜的形成结论一致, 说明根表铁膜与植物生长可能存在一定相关性。本试验发现, 花叶冷水花地上部分干质量最大值出现在 $\text{Fe}_{500}\text{P}_{50}$ 处理下, 说明当外源 Fe^{2+} 质量浓度超过 500 mg/kg, P 处理质量浓度超过 50 mg/L 均会在不同程度上影响植株生长, 这可能是因为磷是蛋白质和核酸的主要必需元素, 根表铁膜可促进植物对磷的吸收^[27], 在植物可接受水平下, 高磷条件培养的植物抗性更强, 磷的大量吸收利于植物干物质的积累。但如果 P 质量浓度过高, 植物会因为无法吸收水分而萎蔫, 造成烧苗现象^[28]。



小写字母表示同一 P 水平下, Fe 处理间的差异显著性, $p < 0.05$, 下同。

图 1 不同 P 质量浓度下外加铁源对花叶冷水花根表铁膜形成的影响

表 2 不同磷水平及不同铁加入量对花叶冷水花生长的影响

Fe ²⁺ 质量浓度/ (mg·kg ⁻¹)	P 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	株高增长量/ cm	鲜质量增长量/ g	根系干质量/ g	地上部干质量/ g
处理前			1.50±0.13	3.50±0.21	
0	0	1.90±0.21d	2.49±0.26c	1.92±0.16bc	4.12±0.19c
	5	3.52±0.02a	2.49±0.19c	2.13±0.52b	3.90±0.66d
	10	2.39±0.13c	5.62±0.01b	2.36±0.45ab	4.23±0.49bc
	50	2.42±0.05bc	7.51±0.01a	1.89±0.05c	5.02±0.08a
	100	2.58±0.25b	7.16±0.06ab	2.59±0.26a	4.50±0.01b
500	0	1.29±0.13d	2.99±0.28c	2.18±0.40b	3.43±0.54d
	5	1.46±0.05d	2.93±0.04c	2.62±0.32a	3.95±0.36c
	10	1.80±0.11c	1.34±0.19d	1.60±0.44c	4.27±0.86b
	50	2.30±0.14b	4.52±0.08a	1.46±0.03c	5.27±0.86a
	100	3.33±0.28a	4.23±0.12b	2.67±0.14a	4.10±0.04c
1 000	0	0.69±0.06e	3.96±1.38c	2.18±0.16c	4.39±0.38bc
	5	1.18±0.04d	3.16±1.44d	2.66±0.33b	3.92±0.39c
	10	2.92±0.23c	5.96±1.23b	2.32±0.20bc	4.52±0.50b
	50	3.75±0.00b	14.74±1.51a	2.59±0.26b	5.10±0.13a
	100	4.46±0.12a	12.12±0.28a	3.09±0.06a	5.05±0.45a
双因素方差分析					
P		<i>p</i> <0.001	<i>p</i> <0.001	<i>p</i> =0.003	<i>p</i> =0.004
Fe		<i>p</i> <0.001	<i>p</i> <0.001	<i>p</i> =0.003	NS
P×Fe		<i>p</i> <0.001	<i>p</i> <0.001	NS(<i>p</i> =0.063)	NS

注：表中数据为平均值±标准差($X\pm SD$)，不同小写字母表示不同 P 质量浓度差异， $p<0.05$ 。

2.3 根表铁膜量与花叶冷水花生长状况的相关性分析

从表 3 可看出，根表铁膜量与参试植株高增长量的相关系数为 0.713**，呈显著正相关($p<0.01$)，但与鲜质量增长量、根系干质量、地上部干质量的相关系数分别为 0.423,0.482 和 0.263，相关性未达显著水平。表明花叶冷水花根表铁膜的形成有利于其纵向生长，但对于干质量积累影响不大，这可能是因为根表铁膜有利于植物地上部分磷素积累，促进植物茎秆生长，而与氮素营养吸收无明确相关性，对植物有机物的积累作用不显著。

表 3 根表铁膜量与株高增长量、鲜质量增长量、根系干质量和地上部分干质量的相关性分析

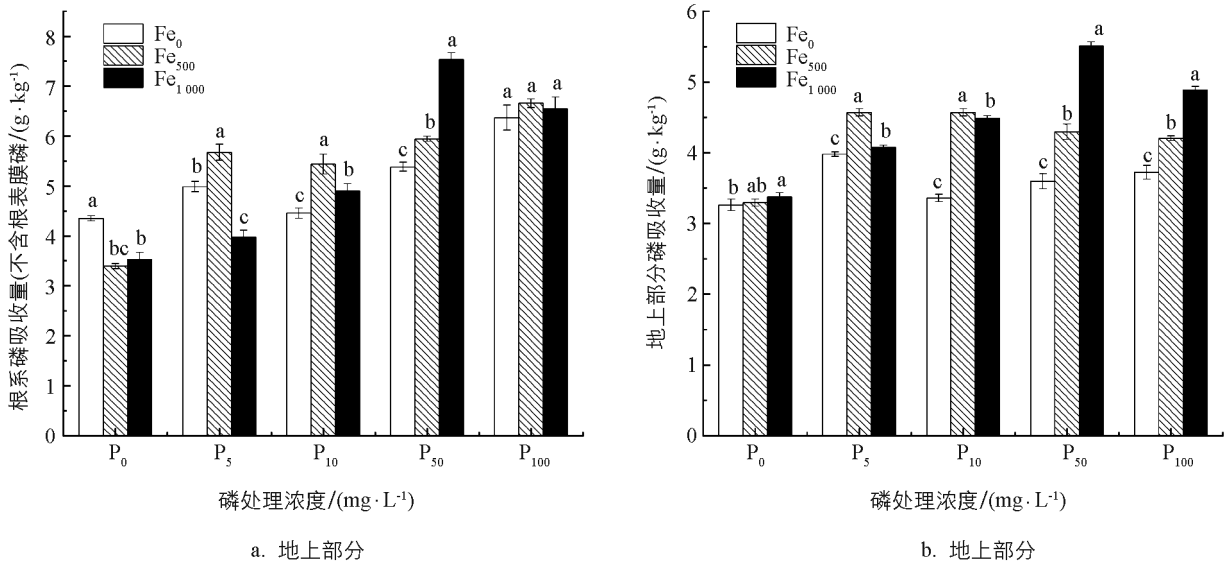
	根表铁膜	株高增长量	鲜质量增长量	根系干质量	地上部干质量
根表铁膜	1	0.713**	0.423	0.482	0.263
株高增长量		1	0.669**	0.386	0.482
鲜质量增长量			1	0.490	0.701**
根系干质量				1	-0.085
地上部分干质量					1

注：**表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著。

2.4 不同 P 质量浓度下外源 Fe^{2+} 对花叶冷水花磷吸收量的影响

2.4.1 不同 P 质量浓度下外源 Fe^{2+} 对花叶冷水花根系及地上部分磷吸收量的影响

由图 2 可知, 当污水 P 质量浓度为 0, 100 mg/L 时, 外源 Fe^{2+} 质量浓度水平对花叶冷水花根系磷吸收量(不含根表膜磷, 下同)的影响无显著差异; 当污水 P 质量浓度为 5, 10, 50 mg/L 时, 外源 Fe^{2+} 对根系磷吸收量的影响差异显著. 由此可见, P 质量浓度过低或过高, 向基质中加入外源 Fe^{2+} 对植物根系磷吸收量没有显著影响. 3 个外源 Fe^{2+} 质量浓度水平下, 花叶冷水花根系对磷的平均积累量分别为 (5.11 ± 0.12) g/kg, (5.42 ± 0.11) g/kg, (5.30 ± 0.15) g/kg, 三者差异不显著, 说明铁的加入对花叶冷水花根系磷的积累影响不大, 其原因可能是植物根系 P 主要与土壤 P 质量分数呈极显著正相关, 与其他元素相关性不明显^[29].



不同小写字母表示不同 Fe^{2+} 质量浓度差异.

图 2 花叶冷水花地上、地下部分磷吸收量

当污水 P 质量浓度为 0 mg/L 时, 外源 Fe^{2+} 质量浓度水平对花叶冷水花地上部分磷吸收量的影响无显著差异; 当污水 P 质量浓度为 5, 10, 50 和 100 mg/L 时, 外源 Fe^{2+} 质量浓度水平与花叶冷水花地上部分磷吸收量差异显著. 在 P 质量浓度不低于 50 mg/L 时, 花叶冷水花地上部分磷吸收量随着 Fe^{2+} 质量浓度的增加而增大, 即当植物生长于富磷条件下时, 外源铁可促进湿地植物地上部分对磷的吸收. 3 个外源 Fe^{2+} 质量浓度水平下, 花叶冷水花地上部分对磷的平均积累量分别为 (3.58 ± 0.07) g/kg, (4.19 ± 0.06) g/kg, (4.47 ± 0.05) g/kg, 三者差异显著, 说明铁的加入对花叶冷水花地上部分磷的积累具有显著性影响.

从图 2 还可看出, 在低 P 水平下, 外加 Fe^{2+} 质量浓度对花叶冷水花根系和地上部分磷吸收量无显著影响, 在 P 质量浓度为 5, 10 mg/L 时, 基质中加入 500 mg/kg Fe^{2+} 可显著提高花叶冷水花根系和地上部分磷吸收量, 在 P 质量浓度为 50 mg/L 时, 基质中加入 1 000 mg/kg Fe^{2+} 可使花叶冷水花根系和地上部分磷吸收量达到最大值, 说明花叶冷水花对磷的吸收量与 P 质量浓度和基质中 Fe^{2+} 含量有关, 这为提高花叶冷水花对含磷污水的净化效果提供了数据支撑.

2.4.2 不同 P 质量浓度下外源铁对花叶冷水花根表铁膜磷吸附量的影响

图 3 表示 0, 5, 10, 50, 100 mg/L 5 个 P 质量浓度处理下, 3 个不同外源 Fe^{2+} 质量浓度对花叶冷水花根表铁膜磷吸附量的影响. 由图 3 可知, 当基质中不加入 Fe^{2+} 时, 根表铁膜磷吸附量随污水 P 质量浓度的增加而降低, 说明在 Fe^{2+} 较低时, P 的加入会抑制植株根表铁膜对磷的吸附, 这与低 Fe^{2+} 质量

浓度下, P 的加入抑制根表铁膜的形成具有一致性; 当基质中加入 500 mg/kg Fe^{2+} 时, 根表铁膜磷吸附量随 P 质量浓度的增加呈先降低再升高的趋势; 在加入 1 000 mg/kg Fe^{2+} 时, 根表铁膜磷吸附量随 P 质量浓度的增加而增大, 在 $\text{Fe}_{1\,000}\text{P}_{100}$ 处理下, 根表铁膜磷吸附量达到最大值, 为 4.40 g/kg.

从图 3 还可看出, 在 P 质量浓度水平较低(分别为 0, 5, 10 mg/L)时, $\text{Fe}_{1\,000}$ 处理下根表铁膜磷吸附量始终低于 Fe_0 和 Fe_{500} ; 而在高 P 质量浓度下(分别为 50, 100 mg/L)时, 根表铁膜磷吸附量从高到低依次为 $\text{Fe}_{1\,000}$, Fe_{500} , Fe_0 . 这说明 Fe^{2+} 对根表铁膜磷吸附量的影响取决于环境中 P 的质量浓度, 当在低磷条件下, Fe^{2+} 的加入会抑制根表铁膜对磷的吸附, 而在高磷水平下, Fe^{2+} 的加入可促进根表铁膜对磷的吸附.

2.5 根表铁膜量与花叶冷水花磷吸收量的相关性分析

根表铁膜是铁氧化物在根系表面形成的一层氧化物胶膜, 具有与铁锰氧化物相似的电化学性质, 对土壤中某些阴阳离子具有富集作用, 在很大程度上影响着植物对养分元素的吸收. 许多研究表明, 根表铁膜在近根的区域能富集养分, 可以在介质中养分缺乏时被活化吸收^[30-31].

文献[32]研究指出, 铁胶膜中的磷是植物吸收磷的重要来源. 文献[33]的研究发现, 根表铁膜可以促进水稻对磷的吸收, 但这种促进作用的大小依赖于根表铁膜数量. 表 4 列出了根表铁膜量与花叶冷水花根系、地上部分以及铁膜磷吸附量的线性关系. 从表 4 可知, 根表铁膜量与参试植物根系磷吸收量无显著相关性, 而与植株地上部分磷吸收量和铁膜磷吸附量的相关系数分别为 0.386 **, 0.476 **, 呈显著正相关($p<0.01$), 说明花叶冷水花根表形成的铁膜可促进其地上部分和根表铁膜对磷的吸收, 这与文献[15, 33-34]等关于根表铁膜量与植物磷吸收的研究观点一致. 从表 4 还可看出, 花叶冷水花根表铁膜磷吸附量与根系磷吸收量呈显著负相关($r=-0.438$ **, $p<0.01$), 而与地上部分磷吸收量呈显著正相关($r=0.386$ **, $p<0.01$). 表明根表铁膜对磷的吸附作用可阻止磷在植物根系的大量积累, 抵御磷素过量对根系的伤害, 但并不影响植物地上部分对磷素的吸收, 可以认为根表铁膜充当了植物养分的暂时储存库, 对调节植物磷素平衡起着关键作用.

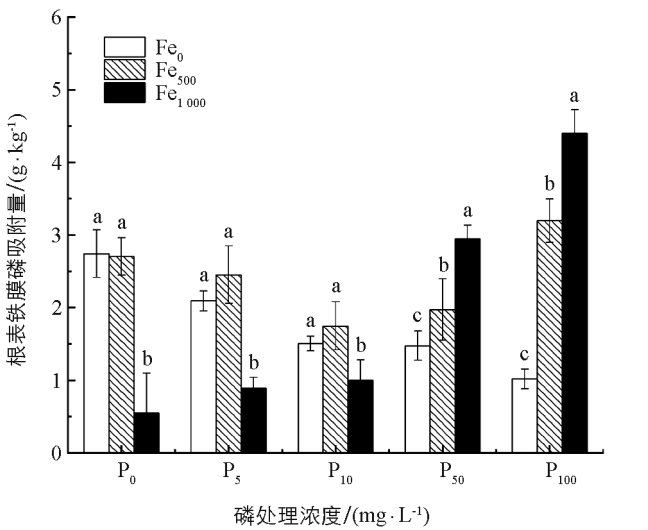
表 4 根表铁膜量与根系磷吸收量、地上部分磷吸收量和铁膜磷吸附量的相关性分析

	根表铁膜	根系磷吸收量 (不含根表膜磷)	地上部分磷吸收量	铁膜磷吸附量
根表铁膜	1	-0.119	0.386 **	0.476 **
根系磷吸收量(不含根表膜磷)		1	0.401 **	-0.438 **
地上部分磷吸收量			1	0.386 **
铁膜磷吸附量				1

注: * * 表示在 0.01 水平(双尾)上相关性显著.

3 结论

1) 在人工湿地系统中, 外源 Fe^{2+} 可促进湿地植物花叶冷水花根表铁膜的形成, Fe^{2+} 对根表铁膜形成



不同小写字母表示不同 Fe^{2+} 质量浓度差异.

图 3 花叶冷水花根表铁膜磷吸附量

的影响与系统中 P 的质量浓度有关, 当 P 质量浓度不超过 10 mg/L 时, 根表铁膜形成量随 Fe^{2+} 质量浓度增加呈先降低后升高趋势, 当 P 质量浓度不低于 50 mg/L 时, 根表铁膜量随 Fe^{2+} 质量浓度的增加而增加. 污水中磷的质量浓度对花叶冷水花根表铁膜形成的影响也与基质中 Fe^{2+} 质量浓度有关, 铁含量较高时, 高磷条件更利于根表铁膜的形成.

2) 外源 Fe^{2+} 可促进花叶冷水花地上部干质量积累, 在高铁高磷交互作用下, 植株根系、地上部分干质量显著高于其他处理, 但当基质中外源 Fe^{2+} 质量浓度超过 500 mg/kg, P 质量浓度超过 50 mg/L 时, 花叶冷水花生长受到影响.

3) 根表铁膜对磷的吸附量与基质中 Fe^{2+} 含量和污水中 P 的质量浓度有关. 当基质中无外源 Fe^{2+} 时, P 质量浓度增大会抑制花叶冷水花根表铁膜的形成, 降低铁膜对磷的吸附能力. 当系统中加入外源 Fe^{2+} , 且 P 质量浓度 ≥ 50 mg/L 时, 根表铁膜磷吸附量随铁质量浓度的增加而增大, 本试验在 $\text{Fe}_{1\ 000}\text{P}_{100}$ 处理下, 根表铁膜磷吸附量达最大值, 为 4.40 g/kg.

4) 根表铁膜与花叶冷水花株高增长量呈显著正相关($r=0.713^{**}$, $p<0.01$), 可促进其纵向生长, 但与鲜质量增长量、根系干质量和地上部干质量的相关性不显著. 此外, 铁膜与花叶冷水花地上部分磷吸收量、铁膜磷吸附量也呈显著正相关, 相关系数分别为 0.386 ** , 0.476 ** ($p<0.01$).

因此, 在应用湿地植物花叶冷水花净化高磷污染水体, 适当加入外源 Fe^{2+} 有利于花叶冷水花的生长, 促进其地上部分对磷的吸收, 从而转移污水中的磷, 达到净化磷污染水体的作用, 对治理磷的面源污染及修复严重富营养化水体具有重要意义.

参考文献:

[1] 朱文玲, 崔理华, 朱夕珍, 等. 人工湿地系统中磷净化影响因素研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6C): 164-171.

[2] 李清藐, 李天阳, 何丙辉, 等. 不同农作措施下紫色土坡耕地氮磷流失特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 46-54.

[3] 胡绵好, 袁菊红, 张玲, 等. 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1740-1749.

[4] QUAN W M, HAN J D, SHEN A L, et al. Uptake and Distribution of N, P and Heavy Metals in Three Dominant Salt Marsh Macrophytes from Yangtze River Estuary, China [J]. Marine Environmental Research, 2007, 64(1): 21-37.

[5] 庞庆庄, 郭建超, 魏超, 等. 4 种湿地植物对污水中氮磷的去除效能及其迁移规律 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 68-73.

[6] 肖德顺, 徐冉, 王丹英, 等. 根表铁膜对水稻磷素吸收影响研究进展 [J]. 中国稻米, 2022, 28(4): 1-5.

[7] 俞佳, 黄颖, 张晋龙, 等. 砷胁迫下外源磷对香蒲根表铁膜形成及吸附砷的影响 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 866-873.

[8] 冯岚, 严岩, 韩建刚. 根表铁膜对风眼莲吸收环丙沙星的影响 [J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 326-333.

[9] 刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 等. 湿地植物根表铁膜研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2470-2480.

[10] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 根表铁膜对水稻铅吸收转运的影响 [J]. 生态毒理学报, 2014, 9(1): 35-41.

[11] 王亚洁, 朱永官, 孙国新, 等. 铁还原菌 *Shewanella oneidensis* MR-1 对根表铁膜中砷运移的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2240-2246.

[12] ZIMMER D, KRUSE J, BAUM C, et al. Spatial Distribution of Arsenic and Heavy Metals in Willow Roots from a Contaminated Floodplain Soil Measured by X-Ray Fluorescence Spectroscopy [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 4094-4100.

[13] WU J T, HUANG R, ZHOU Q Q, et al. Magnetic Biochar Reduces Phosphorus Uptake by *Phragmites australis* dur-

- ing Heavy Metal Remediation [J]. Science of the Total Environment, 2021, 758: 143643.
- [14] 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 等. 根表铁膜在人工湿地磷去除中的作用及基质的影响 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1292-1297.
- [15] 郭昊澜, 赵子豪, 连晓倩, 等. 供磷水平对杉木根表铁膜含量及幼苗生长的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(6): 760-766.
- [16] CHRISTENSEN K K, WIGAND C. Formation of Root Plaques and Their Influence on Tissue Phosphorus Content in *Lobelia dortmanna* [J]. Aquatic Botany, 1998, 61(2): 111-122.
- [17] 李莹, 张洲, 杨高明, 等. 湿地植物根系泌氧能力和根表铁膜与根系吸收重金属的关系 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1657-1666.
- [18] CHABBI A. *Juncus bulbosus* as a Pioneer Species in Acidic Lignite Mining Lakes: Interactions, Mechanism and Survival Strategies [J]. New Phytologist, 1999, 144(1): 133-142.
- [19] 钟顺清. 根表铁膜对 2 种景观湿地植物根系发育及活力的影响 [J]. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 74-79.
- [20] 戴文颖, 李廷轩. 矿山生态型和非矿山生态型粗齿冷水花富磷能力的比较 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1719-1726.
- [21] TAYLOR G J, CROWDER A A. Use of the DCB Technique for Extraction of Hydrous Iron Oxides from Roots of Wetland Plants [J]. American Journal of Botany, 1983, 70(8): 1254.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [23] COLMER T D. Long-Distance Transport of Gases in Plants: A Perspective on Internal Aeration and Radial Oxygen Loss from Roots [J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(1): 17-36.
- [24] 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.
- [25] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [26] ZHAO Q L. The Mechanisms of Iron Plaque Formation on the Surface of Rice Roots Induced by Phosphorus Starvation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 22-27.
- [27] 王震宇, 刘利华, 温胜芳, 等. 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 [J]. 环境科学, 2010, 31(3): 781-786.
- [28] 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.
- [29] 谭雪, 李留彬, 向国伟, 等. 三峡库区消落带落羽杉细根碳氮磷化学计量特征及其与土壤养分的关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 14-23.
- [30] OTTEM L, ROZEMA J, KOSTER L, et al. Iron Plaque on Roots of *Aster tripolium* L.: Interaction with Zinc Uptake [J]. New Phytologist, 1989, 111(2): 309-317.
- [31] ST-CYR L, CROWDER A A. Iron Oxide Deposits on the Roots of *Phragmites australis* related to the Iron Bound to Carbonates in the Soil [J]. Journal of Plant Nutrition, 1988, 11(6-11): 1253-1261.
- [32] GREIPSSON S, CROWDER A A. Amelioration of Copper and Nickel Toxicity by Iron Plaque on Roots of Rice (*Oryza sativa*) [J]. Canadian Journal of Botany, 1992, 70(4): 824-830.
- [33] 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 (4): 295-299.
- [34] 钟顺清. 湿地植物根表铁膜对磷的响应及其对磷的利用 [J]. 广东农业科学, 2012, 39(21): 70-73.