

# 湿地植物根表铁膜形成及其对磷吸收的影响研究进展

程冰冰, 李典宝

(广州普邦园林股份有限公司, 广东 广州 510600)

**摘要:**湿地植物根表铁膜对磷的有效吸收对控制水体富营养化具有重要影响,但其机理目前尚不明确,针对此问题,分析了湿地植物根表铁膜形成的因素及其对湿地植物磷吸收的影响,认为根表铁膜对湿地植物磷吸收的影响主要取决于磷浓度、铁膜的厚度等因素。在明确湿地植物根表铁膜对磷的吸收机理后,建议采用人工方法调节外部条件控制铁膜的形成,促进湿地植物对磷的吸收转化,降低水体富营养化水平。

**关键词:**湿地植物;铁膜;磷吸收

**中图分类号:**Q948

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2017)S1-0113-04

随着社会和经济的快速发展,工业化和城市化进程也在快速推进,面临的环境污染问题也越来越严峻。近年来,利用人工湿地处理污水的研究因其成本低廉、效果明显、能美化环境而日益受到重视。湿地植物在净化污水中的作用近年来越来越受关注,湿地植物与湿地环境中的物理化学作用共同影响湿地对污染物的降解过程<sup>[1]</sup>,湿地植物通过影响污染物的化学属性,使污染物对环境的毒性降低或被消除<sup>[2]</sup>。湿地植物长期生长在浸水环境下(淹水或半淹水),在进化过程中产生了一系列适应浸水环境的特征<sup>[3]</sup>,厌氧环境也容易导致Fe、Mn以还原态存在,植物根系通过通气组织向根区输送氧气使得根际微环境处于相对氧化的状态,还原性的Fe、Mn被氧化,在根表形成红棕色的铁锰氧化物胶膜,被称为铁膜<sup>[4]</sup>。湿地植物根表的铁膜类似于胶体,带有具有正负电荷基团,同时具有较大的比表面积,通过吸附和共沉淀等作用吸附氮磷等营养类物质以及重金属类污染物质,对湿地植物根系吸收养分和污染物起着重要的影响。许多研究都表明,植物根表铁膜的形成对湿地植物削减污染物有着很大的影响<sup>[5-13]</sup>。

磷是植物的必需营养元素,也是引起水体富营养化的关键元素之一。促进湿地植物对磷的有效利用是控制水体富营养化的重要途径之一。提高湿地植物对磷的去除能力可以通过人工模拟铁膜形成的

条件进行诱导,在植物根表负载一层铁膜,改变根表特征,类似于某些水处理滤料的改性。因此,研究湿地植物根表铁膜对植物磷吸收的影响具有重要意义。但目前对其机理的研究尚无统一的结论。本研究介绍近年来国内外对植物根表铁膜的形成及其对磷吸收的研究进展,以期对日后进一步研究提供参考。

## 1 湿地植物根表铁膜的形成

### 1.1 铁膜形成的条件及沉积部位

湿地植物为了适应渍水环境,在进化过程中其根系和地上部分均形成发达的通气组织,空气中的氧通过叶片传输到根系,其根部通过径向渗氧讲氧气和其他的氧化物物质释放到根际,使根际形成相对的氧化环境。渍水的介质环境中存在的还原性Fe、Mn被氧化,通过这种连续的氧化作用,在植物根表沉积生成红棕色的铁锰氧化物胶膜,称之为铁膜<sup>[2-3,14-15]</sup>。湿地植物根表形成铁膜具有普遍性,如挺水植物、沉水植物、木本植物、浮水植物、沼泽植物等都有形成铁膜的能力<sup>[16]</sup>。

铁膜在根表开始沉积的部位一般在距离根尖1 cm的位置,伸长区、根毛区及靠近基部的部位是沉积铁膜较多的部位,新生成的根毛和幼嫩的主根根尖上沉积的铁膜较少<sup>[14-15]</sup>。不同植物种类其根系的氧化能力也有所不同,铁膜在植物根表沉积的部

基金项目:广州市越秀区科技创新和产业化专项(2017-GX-022)

作者简介:程冰冰(1990—),男,硕士,主要从事水环境治理及生态修复技术研究。E-mail:291900078@qq.com

位因植物的种类而呈现不同的沉积形式。研究发现芦苇的根表铁膜是不均匀地沉积在细胞外,没有渗透到组织细胞内部<sup>[2]</sup>;但香蒲根表铁膜却可以渗透到根系外皮层内约3层细胞厚度的部位<sup>[16]</sup>;球状灯芯草根表铁膜多分布在周皮、外皮层和内皮层,而在皮层和薄壁组织铁膜分布较少<sup>[17-19]</sup>。

## 1.2 铁膜形成的影响因素

湿地植物根表铁膜的形成必须具备两个条件,一是植物根际处于局部氧化环境,二是大量充足的Fe、Mn元素<sup>[20]</sup>。影响铁膜形态和数量的因素有很多,包括有温度、pH、CO<sub>2</sub>、土壤通透性以及土壤中的Fe、Mn、Al浓度等。介质中Fe浓度和根系的氧化能力是影响铁膜形成的主要因素,目前的研究主要也是针对这两方面进行研究<sup>[21]</sup>。

### 1.2.1 Fe<sup>2+</sup>浓度

Fe、Mn是土壤中浓度较高的元素,由于形成铁膜所需要的氧化还原电位比锰膜低,所以铁膜的沉积量一般高于锰膜,介质环境中的Fe<sup>2+</sup>浓度是影响根表铁膜形成的重要因素之一。湿地植物根系能释放氧气和一些氧化物,使植物根际的氧化还原电位增加并呈氧化状态,向基质中加入Fe<sup>2+</sup>后,使还原态的Fe<sup>2+</sup>向植物根际迁移,在植物根表发生氧化还原反应,Fe<sup>2+</sup>被氧化形成铁膜,导致植物根表铁膜含量增加<sup>[22]</sup>。Batly等<sup>[17]</sup>在水稻根表铁膜的研究中也发现水稻根表铁膜的量随着植物生长基质中铁的浓度增加而增加,具有明显的正相关性;香蒲根表铁膜的量随培养液中Fe<sup>2+</sup>浓度增加呈非线性增加趋势<sup>[15]</sup>;对灯芯草的研究也表明,向土壤中加入铁能增加湿地植物根表铁膜的含量<sup>[23]</sup>;对植物进行添加FeCl<sub>3</sub>和FeCl<sub>2</sub>对比处理,发现FeCl<sub>2</sub>能提高根系抗氧化活性,增加水稻根表铁膜的量<sup>[24]</sup>。

### 1.2.2 根系的氧化能力

铁膜形成的最主要的生物因素之一就是植物根系的氧化能力。不同种类湿地植物生长机制不同,其根系分泌氧和氧化物质的能力也有所不同,根系的氧化性物质包括根系氧化酶、根系分泌氧化性物质、氧气和根际氧化性微生物<sup>[25]</sup>。通气组织结构越发达,植物根际释放氧的量越大,根系通气组织和根表铁膜的量呈正相关的趋势<sup>[26]</sup>。

研究发现,根系释放氧能力不同使根系氧化力不同,根系氧化力强的植物其根表形成的铁膜量较多<sup>[27]</sup>。灯芯草根表铁膜含量分别是茭白和美人蕉的2.93和10.58倍<sup>[22]</sup>。不同基因型水稻之间根系氧化能力的差异可能会导致根表铁氧化物胶膜沉积量的差异<sup>[28]</sup>,通气组织结构好的扬稻6号比农垦57号形成的铁膜多,根系空隙率和根际释放氧的量的

不同使得14个水稻品种间根表铁膜的量相差达2.6倍<sup>[29-30]</sup>。根系的比表面积越大的植物有更多的氧化还原附着位点能形成更多的铁膜,通过研究发现菹草根细且多,表面积大,其根系形成的铁膜比伊乐藻多<sup>[31]</sup>。

## 2 根表铁膜对湿地植物磷吸收的影响

湿地植物根表铁膜是一种具有吸附作用的两性胶体,对介质中的营养元素磷具有富集作用,影响植物对磷的吸收。目前关于根表铁膜对磷吸收的影响主要有两种观点:一种观点认为根表铁膜具有很强的吸附性,对磷具有吸附后固定铁膜内,因而抑制植物对磷的吸收;另一观点认为铁膜并不沉积在吸收磷的主要区域,而且铁膜的存在是一个动态平衡的过程,因此根表铁膜不会阻碍植物对磷的吸收<sup>[25]</sup>。

造成根表铁膜抑制植物对磷吸收的原因可能是由于铁膜中铁氧化物对磷具有很强的亲和力,其吸附的磷增多,从而降低了根际磷的有效性,并导致植物可利用的磷减少<sup>[32]</sup>。有研究认为铁膜抑制植物吸收磷是在磷浓度低的条件下才发生,由于铁氧化物对磷酸根一般为专性吸附,易形成P-Fe配合物,当介质中磷酸盐浓度较高时,铁氧化物与磷酸盐形成单核配合物,易于解吸附,在磷酸盐离子浓度较低时,却形成双核配合物,吸附较紧密,难以解吸附,从而抑制植物对磷的吸收<sup>[33]</sup>。也有研究发现,根表覆有铁膜的芦苇根中磷质量比为7.9 g/kg(干根),低于无铁膜芦苇根中的10.7 g/kg(干根),但地上部磷质量比达4.3 g/kg(干根),高于无铁膜的3.5 g/kg(干根),而且也满足植物正常生长所需要的磷质量比(3.1 g/kg(干根)),说明尽管磷被固定在根表铁膜上,但并不减少地上部分的磷浓度,也不会因此而影响植株的正常生长。

然而也有研究发现,植物根表铁膜是植物的“磷库”,铁膜对土壤中的磷酸根离子具有较强的吸附能力,当介质中磷缺乏时又可被植物活化吸收,根表覆有铁膜的苔草和香蒲植物体内磷浓度要比无铁膜的高<sup>[14]</sup>。高浓度的铁和磷能促进冷水花植物对磷的吸收<sup>[13]</sup>。

另外还有研究认为,铁膜对磷的富集作用与铁膜的量有关。通过野外调查研究山梗菜时发现,当铁膜的浓度大于30 μmol/g时,植株中磷的浓度降低,但是铁膜浓度小于30 μmol/g时,植株中的磷的浓度与沉积物中植物可利用磷的浓度呈显著正相关,表明厚的铁膜降低了磷的吸收<sup>[34]</sup>。对水稻根表铁膜的研究也发现,水稻根表沉积的铁氧化物胶膜对介质中的磷酸根离子有明显的富集作用,而且对

水稻吸收磷有明显的影响,铁膜的量决定着植物对铁膜上所吸附的磷吸收量的多少。当铁膜的质量比在 24 570 mg/kg 范围内,随着铁膜量的增加,范围内时,随着铁膜量的增加,磷的吸收呈增加趋势,而当铁膜的质量比为 28 260 mg/kg 时,植物体内磷的浓度反而下降。如果铁膜太薄(或无铁膜时),吸附位点少,就只能富集少量的磷,磷的吸收量不高;而当铁膜太厚时,虽然吸附了较多的磷,但由于磷大多处于铁膜外层,磷要进入根系有较多的困难,故而吸收量仍然不高;只有铁膜厚度适中时,被铁膜吸附的磷数量也较多,进入根系也较容易,因此水稻吸收的磷量达到最大值<sup>[28]</sup>。钟顺清<sup>[35]</sup>也有类似发现,在溶液培养实验中,宽叶香蒲根表铁膜量较低的处理时,其地上部磷浓度高于对照,而当铁膜的质量比较大时,其地上部磷的浓度反而低于对照,说明铁膜量较少时促进了植株对磷的利用,铁膜量超出一定值后反而抑制磷的利用。且铁膜量与根表铁膜对磷的吸附受植物种类及其对铁的忍耐性和外界磷的浓度影响,在低磷和高磷两个水平下,宽叶香蒲根表铁膜对磷的吸附量与根表铁膜量存在较好的线性相关,其相关系数分别为 0.776 和 0.861;而黄菖蒲根表吸附磷与根表铁膜量的相关系数分别为 0.659 和 0.655,其相关性并未达到显著水平。

### 3 展 望

根表铁膜作为营养物质进入植物体内的门户,研究其机理及调控机制具有重要的生态环境意义。目前,国内外学者对植物根表铁膜的研究对象主要集中于水稻,取得了许多成果,但对湿地植物根表铁膜研究尚少。应用铁膜型湿地植物防治富营养化水体是未来可选择的生态措施,根表铁膜对湿地植物磷吸收的影响主要取决于磷浓度、铁膜的厚度、植物种类等因素,可根据介质环境的基础条件,采用人工方法调节外部条件控制铁膜的形成,促进湿地植物对磷的吸收转化,削减污染水体中磷元素,降低富营养化水体爆发的概率。对于今后在湿地植物根表铁膜的应用研究,有以下几个方面需要注意:

**a.** 介质中磷浓度的影响。介质中磷酸盐离子浓度对植物吸收磷具有重要影响,界定铁膜抑制或是促进植物吸收磷的浓度范围有待研究。

**b.** 铁膜的量。磷的富集作用与铁膜的量存在关系,包括铁膜的厚度、质量、数量、老化程度与湿地植物吸收磷的定量关系需要进一步系统的理论研究。

**c.** 植物的因素。筛选对铁具有耐受性,促进植物吸收磷具有优势的湿地植物种类的研究较少,对

应用优势种类的铁膜型湿地植物控制富营养化水体需要进一步研究。

### 参考文献:

- [ 1 ] ARMSTRONG J, ARMSTRONG W, BECKETT PM. Phragmites australis: ventur-i and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation[J]. *New Phytologist*, 1992,120: 197-207.
- [ 2 ] COLMER, T. D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(1):17-36.
- [ 3 ] SHIMAMURA S,MOCHIZULI T,NADA Y,et al. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2):351-359.
- [ 4 ] SHIBA H, DAIMON H. Histological observation of secondary aerenchyma formed immediately after flooding in *Sesbania cannabina*, and *S. rostrata*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(1):209-215.
- [ 5 ] CAI M Z, ZHANG S N, XING C H, et al. Interaction between iron plaque and root border cells ameliorates aluminum toxicity of oryza sativa, differing in aluminum tolerance[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2):155-167.
- [ 6 ] GREIPSSON S, CROWDER A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of. [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1992, 70(4):824-830.
- [ 7 ] HUANG H, ZHU Y, CHEN Z, et al. Arsenic mobilization and speciation during iron plaque decomposition in a paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(3):402-410.
- [ 8 ] ZHONG Shunqing, WU Yuping, XU Jianming. Phosphorus utilization and microbial community in response to lead/iron addition to a waterlogged soil[J]. *Journal of Environmental Sciences China*,2009, 21(10): 1415-1423.
- [ 9 ] 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):94-100.
- [ 10 ] JIANG F Y, CHEN X, LUO A C. Iron plaque formation on wetland plants and its influence on phosphorus, calcium and metal uptake [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, 43(4):879-890.
- [ 11 ] PI N, TAM N F, WONG M H. Formation of iron plaque on mangrove roots receiving wastewater and its role in immobilization of wastewater-borne pollutants [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63(12):402.
- [ 12 ] SIQUEIRASILVA A I, DA S L, AZEVEDO A A, et al.

- Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of restinga subjected to excess iron[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 78(2):265.
- [13] YANG L, LI Y, YANG X, et al. Effects of iron plaque on phosphorus uptake by *Pilea cadieri* cultured in constructed wetland[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11(1):1508-1512.
- [14] CHEN C C, DXION J, TURNER F. Iron coatings on rice roots: morphology and models of development[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 1113-1119.
- [15] 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]. *American Journal of Botany*, 1984, 71(5):666-675.
- [16] 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.
- [17] BATTY L C, BAKER A J M, WHEELER B D. Aluminium and phosphate uptake by *Phragmites australis*: the role of Fe, Mn and Al root plaques[J]. *Ann Bot*, 2002, 89(4): 443-449.
- [18] CHABBI A. *Juncus bulbosus* as a pioneer species in acidic lignite mining lakes: interactions, mechanism and survival strategies. [J]. *New Phytologist*, 2010, 144(1):133-142.
- [19] WANG T, PEVERLY J H. Iron oxidation states on root surfaces of a wetland plant (*Phragmites australis*) [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 247-252.
- [20] 刘文菊,朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 358-363.
- [21] 徐德福. 富营养化水体人工湿地生态修复机理及应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [22] XU D, XU J M, HE Y, et al. Effect of iron plaque formation on phosphorus accumulation and availability in the rhizosphere of wetland plants[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, 200(1/2/3/4):79-87.
- [23] 史锬,张福锁,刘学军,等. 不同栽培方式对籼粳稻根表铁膜和根铁镉含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8):1273-1277.
- [24] 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.
- [25] 姚海兴,叶志鸿. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2374-2380.
- [26] 孟冬梅,朱永官,周建国. 水稻根系通气组织与根表铁膜关系的研究[J]. *现代农业科学*, 2008, 15(4): 55-58.
- [27] WU C, YE Z, LI H, et al. Do radial oxygen loss and external aeration affect iron plaque formation and arsenic accumulation and speciation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(8):2961.
- [28] ZHANG X, ZHANG F, MAO D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza Sativa, L.*): phosphorus uptake[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209(2):187-192.
- [29] 刘敏超,李花粉,夏立江,等. 不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(5): 592-596.
- [30] 杨婧,胡莹,王新军,等. 两种通气组织不同的水稻品种根表铁膜的形成及砷吸收积累的差异[J]. *生态独立学报*, 2009, 4(5): 711-717.
- [31] UPFER M, DOLLAN A. Immobilization of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 509(1/2/3):635-640.
- [32] 曾祥忠,吕世华,刘文菊,等. 根表铁-锰氧化物胶膜对水稻铁锰和磷锌营养的影响[J]. *西南农业学报*, 2001, 14(4): 34-38.
- [33] CROWDER A A, SY-CYR L. Iron oxide plaques on wetland roots[J]. *Trends in Soil Science*, 1991, 1: 315-329.
- [34] 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.
- [35] 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.
- (收稿日期:2017-11-30 编辑:王芳)
- +++++
- (上接第112页)
- [10] 靳颜宁,李夕兵,刘彭金,等. 基于改进的未确知聚类模型的岩爆倾向性预测[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(1):12-16.
- [11] 沈俊源,吴凤平,于倩雯. 基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2):92-97.
- [12] 邢永健,王旭,杜航. 集对分析在区域大气环境风险评估中的应用研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 634-640.
- [13] 王栋,梁忠民,常文娟,等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1):35-40.
- [14] 刘畅,冯宝平,张展羽,等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明评价模型[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16):1-7.
- [15] 高彩玲,田采霞,麻冰涓. 基于熵权法的焦作市城市生态系统健康动态评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3):197-202.
- [16] 张蓉珍,范华. 2000—2011年西安市水环境演变与社会经济发展关系的量化分析[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5):67-71.
- (收稿日期:2017-12-10 编辑:王芳)