

电解耦合生物支架人工湿地中植物根表铁膜形成及其净水作用的研究

汪子琛, 杨云天, 徐润灵, 王霞, 李佳丽, 高一瑄, 赵斌*

玉溪师范学院, 化学生物与环境学院, 云南 玉溪

收稿日期: 2021年11月17日; 录用日期: 2021年12月21日; 发布日期: 2021年12月28日

摘要

为研究电解耦合生物支架人工湿地中根表铁膜的含量, 以及根表铁膜与铁元素之间的相关关系, 采集人工湿地装置中风车草的嫩根测定根表铁膜的含量, 采集人工湿地装置中水样测定铁的存在形式及含量。研究表明, 介质中物质的吸收及其在植物体内的转运受根表铁膜的影响, 它可以促进或抑制根系对某些金属元素, 如: 铜、锌、镉的吸收。此外, 研究者发现亚铁的增加会促进根表铁膜的形成。

关键词

根表铁膜, 人工湿地, 湿地植物

Study on the Formation of Iron Film on Plant Root Surface and Its Water Purification Effect in Electrolytic Coupled Biological Scaffold Constructed Wetland

Zichen Wang, Yuntian Yang, Runling Xu, Xia Wang, Jiali Li, Yiyu Gao, Bin Zhao*

College of Chemistry, Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Received: Nov. 17th, 2021; accepted: Dec. 21st, 2021; published: Dec. 28th, 2021

Abstract

In order to study the content of root surface iron membrane and the correlation between root
*通讯作者。

文章引用: 汪子琛, 杨云天, 徐润灵, 王霞, 李佳丽, 高一瑄, 赵斌. 电解耦合生物支架人工湿地中植物根表铁膜形成及其净水作用的研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1230-1237. DOI: 10.12677/aep.2021.116148

surface iron membrane and iron element in the electrolysis coupled biological scaffold constructed wetland, the young roots of windmill grass in the constructed wetland device were collected to determine the content of root surface iron membrane, and water samples in the constructed wetland device were collected to determine the form and content of iron. Studies have shown that the absorption of substances in the medium and its transport in plants are affected by the iron membrane on the root surface, which can promote or inhibit the absorption of some metal elements, such as copper, zinc and cadmium, by the root system. In addition, the researchers found that the increase of ferrous iron promoted the formation of an iron membrane on the root surface.

Keywords

Iron Film on Root Surface, Constructed Wetland, Wetland Plant

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工湿地通常是指一种由人工建造以及人为控制运行的湿地系统，其应用植物-微生物-基质系统的物理、化学、生物协同作用来实现对污水的高效净化[1]。陈琳[2]在人工湿地在废水处理中的应用前景研究中表明利用人工湿地进行废水处理是目前废水处理方向研究的重点。薛彦茵[3]和易礼陵[4]分别进行了人工湿地对农村和小城镇生活污水的处理实验研究，表明人工湿地也适于对分散面广、收集困难、治理难度大的村镇生活污水的处理。由于人工湿地通过填料、植物和微生物的协同作用去除污水中氮磷等污染物[5]，与其他污水处理方式相比人工湿地污水处理系统具有投资少、运行成本低、处理效果好等优点[6]。然而，不同的湿地植物因根际的氧化还原条件不一样而对人工湿地净水作用有不同的影响，人工湿地植物根际氧化还原电位因不同植物、一天中不同的时间有较大差异[7]。根际氧化还原条件的变化对植物根表铁膜的形成有影响，罗敏等[8]的研究也表明根际活动是影响湿地植物根际铁异化还原速率的关键因素之一。本文就电解耦合生物支架人工湿地中水生植物根表铁膜的含量及其对湿地植物的影响和低污染水的处理效率进行研究。

2. 实验材料和方法

2.1. 电解耦合生物支架人工湿地

本实验中的电解耦合生物支架人工湿地是一个由蠕动泵通过水管与高位水箱连接，净水箱模块通过水管与蠕动泵相连，穿孔铁电极板与0~36 V可调直流电源通过钛导线连接植入电解耦合生物支架人工湿地的系统装置，装置进水为模拟入湖低污染水，采用葡萄糖，氯化铵，磷酸二氢钾等配制。如图1、图2所示，在该装置中种植风车草作为净水植物，并采用装置中风车草的嫩根和水样进行研究。该研究中所用人工湿地装置具有无需添加填料的特点，它运用电化学法，且能量消耗低、处理效率也高，在低温、低碳氮比等极端条件下也可以正常运转，还不需要添加其他试剂。该人工湿地装置系统运用电解耦合生物支架方法对难降解污染物(如抗生素)的处理效果较好，装置中的植物根系易采集，便于污染物净化机制量化研究；此外，该人工湿地装置高密植植物，其抗冲击能力强，在植物表面形成根表铁膜，保护植物，延长植物生长周期，使装置处理效果稳定。影响其效果的关键环节在于太阳能的利用效率，也就是较依赖天气情况，所以可根据实际情况扩大或减缩太阳能板的大小以达到最高效率。

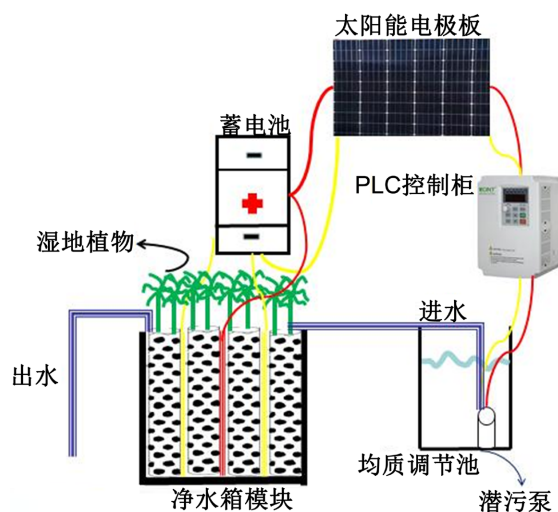


Figure 1. Electrolytic coupled biological scaffold constructed wetland system
图 1. 电解耦合生物支架人工湿地系统

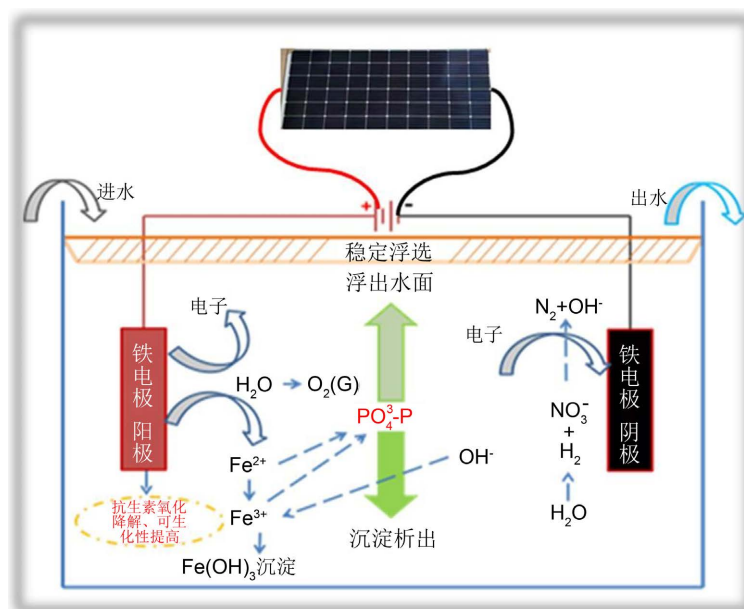
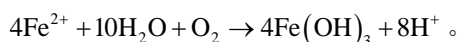


Figure 2. Water purification schematic diagram of electrolytic coupled biological scaffold constructed wetland system
图 2. 电解耦合生物支架人工湿地系统净水原理图

该装置的净水原理是应用电化学的方法去除存在水中的氮：利用铁电极板的阳极接氧化氨或是通过体系的间接氧化作用将氨氮转化成氮气，而在阴极通过将硝态氮的直接还原作用将硝态氮转变为氮气，从而使溶解在水中的氨氮和硝态氮得以去除。同时通过铁电极的电絮凝作用来除磷：金属阳离子在铁阳极电解时生成，水中的磷酸盐与金属阳离子或金属阳离子水合物形成沉淀而去除污水中的磷。其主要原理为： $\text{Fe} \rightarrow 4\text{Fe}^{2+} + 8\text{e}^{-}$ ；



2.2. 实验湿地植物

采用上述电解耦合生物支架人工湿地中风车草的嫩根作为实验材料，从 2019 年 12 月开始，分别在

冬、春、夏、秋四个季节进行监测,以比较四季中不同气候和温度对根表铁膜形成的影响。此外,为了能与自然界中的湿地植物与实验装置中湿地植物的根表铁膜含量作对比,研究者还采了玉溪师范学院人工湖——悠悠湖周围的湿地植物,所采的湿地植物样品有芦苇、灯芯草、美人蕉和风车草的嫩根,以及博思湖周围湿地植物菖蒲的嫩根作为自然对照样品来测量其根表铁膜的含量,如表 1 所示。

Table 1. Plant species and growth characteristics

表 1. 植物种类和生长特性

植物名称	学名	科名	生长环境	生活习性
芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud	禾本科	沼泽、湿地、水岸边	多年生
灯芯草	<i>Juncus effusus</i> L.	灯芯草科	水旁、田边	多年生
美人蕉	<i>Canna indica</i> L.	美人蕉科	阴湿处	多年生
风车草	<i>Cyperus alternifolius</i> L.	莎草科	大河、河流边缘的沼泽、湿地	多年生
菖蒲	<i>Acorus calamus</i> L.	天南星科	水边、沼泽湿地	多年生

2.3. 根表铁膜的形成

湿地植物在淹水或半淹水的状态下,在长期的进化过程中形成了适应缺氧环境的发达通气组织,植物从外界环境中吸收的氧气和叶片光合作用制造的氧气被根系的这些通气组织运输到根部,其中的一部分氧会渗出根的皮层细胞,进而向湿地植物的根际环境扩散,其它的一些氧化性物质会被根系释放到根际,从而导致根际的氧化还原条件发生改变[1] [9],铁氧化物由于水中存在的还原性物质 Fe^{2+} 等氧化而形成,铁氧化物是包裹在湿地植物根表的一层胶膜状物质,这层胶膜状铁氧化物称为根表铁胶膜[9]。

2.4. 样品采集与处理

该实验采集不同处理方式实验装置中的湿地植物——风车草的嫩根,以及玉溪师范学院人工湖,在悠悠湖和博思湖周围采集了种湿地植物,分别采了具有典型代表性的植株 3~5 株,将植株根洗干净装入保鲜袋中带回实验室。将所采集植物芦苇、灯芯草、美人蕉、菖蒲和风车草的嫩根带回实验室后进一步用自来水清洗,然后用去离子水淋洗 2~3 遍,再用吸水纸将根部表面的水吸干,最后放回保鲜袋备用。实验中的电解耦合生物支架人工湿地根据接入电源和种植植物密度不同而分为 D1、D2、D3 和 1#、2#、3#六套装置,分别表示接入电压为 20 V、10 V、5 V 和种植植株数为 24 株、12 株和 6 株。D1、D2、D3 各装置中种植有 24 株风车草,而 1#、2#、3#装置中均未接入电源。

2.5. 湿地植物根表铁膜的含量测定

该实验采用改进的连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(DCB)方法提取湿地植物嫩根的根表铁膜。首将处理好的湿地植物嫩根剪成 1 cm 长的根断,并各称取 1.0 g 放入 100 mL 的三角瓶中,依次加入 40 mL $0.3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸钠,5 mL $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠,最后再加入 3 g 连二亚硫酸钠,摇匀后在室温(25°C)下放入振荡器中(上海智诚, ZHWY-200D)振荡 3 h,然后将根取出并用蒸馏水淋洗 3 次,将淋洗液和提取液转入 100 mL 容量瓶中,最后定容至刻度 100 mL,最后采用 ICP-AES,即电感耦合等离子体原子发射光谱法测定提取液中的铁的含量。提取铁膜后的根用去离子水冲洗干净,烘干至恒重,然后称重。根表铁膜含量的计算采用 DCB 提取液中铁的含量与 DCB 提取后根干重之比,单位是 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 干根,简写成 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.6. 湿地水样中铁元素的测定

该实验在玉溪师范学院 6 栋教学楼实验室进行, 实验所测定水样为上述电解耦合生物支架人工湿地中模拟进、出水。该实验中主要测定铁离子和亚铁离子的含量, 用 10 $\mu\text{g/mL}$ 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液做标线。铁离子的测定: 首先是取 5 mL 水样 8 至 50 mL 比色管中, 然后依次加入 0.1 g/mL 盐酸羟胺 1 mL, 0.003 g/mL 邻菲罗啉 4 mL, 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的邻苯二甲酸氢钾 2 mL, 盖上试管塞摇匀后显色 10~15 分钟, 再用可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司, 722S)在 512 nm 的波长下进行测定。亚铁离子的测定: 先取 5 mL 水样至 50 mL 比色管中, 然后依次加入 0.003 g/mL 邻菲罗啉 4 mL, 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的邻苯二甲酸氢钾 2 mL, 盖上试管塞摇匀后显色 10~15 分钟, 再用可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司, 722S)在 512 nm 的波长下进行测定。

3. 结果和分析

3.1. 湿地植物的根表铁膜含量

采用 DCB 提取液中铁的含量与 DCB 提取后根干重之比来计算电解耦合生物支架中根表铁膜的含量, 发现不同处理方式下人工湿地中种植的风车草的根表铁氧化物沉淀差异较大(图 3)。种植在 6 套装置中风车草的根表铁膜含量在 0.72~6.30 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 其中 D1 中风车草的根表铁膜含量最大。即使是同一种植物, 随着它们生长环境(接入电源或者植物种植密度)的不同, 则其根表所形成的铁膜含量表现出差异。

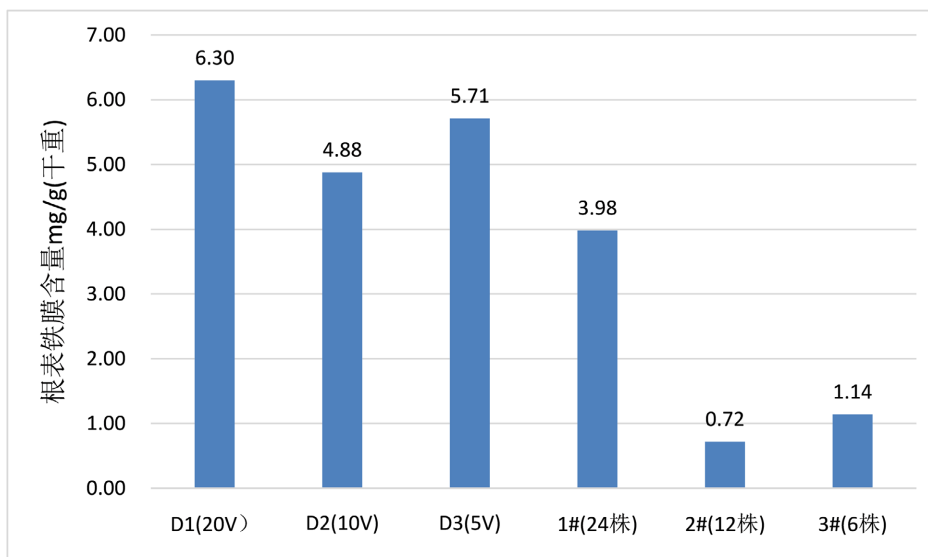


Figure 3. Comparison of iron film content on windmill grass root surface in different constructed wetland devices
图 3. 不同人工湿地装置中风车草根表铁膜含量对比图

铁膜含量在 0.55~6.24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。即使生长在同一生境中, 不同的湿地植物根表铁膜含量在彼此之间表现出明显的差异, 其中灯芯草的根表铁膜含量最大, 芦苇的最低, 灯芯草的根表铁膜含量约为芦苇的 11.3 倍。在同一生境中, 不同植物 9 种类铁膜的含量分别为: 灯芯草 > 美人蕉 > 风车草 > 菖蒲 > 芦苇(图 4)。在电解耦合生物支架人工湿地中的同一种湿地植物在不同的生境, 即在接入电源不同或者植物密度不同的条件下, 根表形成的铁胶膜含量差异较大; 在自然界中相同的生境下, 不同的湿地植物的根表形成的铁胶膜的含量也表现出明显的差异, 刘春英[10]的实验也证明了这一结论。由此

可见，湿地植物根表铁膜的形成与湿地植物的生境无明显关系。而同一湿地植物风车草在电解耦合生物支架人工湿地中的根表铁膜含量与自然界中风车草的根表铁膜含量不同，可能是因为在不同的生境中亚铁的含量存在差异。

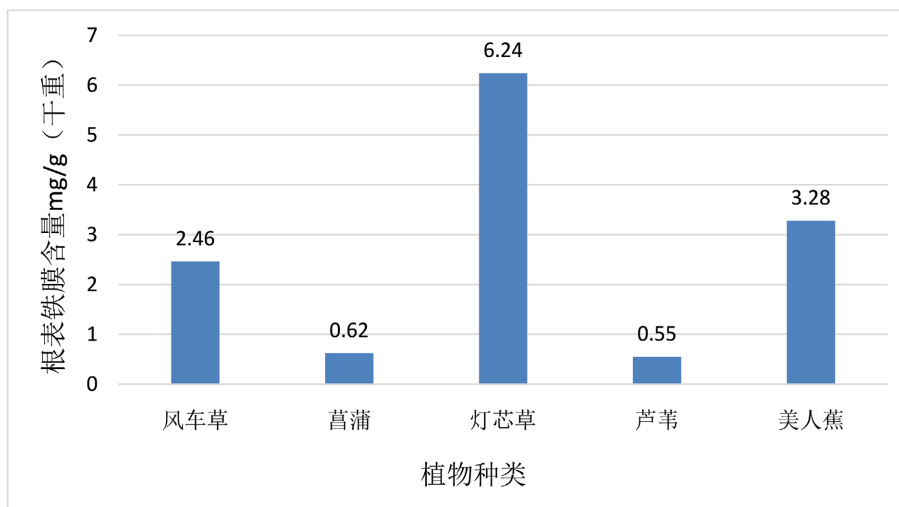


Figure 4. Iron film content on root surface of wetland plants in nature

图 4. 自然界中湿地植物的根表铁膜含量

3.2. 电解耦合生物支架人工湿地中铁的含量

将电解耦合生物支架人工湿地中进出水水样进行铁和亚铁含量的检测，研究结果表面，不同处理方式人工湿地出水亚铁浓度不同，总铁浓度也随着人工湿地的不同处理方式不同而表现出差异。根据比较图 3, 图 5 和图 6 可以发现电解耦合生物支架人工湿地中湿地植物的根表铁胶膜含量与水中亚铁的含量表现出正相关关系，刘春英[10]的结论与此一致，但当亚铁的浓度达到某个值后铁膜的含量不再增加。本研究中铁膜含量与水中的总铁含量没有表现出明显关系。

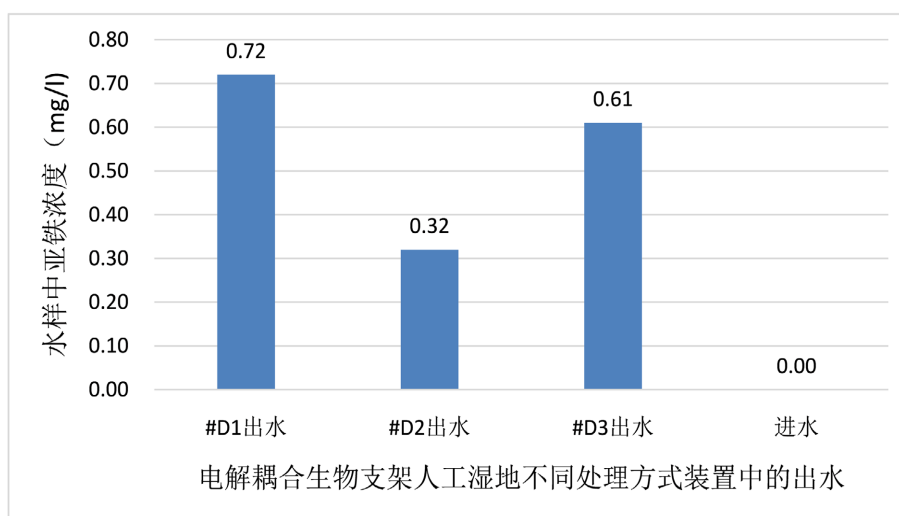


Figure 5. Iron film content on the root surface of wetland plants in nature

图 5. 电解耦合生物支架人工湿地水样中亚铁含量

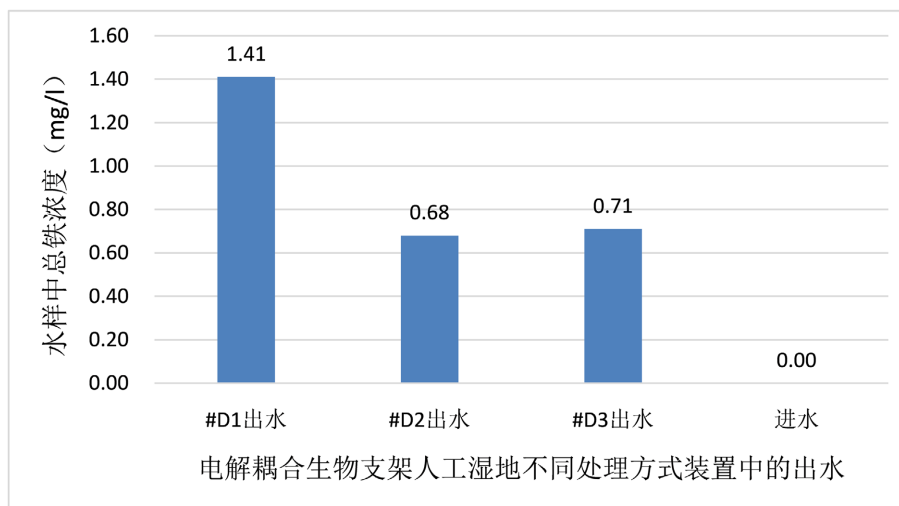


Figure 6. Total iron content in water samples of electrolytic coupled biological scaffold constructed wetland
图 6. 电解耦合生物支架人工湿地水样中总铁含量

3.3. 根表铁膜对净水作用的影响

湿地植物根表形成的铁胶膜对水中 Cu、Zn、Cd 和 Ni 等金属元素的迁移转换有一定程度的影响，以及植物对锌等重金属的吸收和在植物体内的转运有影响。张淼[11]发现水稻根表铁氧化物对 Ca、Fe、Mn、Cu 和 Zn 在根表的富集能力在缺磷条件下增强，从而作为一个缓冲层而影响这些物质进入根系。张艳超[9]在水稻根表铁膜对水稻镉积累的影响研究中表明在铁诱导下水稻的茎叶、根系等各部位的镉积累含量均有所降低。可见，根表铁膜对植物在一定程度上有保护作用。根表铁膜的形成也受到不同介质的影响，刘春英[10]研究发现添加如铅等一些物质会抑制根表铁膜的形成，使植物生长在铅污染土壤中的根系受害，根表铁膜和根组织作为植物运输铅的障碍，根内累积着大约 90%的铅。而李家兴等[12]在对水稻研究中却发现如砷等一些物质的添加会促进根表铁膜的形成，铁膜的增加量甚至达到 140%。根表铁膜对净水作用也有影响，胡莹等[1]研究发现根表铁膜可以抑制镉在水稻中的转运。钟顺清[13]的研究表明根表铁膜可以提高铅在湿地植物中的积累而利于湿地环境中铅的去除，而且根表铁膜的形成还有利于根表磷的吸附。人工湿地中一般都会种植湿地植物，在人工湿地中种植植物不仅在根表形成铁胶膜，从而影响水中重金属的迁移转化，而且可以改善人工湿地的脱氮效率[14]。垂直流人工湿地对氨氮的去除率是 45%，对总氮的去除率是 43%，分别达到国家地表水Ⅱ类水标准和家地表水Ⅳ类水标准[15]。

4. 结论

- 1) 电解耦合生物支架人工湿地中风车草的根表铁膜含量平均值大于玉溪师院悠悠湖边风车草的根表铁膜含量，且电解耦合生物支架人工湿地中接入电源区域的风车草根表铁膜含量显著高于未接入电源区域。
- 2) 电解耦合生物支架人工湿地中铁膜的含量与水中亚铁浓度呈现正相关关系，随着亚铁浓度的增加根表铁膜含量也增加，当亚铁浓度达到一定值后根表铁膜含量不再增加。
- 3) 根表铁膜的形成受溶液中介质的影响，不同介质有促进或抑制铁膜形成的作用，铅会抑制铁膜的形成，砷促进铁膜的形成。
- 4) 根表铁膜对介质中物质的吸收和转运有影响，它会抑制镉在水稻中的转运，也会作为一个缓冲层而增强对 Ca、Fe、Mn、Cu 和 Zn 在根表的富集能力，对湿地植物自身具有保护作用，也有利于去除水中的 Ca、Fe、Mn、Cu 和 Zn 等物质，从而促进其净水作用。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(202011390011)。

参考文献

- [1] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 432-437.
- [2] 陈琳. 人工湿地在废水处理中的应用前景[J]. 广东化工, 2019, 46(16): 152-153.
- [3] 薛彦茵. 复合垂直流-水平流人工湿地深度处理农村生活污水的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [4] 易礼陵. 复合流人工湿地处理小城镇生活污水实验研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2016.
- [5] 宋豪坤. 人工湿地在污水处理中的研究现状与应用[J]. 清洗世界, 2019, 35(10): 40-41.
- [6] 肖广敏. 人工湿地基质及植物筛选研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2015.
- [7] 李华超, 陈宗晶, 陈章和. 六种湿地植物根际氧化还原电位的日变化[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5766-5773.
- [8] 罗敏, 黄佳芳, 刘育秀, 等. 根系活动对湿地植物根际铁异化还原的影响及机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 156-166.
- [9] 张艳超. 水分管理对水稻根表铁膜形成及水稻镉积累的影响[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [10] 刘春英. 鄱阳湖湿地植物根表铁膜的形成及对铅的转运机制研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [11] 张淼. 低磷诱导水稻根表铁膜形成及其对砷累积的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [12] 李家兴, 谢易铮, 林紫慧, 等. 不同品种水稻根部铁膜形成及其对铁磷与砷吸收之影响[C]//面向未来的土壤科学(中册)——中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 成都: 电子科技大学出版社, 2012: 573-581.
- [13] 钟顺清. 湿地植物根表铁膜对磷、铅迁移转化及植物有效性影响的机理探讨[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [14] 潘福霞, 来晓双, 李欣, 等. 不同湿地植物脱氮效果与根际土壤微生物群落功能多样性特征分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(6): 1497-1503.
- [15] 宋探. 垂直流人工湿地改善人工湖水质的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2016.