

植物-生物膜氧化沟中不同形态铁及根表铁膜与除磷的关系

刘 雯^{1,2}, 张建桃², 周遗品¹, 陈 平¹, 雷泽湘¹, 刘 晖¹, 吴启堂^{2*}

(1.仲恺农业工程学院环境科学与工程学院, 广州 510225;

2.华南农业大学, 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 针对传统氧化沟投资建造成本高, 脱氮除磷效率较差的问题, 在污染现场建设植物-生物膜氧化沟, 通过室内曝气模拟试验和室外小试试验, 研究了总磷 (total phosphorus, TP) 的去除与铁和曝气时间的关系以及美人蕉、茭白根表铁氧化物胶膜对污水中磷的吸附去除情况, 了解不同形态铁和植物根表铁膜与除磷的关系。研究结果表明: 不同形态铁及植物根表铁膜与污水中磷的去除密切相关。随着曝气时间的延长, 污水中铁减少量呈现出逐级递增的趋势, 当曝气时间为 12 h 时, 铁减少量达到 0.45 mg/L 以上, 铁减少量与曝气时间之间的相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$), 而 TP 的减少量与铁减少量之间也呈现极显著的相关性 ($P < 0.01$)。小试试验中, 3 个系统出水磷含量及全 Fe、Fe²⁺ 含量均有所降低, 降低量表现出茭白系统 > 美人蕉系统 > 对照系统的规律; 同时, 美人蕉、茭白根表铁氧化物的沉积量随运行时间的延长而增加, 且茭白根表铁膜数量及其吸附磷的数量均要高于美人蕉。该研究为植物-生物膜氧化沟工艺的改进及应用和推广提供了理论和实践依据。

关键词: 磷; 铁; 污染控制; 根表铁膜; 植物-生物膜氧化沟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.032

中图分类号: Q945; Q948

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0228-05

刘 雯, 张建桃, 周遗品, 陈 平, 雷泽湘, 刘 晖, 吴启堂. 植物-生物膜氧化沟中不同形态铁及根表铁膜与除磷的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 228—232. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.032 <http://www.tcsae.org>
Liu Wen, Zhang Jiantao, Zhou Yipin, Chen Ping, Lei Zexiang, Liu Hui, Wu Qitang. Relation of ferrum in different forms and ferric iron plaque of plant root with phosphorus removal in plant-biofilm oxide ditch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 228—232. (in Chinese with English abstract)
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.032 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着中国人口急剧增长和第三产业的快速发展, 污水排放量急剧增加。农村生活污水、禽畜养殖废水以及农业面源污染等问题越来越严重。为了落实党中央提出的“加快农业和农村污染防治, 保护农村饮用水源地, 确保生存环境和食品安全”的要求^[1], 控制水体富营养化, 大力发展“三低” (低能耗、低管理技术和低成本) 的污水处理生态工程技术对于农村地区和城市富营养化湖泊的治理来说是非常紧迫和必要的。基于此, 本实验室研究开发了植物-生物膜氧化沟, 试图将污水处理设施搬到污染现场进行污水处理。而植物-生物膜氧化沟中的不同形态铁及植物根表铁膜与污水磷的去除密切相关。一种观点认为, 铁锰氧化物胶膜在一定条件下可以钝化

污染物的活性, 成为减少根系吸收污染物的屏障^[2-8]。Molla 等的试验结果也表明根表铁锰氧化物膜的形成可降低水稻对磷的吸收^[9]。而另一种观点认为, 铁锰氧化物在一定条件下可以活化养分及污染物, 成为根际污染物的富集库或营养储存库, 从而促进植物对污染物质的吸收和积累^[10-15]。Chen 等发现根表覆有铁膜的苔草和香蒲植株体内的磷浓度要比无铁膜的高^[16-20]。综上所述, 前人对湿地中根表铁膜与除磷的关系研究较多, 而有关植物-生物膜氧化沟中不同形态铁以及植物根表铁膜与除磷关系的研究罕有报道, 而弄清不同形态铁及植物根表铁膜与除磷的关系, 提高系统的除磷效果, 可为植物-生物膜氧化沟的推广应用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 室外植物生物膜氧化沟小试试验

系统 1 (种植美人蕉+曝气)、系统 2 (种植茭白+曝气) 和系统 3 (不种植物+曝气), 试验历时 75 d, 主要考察不同形态铁与磷去除之间的关系, 期间共进行了 2 次铁膜提取试验, 当系统运行到第 50 天时, 收获一部分植物进行了第 1 次铁膜提取试验, 当系统运行到第 75 天时, 收获另一部分植物进行第 2 次铁膜提取试验。

每个系统由水泥墙围成, 长 374 cm, 宽 136 cm, 深 80 cm, 底部为封闭性良好的水泥底。其平面图如图 1 所示。

收稿日期: 2015-07-23 修订日期: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (41401554), 广东省自然科学基金 (2015A030313596), 农业部华南热带农业环境重点实验室开放课题, 广州市产学研协同创新民生科技重大专项 (2014Y2-00526), 广东省教育厅-特色创新项目 (自然科学)。

作者简介: 刘 雯, 女, 湖北仙桃人, 博士, 副教授, 主要从事水污染控制、农业面源污染治理及环境生态修复方面的研究。广州 仲恺农业工程学院环境科学与工程学院, 510225。Email: lazliu@163.com

*通信作者: 吴启堂, 男, 教授, 博导, 主要从事重金属污染治理及环境生态修复方面的研究。广州 华南农业大学资源环境学院, 510642。

Email: qitangwu@pub.guangzhou.gd.cn

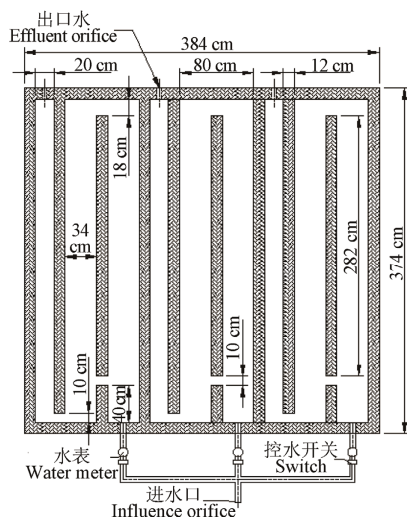


图1 系统平面示意图

Fig.1 Plane diagram of oxidation ditch in small-scale

1.1.2 室内模拟试验

将污水口的污水用 25 L 的塑料桶取回实验室, 摇匀后等体积分装于 18 个 500 mL 的聚乙烯塑料瓶中 (每个瓶装 300 mL 污水)。将 18 个大小一样的曝气头装于 GF-120 叶轮式鼓风机上, 放进前面分装好的污水中进行曝气。在曝气 1、2、4、8、12、24 h 后进行取样分析并记录污水的损失量, 考察曝气时间长短对污水中铁和磷含量的影响。室内模拟装置如图 2 所示。

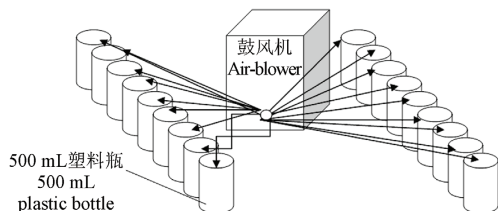


图2 室内模拟试验装置示意图

Fig.2 Sketch diagram of simulation experimentation

1.2 分析与计算方法

1.2.1 水样分析方法

水样中的 TP 采用过硫酸钾消解-比色测定法^[21]。污水中全 Fe 的测定采用原子吸收光谱法, Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 的测定采用重铬酸钾滴定法^[22]。 Fe^{2+} 的具体测定方法是取 5 mL 污水移入容量为 150 mL 三角瓶中, 加入 10 mL 硫磷酸 (1.5 mL 浓硫酸+1.5 mL 浓磷酸+7.0 mL 蒸馏水), 混合均匀。加 5 滴二苯胺磺酸钠指示剂, 摇匀。然后使用 0.005 mol/L 的重铬酸钾溶液进行滴定, 直至溶液的颜色从无色变为紫色, 记录每次滴定所用的重铬酸钾溶液体积, 记为 V_{cr1} 。根据式子(1)就可以计算污水中二价铁的含量 $C_{\text{Fe}^{2+}}$ 。

$$C_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{6 \times 0.005 \times 55.85 \times V_{\text{cr1}}}{5} \quad (1)$$

Fe^{3+} 的具体测定方法是: 吸取 5 mL 污水于 150 mL 三角瓶中, 加水 10 mL, 1:3 硫酸 20 mL, 金属锌粉 1~2 g,

待反应停止后, 将溶液煮沸使三价铁充分还原。流动水冷却后立即滤入 150 mL 三角瓶, 并以水洗涤沉淀数次。在滤液中加磷酸 5 mL 及二苯胺磺酸钠指示剂 5 滴, 立即用标准 0.005 mol/L 重铬酸钾溶液滴定至紫蓝色。记录每次滴定所用的重铬酸钾溶液体积, 记为 V_{cr2} 。根据式子(2)就可以计算污水中三价铁的含量 $C_{\text{Fe}^{3+}}$ 。

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{6 \times 0.005 \times 55.85 \times (V_{\text{cr1}} - V_{\text{cr2}})}{5} \quad (2)$$

1.2.2 植物分析方法

植物根表铁膜的提取采用 DCB 法^[23], 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 5g 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 °C, 280 r/min 的摇床上振动 3 h, 溶液过滤至 100 mL 容量瓶中定容。取出的根在 70 °C 烘箱中烘干, 称干质量。用原子吸收光谱法测定浸提液中 Fe 的含量, 用钼蓝比色法测定其中的磷含量^[24]。植物根表铁膜计算采用 Fe mg/kg (根干质量) 单位。

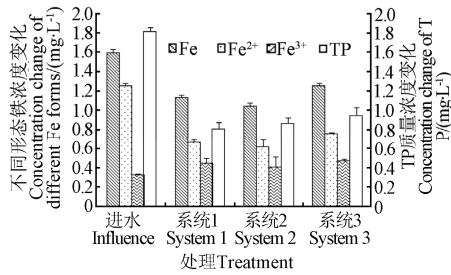
1.3 数据分析

数据用 Excel 2007 整理和作图、采用 SPSS19 软件对数据进行配对 T 检验、方差分析和多重比较 (邓肯氏新复极差法), 并采用 $P=0.05$ 的显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同形态铁之间的转化及其与磷的关系

中国南方地区铁管的锈蚀作用大, 生活污水进水铁含量比较高, 因此研究系统中不同形态铁与植物及污水磷的作用机理就显得比较重要。从图 3 可以看出, 进水 Fe 的含量比较高, 其中 Fe^{2+} 的含量要高于 Fe^{3+} 。而铁膜的形成是根释放出的氧化性物质对周围溶液中亚铁离子的氧化沉积所致, 与溶液中亚铁离子浓度直接相关^[25-27]。因此, 经过植物-生物膜氧化沟系统的处理后, 3 个系统中各种形态 Fe 的含量与进水相比发生较大的改变。各系统中 Fe^{3+} 的含量与进水相比均有不同程度的上升 ($P<0.05$), 这主要是因为氧化沟系统中的曝气作用将污水中一部分 Fe^{2+} 氧化成了 Fe^{3+} 所致。而从各个系统出水 Fe 含量来看, 种植物的系统 1、系统 2 出水 Fe、 Fe^{2+} 及 Fe^{3+} 含量均要低于不种植物的对照系统 3, 种茭白的系统 2 其不同形态的 Fe 含量又要低于种美人蕉的系统 1。从磷的变化曲线上可以看出, 各个系统出水 TP 含量均有所降低, TP 含量最低的是系统 1, 其次为系统 2, 最低的是系统 3。这可能是因为一部分 Fe 作为营养元素被系统 1 和系统 2 中植物吸收、利用或被根系吸附在根表形成铁氧化胶膜, 而另一部分 Fe 与污水中的磷污染物在曝气作用下形成磷酸盐沉淀到污泥中^[28]。而对系统出水中不同形态铁的含量进行方差分析和多重比较发现: 系统 1、系统 2 和系统 3 出水 Fe 及 Fe^{2+} 含量之间差异显著 ($P<0.05$), 而各系统出水 Fe^{3+} 含量虽有一定的差异, 但差异不显著 ($P>0.05$)。



注：图中系统 1 为种植美人蕉的氧化沟系统，系统 2 为种植茭白的氧化沟系统，系统 3 为不种植物的对照系统。

Note: System 1 means *Canna generalis* system; System 2 means *Zizania cadaciflora* system; System 3 means control.

图 3 系统进出水不同形态铁及 TP 的变化

Fig.3 Concentration change of TP and different Fe forms in systems

2.2 曝气时间长短对污水中铁含量的影响

为了解氧化沟中曝气时间与 Fe 含量之间的关系，确定植物生物膜氧化沟的曝气时间及停留时间，进行了室内模拟试验。由图 4 可以看出，曝气时间长短对污水中 Fe 的含量有一定的影响，随着曝气的进行，污水中 Fe 含量有不同程度的减少。当曝气时间为 1、2、4、8、12、24 h 时污水中的 Fe 减少量基本上呈现出逐级递增的趋势。在曝气时间为 12 h 时污水中的 Fe 含量出现大幅度的降低，其减少的 Fe 量达到 0.45 mg/L 以上。而当曝气时间超过 12 h 后，污水中 Fe 含量减少的幅度变小，在曝气 24 h 后，其 Fe 含量也只降低了 0.47 mg/L 左右。相关性分析结果表明，Fe 的减少量与曝气时间的相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

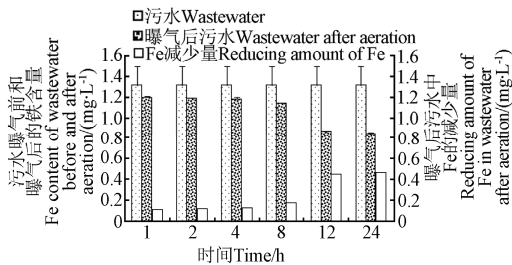


图 4 曝气时间长短对污水中 Fe 的影响

Fig.4 Effect of aeration time on Fe concentration

2.3 曝气时间长短对污水磷的影响

由图 5 可以看出，污水中 TP 减少量随曝气时间的变化趋势与 Fe 的变化趋势具有高度的一致性，即随着曝气时间的增加 TP 含量呈缓慢降低的趋势，在曝气时间为 12 h 时，其减少量上升幅度最大，达 1.21 mg/L，但超过这一时间后，污水中的 TP 变化很小。而且相关性分析结果也表明，TP 的减少量与曝气时间之间呈现极显著相关 ($P < 0.01$)。这可能是因为随着曝气的进行，污水中一部分 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} ，与污水中的磷酸根离子形成磷酸盐沉淀，导致污水中 Fe 和 TP 含量的降低，从而使污水得以净化^[29-32]。这与小试系统出水 Fe^{3+} 含量不降反升的结果类似。而且相关性分析结果表明（如图 6 所示）：TP 减少量和 Fe 减少量之间存在极显著的相关性 ($P < 0.01$)。

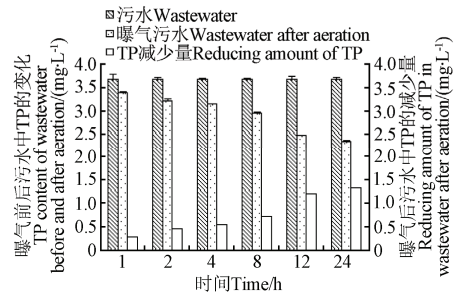


图 5 曝气时间长短对污水中 TP 的影响

Fig.5 Effect of aeration time on TP concentration

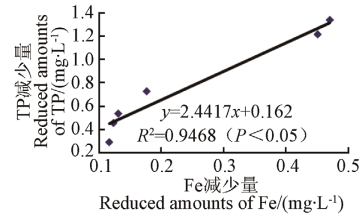


图 6 曝气过程 TP 减少量和 Fe 减少量之间的关系

Fig.6 Relationships between reduced amounts of TP and reduced amounts of Fe during aeration process

2.4 根表铁膜对植物吸收污水磷的影响

为了进一步弄清 Fe 与 TP 的作用机理，对植物根表铁膜及植物地上部和地下部中的磷和 Fe 含量进行了研究。

从表 1 可知，在美人蕉和茭白根表铁氧化膜的提取液中也有大量磷存在，这表明美人蕉和茭白根表铁氧化物胶膜对污水 TP 具有吸附作用。相关分析发现，富集在根表的磷量与 Fe 膜数量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)，说明根表铁膜对磷起吸附作用。从茭白与美人蕉根表提取出来的铁膜数量和磷的数量来看，2 次试验中茭白根表提取出的铁膜和磷的数量均要高于美人蕉。而且茭白与美人蕉中磷含量均具有显著差异 ($P < 0.05$)。而第 1 次提取试验中，茭白与美人蕉 Fe 含量差异不显著，第 2 次差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。这说明茭白根表沉积的铁膜数量及其磷吸附能力要高于美人蕉（而且试验中也发现茭白根表有明显的红棕色物质）。这可能是因为同样曝气的氧化沟系统中，茭白根系的氧化力要高于美人蕉，因而其铁膜形成数量以及其吸附的磷量均要高于美人蕉。

而从 2 次试验 2 种植物提取的铁膜与磷的数量来看，第 2 次试验中茭白和美人蕉根表提取的铁膜数量均要高于第 1 次，第 2 次比第 1 次分别提高了 1171 和 428.3 mg/kg；第 2 次试验中茭白和美人蕉根表吸附的磷量也比第 1 次高，第 2 次比第 1 次分别提高了 10.76 和 15.49 mg/kg。这一结果表明，在污水中存在一定 Fe 和充分曝气的条件下，美人蕉、茭白根表铁氧化物的沉积量随运行时间的延长而增加^[24,33]，即本植物生物膜氧化沟运行时间越长，美人蕉、茭白根表沉淀的铁氧化物胶膜数量也越多（铁氧化物胶膜变厚），且胶膜上所富集的磷量与铁膜数量呈显著正相关。

表1 铁氧化物胶膜数量对磷吸附量的影响(DW)

Table 1 Effects of amounts of ferric hydroxide film on plant root surface on P absorbed

植物类型 Plant		Fe 膜含量 Ferric hydroxide film content/(mg·kg ⁻¹)	磷含量 P content/(mg·kg ⁻¹)
第 1 次 1 st	茭白根	1924±209.8a	312.5±16.03a
	美人蕉根	1167±801.2a	265.8±38.5b
第 2 次 2 nd	茭白根	3096±1615a	323.24±6.74a
	美人蕉根	1595±140b	281.3±21.72b

注: 表中 DW 代表植物根干质量, 表中数据是 4 次重复的平均值, 同一列数据具有不同字母表示差异显著。

Note: DW means dry weight of plant root; Data is the average of four times data in the table; The different superscript letters within the same column mean statistical significant difference ($P<0.05$).

3 结论

1) 植物-生物膜氧化沟系统出水全 Fe、Fe²⁺和 Fe³⁺含量及磷含量有所降低, 全 Fe、Fe²⁺降低量表现出茭白系统>美人蕉系统>对照系统的规律 ($P<0.05$), 而 3 个系统出水 Fe³⁺含量之间无显著差异 ($P>0.05$)。

2) 随着曝气时间的延长, 污水中的 Fe 减少量呈现出逐级递增的趋势, 在曝气时间为 12 h 时污水中的 Fe 含量出现大幅度的降低, 其减少的铁量达到 0.45 mg/L 以上。而当曝气时间为 24 h 时, Fe 含量降低幅度较小, 只比 12 h 曝气时间的铁减少量增加了 0.02 mg/L。TP 的减少量与铁的减少量呈现出相同的变化规律, 二者之间的相关系数 R^2 为 0.9468, 且差异显著。这表明污水 TP 的去除与 Fe 含量密切相关。

3) 植物生物膜氧化沟中的美人蕉和茭白根表铁膜对污水磷具有吸附去除作用。茭白根表的铁膜数量及其吸附磷的数量均要高于美人蕉。随着运行时间的延长, 美人蕉、茭白根表沉淀的铁膜数量也越多, 其 Fe 膜数量分别可达到 3 096 和 1 595 mg/kg, 且铁膜上所富集的磷量与铁膜数量呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。

参考文献

- [1] 国家环保部. 2010 年中国环境状况公报[R]. 北京: 国家环保部, 2010.
- [2] 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.
Liu Wenju, Zhu Yongguan. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wetland plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 358—363. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
Liu Chunying, Chen Chunli, Gong Xiaofeng, et al. Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2470—2480. (in Chinese with English abstract)
- [4] Ultra V U, Nakayama A, Tanaka S, et al. Potential for the alleviation of arsenic toxicity in paddy rice using amorphous iron-(hydroxide) amendments[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(1): 160—169.
- [5] Liu Jiangguo, Leng Xuemei, Wang Mingxin, et al. Iron plaque formation on roots of different rice cultivars and the relation with lead uptake[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(5): 1304—1309.
- [6] Garnier J M, Travassac F, Lenoble V, et al. Temporal variations in arsenic uptake by rice plants in Bangladesh: The role of iron plaque in paddy fields irrigated with groundwater[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(19): 4185—4193.

- [7] Batty L C, Baker A J M, Curtis C D, et al. Aluminium and phosphate uptake by *Phragmites australis* the role of Fe, Mn and Al root[J]. Plaques Ann Bot, 2002, 89: 443—449.
- [8] Delphine Vrommank, Stanley Lutts, Isabelle Lefèvre, et al. Effects of simultaneous arsenic and iron toxicities on rice (*Oryza sativa* L.) development, yield-related parameters and As and Fe accumulation in relation to As speciation in the grains[J]. Plant and Soil, 2013, 371(1): 199—217.
- [9] Molla Rahman Shaibur S M, Imamul Huq, Shigenao Kawai, et al. Quantitative analysis of phosphorus, iron, and arsenic in the inner and outer portions of rice roots: An interaction of arsenic with iron[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38: 66—72.
- [10] Voegelien A, Weber F A, Kretzschmar R. Distribution and speciation of arsenic around roots in a contaminated riparian floodplain soil: Micro-XRF element mapping and EXAFS spectroscopy[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2007, 71(23): 5804—5820.
- [11] Yao Haixin, Ye Zhihong. Iron plaques on wetland plant root surface: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2374—2380.
- [12] 邓泓, 叶志鸿, 黄铭洪. 湿地植物根系泌氧的特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007(6): 69—72.
Deng Hong, Ye Zhihong, Huang Minghong. Characteristics of radial oxygen loss from root of wetland plants[J]. Journal of East China Normal University: Natural Sciences, 2007(6): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [13] Huang Yanchao, Chen Zheng, Liu Wenju. Influence of iron plaque and cultivars on antimony uptake by and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to Sb(III) or Sb(V)[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 41—49.
- [14] 刘春英, 弓晓峰, 陈春丽, 等. 鄱阳湖湿地植物根表铁膜形成的影响因素分析[J]. 土壤通报, 2014, 273(6): 1297—1304.
Liu Chunying, Gong Xiaofeng, Chen Chunli, et al. Analyses on the influence factors of iron plaque formation on the roots of wetland plants from Poyang Lake [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 273(6): 1297—1304. (in Chinese with English abstract)
- [15] Blute N K, Brabander D J, Hemond H F, et al. Arsenic sequestration by ferric iron plaque on cattail roots[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(22): 6074—6077.
- [16] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron coating on rice roots: mineralogy and quantity influencing factors[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 635—639.
- [17] Batty L C, Baker A J M, Curtis C D, et al. Aluminium and phosphate uptake by *Phragmites australis* the role of Fe, Mn and Al root[J]. Plaques Ann Bot, 2002, 89: 443—449.
- [18] Greipsson S, Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice[J]. Can J Bot, 1992, 70: 824—830.
- [19] 刘婧, 陈昕, 罗安程, 等. 湿地植物根表铁膜在污水磷去除中的作用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(2): 224—230.
Liu Jing, Chen Xin, Luo Ancheng, et al. Role of root surface iron plaque in phosphorous removal from wastewater by wetland plants[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2011, 37(2): 224—230. (in Chinese with English abstract)
- [20] Liu H J, Zhang J L, Christie P, et al. Influence of iron fertilization on cadmium uptake by rice seedlings irrigated with cadmium solution[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(5): 584—594.
- [21] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [22] 李云东, 江辉, 丁俊成. 石材着红色溶液中金属离子含量的测定[J]. 石材, 2002(1): 37—38.
Li Yundong, Jiang Hui, Ding Juncheng. Determination of metal iron content in the red solution[J]. Stone, 2002(1): 37—38. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [25] 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.
Cao Xueying, Chong Yunxiao, Yu Guangwei, et al. The role of root iron plaque in phosphorus removal of constructed wetland and the effect of medium on iron plaque[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1292—1297. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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.
Wang Zhenyu, Liu Lihua, Wen Shengfang, et al. Effect of iron plaque on root surfaces on phosphorus uptake of two wetland plants[J]. *Environment Science*, 2010, 31(3): 781—786. (in Chinese with English abstract)
- [27] Yang Lufang, Li Yuanwei, Yang Xinyao, et al. Effects of iron plaque on phosphorus uptake by *Pilea cadierei* cultured in constructed wetland[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011(11):1508—1512.
- [28] 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.
Wang Zhenyu, Wen Shengfang, Xing Baoshan, et al. Phosphorus rhizosphere depletion effect of four aquatic plants[J]. *Journal of Environmental Science*, 2008, 29(9): 2475—2480. (in Chinese with English abstract)
- [29] Fu Yongqiang, Liang Jianping, Yu Zhiwei, et al. Effect of different iron forms on iron plaque on root surface and iron uptake in rice seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1050—1057.
- [30] Taggart M A, Mateo R, Charnock J M, et al. Arsenic rich iron plaque on macrophyte roots an ecotoxicological risk[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(3): 946—954.
- [31] Jingchun, Lu Haoliang, et al. Effect of external phosphate addition on solid-phase iron distribution and iron accumulation in Mangrove *Kandelia obovata* (S. L.)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(17): 13506—13513.
- [32] 郑芸芸, 李忠意, 李九玉, 等. 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 223—229.
Zheng Yunyun, Li Zhangyi, Li Jiuyu, et al. Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice roots[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 223—229. (in Chinese with English abstract)
- [33] Fu Yongqiang, Yu Zhiwei, Cai Kunzheng, et al. Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: A review[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1527—1534.

Relation of ferrum in different forms and ferric iron plaque of plant root with phosphorus removal in plant-biofilm oxide ditch

Liu Wen^{1,2}, Zhang Jiantao², Zhou Yipin¹, Chen Ping¹, Lei Zexiang¹, Liu Hui¹, Wu Qitang^{2*}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

2. South China Agricultural University, Key Laboratory of Agro-environments in Tropics, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Oxide ditch technology for wastewater treatment has been developed recently with such advantages as simple treatment flow, high stability, low capital construction investment and low operation cost. But the conventional oxide ditch still has many shortcomings as a type of deformation technology of activated sludge processes. For example sludge is easily suspending and expanding in the system, and single technology can bring lower removal efficiency on nitrogen and phosphorus (P). In order to solve these problems, a new type of oxidation ditch treatment system, plant-biofilm oxide ditch was developed in our laboratory, which combined the phytoremediation and biofilm technology with the oxidation ditch system and was applied to lake water surface for *in-situ* wastewater treatment. The simulation test and the plant-biofilm oxidation ditch small-scale experiment were carried out, and the removal of total phosphorus (TP), and the relationship between ferrum and aeration time, as well as the P absorption and removal by the ferric iron (Fe) plaque on the root surface of *Canna generalis* and *Zizania cadaciflora* in wastewater were investigated, in order to figure out the correlation between Fe in different forms and ferric iron plaque of plant root and P removal. Results showed that there was a close relationship between P removal and aerated time, Fe in different forms, ferric iron plaque of plant root in wastewater. The Fe^{3+} concentration of discharge water went up, but the P concentration descended after wastewater was treated by oxidation ditch system. When the aerated time was 1, 2, 4, 8, 12 and 24 h, the reduced amount of Fe increased by degrees on the whole with the extension of aeration time. When aerated for 12 h, the decline extent of Fe concentration in wastewater was very high, and the reduced amount of Fe was up to 0.45 mg/L. After the aerated time preponderated over 12 h, the decline extent of Fe concentration in wastewater was decreased. The relevance between the reduced amount of Fe and the aeration time reached a very significant level ($P < 0.01$), while the correlation between the reduced amount of TP and the reduced amount of Fe also had a very significant correlation ($P < 0.01$). In the small-scale test, the concentrations of P, Fe and Fe^{2+} in the effluent of 3 systems all decreased to some extent and the reduced amounts exhibited as *Zizania cadaciflora* system > *Canna generalis* stem > control system. Additionally, the ferric iron plaque of *Canna* and *Zizania* root surface could absorb P. The deposition of iron oxide on the root surface of *Canna generalis* and *Zizania cadaciflora* increased with the operation time increasing, and the amounts of iron plaque and absorbed P on *Zizania cadaciflora* root surface both exceeded that of *Canna generalis*. The amounts of ferric iron plaque were up to 3096 and 1595 mg/kg respectively for *Zizania cadaciflora* and *Canna generalis*. The correlation analysis result showed that the relationship between P and ferric iron plaque on enrichment root surface had positive correlation ($P < 0.05$). The experimental research provides theoretic and practical basis for the improvement, further application and generalization of plant-biofilm oxide ditch.

Keywords: phosphorus; Fe; pollution control; iron plaque; plant-biofilm oxidation ditch