

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征

沈小雪, 李瑞利*, 柴民伟, 邱国玉

(北京大学深圳研究生院, 环境与能源学院, 深圳 518055)

摘要:以深圳湾红树林湿地的5种典型红树植物为研究对象, 调查了红树植物根表铁膜及其重金属富集特征。结果表明: ① 5种红树植物根表铁膜含量依次为: 老鼠簕 > 桐花树 > 木榄 > 秋茄 > 银叶树, 含量范围为 $0.37 \sim 10.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。② 根表铁膜对沉积物中重金属具有一定的富集作用, 并且其因植物种类和重金属种类而异: 重金属在老鼠簕根表铁膜中积累较高, 银叶树中最低; 铁膜中的重金属 Mn 含量为 $0.11 \sim 2.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb、Zn、Cu、As 和 Cr 最高含量范围为 $117.44 \sim 189.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd、Ni、Co、Sb 最高含量范围为 $34.84 \sim 63.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 铁膜中的 Zn 含量与其他重金属含量呈显著负相关 ($P < 0.001$), 表明铁膜中 Zn 的积累可能与其它金属元素存在一定的竞争关系。③ 沉积物 pH 显著影响根表铁膜的含量及其对 Mn 的积累 ($P < 0.05$); 沉积物含水量和盐度与铁膜中重金属 Cr 和 Co 含量呈正相关 ($P < 0.05$)。④ 红树植物根表铁膜及其重金属含量的分布特征均为根尖 > 根中 > 根基。

关键词: 深圳湾; 红树植物; 沉积物; 根表铁膜; 重金属

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1851-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201708088

Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China

SHEN Xiao-xue, LI Rui-li*, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu

(School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Based on the five typical mangrove species in the mangrove wetland of Shenzhen Bay, the contents and distributional characteristics of iron plaques (Fe) and the Mn, Pb, Zn, Cu, As, Cr, Cd, Ni, Co, and Sb enrichment of the iron plaques on mangrove plant roots were investigated. The results show that: ① There is a significant difference in the contents of iron plaques among the five mangrove species, and the contents in the species follow the order: *Acanthus ilicifolius* > *Aegiceras corniculatum* > *Bruguiera gymnorhiza* > *Kandelia obovate* > *Heritiera littoralis*; the content ranged from $0.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $10.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. ② Iron plaques have a certain enrichment effect on the heavy metals in the sediments. The contents of heavy metals in the iron plaques vary with the plant species, being the highest in *A. ilicifolius* and the lowest in *H. littoralis*. This enrichment also varies with the element species: Mn content changed from $0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $2.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; the highest contents of Pb, Zn, Cu, As, and Cr changed from $117.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $189.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; and the highest contents of Cd, Ni, Co, and Sb changed from $34.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $63.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The content of Zn in the iron plaque is negatively correlated with the other heavy metal contents ($P < 0.001$), indicating that Zn might compete with the other elements. ③ Sediment pH significantly affects the content of iron plaque and the accumulation of Mn in the iron plaque ($P < 0.05$). The water content and salinity of the sediments are positively correlated with the contents of heavy metals Cr and Co in the iron plaque ($P < 0.05$). ④ The distribution of iron plaques and their heavy metal contents in different parts of the roots of the mangrove plants follow the order: root tip > root middle > root base.

Key words: Shenzhen Bay; mangrove plants; sediments; iron plaque; heavy metals

植物根表铁膜是一种两性胶体, 可以通过离子之间的吸附-解吸、氧化-还原、有机-无机的络合作用改变根际环境中重金属的存在形态, 从而影响这些离子的生物有效性, 具有潜在的净化重金属污染的功能^[1]。根表铁膜在湿地植物根-土界面的研究已经成为湿地环境科学研究中的热点^[1~3]。现有研究主要涉及根表铁膜的形成条件及影响因素^[1, 4~6], 物质组成、形貌与磁性特征^[7~9], 对植物营养元素和重金属等污染物吸收的影响及其环境影响因子^[1, 10, 11], 铁膜分解过程的元素动态和生态毒理风险^[8]等方面。目前, 国内外对根表铁膜的研究主要针

对水稻^[4, 12, 13]、芦苇^[14]和香蒲^[15]等草本植物。

湿地植物根表铁膜形成必须具备的两个条件是: 植物根际处于局部氧化状态和生长介质中存在充足的 Fe^{2+} ^[2, 16]。红树林是分布于热带、亚热带潮间带的木本植物群落。长期的海水浸淹使其沉积物处于还原状态, 红树植物可通过通气组织向地下根

收稿日期: 2017-08-11; 修订日期: 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400446); 深圳市科创委基础研究项目(JCYJ20160330095549229); 深圳市孔雀计划研究项目(KQJSCX20160226110414)

作者简介: 沈小雪(1991~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: shenxx1991@126.com

* 通信作者, E-mail: liruli@pkusz.edu.cn

系输送氧气,在根际形成局部氧化环境,沉积物中还原态的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} ,在根表形成铁膜^[1, 17].植物根表铁膜的数量变异很大,对环境因子变化响应敏感^[18].有研究发现,红树植物能够通过根系渗氧来改善其对重金属的耐性和修复作用^[19].通过城市废水处理能够诱导红树植物产生根表铁膜,并对净化水质具有一定促进作用^[20, 21].然而,在野外生境中,红树植物根表铁膜形成有何特点,对重金属的富集有何影响,尚未有明确的结论.

深圳湾福田红树林湿地紧邻深圳市中心城区,长期受人类活动的影响,成为各种陆源性污染物的“库”,是研究红树植物根表铁膜及其生态功能的理想研究样地.福田红树林保护区内红树林覆盖面积约 111 hm^2 ,林分按优势树种分秋茄+桐花树林、秋茄林、白骨壤林、秋茄+桐花树+白骨壤林、海桑+无瓣海桑林,林下普遍生长有老鼠簕,并有小面积分布的木榄和银叶树.保护区内已对无瓣海桑采取清理措施;白骨壤受虫害影响,林下多年未发现幼苗.同时,木榄林面积逐年增加,老鼠簕在林下生长繁茂,银叶树在靠陆端有大量幼苗.综上,本研究选择深圳湾红树林为研究对象,旨在阐明:①5种典型红树植物根表铁膜含量

及其分布特征;②红树植物根表铁膜上重金属元素的富集特征;③沉积物理化性质对红树植物根表铁膜形成及铁膜富集重金属的影响,以期揭示红树植物根表铁膜在沉积物重金属污染修复中的作用,并为红树林湿地修复重金属污染的机制研究提供重要的数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况和野外采样

深圳福田红树林保护区位于深圳湾东北岸,呈带状分布,长 9 km,是我国唯一位于城市中心区内的红树林生态湿地.2017 年 6 月,在研究区内选择 5 种典型红树植物的林地:老鼠簕 *Acanthus ilicifolius*、桐花树 *Aegiceras corniculatum*、秋茄 *Kandelia obovata*、木榄 *Bruguiera gymnorhiza* 和银叶树 *Heritiera littoralis* (图 1).在 5 种林地分别设立 3 个沿岸分布的 5 m×5 m 样方,每个样方随机采集 5~6 株 1 龄幼苗;采集红树植物幼苗后,将周围沉积物刮去表层腐殖质,用园艺铲采集.将幼苗和沉积物装入保鲜袋和保鲜箱中运回实验室.将野外采回的红树植物 1 龄幼苗,先用自来水冲洗,再用去离子水润洗 4 次,备用(图 2).沉积物理化性质如表 1 所示.

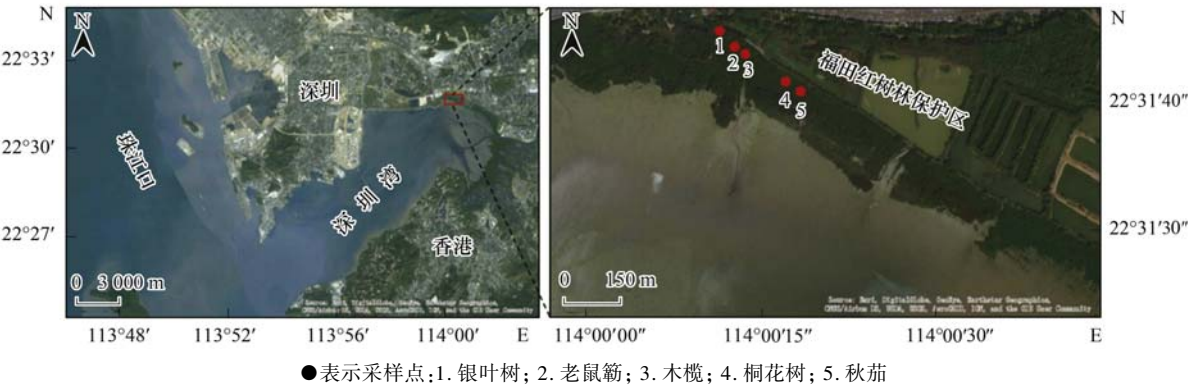


图 1 采样点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

表 1 沉积物理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of sediments

植物	含水量/%	pH	盐度/‰	总碳/%
老鼠簕	35.90 ± 5.21ab	5.99 ± 0.25b	2.47 ± 0.63ab	1.98 ± 0.97b
桐花树	48.68 ± 8.17a	6.32 ± 0.17b	3.55 ± 1.32a	5.54 ± 0.90a
木榄	39.94 ± 8.76ab	6.26 ± 0.03b	3.08 ± 0.62a	3.20 ± 2.18ab
秋茄	46.70 ± 10.83a	6.65 ± 0.16a	3.55 ± 1.87a	4.17 ± 0.97ab
银叶树	28.89 ± 2.19b	6.72 ± 0.21a	0.55 ± 0.01b	3.48 ± 0.62ab

1) 不同小写字母表示不同种植物间差异显著 ($P < 0.05$)



(a) 老鼠簕 (*A. ilicifolius*); (b) 桐花树 (*A. corniculatum*); (c) 木榄 (*B. gymnorrhiza*); (d) 秋茄 (*K. obovata*); (e) 银叶树 (*H. littoralis*)

图 2 5 种典型红树植物幼苗及其根表铁膜

Fig. 2 Five typical species of mangrove seedlings and their root surface iron plaque

1.2 红树植物根表铁膜提取和重金属含量测定

红树植物根表铁膜的提取采用 DCB 法^[22~24]. 采用火焰原子吸收法 (AAS, TAS-990, 普析, 中国) 测定提取液中 Fe 的含量, 回收率为 $97.73\% \pm 7.92\%$. 采用电感耦合光发射光谱仪 (ICP-OES, Prodigy XP, Leeman, 美国) 测定提取液中 Mn、Pb、Zn、Cu、As、Cr、Cd、Ni、Co 和 Sb 元素的含量. 将提取过铁膜的根在 70°C 烘干 48 h 至恒重. 根表铁膜的计算公式为^[21,22]:

$$C_1 = 0.1591 \times C_2 / m$$

式中, C_1 为根表铁膜的含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); C_2 为 DCB 提取液中的铁离子质量 (mg); m 为 DCB 提取后根的干重 (g); 0.1591 为换算系数^[20].

1.3 数据处理

所测数据以 3 次重复后的平均值及标准误差 (SE) 表示, 采用 SPSS 20.0 软件完成数据处理及统计分析, 采用 Excel 2016 软件绘图. 采用单因素方差分析法 (ANOVA, Duncan 检验法) 进行差异显著性分析 ($P < 0.05$). 用 Spearman 相关分析法分析了根表铁膜与沉积物理化因子以及重金属间的关系.

2 结果与分析

2.1 红树植物根表铁膜及铁膜中重金属的含量

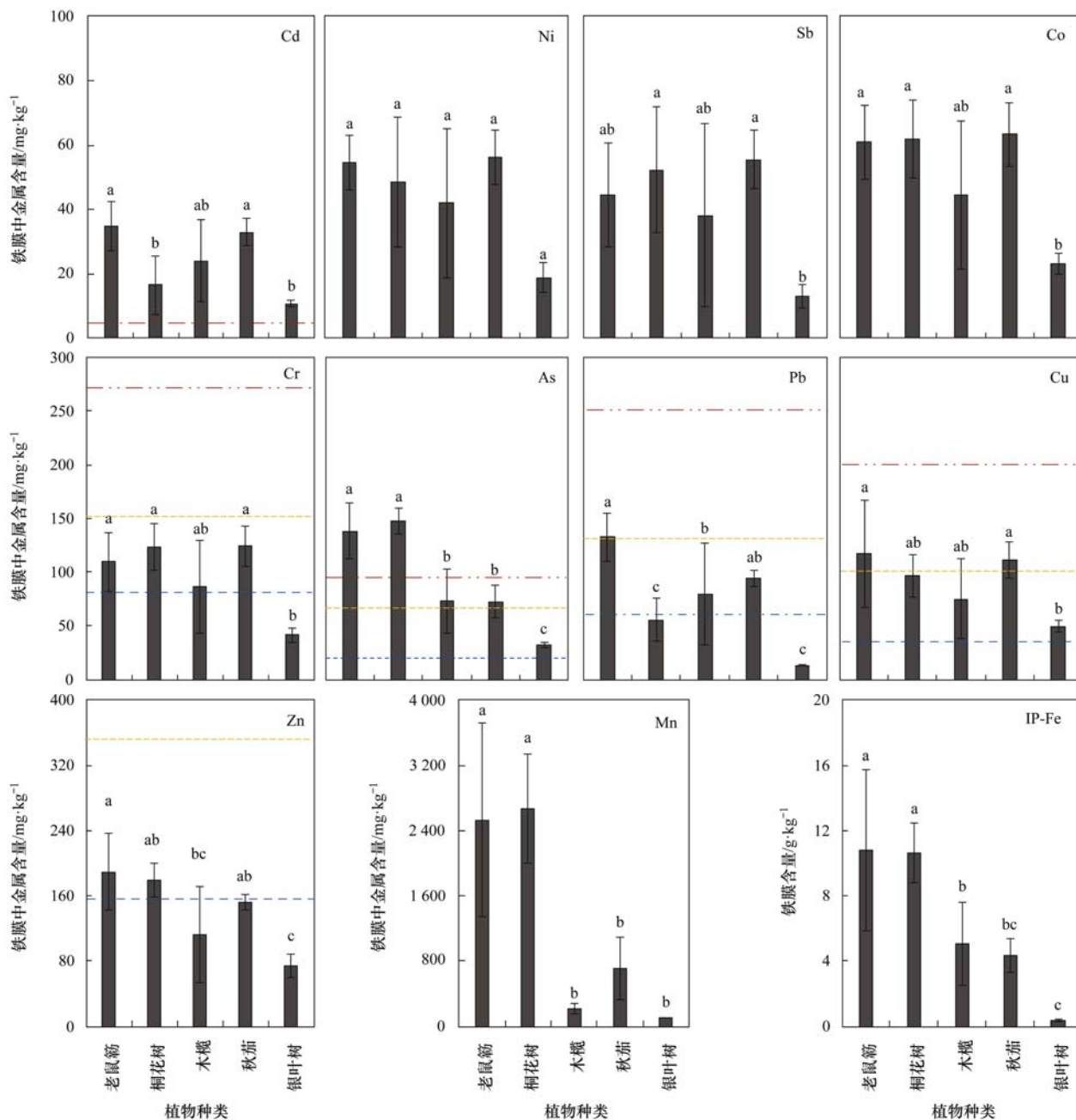
5 种红树植物根表铁膜及其重金属含量水平可分为 3 类 (图 3): ① Fe 和 Mn 含量在 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 数量级, 分别为 $0.37 \sim 10.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.11 \sim 2.53$

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 老鼠簕和桐花树根表铁膜含量 (IP-Fe) 和铁膜中 Mn 含量显著高于其他红树植物 ($P < 0.05$). ② Pb、Zn、Cu、As 和 Cr 含量基本为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 数量级. 其中, 老鼠簕根表铁膜中的金属含量显著高于银叶树 ($P < 0.05$). ③ Cd、Ni、Co、Sb 含量低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中, 老鼠簕和秋茄根表铁膜中 Cd 和 Co 含量显著高于银叶树 ($P < 0.05$); 桐花树和秋茄根表铁膜的 Sb 含量显著高于银叶树 ($P < 0.05$); Ni 在 5 种红树植物根表铁膜中的含量差异不显著 ($P > 0.05$).

红树植物根表铁膜含量与其它重金属呈现极显著正相关关系 ($P < 0.001$, 表 2), 与 Zn 呈极显著负相关关系 ($P < 0.001$, 表 2). 铁膜中 Zn 的含量与其它金属含量间均呈极显著负相关 ($P < 0.001$, 表 2). 沉积物含水量和盐度与铁膜中重金属 Cr 和 Co 含量呈正相关 ($P < 0.05$, 表 3), 根表铁膜含量及 Mn 含量与沉积物 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$, 表 3); 各 (类) 金属含量与沉积物 TC 间无显著相关关系 (表 3).

2.2 红树植物根表铁膜及其重金属分布特征

由于桐花树根的生物量较小, 本研究主要分析了老鼠簕、木榄、秋茄和银叶树根的不同部位的铁膜分布特征. 4 种红树植物根表铁膜含量变化趋势均为根尖 > 根中 > 根基 (图 4). 其中, 木榄根表不同部位铁膜含量差异显著 ($F_{\text{木榄}} = 10.79$, $P < 0.05$), 银叶树、秋茄和老鼠簕不同部位根表铁膜量差异不显著



不同小写字母表示不同红树植物间差异显著 ($P < 0.05$)；图中蓝线、黄线和红线分别表示一类、二类和三类海洋沉积物质量标准 (GB 18688-2002)

图 3 5 种典型红树植物根表铁膜及其重金属含量特征

Fig. 3 Concentrations of root surface iron plaques and their heavy metal contents in five typical species of mangrove seedlings

($F_{\text{银叶树}} = 4.98$ 、 $F_{\text{秋茄}} = 0.86$ 和 $F_{\text{老鼠簕}} = 2.99$, $P > 0.05$). 在根尖、根中和根基部位, 老鼠簕的根表铁膜含量均显著高于木榄、秋茄和银叶树 ($F_{\text{根尖}} = 8.10$ 、 $F_{\text{根中}} = 8.33$ 和 $F_{\text{根基}} = 14.85$, $P < 0.01$).

10 种重金属在 4 种红树林湿地植物根表铁膜中的分布均表现为: 根尖 > 根中 > 根基, 与根表铁膜的分布趋势基本一致 (除 Pb 在银叶树根表铁膜中的分布表现为根中居多, 图 5). 老鼠簕、木榄和秋茄根尖铁膜中的 Cd、Ni、Sb、Co、Cr、Cu 和 Zn

含量显著高于银叶树 ($P < 0.05$); 老鼠簕根尖中的 As、Pb 和 Mn 含量显著高于其他红树植物 ($P < 0.05$). 银叶树根铁膜中的 Cd、Ni、Co、Cr、As、Pb、Cu 含量显著低于其他红树植物 ($P < 0.05$). 银叶树根基铁膜中的 Ni、Co、Cr、As 含量显著低于其他红树植物 ($P < 0.05$); 银叶树和木榄根基铁膜中的 Cd、Pb、Cu、Zn 含量显著低于老鼠簕和秋茄 ($P < 0.05$). 不同植物根表铁膜中同种重金属的含量为: 老鼠簕/秋茄 > 木榄 > 银叶树 (图 5).

表 2 根表铁膜与其重金属富集间的关系¹⁾

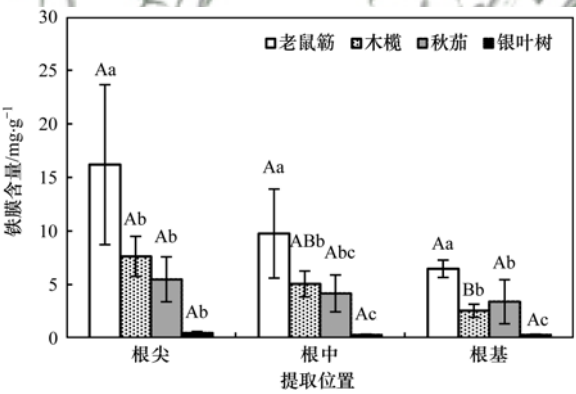
Table 2 Correlation analysis of root surface iron plaques and their heavy metal accumulation											
	IP-Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	As	Cd	Cr	Ni	Co	Sb
IP-Fe	1.00										
Mn	0.87 ***	1.00									
Pb	0.76 ***	0.66 ***	1.00								
Zn	-0.58 ***	-0.50 ***	-0.87 ***	1.00							
Cu	0.62 ***	0.59 ***	0.78 ***	-0.77 ***	1.00						
As	0.91 ***	0.84 ***	0.79 ***	-0.62 ***	0.76 ***	1.00					
Cd	0.66 ***	0.61 ***	0.90 ***	-0.86 **	0.89 ***	0.74 ***	1.00				
Cr	0.68 ***	0.64 ***	0.81 ***	-0.75 ***	0.97 ***	0.79 ***	0.91 ***	1.00			
Ni	0.67 ***	0.62 ***	0.86 ***	-0.81 ***	0.90 ***	0.76 ***	0.93 ***	0.95 ***	1.00		
Co	0.70 ***	0.66 ***	0.83 ***	-0.77 ***	0.97 ***	0.82 ***	0.92 ***	0.99 ***	0.95 ***	1.00	
Sb	0.63 ***	0.58 ***	0.76 ***	-0.64 ***	0.88 ***	0.75 ***	0.85 ***	0.93 ***	0.89 ***	0.92 ***	1.00

1) * * * 表示 $P < 0.001$ ；加粗字体表示极显著负相关

表 3 铁膜及其重金属含量与沉积物理化性质间的关系¹⁾

Table 3 Relationships between the heavy metal contents in iron plaques and sediment physicochemical properties											
	IP-Fe	Sb	As	Cd	Cr	Co	Cu	Pb	Mn	Ni	Zn
含水量/%	0.45	0.45	0.45	0.28	0.54 *	0.54 *	0.44	0.24	0.53 *	0.42	0.41
pH	-0.58 *	-0.24	-0.48	-0.31	-0.19	-0.19	-0.20	-0.40	-0.54 *	-0.15	-0.31
盐度/‰	0.46	0.43	0.43	0.343	0.54 *	0.52 *	0.46	0.31	0.49	0.42	0.42
总碳/%	0.06	0.10	0.14	-0.28	0.17	0.20	0.09	-0.32	0.20	-0.02	0.18

1) * 表示 $P < 0.05$ ；加粗字体表示显著相关



不同小写字母表示相同提取位置不同红树植物间根表铁膜含量差异显著，不同大写字母表示同种植物不同提取位置处根表铁膜含量差异显著 ($P < 0.05$)

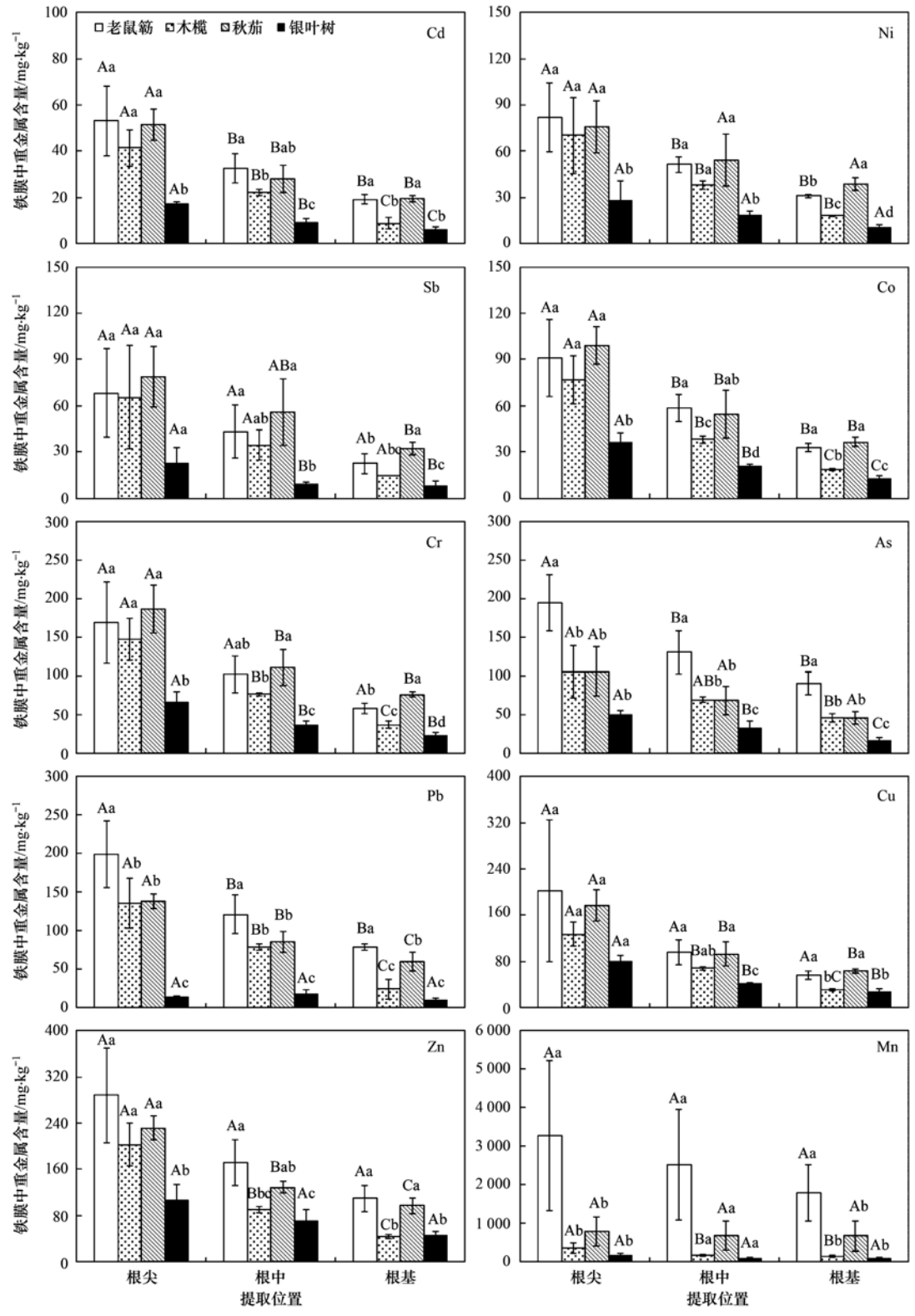
图 4 4 种红树植物根表铁膜分布特征

Fig. 4 Distributional characteristics of iron plaques on the root surfaces of four species of mangrove seedlings

3 讨论

近年来，对野外生境中湿地植物根表铁膜形成和积累特征的研究，主要集中于草本湿地植物和水稻等田间作物，根表铁膜的数量因植物种类和生境差异而变化很大^[2, 25, 26]。红树植物根表铁膜的研究

主要基于控制实验(表 4)，发现红树植物具有较强的形成根表铁膜的潜力^[18, 21]。因此，阐明在野外环境中，红树植物根表铁膜的含量及其分布特征显得十分迫切。本研究选择受人类活动影响较大的深圳湾红树林，调查了 5 种典型红树植物根表铁膜的含量，依次为老鼠簕/桐花树 > 木榄 > 秋茄 > 银叶树(图 3 和表 4)。其中，老鼠簕和木榄根表铁膜的含量介于 Pi 等^[21]曝污盆栽实验的研究结果之间；桐花树、秋茄和银叶树根表铁膜含量均低于 Cheng 等^[18]淹水盆栽实验的结果。在控制实验中，红树植物生成根表铁膜的能力依次为桐花树 > 秋茄 > 老鼠簕 > 银叶树 > 木榄(表 4)。可见，红树植物根表铁膜含量因生境条件变化明显。与其他淡水湿地草本植物相比，红树植物的根表铁膜含量较低(表 4)。这可能是因为，一方面相较于受周期性潮水浸淹的红树林，长期淹水的淡水湿地植物更有利于根表铁膜的形成^[18]；另一方面，湿地草本植物比红树植物拥有更发达的通气组织和根系渗氧能力^[18, 25]，有利于根表铁膜的形成。Cheng 等^[18]发现红树植物根孔隙度为 $5.9\% \pm 0.3\% \sim 25.2\% \pm 2.3\%$ ，小于常见湿地草本植物根孔隙度($9\% \sim 64\%$)^[25]。



不同小写字母表示相同提取位置不同植物间(类)金属含量差异显著,
不同大写字母表示同种植物不同提取位置处重金属含量差异显著($P < 0.05$)

图 5 4 种红树植物根表铁膜中重金属的分布特征

Fig. 5 Distributional characteristics of heavy metals on the root surface iron plaques of four species of mangrove seedlings

红树植物根表铁膜重金属来源于受污染的沉积物. 基于 Pb 同位素的研究发现珠江口及邻近海域

沉积物 Pb 主要来源于人类活动^[32]. 黄小平等^[33]利用 Fe 与重金属的相关性, 发现深圳湾沉积物中 Pb、

表 4 湿地植物根表铁膜含量及其重金属富集

Table 4 Contents of root surface iron plaques in wetland plants and their heavy metal enrichment

类别	植物名称	研究地	根表铁膜含量(以干重计) /g·kg ⁻¹	实验条件	文献
沉水植物	伊乐藻(<i>Elodea canadensis</i>)	德国	82.3 ± 11.2	控制实验(P 和 Fe)	[27]
	水稻(<i>Oryza sativa</i>)	中国长沙	0.6 ~ 1.6	盆栽	[4]
	香蒲(<i>Typha latifolia</i>)	加拿大	8.0 ~ 42.0	自然湿地	[28]
挺水植物	藨草(<i>Phalaris arundinacea</i>)	美国	15.0 ~ 59.0	尾矿附近湿地	[29]
	苔草(<i>Carex rostrata</i>)	加拿大	5.0 ~ 63.0	自然湿地	[28]
	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	加拿大	0.2 ~ 50.0	自然湿地	[28, 30]
红树植物	秋茄(<i>Kandelia obovata</i>)	中国广东	16.4 ± 1.8 ~ 22.5 ± 2.1	盆栽实验(淹水)	[18]
	无瓣海桑(<i>Sonneratia apetala</i>)	中国广东	23.3 ± 2.5 ~ 35.3 ± 3.1	同上	[18]
	桐花树(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	中国广东	15.3 ± 1.4 ~ 23.2 ± 1.8	同上	[18]
	红海榄(<i>Rhizophora stylosa</i>)	中国广东	7.2 ± 2.1 ~ 11.2 ± 0.8	同上	[18]
	银叶树(<i>Heritiera littoralis</i>)	中国广东	6.7 ± 1.1 ~ 8.2 ± 1.2	同上	[18]
	杨叶肖槿(<i>Thespesia populnea</i>)	中国广东	3.5 ± 0.4 ~ 5.2 ± 0.6	同上	[18]
	<i>Avicennia schaueriana</i>	巴西	1.9 ~ 12.6	红树林湿地	[31]
	拉关木(<i>Laguncularia racemosa</i>)	巴西	5.7 ~ 6.4	同上	[31]
	大红树(<i>Rhizophora mangle</i>)	巴西	6.7 ~ 7.7	同上	[31]
	木榄(<i>Bruguiera gymnorhiza</i>)	中国香港	0.7 ~ 7.5	盆栽实验(人工污水)	[21]
	海漆(<i>Excoecaria agallocha</i>)	中国香港	0.8 ~ 13.1	同上	[21]
	老鼠簕(<i>Acanthus ilicifolius</i>)	中国香港	0.9 ~ 12.0	同上	[21]
	老鼠簕(<i>A. ilicifolius</i>)	中国广东	10.8 ± 5.0	红树林湿地	本研究
	桐花树(<i>A. corniculatum</i>)	中国广东	10.6 ± 1.8	同上	本研究
	木榄(<i>B. gymnorhiza</i>)	中国广东	5.1 ± 2.5	同上	本研究
	秋茄(<i>K. obovata</i>)	中国广东	4.4 ± 1.1	同上	本研究
	银叶树(<i>H. littoralis</i>)	中国广东	0.4 ± 0.1	同上	本研究

Zn 和 Cu 与 Fe 相关性较差,说明与人为污染有关; Ni、Co 与 Fe 相关性良好,说明主要为自然来源. 时运红等^[34]发现深圳湾沉积物中重金属 Cu、Pb、Zn 和 As 的富集因子指数较高,说明这 4 种重金属主要来自人类活动; Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 之间存在明显的相关性,具有相似污染途径和迁移过程. 在深圳湾湾口和湾内的调查对比发现,沉积物中 Cr、Pb、Hg、Cd、Zn 和 Cu 可能主要来自于深圳和香港的工业废水和生活污水,而 As 与深圳湾内煤炭的运输相关^[35]. 王冠森等^[36]的研究也发现福田红树林 Cd 和 Zn 主要来源于工业废水, Pb 主要来源于城市污染排入. 综上,深圳湾福田红树林沉积物重金属污染属于陆源性污染(除 As 外),主要通过深圳河、凤塘河和新洲河等引入^[37]. Li 等^[38]的研究表明深圳湾红树林湿地沉积物中 Cd 含量多介于海洋沉积物质量标准的二类和三类^[39]之间; Cu、Cr 和 Pb 含量多介于一类和二类之间; Zn 含量多介于二类和三类之间. 本研究中,5 种红树植物根表铁膜中 Cd 含量均劣于三类;除银叶树铁膜中 Cr 和 Pb 含量优于一类标准、Cu 含量介于一类和二类标准之间外,其它 4 种红树植物铁膜 Pb、Cr 和 Cu 含量介于二类和三类之间, Pb 部分超过三类标准(老

鼠簕和/或桐花树); 5 种红树植物铁膜中 Zn 含量介于一类和二类之间,甚至优于一类(银叶树)(图 3). 可见,红树植物根表铁膜中重金属含量高于沉积物(除 Zn 外);同时,铁膜中其它重金属含量与铁膜含量呈极显著正相关(除 Zn 外,表 2),这与其他同类研究结果一致^[40, 41]. 说明红树植物根表铁膜对重金属具有一定的富集能力(除 Zn 外). 此外,张西科等^[42]发现水稻铁膜数量越多,其上 Zn 的数量也越多;但 Zheng 等^[43]发现水稻根表铁膜量越多,其上 Zn 的含量并未增加,主要归因于生物炭添加导致的孔隙水中 Zn 含量的下降. 本研究中,铁膜及其上 Zn 含量呈显著负相关关系,而且 Zn 含量与其它重金属含量间均呈极显著负相关(表 2),说明 Zn 可能与其它重金属存在一定竞争关系,有待进一步研究.

pH 主要通过影响铁的有效性而影响根表铁膜的形成. 当土壤 pH 值范围在 3 ~ 9 时, Fe³⁺ 的活性随 pH 增加而降低,这主要是由于高 pH 值能够促进形成 Fe(OH)₃^[44]. 然而,低 pH 有利于还原环境中 Fe²⁺ 的释放,为根表铁膜形成提供有效态铁离子,利于根表铁膜形成^[45]. 本研究中,红树林沉积物偏酸性,且红树植物根表铁膜含量与 pH 值呈显

著负相关(表3). 说明相比于 Fe^{3+} 的固定, 红树林湿地中有效态铁离子的供应, 更有利于红树植物根表铁膜的形成. 此外, pH 值也会影响铁膜中重金属的含量^[46]. Batty 等^[46]的研究表明, 相比于 pH = 3.5 的处理组, pH = 6 时芦苇根表铁膜富集更多的 Mn 和 Cu. 本研究中, 红树植物根表铁膜 Mn 含量与沉积物 pH 值呈显著负相关(表3), 这与铁膜含量与 pH 的关系一致; 同时, 沉积物 pH 总体偏酸性且变化较小($5.99 \pm 0.25 \sim 6.72 \pm 0.21$, 表1); 此外, 铁膜及其上 Mn 含量呈极显著正相关(表2). 因此, 铁膜 Mn 含量主要受根表铁膜含量影响. 有研究发现淹水有利于植物根表铁膜的形成^[18, 45]. 本研究中根表铁膜的形成与沉积物含水量有正相关趋势, 能够促进根表铁膜中重金属的积累. 根表铁膜中重金属含量与沉积物盐度呈显著正相关(表3), 而且沉积物含水量与盐度呈显著正相关, 说明红树林湿地含水量可在一定程度上反映海水浸淹情况, 盐度越高, 受海水浸淹越充分.

本研究中, 4 种红树植物根表铁膜总量以及在根中分布均为老鼠簕最高, 木榄和秋茄次之, 银叶树最小(图4). 程皓^[19]系统调查过 8 种红树植物幼苗根的通透性及渗氧情况, 发现红树植物幼苗根部渗氧率为: 无瓣海桑、老鼠簕和桐花树(前滩) > 红海榄、秋茄和木榄(中滩) > 银叶树和杨叶肖槿(后滩), 说明根部渗氧率越高, 铁膜形成量越多. Wang 等^[47]发现芦苇越接近根基部铁膜数量越多; 而 Liu 等^[48]发现, 在水稻根表铁膜在根尖处含量最高, 根基部最低, 这与本研究结果一致(图4), 即根表铁膜分布特征为: 根尖 > 根中 > 根基. 这可能是由于从根尖到根基部, 红树植物幼苗根的渗氧方式均表现为典型的“完全屏障”方式, 即供试植物在基部形成渗氧屏障, 限制了根基部的渗氧, 从而保证了更多的氧在根尖部渗出^[19]. Wu 等^[24]在水稻根表铁膜与 ROL 关系的研究也发现: 水稻根表铁膜在根尖处最多, 并且随着距根尖距离的增加而减小, 与 ROL 的空间趋势一致. 可见, 红树植物根系渗氧会影响根表铁膜形成及其在根表的分布.

4 结论

(1) 深圳湾红树林 5 种典型红树植物根表铁膜含量为: 老鼠簕 > 桐花树 > 木榄 > 秋茄 > 银叶树.

(2) 根表铁膜对沉积物中重金属具有一定的富集作用, 并且因植物种类和重金属种类而异, 根表铁膜含量越高的植物, 其铁膜富集的重金属含量越

高; 沉积物中含量越高的重金属, 其在铁膜中的含量也越高, 但铁膜中 Zn 的积累可能与其它金属元素存在竞争关系.

(3) 沉积物理化性质会影响根表铁膜的含量及其对重金属的富集. 其中, 沉积物 pH 显著影响根表铁膜的含量及其对 Mn 的积累; 沉积物含水量和盐度与铁膜中重金属 Cr 和 Co 含量呈正相关.

(4) 红树植物根表铁膜及其重金属含量的分布特征均为根尖 > 根中 > 根基.

参考文献:

- [1] Khan N, Seshadri B, Bolan N, *et al.* Root iron plaque on wetland plants as a dynamic pool of nutrients and contaminants [J]. *Advances in Agronomy*, 2016, **138**: 1-96.
- [2] 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 C Y, Chen C L, Gong X F, *et al.* Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- [3] Tripathi R D, Tripathi P, Dwivedi S, *et al.* Roles for root iron plaque in sequestration and uptake of heavy metals and metalloids in aquatic and wetland plants [J]. *Metallomics*, 2014, **6**(10): 1789-1800.
- [4] Wu C, Zou Q, Xue S G, *et al.* The effect of silicon on iron plaque formation and arsenic accumulation in rice genotypes with different radial oxygen loss (ROL) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 27-33.
- [5] Syu C H, Lee C H, Jiang P Y, *et al.* Comparison of As sequestration in iron plaque and uptake by different genotypes of rice plants grown in As-contaminated paddy soils [J]. *Plant and Soil*, 2014, **374**(1-2): 411-422.
- [6] Seyfferth A L, Webb S M, Andrews J C, *et al.* Arsenic localization, speciation, and co-occurrence with iron on rice (*Oryza sativa* L.) roots having variable Fe coatings [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(21): 8108-8113.
- [7] 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]. 南昌: 南昌大学, 2015. 66-74.
Liu C Y. Study on the formation of iron plaque on the root surfaces of wetland plants from Poyang Lake and its translocation mechanism on lead [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. 66-74.
- [8] Yamaguchi N, Ohkura T, Takahashi Y, *et al.* Arsenic distribution and speciation near rice roots influenced by iron plaques and redox conditions of the soil matrix [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1549-1556.
- [9] 刘晋嫣, 张卫国, 董艳, 等. 长江口潮滩芦苇根表铁膜磁性特征及其环境意义 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3354-3362.
Liu J Y, Zhang W G, Dong Y, *et al.* Magnetic properties of iron plaque on roots of *Phragmites australis* in tidal flat of the Yangtze Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3354-3362.
- [10] 杨世杰, 唐冰培, 王代长, 等. 硫素对水稻吸收砷的生物有

- 效性及其在土壤中形态影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3553-3563.
- Yang S J, Tang B P, Wang D C, *et al.* Influence of sulfur on the bioavailability of arsenic uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and its speciation in soil[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3553-3563.
- [11] 马微, 鲍艳宇. 根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2259-2265.
- Ma W, Bao Y Y. Effect of root iron plaque on norfloxacin uptake by rice [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2259-2265.
- [12] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.). Zinc uptake by Fe-deficient rice[J]. Plant and Soil, 1998, **202**(1): 33-39.
- [13] Okkenhaug G, Zhu Y G, He J W, *et al.* Antimony (Sb) and arsenic (As) in Sb mining impacted paddy soil from Xikuangshan, China: differences in mechanisms controlling soil sequestration and uptake in rice[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(6): 3155-3162.
- [14] 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]. Annals of Botany, 2002, **89**(4): 443-449.
- [15] Zhong S Q, Wu Y P, Xu J M. Phosphorus utilization and microbial community in response to lead/iron addition to a waterlogged soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(10): 1415-1423.
- [16] 刘侯俊, 张俊伶, 韩晓日, 等. 根表铁膜对元素吸收的效应及其影响因素[J]. 土壤, 2009, **41**(3): 335-343.
- Liu H J, Zhang J L, Han X R, *et al.* Influences of iron plaque on element uptake by plants and its affecting factors[J]. Soils, 2009, **41**(3): 335-343.
- [17] Bravin M N, Travassac F, Le Floch M, *et al.* Oxygen input controls the spatial and temporal dynamics of arsenic at the surface of a flooded paddy soil and in the rhizosphere of lowland rice (*Oryza sativa* L.): a microcosm study[J]. Plant and Soil, 2008, **312**(1-2): 207-218.
- [18] Cheng H, Wang Y S, Fei J, *et al.* Differences in root aeration, iron plaque formation and waterlogging tolerance in six mangroves along a continues tidal gradient[J]. Ecotoxicology, 2015, **24**(7-8): 1659-1667.
- [19] 程皓. 红树植物根的通透性、渗氧在其重金属 Pb、Zn、Cu 耐性和净化效应中的作用及机理[D]. 广州: 中山大学, 2010. 34-64.
- Cheng H. The role of root permeability and Radial Oxygen Loss (ROL) on tolerance and purification of heavy metals (Pb, Zn, Cu) by mangrove plants [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2010. 34-64.
- [20] Pi N, Tam N F Y, Wong M H. Effects of wastewater discharge on formation of Fe plaque on root surface and radial oxygen loss of mangrove roots[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(2): 381-387.
- [21] Pi N, Tam N F Y, 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**(5-12): 402-411.
- [22] 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): 1254-1257.
- [23] Arrivabene H P, Campos C Q, da Costa Souza I, *et al.* Differential bioaccumulation and translocation patterns in three mangrove plants experimentally exposed to iron. Consequences for environmental sensing[J]. Environmental Pollution, 2016, **215**: 302-313.
- [24] Wu C, Ye Z H, 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): 2961-2970.
- [25] Li H, Ye Z H, Wei Z J, *et al.* Root porosity and radial oxygen loss related to arsenic tolerance and uptake in wetland plants[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 30-37.
- [26] Pereira E G, Oliva M A, Siqueira-Silva A I, *et al.* Tropical rice cultivars from lowland and upland cropping systems differ in iron plaque formation[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, **37**(9): 1373-1394.
- [27] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2003, **506**(1-3): 635-640.
- [28] Crowder A A, Macfie S M. Seasonal deposition of ferric hydroxide plaque on roots of wetland plants [J]. Canadian Journal of Botany, 1986, **64**(9): 2120-2124.
- [29] Hansel C M, La Force M J, Fendorf S, *et al.* Spatial and temporal association of As and Fe species on aquatic plant roots [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(9): 1988-1994.
- [30] St-Cyr L, Crowder A A. Factors affecting iron plaque on the roots of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel[J]. Plant and Soil, 1989, **116**(1): 85-93.
- [31] Machado W, Gueiros B B, Lisboa-Filho S D, *et al.* Trace metals in mangrove seedlings: role of iron plaque formation [J]. Wetlands Ecology and Management, 2005, **13**(2): 199-206.
- [32] Ip C C M, Li X D, Zhang G, *et al.* Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 311-323.
- [33] 黄小平, 李向东, 岳维忠, 等. 深圳湾沉积物中重金属污染累积过程[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 144-149.
- Huang X P, Li X D, Yue W Z, *et al.* Accumulation of heavy metals in the sediments of Shenzhen Bay, South China [J]. Environmental Science, 2003, **24**(4): 144-149.
- [34] 时运红, 李明远, 李波, 等. 深圳湾沉积物重金属污染时空分布特征[J]. 海洋环境科学, 2017, **36**(2): 186-191, 208.
- Shi Y H, Li M Y, Li B, *et al.* Spatial and temporal distribution of heavy metals in the sediment of Shenzhen Bay [J]. Marine Environmental Science, 2017, **36**(2): 186-191, 208.
- [35] 唐得昊, 刘兴健, 邹欣庆. 海湾表层沉积物重金属污染与潜在生态危害评价——以深圳湾为例[J]. 环境化学, 2014, **33**(8): 1294-1300.
- Tang D H, Liu X J, Zou X Q. Heavy metals pollution and their potential ecological risk assessment in the surface sediment from Shenzhen Bay [J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(8): 1294-1300.
- [36] 王冠森, 柴民伟, 栾胜基. 深圳典型红树林湿地重金属累积特征比较研究[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(5): 862-870.
- Wang G S, Chai M W, Luan S J. A comparative study of heavy

- metal accumulation characteristics in typical mangrove wetlands of Shenzhen, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(5): 862-870.
- [37] 邓利, 张慧敏, 劳大荣, 等. 福田红树林自然保护区沉积物重金属污染现状及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2014, **33**(6): 947-953.
- Deng L, Zhang H M, Lao D R, *et al.* Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Futian Mangrove Nature Reserve [J]. Marine Environmental Science, 2014, **33**(6): 947-953.
- [38] Li R Y, Li R L, Chai M W, *et al.* Heavy metal contamination and ecological risk in Futian mangrove forest sediment in Shenzhen Bay, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **101**(1): 448-456.
- [39] GB 18668-2002, 海洋沉积物质量[S].
- [40] Zhong S Q, Shi J C, Xu J M. Influence of iron plaque on accumulation of lead by yellow flag (*Iris pseudacorus* L.) grown in artificial Pb-contaminated soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(5): 964-970.
- [41] 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.
- Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al.* Influence of iron plaque on Pb uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, **9**(1): 35-41.
- [42] 张西科, 张福锁, 毛达如. 根表铁氧化物胶膜对水稻吸收 Zn 的影响[J]. 应用生态学报, 1996, **7**(3): 262-266.
- Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of root iron plaque on zinc uptake by rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, **7**(3): 262-266.
- [43] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. Chemosphere, 2012, **89**(7): 856-862.
- [44] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soil and plants (3rd ed.) [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 286-366.
- [45] Syu C H, Jiang P Y, Huang H H, *et al.* Arsenic sequestration in iron plaque and its effect on As uptake by rice plants grown in paddy soils with high contents of As, iron oxides, and organic matter [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, **59**(3): 463-471.
- [46] 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]. Annals of Botany, 2000, **86**(3): 647-653.
- [47] Wang T G, 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.
- [48] Liu W J, Zhu Y G, Hu Y, *et al.* Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(18): 5730-5736.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)