

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

丛枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水

窦文清¹, 何皓^{2*}, 宋文萍¹, 王曙光^{3*}, 戴东伟³

(1. 中煤鄂尔多斯能源化工有限公司, 鄂尔多斯 017300; 2. 环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012; 3. 北京化工大学化工学院环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要: 针对缺乏经济有效的中低盐废水脱盐技术问题, 本试验利用丛枝菌根 (AM) 真菌增强植物抗盐胁迫能力, 搭建 AM 强化型生态浮床, 既探索新的中低盐废水处理技术, 又解决普通浮床植物耐盐胁迫能力差、除盐效率低的问题。结果表明, AM 真菌 (*Glomus etunicatum*) 与浮床植物美人蕉 (*Canna indica* L.) 建立了良好的共生关系, 且侵染不受盐胁迫的影响。接种 AM 真菌提高了生态浮床处理含盐废水的能力, 21 d 内 TDS、COD、TN 和 TP 的去除率分别达到了 36.1%、74.4%、57.6% 和 59.1%, 比未接种 AM 真菌的普通生态浮床分别提高了 79.2%、36.4%、32.7% 和 37.6%。从具体盐离子来看, 21 d 内水体中 Na、K、Ca 和 Mg 离子的去除率分别达到了 34.4%、61.3%、57.4% 和 51.9%, 相比未接种 AM 真菌的普通生态浮床分别提高了 11.4%、37.1%、18.3% 和 24.6%。从植物对盐的吸收来看, AM 的存在促进了美人蕉对 Na 离子的吸收和向地上部的转移, 这可能是 AM 强化型生态浮床功能得到提升的主要原因之一。本研究表明 AM 真菌可增强生态浮床修复水体污染的能力, 提高脱盐效率。

关键词: 生态浮床; AM 真菌; 含盐废水; 溶解性总盐 (TDS); 盐离子

中图分类号: X171; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0761-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811028

Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza

DOU Wen-qing¹, HE Hao^{2*}, SONG Wen-ping¹, WANG Shu-guang^{3*}, DAI Dong-wei³

(1. Ordos Energy Chemical Co., Ltd., China National Coal Group Corp., Ordos 017300, China; 2. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: For the problem that few technologies can be directly used to treat wastewater with middle and low salt, in this study, arbuscular mycorrhizal (AM) fungi were used to enhance the tolerance of wetland plants to salt stress. Ecological floating beds (EFBs) enhanced with AM fungi were constructed to explore a new technology as well as to treat wastewater with low and medium salt content, but also to overcome the low tolerance to salt stress and low salt removal by EFB plants. Results showed that canna plants (*Canna indica* L.) were well colonized by AM fungi (*Glomus etunicatum*) and the mycorrhizal colonization rate was not affected by salt stress. Inoculation with AM fungi enhanced the ability of the EFBs to treat saline wastewater. After treatment by EFB with AM for 21 d, removal rates of total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were 36.1%, 74.4%, 57.6%, and 59.1%, respectively, which were higher by 79.2%, 36.4%, 32.7%, and 37.6% over those with treatment by EFB without AM, respectively. Removal rates of Na, K, Ca, and Mg were 34.4%, 61.3%, 57.4%, and 51.9% after 21 d of treatment by EFB with AM, which were higher by 11.4%, 37.1%, 18.3%, and 24.6%, respectively, than removal rates with treatment by EFB without AM, respectively. Plant sample analysis showed that AM increased the Na uptake of plants and Na transportation from root to shoot, and this may be the reason that AM enhanced the ability of the EFBs to treat saline wastewater. This study indicated that AM fungi can be used to improve the ability of EFB to remedy water pollution and increase salt removal efficiency.

Key words: ecological floating bed; arbuscular mycorrhizal (AM) fungi; saline wastewater; total dissolved solids (TDS); salt ions

含盐废水是常见的工业废水之一, 主要来自煤化工、制革、印染和油品炼制等行业^[1~3]。虽然盐分不像重金属、有机污染物对环境危害那么大, 但含盐废水过多排放还是对环境造成了明显影响。调查表明, 我国部分湖水、河水的电导率近年来都呈明显的上升趋势, 例如, 由于工业和生活污水排放导致太湖从碳酸盐钙型水转化成氯化盐钠型水^[4], 山东南四湖水体电导率在 2006~2012 年的 6 年间增加了 88%^[5]。在淡水资源日趋紧张的背景下, 这些变化无疑会影响饮用水安全、淡水养殖、农业灌溉等, 盐碱水灌溉越来越多就是具体表现之一^[6]。

控制含盐废水的排放, 一要加快废水排放标准中涉盐指标的制定, 二要探索有效的废水脱盐技术。目前废水排放标准涉盐指标的制定已取得进展, 如国标《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962-2015)、行业标准《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010)、北京市地方标准《水污染物综合排放标准》(DB11/307-2013) 和上海市地方标

收稿日期: 2018-11-04; 修订日期: 2018-12-17

作者简介: 窦文清 (1965~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为煤化工废水处理, E-mail: 1983873632@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1983873632@qq.com; shgwwang2013@126.com

准《污水综合排放标准》(DB31/1999-2009)中都对溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)做了规定。脱盐技术对含盐废水排放控制也至关重要,但目前可选的有效技术非常有限。总体上,含盐废水处理技术可分为两大类,一类是仅对含盐废水的非盐目标物进行处理,如 COD、总氮、总磷和有机污染物等,但并不处理盐分^[7,8],所以达标排放时盐浓度仍可能很高,这也是地表水含盐量持续增加的主要原因之一;另一类是将盐和其他污染物一并处理,降低废水盐浓度和污染物浓度^[9],这是今后应该重点发展的技术。目前最常用的脱盐技术是蒸发塘技术、“双膜”技术(超滤或纳滤膜+反渗透膜)+结晶技术,随着国家对蒸发塘技术使用的限制,“双膜”技术得到快速发展,并在煤化工、石化等行业应用较多。虽然“双膜”技术脱盐效果好,但投资、运行、维护成本非常高,仅适用于高浓盐水(TDS > 10 000 mg·L⁻¹),而且结晶盐目前还只能按“危险废物”处理,所以,该技术不适用于中小企业或中低盐废水的处理。也有些企业尝试应用电渗析等技术,但由于缺点明显还未得到企业的认可。所以,探索经济有效的中低盐废水脱盐技术仍是含盐废水处理必须要面对的问题。

生态浮床技术具有不占用土地面积、兼具水体净化与景观美化双重功能、环境友好、易管理和经济性好等特点,在地表水、城市污水、废水等处理中应用越来越多,对重金属、营养盐去除显示出较好效果^[10,11]。基于生态浮床技术的作用原理,其在废水脱盐方面可能发挥良好作用,在土地资源不紧张的区域有很好的应用前景,但目前这方面的探索还比较少。此外,普通浮床植物通常耐污染能力差、吸收污染物效率低、废水中长势差,从而影响了生态浮床的功能,一定程度上限制了其应用。

众多研究表明,丛枝菌根(AM)真菌能增强植物的抗盐胁迫能力,作用机制包括增加植物养分吸收^[12]、改善根际土壤条件^[13]、增强植物光合作用^[14]、促进相容性溶质积累^[15]和增强抗氧化酶活性^[16],所以AM真菌被认为能生物改善盐碱地土壤并在应用上获得进展^[17]。但AM真菌在生态浮床上的应用非常少,这主要与之前AM真菌一直被认为只存在于陆生环境中有关,近几年才有不少学者对湿生环境AM真菌种群结构和功能进行了探索。如李世阳^[18]发现接种AM真菌能明显促进芦苇对废水中高锰酸盐指数和苯酚的降解。因此,本研究拟将AM真菌接种在生态浮床植物上,搭建AM真菌强化型生态浮床,处理煤化工模拟含盐废水。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试植物

选择美人蕉(*Canna indica*)、旱伞草(*Cyperus alternifolius*)为供试植物。美人蕉是最常见景观植物,根系发达;旱伞草根系发达,外观漂亮。每个浮床均由这2种植物组成。购买植物幼苗后,保留3条根系,其余剪去,在灭菌土壤中生长一个月,再从中挑出大小接近的植物,一半接种AM真菌,一半接种灭菌AM菌剂作为对照,接种时间2个月。

1.1.2 AM菌剂

根据课题组前期实验结果,选用耐盐胁迫能力较强的幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)作为实验用AM真菌。菌剂是以灭菌河沙为基质、三叶草(*Trifolium repens*)为宿主植物扩繁而成的混合体,包括孢子、菌丝和被侵染根段,三叶草菌根侵染率78%,菌剂孢子密度820个·g⁻¹。菌剂接种量为植物生长基质的10%,将菌剂与土壤完全混合均匀,对照处理接种等量的灭菌AM菌剂,浮床试验开始前2个月接种AM真菌。

1.1.3 含盐废水

含盐模拟废水由内蒙古某煤化工企业获得的结晶盐复配而成,结晶盐主要成分为NaCl和Na₂SO₄,有少量钙、镁盐。根据水池中水的体积,配制成TDS为6 000 mg·L⁻¹的含盐废水。由于结晶盐中氮磷浓度较低,为了有利于植物生长,含盐废水中加入了一定量的学校生活污水。最终水体的参数为:pH 7.0, TDS 6 000 mg·L⁻¹、COD 380 mg·L⁻¹、TN 14 mg·L⁻¹和TP 4.5 mg·L⁻¹。每个水池水量800 L。

1.2 AM真菌强化型生态浮床的搭建及运行

生态浮床长×宽=2.0 m×1.0 m,水深0.4 m(图1)。两组生态浮床的植株大小保持一致,将植物固定在直径20 cm的镂空花盆中,该花盆固定在PVC浮床框上。为避免植物在花盆中倾斜,在镂空花盆中放入2袋装满河沙的自封袋固定植物。两种植物共50株,美人蕉与旱伞草数量比为4:1,植物密度为25株·m⁻²,浮床覆盖率约为80%。浮床搭建完成后放入含盐废水池中。通过蠕动泵实现废水循环,48 h循环一遍,每天补自来水至固定水位线。生态浮床放入水池稳定3 d后开始第一次取样,每天取3次样混合成一个样品,共运行21 d,最后一次(11月1日)采集水样后采集植物样品,测植物体内盐离子含量。生态浮床在室外露天环境中运行,试验期间环境条件为:白天28/22℃,平均气温25℃;夜间16/11℃,平均气温14℃。

1.3 测试指标及方法

新鲜根系用曲利苯蓝染色-交叉划线法测定菌根侵染率^[19]. 植物体内盐离子含量采用硫酸-高氯酸消解 ICP-OES 测定方法^[20]. 水质指标分析参见文献^[21]; TDS 采用重量法, COD 采用重铬酸钾法, TN

采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法, 阳离子含量采用 ICP-OES 法.

1.4 统计方法

所有数据均用 SPSS13.0 软件的 Duncan 分析进行显著性检验, $P < 0.05$ 表示差异显著.



图1 生态浮床示意

Fig. 1 Ecological bed used in this study

2 结果与分析

2.1 植物菌根侵染率的变化

无论是否接种 AM 真菌, 在旱伞草根系上均未观察到 AM 结构, 表明旱伞草未被 AM 真菌侵染. 在未接种美人蕉植物根系上, 虽然观察到少量疑似 AM 菌丝, 但侵染率为零. 在接种处理中, 美人蕉的菌根侵染率变化如表 1 所示. 可以看出, AM 真菌与美人蕉建立了良好的共生关系, 侵染率在 40% 左右, 即使在盐胁迫下菌根侵染率也没明显变化 ($P > 0.05$), 表明该 AM 真菌有一定的耐盐胁迫能力.

表1 盐胁迫对 AM 真菌侵染美人蕉的影响

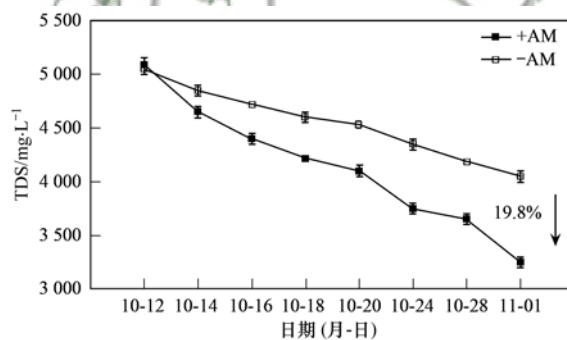
Table 1 Effects of salt stress on mycorrhizal colonization rate in canna plants

盐浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	处理时间/d	侵染率/%
5 000	0	40a
3 800	10	43a
3 200	21	42a

2.2 含盐废水 TDS 的变化

溶解性总固体(TDS)原指溶于水中的离子、分子和化合物总量, 但在实际测试过程中一般会忽略溶解性分子态无机物和有机物, 将 TDS 直接等同于水中含盐量, 作为评价水体总盐含量的指标. 从图 2 可以看到, 随着处理时间的延长, AM 强化型生态浮床和普通生态浮床对废水 TDS 的去除量均持续增加. 第 21 d 时, 普通生态浮床处理中废水的 TDS 浓度为 $4\,050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 20.1%, 而 AM 强化

型生态浮床处理中的废水 TDS 浓度为 $3\,250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 36.1%, TDS 含量比普通生态浮床下降了 19.8%, 去除率提高了 79.2%, 表明 AM 对生态浮床的脱盐能力和效率都有较大提高.



+ AM 表示接种 AM 真菌, - AM 表示未接种 AM 真菌对照, 下同

图2 生态浮床处理下含盐废水中溶解性总盐(TDS)浓度的变化

Fig. 2 Changes in TDS concentrations of saline wastewater under the treatment of EFB

2.3 含盐废水 COD 的变化

从图 3 可以看出, 随着生态浮床处理时间的延长, 废水 COD 浓度持续下降. 普通生态浮床处理 21 d 时 COD 浓度为 $159 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 54.5%; AM 强化型生态浮床处理 21 d 时 COD 浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 74.4%. 接种 AM 真菌后, COD 去除率提高了 36.4%, 表明 AM 增强了生态浮床去除废水 COD 的能力和效率.

2.4 含盐废水总氮(TN)的变化

从图 4 可以看出, 接种 AM 真菌后生态浮床的脱氮能力明显高于普通生态浮床. 21 d 时普通生态

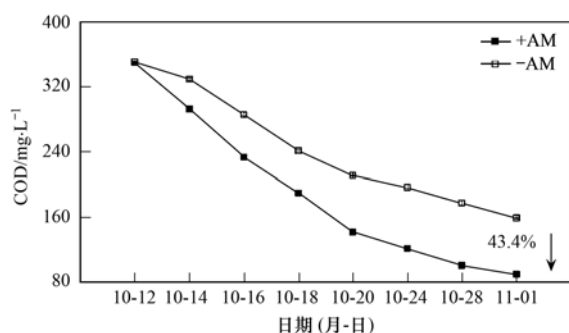


图3 生态浮床处理下含盐废水中 COD 浓度的变化

Fig. 3 Changes in COD concentrations of saline wastewater under EFB treatment

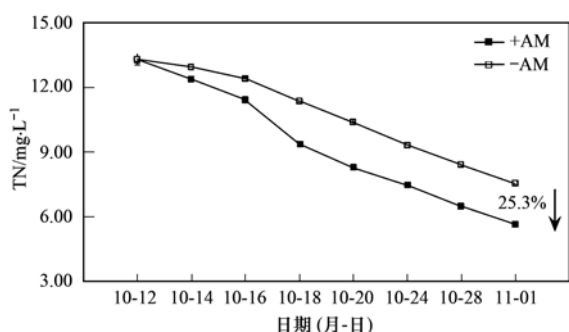


图4 生态浮床处理下含盐废水中总氮 (TN) 浓度的变化

Fig. 4 Changes in TN concentrations of saline wastewater under EFB treatment

浮床对 TN 的去除率为 43.4%，AM 强化型生态浮床对 TN 的去除率为 57.6%，去除率提高了 32.7%。

2.5 含盐废水总磷 (TP) 的变化

从图 5 可以看到，废水 TP 在两组生态浮床作用下都明显下降，但下降幅度显著不同。AM 强化型生态浮床处理 21 d 时废水 TP 的去除率为 59.07%，而普通生态浮床在 21 d 时的 TP 去除率仅为 36.89%，比前者低了 37.6%，表明 AM 提高了生态浮床的脱磷能力和效率。

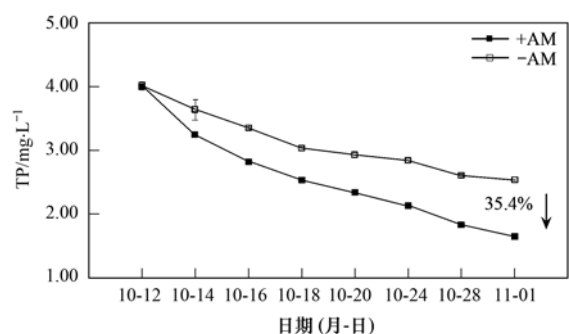


图5 生态浮床处理下含盐废水中总磷 (TP) 浓度的变化

Fig. 5 Changes in TP concentrations of saline wastewater under EFB treatment

2.6 废水盐离子浓度变化

对含盐废水的除盐处理来说，首要目标是降低

水体中盐离子浓度。前期的分析结果显示，废水中主要阳性盐离子为 Na、Ca、Mg 和 K。从图 6 可以看出，AM 强化型生态浮床对 Na、Ca、Mg 和 K 这 4 种离子的去除率明显高于普通生态浮床，提高幅度在 10% ~ 40% 之间，其中对 K 离子去除效果促进作用更为明显，对 Na 离子促进作用最小。这可能与 AM 促进植物吸收 K^+ 、 Ca^{2+} ，增强植物抗耐 Na^+ 胁迫有关。

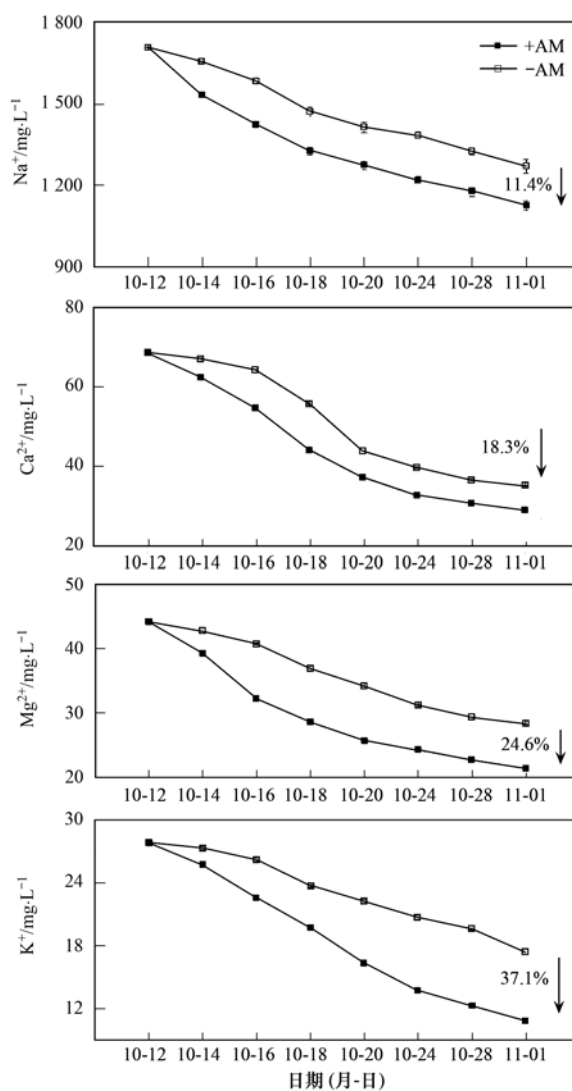


图6 生态浮床处理下含盐废水中盐离子浓度的变化

Fig. 6 Changes in salt ion concentrations of saline wastewater under EFB treatment

2.7 美人蕉 Na 离子含量的变化

从图 7 可以看出，接种 AM 真菌后美人蕉对 Na^+ 的吸收明显增加。试验后期未接种美人蕉对 Na^+ 的吸收趋缓，而接种 AM 真菌的美人蕉仍显示出较强的吸收能力，导致两者 Na^+ 含量差距越来越大。AM 美人蕉根系和茎部的 Na^+ 含量比不接种对照最大分别提高 30.6% 和 46.5%。AM 的存在促进了植物根部 Na^+ 向茎部的转移，茎/根 Na^+ 含量比

最大增加 87.5%, 很大程度上减轻了根部 Na^+ 的胁迫影响。

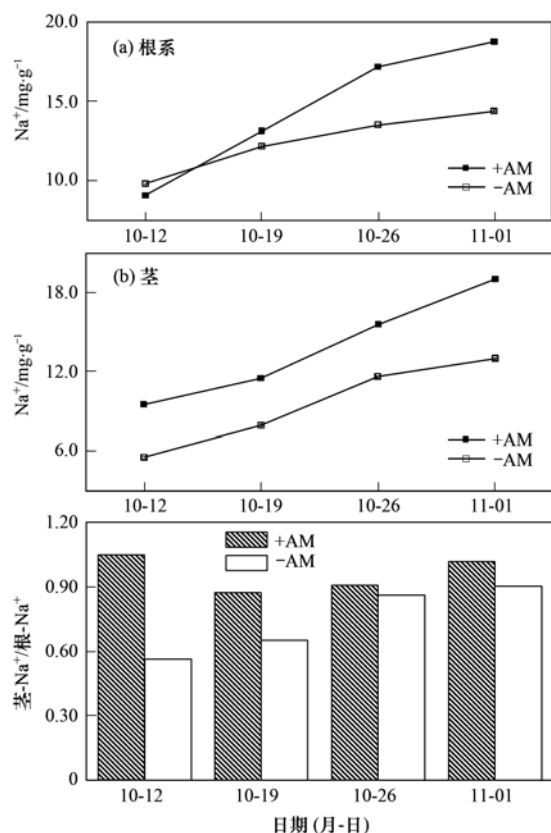


图7 AM对浮床植物吸收和转移 Na^+ 的影响

Fig. 7 Effects of AM inoculation on Na^+ uptake and transportation in canna plants

3 讨论

3.1 浮床植物菌根侵染率的变化

侵染率是评价 AM 真菌与宿主植物建立共生关系程度的主要指标, 植物从 AM 共生体的受益程度理论上与侵染率高低呈正相关^[22]. 本研究中, 在旱伞草上没有观察到 AM 结构, 这与预期有差异. 旱伞草属须根系植物, 根系发达密集, 外型漂亮, 因此本试验选择了旱伞草作为供试植物. 之前查阅了大量湿生植物的相关文献, 没发现旱伞草不能形成 AM 的报道. 虽然本研究中没在旱伞草上观察到 AM 结构, 但要想确认旱伞草是否属于非 AM 植物, 还有待做更详细的实验和文献调研, 特别是关注不同 AM 真菌对旱伞草的侵染可能性方面. 美人蕉与 AM 真菌建立了很好的共生关系, 且侵染率不受盐胁迫的影响, 表明该菌有一定的耐盐胁迫能力. 有研究表明, 分离自盐碱环境中的 AM 真菌对盐碱胁迫的耐受能力比分离自普通环境中的 AM 真菌高. 本研究中, AM 真菌被应用之前已通过盆栽试验进行了长时间的耐盐胁迫驯化, 所以其对盐胁迫不敏感可能与此有关. 本研究结果与 Hartmond 等^[23] 的

研究结果类似, 他们发现 $150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 胁迫的存在没有降低 AM 真菌对柑橘苗的侵染率. 但与 Aliasgharzadeh 等^[24] 结果相反, 他们发现根系侵染率随着土壤盐度 (EC 为 $7.3 \sim 92.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 的增加而显著下降, Hashem 等^[25] 和 Shekoofeh 等^[26] 也发现类似现象. 这些差异可能与植物种类、AM 真菌耐盐能力和盐含量高低等都有关系^[17, 27].

3.2 废水水质变化

接种 AM 真菌后, 生态浮床处理废水的能力明显高于普通浮床, 这可能主要得益于 AM 真菌侵染使植物发生的生理生化变化, 如促进色素、脯氨酸、茉莉酸、水杨酸的合成, 提高抗氧化酶活性, 促进植物对主要矿质元素 (Na 除外) 的吸收, 叶面积的增加等^[25, 26, 28]. 此外, 不管植物是否遭受环境胁迫, AM 真菌侵染均能增强植物的光合作用^[29, 30], 这将有助于植物对氮磷等养分的吸收. 这些变化促进了植物生长, 提高了植物的抗盐胁迫能力, 为生态浮床除盐提供了保障. 虽然部分上述原理来自陆生植物, 而本研究是水生环境, 氮磷移动性要远高于陆生环境, 但由于本研究中水体的氮磷浓度低于植物生长所需要的浓度, 所以 AM 对促进植物吸收氮磷养分仍能起到明显的作用. 这是因为 AM 结构如外生菌丝比植物根系对氮磷有更强的亲和力^[31], 能吸收水生植物吸收困难的氮磷元素. 本研究中, COD 主要来自配水用的生活污水, 该水取自学生宿舍楼污水口, 主要是厕所冲洗水、洗涤水和洗浴室, 以氮磷和有机物为主. 当水体氮磷浓度降低后, 有机物也被水体微生物降解, 因此 COD 迅速下降. 但造成两者 COD 下降速率不同的主要原因应该是 AM 导致的氮磷下降, 其次是 AM 使植物根际吸附有更多的微生物, 所以在降解有机物方面速度可能更快. 但遗憾的是, 在本研究中没有测试两组生态浮床水体和根际 (表) 微生物的差异变化. 在后面的研究中, 将对此予以重点关注.

本研究中的含盐废水属于典型的 Na 离子型废水, 其它离子如 Ca 、 Mg 、 K 等虽有检出但浓度较低, 所以 Na 离子是主要处理目标. 对盐胁迫来说, Na 也是伤害浮床植物的首要离子, 钠离子不仅能改变细胞膜结构与功能导致细胞电解质泄漏, 而且还与 K 竞争吸附位点, 影响植物对 K 的吸收, 干扰与 K 有关的生理过程, 如气孔开放、基因转录、酶功能等^[32, 33]. 有研究表明, AM 改变植物耐 Na 离子胁迫能力的途径主要是增加对 K 离子的吸收, 降低 Na 离子向地上部的转移^[34, 35]. Augé 等^[36] 通过 meta-analysis 对 107 篇 AM 与 NaCl 胁迫相关的文章进行分析, 发现在盐胁迫环境中 AM 使植物根系和

茎 K 离子浓度分别增加了 47% 和 42%, K/Na 分别增加了 47% 和 58%。但在本研究中, AM 植物地上/地下 Na 浓度都增加了, 说明 AM 在增加植物吸收其他矿质元素的同时, 可能也相应地增加了植物对 Na 离子的吸收和转移, 具体机制还有待做进一步研究。

4 结论

(1) AM 侵染美人蕉不受盐胁迫的影响。

(2) AM 提高了生态浮床处理含盐废水的能力, 对 TDS、COD、TN 和 TP 的去除率比普通生态浮床提高 20% ~ 35%。

(3) AM 促进植物生长、增加植物对 Na 离子吸收、促进 Na 离子向地上部的转移可能是生态浮床功能得到提升的主要原因之一。

参考文献:

- [1] 崔繁繁, 梁睿, 罗霖, 等. 现代煤化工含盐废水处理技术进展及对策建议[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(6): 95-100, 65.
- Cui C C, Liang R, Luo M, et al. Research progress and suggestion of coal chemical salty waste water treatment technologies[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 95-100, 65.
- [2] Lee Y H, Jeong J Y, Jega J, et al. Preparation and characterization of polymer-carbon composite membranes for the removal of the dissolved salts from dye wastewater[J]. Dyes and Pigments, 2008, 76(2): 372-378.
- [3] 薛建良, 赵东风, 李石, 等. 炼化企业含盐废水处理的研究进展[J]. 工业水处理, 2011, 31(7): 22-26.
- Xue J L, Zhao D F, Li S, et al. Study on brine wastewater treatment in refineries[J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(7): 22-26.
- [4] 代丹, 张远, 韩雪娇, 等. 太湖流域污水排放对湖水天然水化学的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3121-3130.
- Dai D, Zhang Y, Han X J, et al. Impact of sewage discharge on the water chemistry of Lake Taihu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3121-3130.
- [5] 张健, 李宝恒, 张秀敏, 等. 利用电导率分析南四湖水质变化状况[J]. 治淮, 2013, (1): 70-71.
- [6] Feng G X, Zhang Z Y, Wan C Y, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system [J]. Agricultural Water Management, 2017, 193: 205-213.
- [7] Ramos C, Suárez-Ojeda M E, Carrera J. Biodegradation of a high-strength wastewater containing a mixture of ammonium, aromatic compounds and salts with simultaneous nitrification in an aerobic granular reactor [J]. Process Biochemistry, 2016, 51(3): 399-407.
- [8] 于德爽, 唐佳佳, 张军, 等. 中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2740-2747.
- Yu D S, Tang J J, Zhang J, et al. Start-up and process characteristics of simultaneous ANAMMOX and denitrification (SAD) in a pilot-scale anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2740-2747.
- [9] Hasan M, Rotich N, John M, et al. Salt recovery from wastewater by air-cooled eutectic freeze crystallization [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 192-200.
- [10] Yeh N, Yeh P, Chang Y H. Artificial floating islands for environmental improvement [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 616-622.
- [11] 陈智. 微曝气强化生态浮床对污水中重金属 Cu 的去除效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- Chen Z. Study on the decontamination performance of heavy metal-Cu in sewage by the micro-aeration enhanced ecological floating bed [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] Evelin H, Giri B, Kapoor R. Contribution of *Glomus intraradices* inoculation to nutrient acquisition and mitigation of ionic imbalance in NaCl-stressed *Trigonella foenum-graecum* [J]. Mycorrhiza, 2012, 22(3): 203-217.
- [13] Asghari H R, Marschner P, Smith S E, et al. Growth response of *Atriplex nummularia* to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at different salinity levels [J]. Plant and Soil, 2005, 373(1-2): 245-256.
- [14] Hajiboland R, Aliasgharzadeh N, Laiegh S F, et al. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants [J]. Plant and Soil, 2010, 331(1-2): 313-327.
- [15] Evelin H, Giri B, Kapoor R. Ultrastructural evidence for AMF mediated salt stress mitigation in *Trigonella foenum-graecum* [J]. Mycorrhiza, 2013, 23(1): 71-86.
- [16] Manchanda G, Garg N. Alleviation of salt-induced ionic, osmotic and oxidative stresses in *Cajanus cajan* nodules by AM inoculation [J]. Plant Biosystems, 2011, 145(1): 88-97.
- [17] Hajiboland R. Role of arbuscular mycorrhiza in amelioration of salinity [A]. In: Ahmad P, Azooz M M, Prasad M N V (Eds.). Salt Stress in Plants: Signalling, Omics and Adaptations [M]. New York: Springer, 2013.
- [18] 李世阳. 芦苇菌根真菌依赖性及其联合环境修复功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Li S Y. The reed mycorrhizal fungi dependence and the studies of combinational environmental remediation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [19] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Transaction of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161, IN16-IN18.
- [20] Wang S G, Feng Z Z, Wang X K, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alter the response of growth and nutrient uptake of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to O₃ [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(6): 968-974.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] Juniper S, Abbott L. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and soil salinity [J]. Mycorrhiza, 1993, 4(2): 45-57.
- [23] Hartmond U, Schaesberg N V, Graham J H, et al. Salinity and flooding stress effects on mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus rootstock seedlings [J]. Plant and Soil, 1987, 104(1): 37-43.
- [24] Aliasgharzadeh N, Rastin N S, Towfighi H, et al. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil [J]. Mycorrhiza, 2001, 11(3): 119-122.
- [25] Hashem A, Alqarawi A A, Radhakrishnan R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and

- ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, **25** (6): 1102-1114.
- [26] Shekoofeh E, Sepideh H, Roya R. Role of mycorrhizal fungi and salicylic acid in salinity tolerance of *Ocimum basilicum* resistance to salinity[J]. Journal of Biotechnology, 2012, **11** (9): 2223-2235.
- [27] Hirrel M C, Gerdemann J W. Improved growth of onion and bell pepper in saline soils by two vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44** (3): 654-655.
- [28] Balliu A, Sallaku G, Rewald B. AMF Inoculation enhances growth and improves the nutrient uptake rates of transplanted, salt-stressed tomato seedlings[J]. Sustainability, 2015, **7** (12): 15967-15981.
- [29] Talaat N B, Shawky B T. Protective effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat (*Triticum aestivum* L.) plants exposed to salinity[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, **98**: 20-31.
- [30] Xiao J X, Hu C Y, Chen Y Y, *et al.* Effects of low magnesium and an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth, magnesium distribution and photosynthesis of two citrus cultivars [J]. Scientia Horticulturae, 2014, **177**: 14-20.
- [31] 朱先灿, 宋凤斌. 植物菌根共生磷酸盐转运蛋白[J]. 中国生物工程杂志, 2009, **29** (12): 108-113.
- Zhu X C, Song F B. Advances of study on arbuscular mycorrhizal symbiotic phosphate transporter in plants [J]. China Biotechnology, 2009, **29** (12): 108-113.
- [32] Evelin H, Kapoor R, Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review[J]. Annals of Botany, 2009, **104** (7): 1263-1280.
- [33] Munns R, James R A, Läuchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals [J]. Journal of Experimental Botany, 2006, **57** (5): 1025-1043.
- [34] Giri B, Kapoor R, Mukerji K G. Improved tolerance of *Acacia nilotica* to salt stress by arbuscular mycorrhiza, *Glomus fasciculatum* may be partly related to elevated K/Na ratios in root and shoot tissues[J]. Microbial Ecology, 2007, **54** (4): 753-760.
- [35] Sharifi M, Ghorbanli M, Ebrahimzadeh H. Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, **164** (9): 1144-1151.
- [36] Augé R-M, Toler H D, Saxton A M. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and osmotic adjustment in response to NaCl stress: a meta-analysis[J]. Frontiers in Plant Science, 2004, **5**: 562.



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)