

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析

赵娇¹, 谢慧君^{2*}, 张建¹

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266200; 2. 山东大学环境研究院, 青岛 266200)

摘要: 土壤盐碱化是限制全世界农业发展的主要问题. 在盐碱土壤上种植盐生植物和耐盐植物可以对盐碱土壤进行脱盐, 而盐碱土壤中的微生物对盐生植物和耐盐植物的生长起着重要作用. 本研究在盐碱地上选取玉米、棉花、盐地芦苇和盐地碱蓬这4种有代表性的植物, 采集土壤样品, 探究植物根系与非根系主要细菌群落与土壤理化性质和盐碱土壤微生物多样性的关系. 结果表明, 盐地碱蓬的根系微生物在一定程度上影响了土壤的pH, 土壤中的盐度与土壤营养物质呈明显的负相关关系. 所有土壤样品中相对丰度较高的前5个细菌门均为变形菌门、放线菌门、拟杆菌门、绿弯菌门和酸杆菌门. 其中, 棉花、芦苇和盐地碱蓬中根系土壤与非根系土壤耐盐菌门存在较大差异, 分析高通量测序结果可以得出3种植物根系与非根系土壤中差异较大的耐盐细菌属, 如棉花土壤中差异较大的 *Actinophytocola* 和 *Lechevalieria*, 芦苇土壤中差异较大的 *Bacillus* 和 *Filobacillus*, 以及盐地碱蓬土壤中的 *Echinicola*. 本研究可为盐碱地中接种促进植物生长的微生物提供理论依据.

关键词: 盐碱地土壤; 耐盐植物; 根际微环境; 土壤理化性质; 土壤微生物多样性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1449-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908044

Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta

ZHAO Jiao¹, XIE Hui-jun^{2*}, ZHANG Jian¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266200, China; 2. Environment Research Institute, Shandong University, Qingdao 266200, China)

Abstract: Soil salinity and alkalinity are major problems that limit agricultural development across the world. The planting of halophytes and salt-tolerant plants could improve saline-alkaline soil character, while the microorganisms in saline-alkali soils play an important role in the growth of halophytes and salt-tolerant plants. In this study, four representative plants of maize, cotton, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, and *Suaeda salsa* were selected in saline-alkali soil. Soil samples were collected to explore the relationship between the main bacterial communities of roots and non-roots and the physical and chemical properties and soil microbial diversity of saline-alkali soil. The results showed that the root microorganisms of *Suaeda salsa* affect the pH of the soil to some extent, and the soil salinity is negatively correlated with the soil nutrient content. The top five bacterial gates with higher relative abundance in all soil samples were α -Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroides, Chloroflexi, and Acidobacteria. Cotton, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, and *Suaeda salsa* have large differences in salt-tolerant bacteria between root soils and non-root soils. High-throughput sequencing results show that salt tolerance is different between the three plant roots and non-root soils. Bacterial genus, such as *Actinophytocola* and *Lechevalieria*, differ greatly in cotton soil, *Bacillus* and *Filobacillus* differ greatly in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. soil, and *Echinicola* differ greatly in the soil of *Suaeda salsa*. This research can provide a theoretical basis for promoting plant growth in saline-alkali soil.

Key words: saline-alkali soil; salt-tolerant plants; rhizosphere microenvironment; physical and chemical properties of soil; microbial diversity

我国盐碱土总面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 4.88%^[1]. 其中, 黄河三角洲地区盐渍化土地面积高达 18 万 hm^2 , 黄河三角洲是由陆海相互作用形成的回归区, 也是由黄河携带并沉积在河口的大量沉积物形成的新土地区域^[2]. 黄河是淡水, 沉积物中不含盐离子, 但考虑到存在海水入侵现象, 而高盐度、浅层地下水和高蒸发降水比会使得新形成的土壤中容易发生次生盐渍化. 土壤盐碱化是限制全世界农业发展的主要问题^[3]. 盐碱地作为一个独特的生态系统, 具有特殊土壤理化特性及土壤微生物群落^[4]. 盐碱土土壤结构差、pH 值和

含盐量高、肥力缺乏的特点^[5], 使得植物难以生长, 因此严重降低了农业生产力, 造成农业生产资源的萎缩. 改善盐碱地土壤以提高盐碱地农作物产量对于满足中国的粮食需求和可持续生态系统发展至关重要^[6]. 为了利用这些盐碱地, 我国已采用了许多农业措施来改善土壤质量, 包括耕作、滴灌和施

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2018ZC08N4); 国家自然科学基金项目 (51578321)

作者简介: 赵娇 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物, E-mail: 294730660@qq.com

* 通信作者, E-mail: xiehuijun@sdu.edu.cn

肥^[7],任何形式的盐碱地改良都会改变土壤的理化性质和土壤微生物的多样性^[8].

有研究表明,在盐碱土上种植盐生植物和抗盐植物,能使盐碱土脱盐.根据其对过量盐分的适应特点,盐生植物可分为泌盐植物、聚盐植物和不透盐的植物^[9].此外,盐碱土壤中的微生物在盐生植物和耐盐植物的生长中起重要作用,接种盐碱土壤中的促进植物生长的原生微生物对于促进盐碱地不耐受作物的生长来说是一种非常有效的方法,因为相对于其他方法,此方法非常有效且对环境安全.微生物对于盐生植物和抗盐植物生长的重要作用主要表现在以下两方面.①直接作用:抵抗生物或非生物逆境,直接促进植物生长和对水肥的利用^[9];②间接作用:间接改善根系微环境,提高土壤养分、降低 pH 值,形成“低盐、低 pH、高有机质”优化区域,间接促进植物的生长^[10].

深入了解盐生植物土壤理化性质和微生物多样性,分离筛选耐盐碱菌群,对于改善盐碱土理化性质及促进植物生长发育具有重要意义^[11].关于黄河三角洲盐碱地土壤微生物的研究多集中在较耐盐植物柽柳、白蜡和刺槐等,而有关盐碱土壤中耐盐植物与人工种植的较耐盐农作物根系微环境的理化性质和生物多样性比较却鲜见报道.因此在这项研究中,基于初步调查,本研究选择东营地区生长面积较广的盐地碱蓬和盐地芦苇两种天然植被以及当地居民种植面积较大的玉米和棉花为调查对象来研究这 4 种植物根系和非根系土壤的理化性质和微生物多样性.同时,探究盐碱地土壤中主要的耐盐细菌群落以及土壤理化性质与盐碱地微生物多样性之间的联系,通过将耐盐植物根系中的耐盐微生物作用于农作物根系,来提高农作物根系微环境质量,对维护盐碱地生态系统的稳定平衡提供土壤微生物方面的参考依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集

于 2018 年 11 月在黄河三角洲的中心城市——东营市河口区(北纬 37°45′~38°10′,东经 118°10′~119°05′)进行采样,研究区域地下水位低,地势平坦.具体方法如下:提前调查了解该区域植被类型,选择种植区域较大的经济作物玉米和棉花以及天然植被盐地碱蓬和盐地芦苇,在各自区域设置 3 个 200 cm×200 cm 的样方,在样方内采用对角线五点取样法,分为根际土样及非根际土样分别采集.本次采样一共采集了多个地点的玉米、棉花、盐地芦苇和盐地碱蓬 4 种植物的根际土与非根际土 8 个土壤

样本,在多个地点采集的土壤分别进行充分混合并去除根系等杂物后(植物根系单独保存),储存在不同的标签纸袋中,并通过 2 mm 筛^[12],然后分成 2 份.一份封于灭菌袋中,4℃ 低温干燥保存,用于土壤理化性质分析;另一份带回实验室,−80℃ 冷冻干燥保存,用于分子生物学研究^[12].

1.2 土壤样品的理化性质测定

土壤理化性质的测定指标包括土壤水分、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、盐分和土壤 pH.土壤水分采用烘干法^[13]测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法^[14]测定,全氮采用凯氏蒸馏法^[15]测定,碱解氮采用碱解扩散法^[16]测定,全磷采用硫酸-高氯酸消煮法^[12]测定,速效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法^[13]测定,土壤盐分用盐度计测定,pH 用 pH 计测定,其中土壤盐分和 pH 在测定时保持水:土=5:1 的状态.

1.3 土壤总 DNA 的提取及 16S rRNA 基因的 PCR 扩增

供试土壤采用 Omega 的“mD5625 Soil DNA Kit”试剂盒提取 DNA,电泳检测后,对样品进行扩增及测序.PCR 所用的引物为 V3+V4 区通用引物:338F 5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3′以及 806R 5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′^[12],使用 Illumina HiSeq 2500 PE250 测序技术进行高通量测序,用 QIIME 2 (Quantitative Insights Into Microbial Ecology 2) 处理原始 DNA 测序数据,并将有效序列聚类到 OTU 中,以基于 97% 的相似性进行进一步分析.

1.4 数据分析

测定结果统计与分析采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行处理,土壤理化性质指标为平行样均值,对各处理间各类指标的差异进行差异显著性检验($P<0.05$),采用 Canoco 5.0 软件分析土壤理化性质与土壤细菌群落多样性之间的关系,采用 Origin 2018 软件作图.

2 结果与讨论

2.1 不同植物根际与非根际土壤的理化性质

2.1.1 不同植物根际与非根际土壤 pH 及盐度的差异

土壤 pH 和含盐量是盐碱地土壤影响植物生长的最重要的指标.图 1 是 4 种不同植物根系与非根系土壤中 pH 和盐度的关系.从中可以看出,玉米地相对于其他 3 种植物地土壤,pH 值偏高,且植物根际土壤的 pH 值略高于非根际土壤处,而其他 3 种植物非根际土壤的 pH 值略高于根际土壤处;同时,

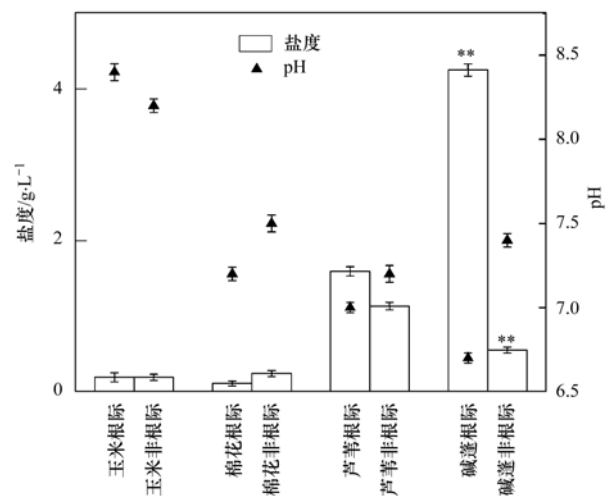
盐地碱蓬植物根际与非根际土壤的 pH 值具有显著差异 ($P < 0.01$), 其他 3 种植物根际与非根际土壤 pH 值无显著差异 ($P > 0.05$), 说明盐地碱蓬的植物根际微环境对于 pH 值有一定的影响, 使其更适应盐地土壤的生长环境. 从 4 种植物根系与非根系土壤盐度来分析, 方差分析和多重比较表明, 玉米和棉花的盐度在根系与非根系土壤中没有显著差异 ($P > 0.05$), 尤其是玉米, 根系与非根系土壤中盐度几近相等, 这与玉米的耐盐机制相吻合. 土壤盐胁迫主要包括渗透胁迫和离子毒害两方面. 国内外学者在对玉米耐盐机制的研究中表明, 植株对活性氧的消解和有机物渗透调节是玉米植株对盐胁迫适应的两条重要途径^[17]. 其中, 当玉米受到不同浓度盐胁迫时, 叶片的相对电导率和丙二醛 (MDA) 含量均有提高, 对植物细胞产生破坏, 同时超氧化物歧化酶 (SOD) 活性增加^[18]. 同时, 由于细胞外水势低于细胞内, 细胞内部水分会向外流失, 引起细胞失水^[19]. 为维持细胞内水分不外流, 保证细胞正常的生理代谢, 因此玉米细胞通过有机物渗透调节, 降低细胞内的水势, 使水分从外部环境向细胞内流动.

棉花的盐度在根系与非根系土壤中没有显著差异, 是由于棉花的耐盐机制是通过调节渗透胁迫. 彭振^[20]的研究指出, 棉花耐盐机制之一是在盐胁迫条件下能对渗透胁迫进行调节, 其中一种是吸收大量的无机盐离子积累到液泡中, 提高浓度, 降低水势, 使其能在较高的渗透条件下吸水, 保持膨压, 正常生长.

芦苇属于不透盐植物, 体内较高的渗透压使得植物根系从土壤中吸收大量的水分, 故而导致根系土壤盐分略高于非根系土壤; 盐地碱蓬是聚盐性植物^[21], 因此植物土壤根系中含有较非根系土壤明显更多的盐分. 耐盐植物芦苇属于不透盐植物, 而盐地碱蓬属于聚盐性植物, 不透盐植物体内含有大量可溶性的有机物, 使得自身体内渗透压增高, 故而能够提高根系从土壤中吸收水分的能力, 进而减小盐分对植物本身的影响; 盐地碱蓬为代表的聚盐性植物, 能从土壤中吸收大量的盐分, 并把这些盐分聚集在体内而不受伤害^[22].

2.1.2 不同植物根际与非根际土壤营养元素含量的差异

如表 1 所示, 4 种植物盐碱土壤中的总磷含量为 $80.4 \sim 132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷含量为 $1.16 \sim 5.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 此外, 4 种植物根际土壤中总磷与有效磷含量均显著高于植物非根际土壤 ($P < 0.05$), 表明植物根系微环境可有效提高盐碱地的磷含量, 为植物生长提供更多的磷. 棉花和盐地芦苇土壤中总磷含



**表示土壤盐度存在极显著性差异 ($P < 0.01$)

图 1 4 种不同植物根际与非根际土壤的 pH 和盐度

Fig. 1 Relationship between pH and salinity of four different plant rhizospheres and bald soil

量较高, 同时数据表明玉米土壤和棉花土壤中有有效磷含量较高, 盐地碱蓬土壤中总磷和有效磷含量最低. 棉花和玉米土壤含有的植物可以直接使用的磷更多, 而盐地碱蓬比棉花和玉米更能适应环境贫瘠的土壤. 有研究还表明, 随着土壤盐分的增加, 土壤中磷含量逐渐降低, 植物能够从土壤中直接吸收利用的磷含量也随之降低. 盐地碱蓬具有很强的耐盐性和抗逆性^[23], 可以在磷含量较低的土地上生存.

4 种植物土壤的总氮含量为 $196 \sim 432 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效氮含量为 $14.83 \sim 53.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 4 种植物土壤中的总氮含量从大到小依次为: 玉米 $\approx$ 棉花 $>$ 盐地芦苇 $>$ 盐地碱蓬. 此外, 4 种植物根际土壤中总氮和碱解氮含量均显著高于非根际土壤中两者的含量 ($P < 0.05$), 这与土壤氮含量随着土壤深度增加而下降的表述相一致. 盐地芦苇土壤中碱解氮含量是最低的, 恰巧说明盐地芦苇可以在低氮环境中生长. 从表中数据可以看出, 棉花土壤中的碱解氮和有效磷含量较高, 土壤肥力最高, 其次是玉米. 这跟施肥可能有关.

土壤有机质是土壤的重要组成部分, 它含有作物和微生物所需的几乎所有营养元素, 可以提供作物养分并改善营养元素的可用性. 有机质还能促进土壤团聚体结构的形成, 改善土壤结构^[24]. 研究中测定了 4 种植物土壤的有机质含量. 4 种植物土壤的有机质含量为 $7.07 \sim 19.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 4 种植物的根际土壤的有机质含量都高于本身在非根际土壤中的有机质含量 ($P < 0.05$), 这与土壤有机质含量随着土壤深度的增加而持续减少的结论相一致. 4 种植物土壤中, 棉花土壤有机质含量最高, 而盐地碱蓬的有机质含量是最少的. 一般情况下, 在相同或相似

表 1 4 种植物根际和非根际土壤营养元素含量¹⁾

Table 1 Contents of nutrients in root and non-root soil of four plants

样品	总磷/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	总氮/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹
玉米根际	104.96 ± 3.04a	2.80 ± 3.45a	403.08 ± 4.87b	26.59 ± 4.56b	18.96 ± 3.06a
玉米非根际	104.56 ± 3.76a	2.51 ± 4.86b	402.05 ± 3.87b	25.47 ± 4.29b	16.645 ± 3.34a
棉花根际	125.42 ± 5.87b	5.89 ± 3.98b	431.885 ± 3.04a	57.34 ± 4.68c	19.62 ± 5.98c
棉花非根际	117.54 ± 6.13c	5.34 ± 4.98a	364.82 ± 3.08a	30.775 ± 5.98c	18.01 ± 3.87b
芦苇根际	132.81 ± 3.07b	2.89 ± 6.83b	385.48 ± 5.87c	15.04 ± 4.08b	12.76 ± 5.89c
芦苇非根际	112.33 ± 5.93b	1.16 ± 3.05b	322.46 ± 4.98c	14.83 ± 3.08a	7.355 ± 6.02b
碱蓬根际	82.76 ± 3.38a	1.62 ± 3.14a	308.08 ± 3.98b	27.8 ± 3.48a	7.49 ± 4.28a
碱蓬非根际	80.89 ± 3.98a	1.22 ± 3.67a	196.84 ± 3.76b	14.85 ± 3.78a	7.07 ± 3.98a

1) 采用 Duncan's multiple range test 方法分析,不同字母表示显著性差异($P < 0.05$, $n = 3$),下同

的条件下,在一定的含量范围内,有机质含量与土壤肥力呈正相关^[25].

2.2 土壤细菌群落组成

2.2.1 α 多样性分析

表 2 显示细菌群落的 Shannon 指数顺序为:玉米根际 > 玉米非根际 > 碱蓬根际 > 棉花根际 > 棉花非根际 > 碱蓬非根际 > 芦苇根际 > 芦苇非根际,细菌群落的 Simpson 指数顺序为:芦苇非根际 > 芦苇根际 > 碱蓬非根际 > 棉花非根际 > 碱蓬根际 > 棉花根际 > 玉米非根际 > 玉米根际. 根据 Shannon 多样性指数和 Simpson 多样性指数,在 8 个样本中,细菌群落多样性最大的是玉米根际土壤,细菌群落多样性最小的是芦苇非根际土壤. 通过 Shannon 指数和 Simpson 指数排序可以看出,4 种植物细菌群落多

样性随着土壤深度的增加呈下降趋势,主要是由于植物根系土壤营养元素含量高,pH 值较低,更适合微生物的生存和繁衍.

4 种不同植物不同土层样品中细菌群落的 Chao 指数大小排序为:玉米非根际 > 玉米根际 > 棉花根际 > 棉花非根际 > 芦苇根际 > 碱蓬非根际 > 碱蓬根际 > 芦苇非根际,群落的 ACE 指数的大小排序与 Chao 指数大小排序大致相同. 综合样品中细菌群落的 Chao 指数与 ACE 指数可以推断出,8 个样品中,细菌群落丰富度最大的是玉米非根际土壤,细菌群落丰富度最小的是芦苇非根际土壤. 通过 Chao 指数和 ACE 指数排序可以看出,4 种植物细菌群落丰富度大致是随着土壤深度的增加呈下降趋势,这与细菌群落多样性相一致.

表 2 细菌多样性指数

Table 2 Bacterial diversity index table

样品	OTUs	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao 指数	ACE 指数	覆盖率
玉米根际	1 965 ± 3.76a	6.709 5 ± 3.45a	0.002 4 ± 2.05a	2 027.658 2 ± 4.98c	2 000.870 5 ± 1.76a	0.998 7 ± 1.53a
玉米非根际	1 933 ± 3.18a	6.597 6 ± 3.08a	0.002 8 ± 1.53a	2 003.783 ± 5.98c	1 984.347 9 ± 2.05a	0.998 5 ± 4.76b
棉花根际	1 861 ± 4.56b	6.541 1 ± 4.98c	0.003 ± 3.08a	1 991.02 ± 4.76b	1 976.748 9 ± 1.53a	0.996 9 ± 5.98c
棉花非根际	1 859 ± 4.98b	6.447 7 ± 1.76a	0.003 8 ± 5.98c	1 991.755 7 ± 2.05a	1 969.804 4 ± 4.98c	0.997 6 ± 2.05a
芦苇根际	1 726 ± 4.89c	6.300 9 ± 2.05a	0.006 6 ± 4.98c	1 898.494 6 ± 1.76a	1 864.752 4 ± 4.76b	0.998 6 ± 3.08a
芦苇非根际	1 677 ± 5.87c	5.385 3 ± 4.76b	0.021 ± 3.76a	1 762 ± 3.08a	1 747.983 8 ± 5.98c	0.995 6 ± 2.32a
碱蓬根际	1 803 ± 3.01a	6.557 8 ± 5.98c	0.003 5 ± 1.76a	1 853.608 7 ± 1.53a	1 834.486 3 ± 3.08a	0.998 ± 1.76a
碱蓬非根际	1 770 ± 3.23a	6.302 ± 1.53a	0.004 9 ± 2.32a	1 828.5 ± 2.32a	1 814.546 3 ± 2.32a	0.997 7 ± 4.98c

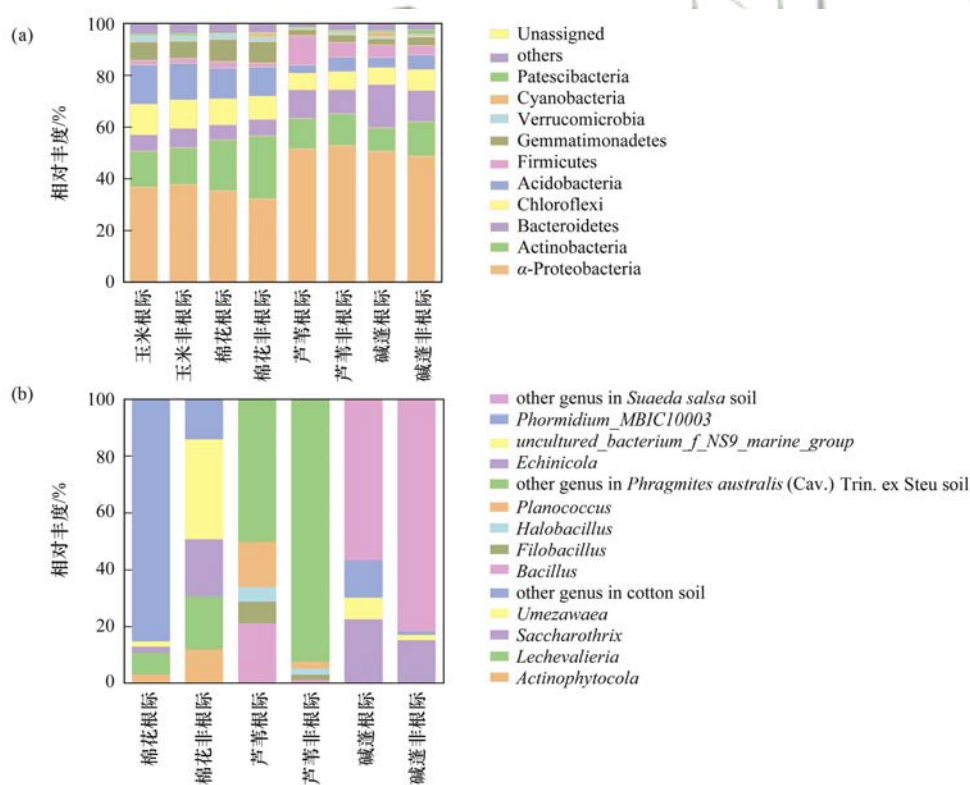
2.2.2 细菌群落结构分析

根据分类结果,在 8 个样品中检测到的细菌群落主要为变形菌门(32.16%~52.82%)、放线菌门(9.07%~24.46%)、拟杆菌门(5.85%~16.77%)、绿弯菌门(6.43%~11.84%)、酸杆菌门(3.17%~15.22%)、厚壁菌门(1.67%~11.42%)、芽单胞菌门(2.26%~8.59%)、疣微菌门(0.13%~2.27%)、蓝藻门(0.15%~1.60%)、超菌门(0.31%~1.53%)、未分类菌(0.00%~0.09%)以及检测量较少的其他群落(共 1.39%~3.82%)[图 2(a)]. 其中前 3 种是优势菌群,总和共占 47.08%~

94.05%. 在 8 个样本中,主要细菌门变形菌门、放线菌门、拟杆菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、厚壁菌门、芽单胞菌门、疣微菌门、蓝藻门及超菌门均具有极显著差异($P < 0.01$). 在盐度较轻的玉米和棉花土壤里,变形菌门和厚壁菌门明显少于盐度较重的芦苇和盐地碱蓬土壤,而芦苇和盐地碱蓬土壤中酸杆菌门和芽单胞菌门分布明显少于玉米和棉花土壤,这与郑微^[26]研究不同盐度土壤群系结构组成结果相一致,说明变形菌门和厚壁菌门具有较高的耐盐性,而酸杆菌门和芽单胞菌门不具有耐盐性或更容易受高盐影响.

比较根系与非根系土壤中细菌门类的差别,可以看出,玉米的根系与非根系土壤中的细菌门类差别不大,根据高通量测序得到的细菌属类的丰度来看,也可以得出根系与非根系土壤细菌丰度差别并不是很大;这可以说明玉米能够在轻度盐碱土上生长是自身原因,并没有特定的根系细菌种群改良根系微环境来促进玉米的生长^[27]。棉花非根系土壤中放线菌门细菌比根系土壤中多,查看细菌属类丰度可以得出,在放线菌门类中,相差较大的是 *Actinophytocola*、*Lechevalieria*、*Saccharothrix* 和 *Umezawaea* [图 2(b)],由于棉花非根系土壤盐度略高于根系土壤,推测这 4 个菌属具有较其他菌属高的耐盐性,能够适应盐度较高的土壤环境^[28];芦苇根系土壤中含有较非根系土壤中更多的厚壁菌门细菌,查看细菌属类丰度可以得出,在厚壁菌门类中,相差较大的是 *Bacillus*、

Filobacillus、*Halobacillus* 和 *Planococcus* [图 2(b)],由于芦苇属于不透盐植物,根系土壤中含有较非根系土壤中更高的盐分,而厚壁菌门细菌具有较高的耐盐性,同时 *Bacillus* 和 *Filobacillus* 具有较高的抗逆性,能够在环境恶劣的条件下存活,这也与本研究的测定结果相一致;盐地碱蓬根系土壤比非根系土壤中含有更多的拟杆菌门细菌,查看细菌属类丰度可以得出,在拟杆菌门类中,相差较大的是 *Echinicola*、*uncultured_bacterium_f_NS9_marine_group* 和 *Phormidium_MBIC10003* [图 2(b)],由于盐地碱蓬属于聚盐性植物,根系土壤含盐量高于非根系土壤,而拟杆菌门细菌具有较高的耐盐性,同时 *Echinicola*、*uncultured_bacterium_f_NS9_marine_group* 和 *Phormidium_MBIC10003* 具有较高的抗逆性,可在恶劣条件下存活,这也与本研究的测定结果一致。



(a) 4 种植物根际与非根际土壤中细菌门类分布; (b) 棉花、盐地芦苇与盐地碱蓬根际与非根际土壤中具有明显差异的细菌属类分布

图 2 4 种不同植物根际与非根际土壤中细菌的分布

Fig. 2 Proportion of bacteria in four different plant soils

2.3 细菌群落结构与环境因子的相关分析

为了解各样地土壤主要理化性质变化对盐碱地 4 种植物根际与非根际土壤细菌群落组成的影响,本研究选择土壤盐分、含水量、pH、TOC、TN、AN、TP 和 AP 和土壤样本进行 CCA 分析. 结果表明(图 3), TOC、TP、TN、AP 和 AN 均在第一象限内,且保持着较好的正相关关系. 其中 TOC、AN、TN 和盐度的线段长度较长,说明其对植物根系与非根系细菌

群落组成影响较大. 而 TP 和水分的线段长度较短,说明对细菌群落组成影响较小. 从样品分布上可以看出来,芦苇根际和盐地碱蓬根际土壤微生物群落多样性受盐分影响较大,分析由于芦苇的高渗透压,导致根系土壤吸水盐分增加,高盐度又刺激芦苇不断从土壤中吸水^[29]; 由于盐地碱蓬是聚盐性植物,能从土壤中吸收大量的盐分来积聚在体内,因此芦苇根际和盐地碱蓬根际土壤微生物群落多样性与含

盐量呈正相关关系. 由于玉米和棉花属于轻度耐盐植物, 盐分不利于植物的生长^[30], 因此盐分与玉米和棉花土壤中微生物群落多样性呈明显的负相关关系. 轻度耐盐碱植物玉米和棉花的根际与非根际土壤细菌群落受土壤理化性质影响类似, 而中度耐盐碱植物盐地芦苇甚至重度耐盐碱植物盐地碱蓬的根系土壤细菌群落相似, 非根系土壤细菌群落相似, 根系与非根系土壤细菌群落相差较大. 因为轻度耐盐碱的农作物多是由于人为的原因导致土壤理化性质基本符合植物生长所需, 因此无需从土壤深层去汲取, 同样地, 中度以及重度耐盐碱植物由于需要克服高盐度、高 pH 和低有机质的环境, 需要不断地从土壤深处获取自身所需, 因此会造成根际与非根际的较大差异.

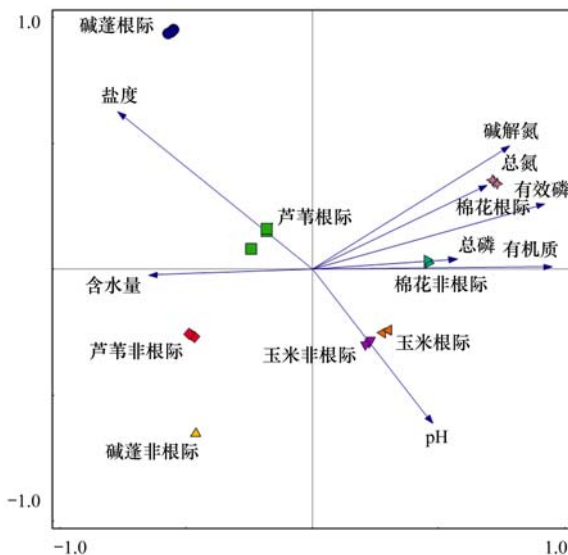


图3 4种植物根际与非根际土壤细菌群落与环境因子的 CCA 分析

Fig. 3 CCA analysis of bacterial community and environmental factors

3 结论

(1) 盐地碱蓬植物根际与非根际土壤中的 pH 值具有显著差异, 盐地碱蓬的根系微环境在一定程度上能够影响土壤 pH, 使植物能够在盐碱土上生长; 盐地芦苇和盐地碱蓬两种盐生植物的根系与非根系土壤的含盐量存在显著差异, 与植物的耐盐机制有关; 4 种植物根际土壤中营养元素含量氮磷等均高于非根际土壤.

(2) 由于植物根际土壤营养元素含量高, pH 值较低, 更适合微生物的生存和繁衍, 4 种植物根际土壤中细菌群落多样性以及群落丰富度均明显高于非根际土壤.

(3) 中度耐盐植物根际环境中含有较多的变形菌门和厚壁菌门细菌, 轻度耐盐植物根际环境中含

有较多的酸杆菌门和芽单胞菌门细菌, 与细菌耐盐性有关.

参考文献:

- [1] Lim S J, Shin M N, Son J K, *et al.* Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, **132**: 49-55.
- [2] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, *et al.* Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2019, **349**: 25-35.
- [3] Xue B X, Zhao Z Q, Wei L, *et al.* Study of the comprehensive landscaping treatment technique of saline-alkali land in Daqing based on the network of the grading of trapezoidal terrace ditches [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(4-6): 1183-1192.
- [4] Zhang X J, Yao Q, Cai Z P, *et al.* Isolation and identification of myxobacteria from saline-alkaline soils in Xinjiang, China[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(8): e70466.
- [5] Wang W J, He H S, Zu Y G, *et al.* Addition of HPMA affects seed germination, plant growth and properties of heavy saline-alkali soil in northeastern China: comparison with other agents and determination of the mechanism[J]. *Plant and Soil*, 2011, **339**(1-2): 177-191.
- [6] Shi S H, Tian L, Nasir F, *et al.* Response of microbial communities and enzyme activities to amendments in saline-alkaline soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **135**: 16-24.
- [7] Liu S L, Maimaitiaili B, Joergensen R G, *et al.* Response of soil microorganisms after converting a saline desert to arable land in central Asia[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **98**: 1-7.
- [8] Peng M, Jia H B, Wang Q Y. The effect of land use on bacterial communities in saline-alkali soil [J]. *Current Microbiology*, 2017, **74**(3): 325-333.
- [9] Zhao X, Zhu H S, Dong K H, *et al.* Plant community and succession in lowland grasslands under saline-alkali conditions with grazing exclusion[J]. *Agronomy Journal*, 2017, **109**(5): 2428-2437.
- [10] Fu J, Xiao Y, Wang Y F, *et al.* *Trichoderma* affects the physiochemical characteristics and bacterial community composition of saline-alkaline maize rhizosphere soils in the cold-region of Heilongjiang Province[J]. *Plant and Soil*, 2019, **436**(1-2): 211-227.
- [11] Yang J C, Zhang S W, Li Y, *et al.* Dynamics of saline-alkali land and its ecological regionalization in western Songnen Plain, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(2): 159-166.
- [12] Bao S C, Wang Q, Bao X H, *et al.* Biological treatment of saline-alkali soil by sulfur-oxidizing bacteria[J]. *Bioengineered*, 2016, **7**(5): 372-375.
- [13] Wang X X, Han Z, Bai Z H, *et al.* Archaeal community structure along a gradient of petroleum contamination in saline-alkali soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(11): 1858-1864.
- [14] 叶文雨, 廖海萍, 许钰滢, 等. 基于高通量测序技术分析 2 种菌草根际土壤细菌群落多样性[J]. *热带作物学报*, 2019, **40**(9): 1783-1788.
- [15] Zhang P P, Cui Y X, Zhang Y L, *et al.* Changes in soil physical and chemical properties following surface mining and reclamation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, **80**(6): 1476-1485.

- [16] Zhang Q Y, Shao M A, Jia X X, *et al.* Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests[J]. *Geoderma*, 2019, **338**: 170-177.
- [17] Motojima H, Yamada P, Irie M, *et al.* Amelioration effect of humic acid extracted from solubilized excess sludge on saline-alkali soil [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2012, **14**(3): 169-180.
- [18] Wang B H, Zhang M, Fu R, *et al.* Epigenetic mechanisms of salt tolerance and heterosis in Upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) revealed by methylation-sensitive amplified polymorphism analysis[J]. *Euphytica*, 2016, **208**(3): 477-491.
- [19] Abdelraheem A, Fang D D, Zhang J F. Quantitative trait locus mapping of drought and salt tolerance in an introgressed recombinant inbred line population of Upland cotton under the greenhouse and field conditions [J]. *Euphytica*, 2018, **214**: 8.
- [20] 彭振. 棉花苗期耐盐和耐热的生理机制及其基因转录调控分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [21] 李劲松, 郭凯, 李晓光, 等. 模拟干旱和盐碱胁迫对碱蓬、盐地碱蓬种子萌发的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(7): 1011-1018.
- [22] Luo M J, Zhao Y X, Wang Y D, *et al.* Comparative proteomics of contrasting maize genotypes provides insights into salt-stress tolerance mechanisms[J]. *Journal of Proteome Research*, 2018, **17**(1): 141-153.
- [23] Martins A F, Salcedo I H, De Oliveira F P, *et al.* Physical, chemical, and microbiological properties of soil under different plant covers in the seridó desertification region in the Brazilian semiarid[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2019, **43**: e0180162.
- [24] Sun J Z, Shi S L, Wu J, *et al.* Characterization of a salt-tolerant and cold-adapted xylanase from *Bacillus cellulosilyticus* [J]. *Bioresources*, 2016, **11**(4): 8875-8889.
- [25] 罗敏强. 枣树压砂地土壤肥力评价及肥力指标空间变异规律研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [26] 郑薇. 天津不同盐度土壤微生物群落结构特征及其适应机理研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2018.
- [27] Yuan P, Wang J Q, Pan Y J, *et al.* Review of biochar for the management of contaminated soil: preparation, application and prospect[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 473-490.
- [28] Li H Q, Jiang X W. Inoculation with Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) improves salt tolerance of maize seedling[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, **64**(2): 235-241.
- [29] Hamdia M A E S, Shaddad M A K, Doaa M M. Mechanisms of salt tolerance and interactive effects of *Azospirillum brasilense* inoculation on maize cultivars grown under salt stress conditions [J]. *Plant Growth Regulation*, 2004, **44**(2): 165-174.
- [30] Bore E K, Halicki S, Kuzyakov Y, *et al.* Structural and physiological adaptations of soil microorganisms to freezing revealed by position-specific labeling and compound-specific ¹³C analysis[J]. *Biogeochemistry*, 2019, **143**(2): 207-219.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)