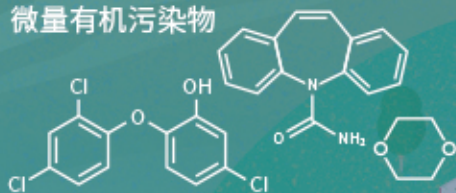


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
- 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营 (2573)
- 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
- 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
- 天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
- 南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
- 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
- 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
- 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
- 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
- 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
- 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
- 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
- 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
- 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
- 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
- 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
- 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
- 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
- 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
- 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
- 不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
- 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
- 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
- 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
- 太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
- 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
- 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
- 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
- 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
- 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
- CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
- pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
- 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
- 超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
- 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
- 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
- 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
- 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
- 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
- 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙屹, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
- 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
- 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
- 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
- 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
- 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
- 调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
- S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
- 连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
- 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
- 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
- 罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
- 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
- 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

连续4个生长季大气CO₂升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征

贾夏^{1,2}, Lkhagvajargal Khadkhurel¹, 赵永华², 张春燕¹, 张宁静¹, 高云峰², 王子威²

(1. 长安大学水利与环境学院, 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 2. 长安大学土地工程学院, 陕西省土地工程重点实验室, 西安 710054)

摘要: 阐明CO₂升高和土壤重金属污染耦合对植物根际微生物群落的影响对明确大气CO₂升高背景下土壤重金属污染的植物根际生态效应意义明显. 利用开顶箱系统模拟了连续4个生长季大气CO₂浓度升高[(700±27) μmol·L⁻¹]与土壤Pb污染(15.6 mg·kg⁻¹和515.6 mg·kg⁻¹)耦合对刺槐幼苗根际土壤微生物群落的影响. 结果表明, 与Pb污染相比, 高浓度CO₂提高了($P < 0.05$) Pb污染下幼苗根际土壤总N含量, 同时也提高了根际土壤pH、总C和水溶性C含量及C/N, 降低了($P < 0.05$)根际土壤总Pb和可溶性Pb含量. 细菌丰富度和多样性在耦合条件下较Pb污染增加($P < 0.05$), 而真菌丰富度降低($P < 0.05$)和多样性增加($P < 0.05$); 细菌和真菌群落中相对丰度最高的前两位优势属变化不显著, 但其它类群如 Anaerolineaceae、Solirubrobacterales、Eurotiomycetes、Aspergillus 和 Trichocomaceae 的相对丰度受大气CO₂浓度升高与土壤Pb污染耦合影响显著; 相对丰度较高的前10位细菌和真菌优势属与根际土壤环境因子的冗余分析表明, 根际土壤总C和可溶性Pb是显著($P < 0.05$)影响细菌优势属环境因子, 总C对真菌优势属影响显著($P < 0.05$). 结果表明刺槐幼苗根际土壤总C和可溶性Pb是根际土壤细菌群落变化的显著影响因子, 而真菌群落仅受总C的显著影响.

关键词: 大气CO₂升高; Pb; 耦合效应; 细菌; 真菌; 群落特征

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3046-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202009023

Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of *Robinia pseudoacacia* L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils

JIA Xia^{1,2}, Lkhagvajargal Khadkhurel¹, ZHAO Yong-hua², ZHANG Chun-yan¹, ZHANG Ning-jing¹, GAO Yun-feng², WANG Zi-wei²

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Elevated atmospheric CO₂ could affect the speciation of heavy metals in rhizosphere soils by changing root exudates, thereby influencing soil microecosystem in the rhizosphere. Therefore, understanding the function of heavy metals in soils on rhizospheric ecology under elevated atmospheric CO₂ scenarios is highly important. Here, we investigated the combined effects of a four-year period of elevated air CO₂ concentrations [(700±27) μmol·L⁻¹] and Pb-contamination (15.6 mg·kg⁻¹ and 515.6 mg·kg⁻¹) on the soil rhizospheric microbial community of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings. Significant ($P < 0.05$) effects of CO₂, Pb, and their interaction on bacterial richness and fungal diversity were observed. Relative to Pb exposure alone, elevated CO₂ significantly increased pH, total C, total N, and water-soluble organic carbon, and the C/N ratio under Pb exposure ($P < 0.05$) and significantly decreased total and soluble Pb content ($P < 0.05$). The richness and diversity of bacteria increased ($P < 0.05$), fungal richness decreased ($P < 0.05$), and microbial diversity increased ($P < 0.05$) under the combined treatments relative to Pb contamination alone. The changes in the relative abundance of the top two dominant bacterial and fungal genera were not significant; however, differences in the relative abundances of other groups, such as Anaerolineaceae, Solirubrobacterales, Eurotiomycetes, Aspergillus, and Trichocomaceae, were significant between the different treatments. According to a redundancy analysis, total C and soluble Pb had a significant influence ($P < 0.05$) on the dominant bacterial genera, and total C affected ($P < 0.05$) the dominant genera in the fungal community. These results suggest that the responses of soil environmental factors to the combination of elevated atmospheric CO₂ and Pb could shape soil microbial community structure in the rhizosphere of *R. pseudoacacia* seedlings.

Key words: elevated atmospheric CO₂; Pb; combined effects; bacteria; fungi; community characteristics

根际土壤微生物关系根际土壤养分循环和有害物质沉淀及运移、根系健康和植物生长等,对维护健康的根际微生态系统具有重要作用^[1~4]. 而根系释放的各类小分子有机化合物可通过改变根际土壤

pH值而影响微生物群落^[5,6],已有研究表明17%~

收稿日期: 2020-09-22; 修订日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870582, 31270665)

作者简介: 贾夏(1975~),女,博士,教授,主要研究方向为全球变化与土壤污染耦合环境效应, E-mail: jiaxianavy@163.com

40% 的植物光合产物会通过根系释放到土壤中, 从而影响根际土壤微生物生长和代谢等^[7,8]. 故影响植物生长的环境因子如大气 CO₂ 浓度和气温、土壤重金属及有机污染等会影响根际土壤微生物.

大气 CO₂ 浓度逐年升高已成事实, 预计本世纪末将升高至 700 μmol·L⁻¹^[9]. 有研究表明大气 CO₂ 升高通过提高植物光合作途径增加了其代谢产物借助于根系分泌物、细根脱落及枯枝落叶等形式释放到根际土壤中的比率^[10~14], 如大气 CO₂ 升高下银海枣 (*Phoenix sylvestris*) 根系分泌氨基酸提高了 250%、低分子有机化合物提高了 120%~160%、总可溶性碳提高了 180%~220%^[15]. 总体而言, 大气 CO₂ 升高可通过增加根系生长和根际沉积影响根际微环境^[16~18], 从而会影响根际微生物群落如高浓度 CO₂ 提高了刺槐幼苗根际土壤细菌丰富度^[19,20]. 与此同时, 土壤重金属污染是又一面面临的重要环境问题^[21], 其中铅(Pb)由于毒性大、移动性强和分布广而受关注^[22], 目前土壤“Pb 污染”现状严峻, 截止 2010 年我国重金属污染土壤中 Pb 浓度为 3.79~341.00 mg·kg⁻¹^[23]. Pb 通过影响根系渗透压而改变根系分泌物和影响根际土壤微环境, 进而会影响根际土壤微生物群落^[24~27], 已有研究表明, Pb 降低了刺槐幼苗根际土壤细菌丰富度和多样性^[28].

如上所述, 单独大气 CO₂ 升高和土壤 Pb 污染对植物根际土壤微生物影响的研究已获重要进展, 但二者耦合对根际土壤微生物影响的研究还甚少见, 而 CO₂ 浓度升高会通过改变根际 pH 及 Pb 的生物有效性等而影响根际土壤微生物群落, 从而关系根际微生态系统的稳定及功能, 故探讨大气 CO₂ 浓度升高和土壤 Pb 污染耦合对植物根际微生物群落影响对明确全球变化背景下土壤重金属污染的植物根际生态效应具有重要意义. 刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 是我国常见造林树种, 其有适应性强、生长速度快、根系发达、耐干旱和重金属胁迫等优点^[29]. 已有研究表明大气 CO₂ 升高和 Cd 污染耦合提高了刺槐幼苗可溶性糖和淀粉含量^[30], 故本研究以刺槐幼苗为材料探讨根际土壤微生物对耦合条件的响应特征.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物材料

供试土壤采自西安市南郊农田 (34°16'N, 108°54'E), 采用多点混合采样法采集 0~20 cm 层土壤, 去除石子等较大杂物后过 5 mm 筛并充分混匀, 然后向土壤中添加 Pb(NO₃)₂ 水溶液充分混匀后于暗处放置平衡 1 个月, 期间经常搅拌. 土壤基本

理化性质见表 1. 刺槐种子购于西北农林科技大学林业科学研究所.

表 1 供试土壤理化性质 (平均值 ± 标准误差)

Table 1 Physical and chemical properties of the soil used in the experiment (mean ± SE)	
项目	参数
土壤类型	淋溶土 ^[31]
pH(水土比 2.5:1)	7.1 ± 0.3
有机质/g·kg ⁻¹	11.8 ± 0.4
有机 C/g·kg ⁻¹	6.2 ± 0.2
总 N/g·kg ⁻¹	1.3 ± 0.1
有效 N/mg·kg ⁻¹	0.1 ± 0.01
有效 P/mg·kg ⁻¹	41.9 ± 1.4
有效 K/mg·kg ⁻¹	149.6 ± 5.9
阳离子交换量/meq·(100 g) ⁻¹	27.2 ± 1.1
可溶性盐/mg·kg ⁻¹	373.4 ± 9.1
总 Pb/mg·kg ⁻¹	15.6 ± 0.8

1.2 试验设计

采用双因素裂区试验设计法, 主区因素: CO₂, 副区因素: Pb, 考虑交互作用. CO₂ 设置两个水平: 大气 CO₂ (385 μmol·L⁻¹) 和高浓度 CO₂ [(700 + 27) μmol·L⁻¹], 每水平重复 3 次. 根据国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 设置添加 0 和 500 mg·kg⁻¹ 2 种 Pb 浓度, 最终形成 15.6 mg·kg⁻¹ 和 515.6 mg·kg⁻¹ 两个 Pb 水平, 分别记为 Pb0 和 Pb1, 每水平重复 9 次. 试验处理分为大气 CO₂ + Pb0 (D1)、大气 CO₂ + Pb1 (D4)、高浓度 CO₂ + Pb0 (E1) 和高浓度 CO₂ + Pb1 (E4) 这 4 组, 其中对照组为 D1, 单一 Pb 处理为 D4, 单一 CO₂ 处理为 E1, 耦合处理为 E4. 本试验于 2014 年 5 月 1 日开始至 2017 年 9 月 30 日结束, 共历经 4 个生长季.

1.3 CO₂ 浓度处理、植物种植及根际土壤样品采集

CO₂ 处理采用带有 CO₂ 传感器和浓度控制系统及土壤水分、空气湿度和温度传感器的开顶箱 (OTC, 邯郸冀南新区盛炎电子科技有限公司) 系统进行. OTC 控制系统位于长安大学渭水校区原位试验场 (34°15'N, 108°55'E), OTC 结构为八边形, 室壁材料为透光性好的无色透明玻璃, OTC 两平行边相距 4 m, 高 1.6 m, 高浓度 CO₂ 箱和大气 CO₂ 对照箱分别设 3 个, 共设 6 个开顶箱, 各 OTC 相距约 2 m, 彼此间的小气候差异可忽略不计, 4 个生长季期间对照箱和高浓度 CO₂ 箱平均气温分别为 27.9℃ 和 28.4℃、平均空气湿度分别为 77.3% 和 75.9%.

将平衡好的土壤装入盆栽试验盆 (长 70 cm × 宽 40 cm × 高 50 cm), 每盆装土壤约 40 kg (干容重), 同一 Pb 水平设置 9 个重复, 每个开顶箱放置同一 Pb 处理土壤 3 盆, 于 2014 年 5 月 1 日播种刺槐种子, 待出苗后 10 d 根据生长状况选留 40 棵大

小均匀且健壮的幼苗. 每个盆中都装有土壤湿度传感器以进行土壤水分测定, 设置为每小时读数一次, 在整个试验期间根据土壤平均含水量采用自来水进行浇灌, 确保土壤水分含量约为田间最大持水量的 60%. 此外, 在试验期间及时清理盆中的杂草和幼苗凋落物, 雨天时遮盖开顶箱.

在 2017 年 9 月 30 日, 采用多点混合法挖取整棵幼苗后, 采用抖落法获取根际土壤, 去除砂石、枝叶、细根等杂质后过 1 mm 土壤筛后分成两份, 其中一份风干用于 Pb、总碳(TC)、总氮(TN)和 pH 值分析, 另一份置于 -80℃ 的冰箱用于根际土壤微生物群落和土壤水溶性碳(WSOC)分析.

1.4 测定项目与方法

1.4.1 根际土壤 pH 值、WSOC、TC、TN、C/N 及 Pb 含量分析

根际土壤 pH 值采用电位法^[32]. WSOC 分析采用有机碳(TOC)分析仪测定^[33]: 称取去根土样 10 g 于三角瓶中, 加入 50 mL 无 CO₂ 蒸馏水和 10 粒大小均匀的玻璃珠, 在恒温振荡箱中于 25℃, 250 r·min⁻¹ 振荡 15 h. 水土混合液用冷冻高速离心机 14 000 r·min⁻¹ 离心 6 min, 取离心后上清液过 ϕ 0.22 μ m 的滤膜, 收集滤液进行二次离心, 采用 TOC 分析仪(日本岛津 TOC-500)分析上清液中的 C 含量即为根际土壤 WSOC 含量. 根际土壤 TC、TN 采用元素分析仪(德国 Elemental, Vario Macro cube)测定. 根际土壤 Pb 含量分析^[34]: 0.5 g 根际土样采用 H₂O₂:HNO₃ (1:8, V/V) 消解液于微波消解炉(上海屹尧)消解后, 消解液采用 ICP-MS(美国 Thermo Fisher-X series)分析 Pb 含量.

1.4.2 根际土壤微生物基因信息学分析

用 ZR Soil Microbe DNA KitTM 土壤 DNA 提取试剂盒(美国)提取根际土壤微生物组总 DNA, DNA 的提取质量用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳检测, 同时采用紫外分光光度计对 DNA 进行定量测定. 采用引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GCACTACHVGGGTWCTAAT-3') 扩增细菌 V3 ~ V4 区 16S rDNA, 采用引物 ITS5 (5'-GGAAGTAAAGTCGTAACAAGG-3') 和 ITS1 (5'-GCTGCGTTCATCGATGC-3') 扩增真菌 ITS1 区. 用 2% 琼脂糖凝胶电泳对上述 PCR 扩增产物进行检测, 对于目标片段的切胶回收使用 AXYGEn 公司的凝胶回收试剂盒. 采用 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit 试剂盒进行 PCR 扩增回收产物荧光定量分析(美国 BioTek, Flx800 荧光分析仪), 最后采用 Illumina MiSeq 平台进行高通量分析(上海派森诺生物科技股份有限公司). 对测序结果采用 QIIME 软件(Quantitative Insights Into

Microbial Ecology, v1.8.0, <http://qiime.org/>) 识别疑问序列^[35], 剔除 <150 bp 的基因序列、5'端引物错配碱基数 >1 的序列和含有连续相同碱基数 >8 的序列, 并通过 QIIME 软件调用 USEARCH (v5.2.236, <http://www.drive5.com/usearch/>) 检查并剔除嵌合体序列. 对初步筛选的高通量序列测序数据在 97% 的序列相似度基础上进行 OTU (operational taxonomic unit, 可操作性分类单元) 划分^[36], 然后针对细菌采用 Silva 数据库 (Release115, <http://www.arb-silva.de/>) 进行分类地位鉴定^[37], 针对真菌的 ITS 序列采用 UNITE 数据库 (Release5.0, <https://unite.ut.ee/>) 进行分类地位鉴定^[36]. 在此基础上, 进行 OTU 精简和分类结果统计后利用 R 软件进行不同样本共有 OTU 分析(结果通过 Venn 图呈现), 使用 QIIME 软件计算每个样本的 Shannon 多样性指数和 Chao1 丰富度估计指数^[38-40], 使用 R 软件进行分类组成研究, 并对相对丰度前 50 位的优势属结合样本进行聚类分析并绘制热图. 提交属水平的相对丰度矩阵于 Galaxy 在线分析平台 (<http://huttenhower.sph.harvard.edu/galaxy/>) 进行基于线性判别分析效应量 (linear discriminant analysis effect size, LEfSe) 的分析, 采用线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 对数据进行降维和评估差异显著的物种的影响力 (即 LDA 得分值).

1.5 数据分析

数据统计分析采用 SPSS 26.0 软件进行, 采用双因素方差分析 (Two-way analysis of variance) 分析 CO₂、Pb 及其交互作用对刺槐幼苗根际土壤特征的影响, 影响显著时采用 LSD (最小显著差异法, Fisher's least significant difference) 分析处理间的差异性; 采用 Canoco5.0 软件对相对丰度较高的前 10 位根际土壤细菌和真菌优势属与土壤环境因子进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA).

2 结果与分析

2.1 刺槐幼苗根际土壤特征及根系 Pb 积累

由表 2 可知, 大气 CO₂ 升高、Pb 处理及二者耦合下, 根际土壤 pH 值、C/N 及 WSOC 均较对照增加 ($P < 0.05$), TC 和 TN 在 Pb 及耦合处理下较对照有所升高; 大气 CO₂ 升高提高 ($P < 0.05$) 了 Pb 处理下根际土壤总 N 含量, pH、TC、WSOC 及 C/N 也有所升高但不显著. 高浓度 CO₂ 下根际土壤可溶性 Pb 及总 Pb 较对照 (D1) 降低 ($P < 0.05$), 而根系 Pb 积累增加 ($P < 0.05$). 此外, Pb 对 pH、TN 及 WSOC 影响显著, CO₂ 对 pH 和 TN 影响显著, 但二者对各指标未表现出显著交互作用.

表 2 不同处理下刺槐幼苗根际土壤特征及幼苗根系 Pb 积累量 (平均值 ± 标准误差) 及方差分析结果 (F 值和显著性水平)¹⁾

Table 2 Soil characteristics in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings under different treatments and Pb accumulation in roots (mean ± SE) and summary results (F-values and significance levels) from an analysis of variance (ANOVA)

项目	处理	pH	TC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	C/N/%	WSOC /g·kg ⁻¹	总 Pb /mg·kg ⁻¹	根系 Pb 积累量 /mg·kg ⁻¹
	E1	8.07 ± 0.02c	10.57 ± 0.03b	1.37 ± 0.03c	7.77 ± 0.28b	6.87 ± 0.05a	2.68 ± 0.03d	6.97 ± 0.19c
	E4	8.37 ± 0.01a	12.33 ± 0.09a	1.46 ± 0.03a	8.39 ± 0.13a	7.72 ± 0.13a	177 ± 3.01b	35.87 ± 0.72a
	D1	7.93 ± 0.12b	10.80 ± 0.06b	1.37 ± 0.07c	7.96 ± 0.35b	6.60 ± 0.07b	2.78 ± 0.01c	6.33 ± 0.12c
	D4	8.29 ± 0.03a	11.80 ± 0.00ab	1.40 ± 0.00b	8.38 ± 0.04a	7.56 ± 0.01a	202 ± 1.11a	29.94 ± 0.54b
	Pb	160.32 **	4.50Ns	195.57 **	0.11Ns	31.93 **		
差异来源	CO ₂	16.77 **	4.50Ns	137.29 **	0.01Ns	1.84Ns		
	Pb × CO ₂	1.15Ns	0.50Ns	0.14Ns	0.01Ns	0.14Ns		

1) 同一列不同小写字母表示不同处理间的差异显著 (P < 0.05); ** 表示 P < 0.01, Ns 表示不显著, * 表示 P < 0.05

2.2 根际土壤微生物群落特征

由表 3 可知, 细菌和真菌序列总数分别为 159 499 和 192 934 条。在属水平上与对照相比, 不同处理下细菌 OTUs 数增加 (P < 0.05), 而真菌 OTUs 数降低 (P < 0.05), 且细菌远高于真菌; 细菌 Chao1 丰富度指数增加, 真菌 Chao1 和 Shannon 多样性指数均较对照降低。此外, CO₂ 升高和 Pb 耦合下细菌

OTUs、Chao1 和 Shannon 及真菌 Shannon 指数较单一 Pb 处理下增加 (P < 0.05), 而真菌 OTUs 和 Chao1 却降低。且由表 3 可知, CO₂ 和 Pb 对细菌和真菌 OTUs 和 Chao1 影响显著, 且对真菌 OTUs、细菌和真菌 Chao1 及真菌 Shannon 指数具有显著交互作用。由图 1 可知, 4 种处理下, 细菌共有 OTUs 为 998 个, 而真菌仅为 119 个。

表 3 不同处理下刺槐幼苗根际土壤微生物群落特征 (平均值 ± 标准误差) 及方差分析结果 (F 值和显著性水平)¹⁾

Table 3 Soil microbial characteristics in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings under different treatments (mean ± SE) and summary results (F-values and significance levels) from an analysis of variance (ANOVA)

项目	处理	序列数	分类操作单元 OTUs (属水平)	Chao1 丰富度指数	Shannon 多样性指数
细菌	E1	37 513 ± 52d	1 883 ± 21b	4 026.00 ± 14.59b	11.03 ± 0.23a
	E4	41 813 ± 48b	1 924 ± 14a	4 239.56 ± 14.65a	11.04 ± 0.06a
	D1	37 931 ± 41c	1 798 ± 18c	4 175.91 ± 15.29c	10.86 ± 0.03b
	D4	42 242 ± 36a	1 882 ± 19b	4 177.81 ± 21.96c	10.73 ± 0.02c
差异来源	Pb		11.55 **	112.22 **	2.29Ns
	CO ₂		11.92 **	18.73 **	36.57 **
	Pb × CO ₂		1.37Ns	108.09 **	3.11Ns
真菌	E1	51 795 ± 55b	247 ± 6b	538.92 ± 8.09c	7.03 ± 0.01ab
	E4	46 061 ± 35c	231 ± 6b	431.00 ± 5.71d	7.02 ± 0.04ab
	D1	52 104 ± 40a	331 ± 7a	687.69 ± 6.50a	7.28 ± 0.04a
	D4	42 973 ± 42d	258 ± 4b	547.00 ± 6.03b	6.96 ± 0.03c
差异来源	Pb		54.63 **	349.95 **	23.67 **
	CO ₂		84.97 **	396.92 **	7.84 *
	Pb × CO ₂		22.41 **	6.08 *	20.89 **

1) 同一物种下同一列不同小写字母表示不同处理间的差异显著 (P < 0.05); ** 表示 P < 0.01, Ns 表示不显著, * 表示 P < 0.05

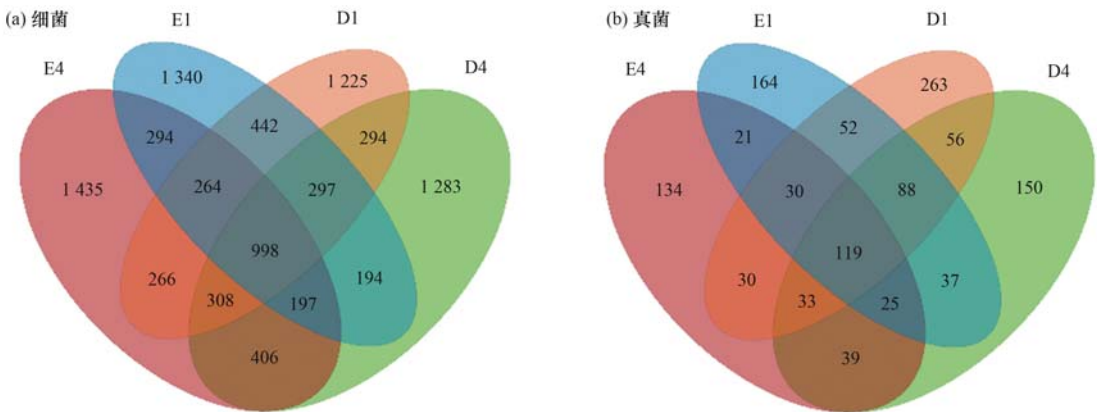


图 1 不同处理下刺槐幼苗根际土壤细菌和真菌共有 OTUs 的 Venn 图

Fig. 1 Venn diagrams representation of OTUs of bacteria and fungi used to compare samples in the rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings

由图 2(a)可知,属水平相对丰度较高的前 20 位细菌中,丰度最高的苍白杆菌属 (*Ochrobactrum*) 在不同处理下变化不显著;耦合处理下地杆菌 (*Geobacter*)和苔藓杆菌 (*Bryobacter*)相对丰度较对照和 Pb 处理下显著增加,而玫瑰弯菌属 (*Roseiflexus*)显著降低.前 20 位真菌属中,不同处理下古根菌属 (*Archaeorhizomyces*)和曲霉属 (*Aspergillus*)的相对丰度均较对照增加,且 CO₂ 升高促进了 Pb 处理下 *Archaeorhizomyces*、*Aspergillus* 和光

黑壳属内生真菌 (*Preussia*) 相对丰度增加 ($P < 0.05$) [(图 2(b))].

相对丰度较高的前 50 属细菌共分为 3 大类[图 3(a)],各类群中细菌种类在不同处理下相对丰度差异显著,且按照 CO₂ 处理水平聚为两类,表明大气 CO₂ 升高对 Pb 污染下根际细菌群落影响明显;由图 3(b)可知,前 50 属真菌也聚为 3 大类,各类群真菌种类在不同处理下相对丰度差异明显,但处理聚类未表现出明显的 CO₂ 效应.

由图 4(a)可知,不同处理下相对丰度有显著差异的细菌有 1 门、3 纲、6 目、4 科和 4 属,差异最显著的有厌氧绳菌科 (*Anaerolineaceae*)、土壤红杆菌目 (*Solirubrobacterales*)、嗜热油菌纲 (*Thermoleophilia*);而真菌有 1 门、2 纲、3 目、9 科和 9 属,曲霉属 (*Aspergillus*)、发菌科 (*Trichocomaceae*)、散囊菌纲 (*Eurotiomycetes*) 等在不同处理间差异显著 [图 4 (b)].

2.3 根际土壤微生物群落优势属和土壤环境因子的关系

对前 10 位相对丰度较高的细菌和真菌优势属和根际土壤环境因子进行 RDA 分析(图 5 和表 4).结果表明,RDA1 和 RDA2 对细菌群落优势属的总解释率为 63.8%,其中根际土壤 TC 和可溶性 Pb 是引起细菌群落优势属发生变化的显著($P < 0.01$)环境因子,TC 与厌氧粘细菌属 (*Anaeromyxobacter*) 和鞘脂单胞菌属 (*Sphingomonas*) 相对丰度呈负相关($P < 0.01$),与 RB41 和 *Geobacter* 等丰度呈正相关($P < 0.01$);而根际土壤可溶性 Pb 与 *Anaeromyxobacter* 和 *Sphingomonas* 相对丰度呈正相关($P < 0.05$),但与 RB41 和链霉菌属 (*Streptomyces*) 呈负相关($P < 0.05$). RDA1 和 RDA2 对真菌优势属的总解释率为

表 4 根际土壤微生物优势属和土壤特征间的冗余分析 (RDA) 的土壤因子解释率¹⁾

Table 4 Redundancy analysis (RDA) for soil characteristics on the dominant genera in the soil microbial community			
项目	土壤特征	解释率/%	P 值
细菌	TC	35.4	0.002 **
	WSOC	0.2	0.942
	总 Pb	2.5	0.474
	TN	1.6	0.622
	C/N	5.3	0.34
	可溶性 Pb	27.8	0.01 *
	pH	0.2	0.96
	TC	22.7	0.04 *
真菌	WSOC	19.4	0.12
	总 Pb	6.7	0.354
	TN	5.0	0.442
	C/N	2.8	0.666
	可溶性 Pb	5.1	0.49
	pH	0.4	0.958
	TC	22.7	0.04 *
	WSOC	19.4	0.12

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

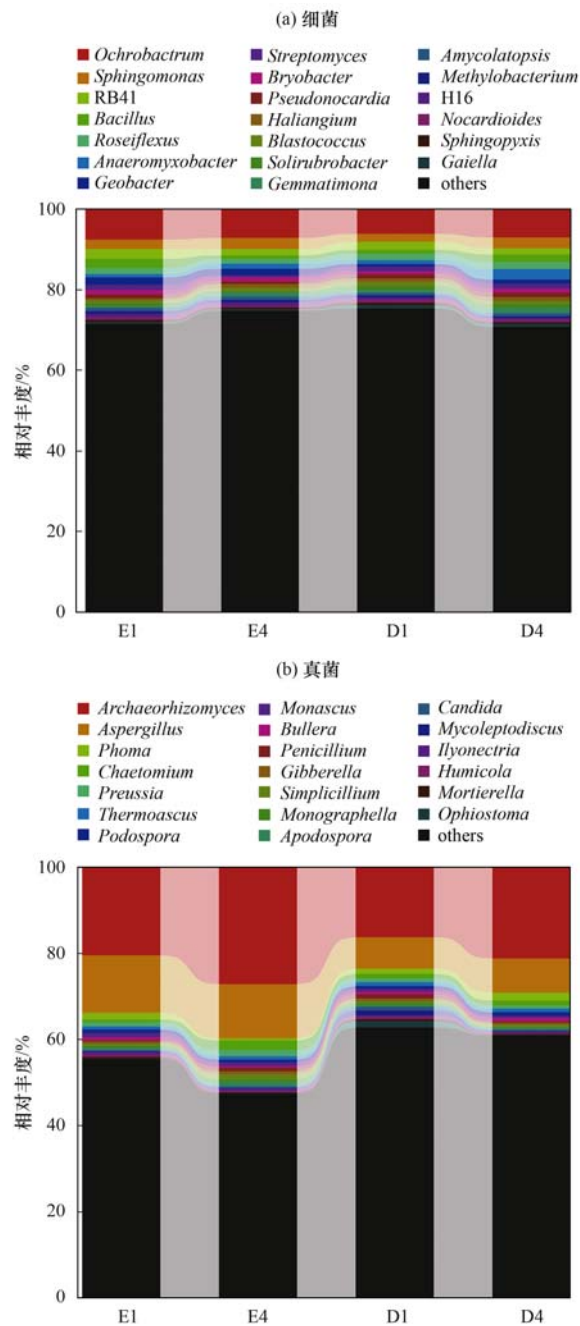


图 2 不同处理下刺槐幼苗根际土壤属水平细菌和真菌相对丰度分布

Fig. 2 Relative abundance of soil bacteria and fungi at the genus level in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings under different treatments

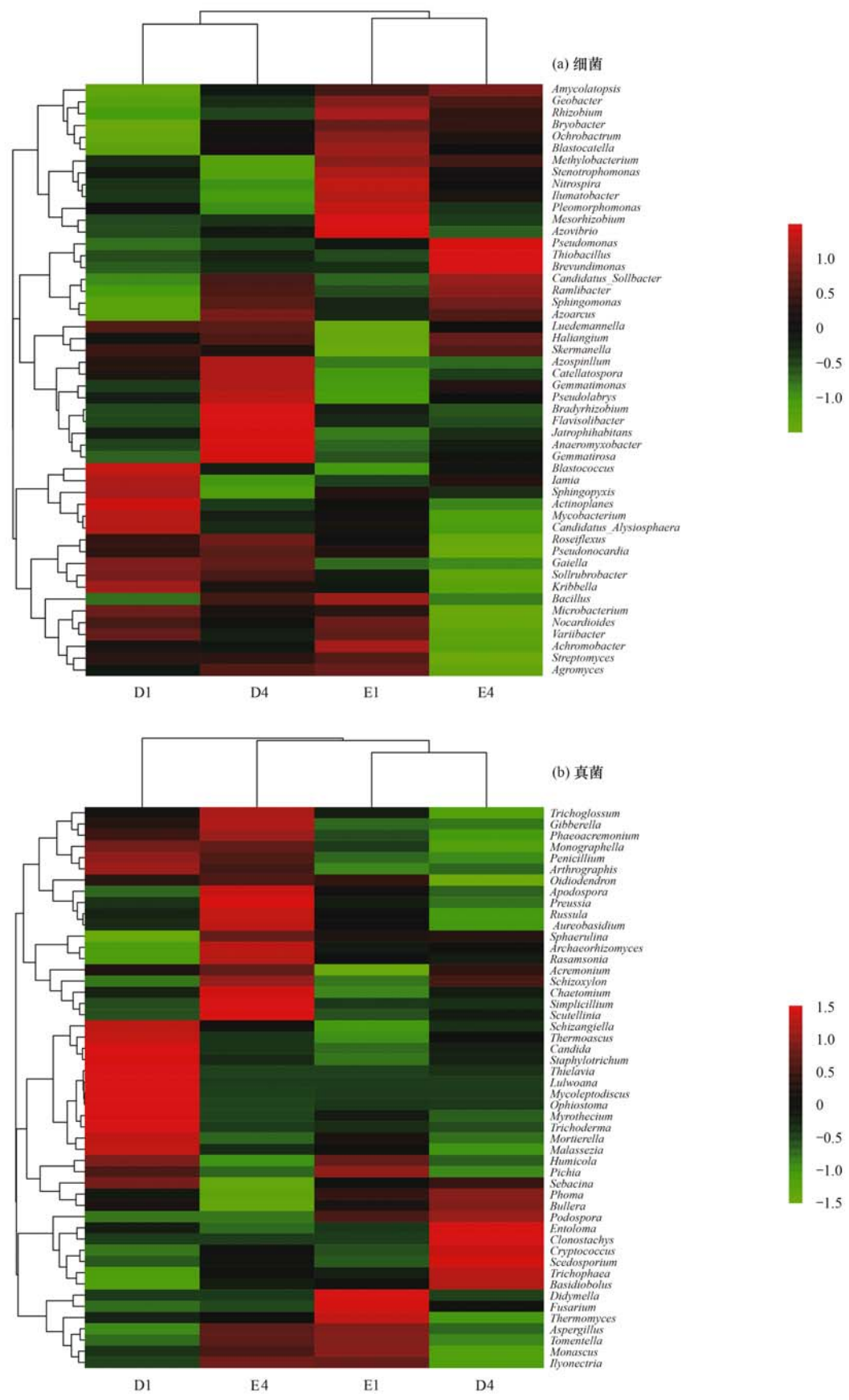


图 3 刺槐幼苗根际土壤结合聚类分析的属水平细菌和真菌群落组成热图

Fig. 3 Heat-maps of the relative abundance of bacterial and fungal genera in the rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings

58.0% [图 5(b)], TC 是真菌优势属相对丰度变化的显著因子, 与红曲霉属 (*Monascus*)、*Aspergillus* 等的相对丰度呈正相关 ($P < 0.05$), 而与热子囊菌属 (*Thermoascus*) 和青霉属 (*Penicillium*) 等的相对丰度

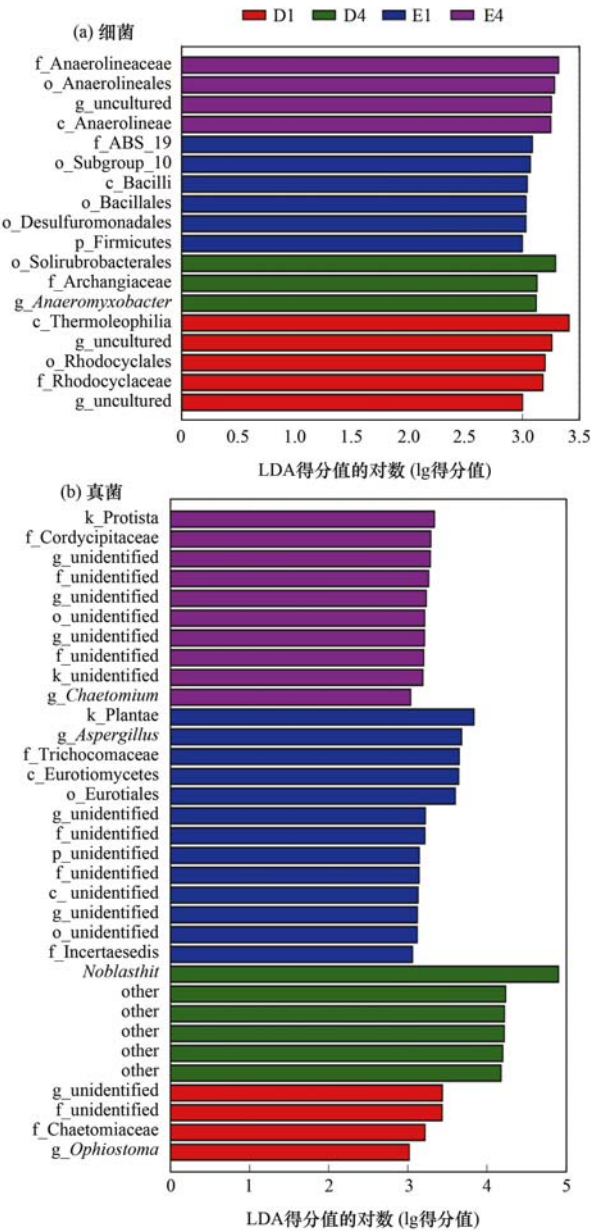


图4 刺槐幼苗根际土壤细菌和真菌在不同处理间具有显著差异的分类单元

Fig. 4 Taxon of bacteria and fungi with significant differences in the rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings

呈负相关($P < 0.05$),此外,WSOC 对主要优势属的解释率为 19.4%.

3 讨论

已有研究表明 CO_2 的施肥作用促进了植物光合作用,使分配到根系的光合产物比例明显上升,提高了植物向根际土壤释放根系分泌物及根脱落物的比例^[10~18],如本研究中尽管刺槐幼苗根际土壤 TC 在 CO_2 升高下变化不明显,但 WSOC 含量的显著增加和 C/N 的显著降低表明了大气 CO_2 浓度升高提高了幼苗根系分泌物释放比例;然而,刺槐幼苗根际土壤 pH 值的显著增加却与其它植物根际 pH 对高浓度 CO_2 的响应结果相反^[40],这可能与刺槐根系丛

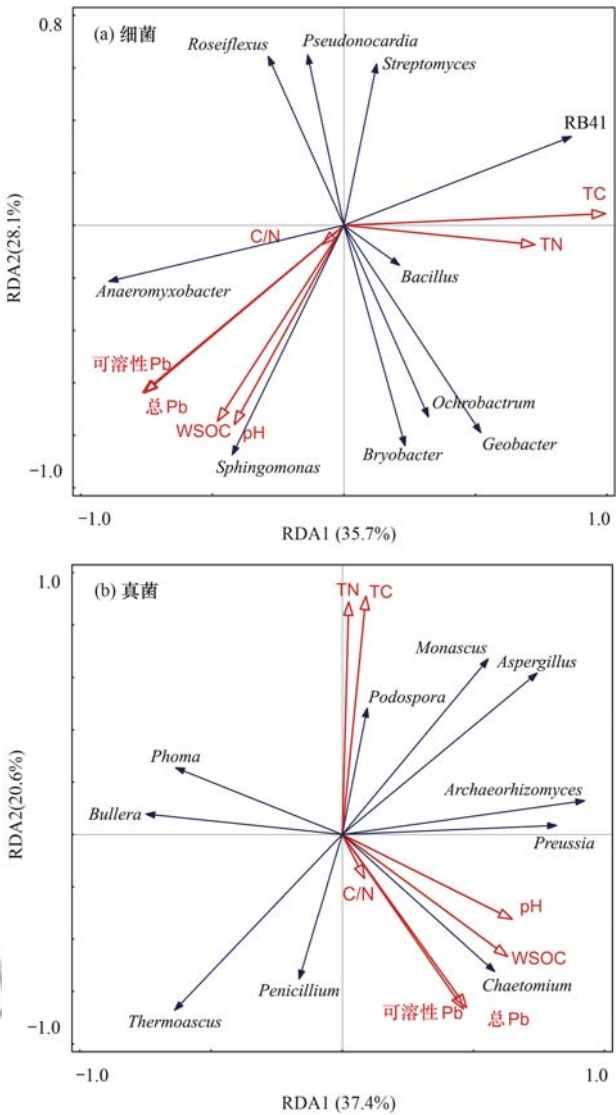


图5 刺槐幼苗根际土壤细菌和真菌优势属相对丰度与土壤环境因子的冗余分析

Fig. 5 RDA data for the relative abundance of bacterial and fungal genera and soil characteristics in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings

枝菌根真菌(AMF)的定植有关.已有研究表明 AMF 会分泌释放球囊霉素至根际土壤中,从而会提高根际土壤 pH 值和 N 含量^[41,42].而大气 CO_2 浓度升高下 WSOC、pH 及 C/N 等土壤因子的变化共同引起了刺槐幼苗根际土壤细菌和真菌群落物种丰富度和多样性的显著变化;此外,大气 CO_2 升高下细菌和真菌优势属相对丰度的变化也与上述幼苗根际土壤因子对高浓度 CO_2 响应有关,如 RDA 结果表明幼苗根际土壤 TC 和 WSOC 是影响细菌和真菌优势属相对丰度的主要环境因子.

大量研究表明,Pb 影响土壤微生物生长及群落特征^[24~28],本研究也证实了这点.土壤 Pb 污染下,刺槐幼苗根际土壤细菌群落优势属相对丰度变化除与 TC 显著相关外,还与可溶性 Pb 有关,而真菌优

势属与 Pb 的关系不显著,表明了细菌和真菌对 Pb 响应的差异性.此外,Pb 显著降低了细菌和真菌群落多样性及真菌的物种丰富度,表明 Pb 对部分物种的生存或生长繁殖具有抑制性.

大气 CO₂ 升高提高了土壤 Pb 污染下幼苗根际土壤 pH、TC、TN 及 C/N,降低了根际土壤可溶性 Pb 含量.根际土壤 TN 的显著增加表明大气 CO₂ 升高会促进 Pb 污染下刺槐幼苗根系对含 N 化合物如游离氨基酸、短肽的释放量增加^[43],此外,根据已有研究^[44],根系 AMF 对球囊霉素的释放量也会增加,从而表现出根际土壤 TN 显著增加现象.CO₂ 升高下可溶性 Pb 含量的降低与 pH 增加有关,然而土壤总 Pb 含量的显著降低可能与 CO₂ 会提高幼苗生物量有关^[45],幼苗生物量的增加会提高其对 Pb 的积累量,从而出现了可溶性 Pb 降低背景下土壤总 Pb 也降低的现象.总体而言,在试验过程中随时清理盆中枯落物和杂草条件下,大气 CO₂ 升高主要通过根系分泌物途径实现对土壤 Pb 污染下刺槐幼苗根际土壤各因子的影响,而这也是细菌和真菌生物多样性和群落特征变化的来源.细菌丰富度和多样性的显著增加表明大气 CO₂ 浓度升高会改善 Pb 污染下刺槐幼苗根际细菌的生境,利于细菌繁殖和多样性的保持及增长,但真菌群落多样性变化不显著,仅表现出了丰富度降低,表明了高浓度 CO₂ 提高了 Pb 对真菌的抑制性.土壤 Pb 污染下细菌相对丰度最高的前两位优势属 *Ochrobactrum* 和 *Sphingomonas* 受 CO₂ 影响不显著,而真菌 *Archaeorhizomyces* 和 *Aspergillus* 相对丰度在高浓度 CO₂ 下显著增加,且高浓度 CO₂ 也显著提高了前 20 位优势属总的相对丰度,RDA 结果显示优势属相对丰度的这些变化是根际土壤环境因子对高浓度 CO₂ 响应的综合作用结果,尤以 TC 和可溶性 Pb 的变化对根际微生物影响最大.

总体看,全球大气 CO₂ 浓度升高背景下,土壤重金属污染会影响植物根际土壤环境因子,尤其影响重金属在根际的运移特征.研究结果显示重金属在根际的运移特征可能与植物种类有关,对于 AMF 共生植物如刺槐会降低重金属的可溶性,但无 AMF 共生的植物依目前的研究结果主要表现为其根系可溶性重金属浓度增加^[46],而根际土壤微环境因子的这些变化明显影响根际微生物群落特征,预示着大气 CO₂ 浓度升高和土壤重金属污染耦合会影响植物根际微生态系统的结构和功能,且存在植物种类差异性.

4 结论

通过连续 4 个生长季大气 CO₂ 浓度升高与土

壤 Pb 污染耦合对刺槐幼苗根际土壤微生物影响试验表明:大气 CO₂ 浓度升高提高($P < 0.05$)了 Pb 污染下根际土壤 TN 含量,并降低($P < 0.05$)了可溶性 Pb 和总 Pb 含量;大气 CO₂ 浓度升高和土壤 Pb 污染耦合下根际土壤微环境特征的改变提高($P < 0.05$)了根际土壤细菌丰富度及细菌和真菌多样性,但真菌丰富度却降低($P < 0.05$);前 50 属聚类及 LEFSe 分析表明根际土壤细菌和真菌部分类群如 *Anaerolineaceae*、*Solirubrobacterales*、*Eurotiomycetes*、*Aspergillus* 和 *Trichocomaceae* 的相对丰度受大气 CO₂ 浓度升高与土壤 Pb 污染耦合影响显著;RDA 分析表明,幼苗根际土壤 TC 和可溶性 Pb 对 CO₂ 浓度升高的响应特征显著($P < 0.05$)影响根际细菌和真菌优势种群相对丰度,表明大气 CO₂ 浓度升高主要通过植物根系分泌物途径影响重金属污染下根际土壤微生物群落结构特征,进而可能影响根际微生态系统的稳定及功能.

参考文献:

- [1] Buchenauer H. Biological control of soil-borne diseases by rhizobacteria [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 1998, **105**(4): 329-348.
- [2] Atkinson D, Watson C A. The beneficial rhizosphere: a dynamic entity [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, **15**(2): 99-104.
- [3] Sylvia D M, Chellemi D O. Interactions among root-inhabiting fungi and their implications for biological control of root pathogens [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, **73**: 1-33.
- [4] Jia X, Li X D, Zhao Y H, et al. Soil microbial community structure in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings exposed to elevated air temperature and cadmium-contaminated soils for 4 years [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2355-2363.
- [5] Kent A D, Triplett E W. Microbial communities and their interactions in soil and rhizosphere ecosystems [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2002, **56**: 211-236.
- [6] Patra A K, Abbadi L, Clays-Josserand A, et al. Effects of management regime and plant species on the enzyme activity and genetic structure of N-fixing, denitrifying and nitrifying bacterial communities in grassland soils [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(6): 1005-1016.
- [7] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere [A]. In: Keister D L, Cregan P B (Eds.). *The Rhizosphere and Plant Growth* [M]. Dordrecht: Springer, 1991. 15-24.
- [8] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls [J]. *Agronomie*, 2003, **23**(5-6): 375-396.
- [9] 刘树霞, 徐军田, 邹定辉. 大气 CO₂ 升高和紫外辐射相互作用对羊栖菜生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(21): 7089-7096.
- [10] Liu S X, Xu J T, Zou D H. Combined effects of increasing CO₂ concentrations and solar UV radiation on the physiological performance of *Hizikia fusiformis* Okamura (Sargassaceae, phaeophyta) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(21): 7089-7096.
- [10] Högy P, Keck M, Niehaus K, et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on biomass, yield and low molecular weight metabolites in wheat grain [J]. *Journal of Cereal Science*, 2010,

- 52(2): 215-220.
- [11] Perry L G, Andersen D C, Reynolds L V, *et al.* Vulnerability of riparian ecosystems to elevated CO₂ and climate change in arid and semiarid western North America[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(3): 821-842.
- [12] AbdElgawad H, Farfan-Vignolo E R, de Vos D, *et al.* Elevated CO₂ mitigates drought and temperature-induced oxidative stress differently in grasses and legumes[J]. *Plant Science*, 2015, **231**: 1-10.
- [13] Grandlic C J, Geib I, Pilon R, *et al.* Lead pollution in a large, prairie-pothole lake (Rush Lake, WI, USA): effects on abundance and community structure of indigenous sediment bacteria[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(1): 119-126.
- [14] Hungate B A, van Groenigen K J, Six J, *et al.* Assessing the effect of elevated carbon dioxide on soil carbon: a comparison of four meta-analyses[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(8): 2020-2034.
- [15] Johansson E M, Fransson P M A, Finlay R D, *et al.* Quantitative analysis of soluble exudates produced by ectomycorrhizal roots as a response to ambient and elevated CO₂ [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1111-1116.
- [16] Paterson E, Hall J M, Rattray E A S, *et al.* Effect of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes[J]. *Global Change Biology*, 1997, **3**(4): 363-377.
- [17] Guo J, Zhang W J, Zhang M Q, *et al.* Will elevated CO₂ enhance mineral bioavailability in wetland ecosystems? Evidence from a rice ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2012, **355**(1-2): 251-263.
- [18] Xu M Y, He Z L, Deng Y, *et al.* Elevated CO₂ influences microbial carbon and nitrogen cycling[J]. *BMC Microbiology*, 2013, **13**, doi: 10.1186/1471-2180-13-124.
- [19] 方雅莉, 朱宗强, 赵宇宇, 等. 桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1498-1504.
- Fang Y L, Zhu Z Q, Zhao N N, *et al.* Passivation and remediation effects and mechanisms of plant residual modified materials on lead-contaminated soils[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1498-1504.
- [20] 王博强, 李晨阳, 卢伟, 等. CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2978-2987.
- Wang B Q, Li C Y, Lu W, *et al.* Shift of Microbial communities during the CO₂-brine-sandstone interaction process [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2978-2987.
- [21] 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 等. 棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3846-3854.
- Liu S D, Han Y G, Zhu X P, *et al.* Effects of cotton stalk biochar on the structure and function of fungi community in alkaline rhizosphere soil of rice under cadmium pollution[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3846-3854.
- [22] Jia X, Wang L, Zhao Y H, *et al.* Soil microbial communities in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. after being exposed to elevated atmospheric CO₂ and cadmium for 4 years[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **154**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103661.
- [23] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(2): 293-298.
- Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(2): 293-298.
- [24] Huang S P, Jia X, Zhao Y H, *et al.* Response of *Robinia pseudoacacia* L. rhizosphere microenvironment to Cd and Pb contamination and elevated temperature [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **108**: 269-277.
- [25] Huang S P, Jia X, Zhao Y H, *et al.* Elevated CO₂ benefits the soil microenvironment in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Cd- and Pb-contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 606-616.
- [26] Wang C Y, Wu B D, Jiang K, *et al.* Effects of different concentrations and types of Cu and Pb on soil N-fixing bacterial communities in the wheat rhizosphere[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **144**: 51-59.
- [27] Stefanowicz A M, Kapusta P, Zubeck S, *et al.* Soil organic matter prevails over heavy metal pollution and vegetation as a factor shaping soil microbial communities at historical Zn-Pb mining sites [J]. *Chemosphere*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124922.
- [28] Jia X, Zhang N J, Zhao Y H, *et al.* A consecutive 4-year elevated air temperature shaped soil bacterial community structure and metabolic functional groups in the rhizosphere of black locust seedlings exposed to lead pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139273.
- [29] Zhao Y H, Jia X, Wang W K, *et al.* Growth under elevated air temperature alters secondary metabolites in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Cd- and Pb-contaminated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 586-594.
- [30] Jia X, Zhao Y H, Liu T, *et al.* Elevated CO₂ affects secondary metabolites in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Cd- and Pb-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2016, **160**: 199-207.
- [31] ISSS, FAO, ISRIC. World reference base for soil resources[R]. Rome: ISSS-ISRIC-FAO, 1998. 1-68.
- [32] Li T Q, Tao Q, Han X, *et al.* Effects of elevated CO₂ on rhizosphere characteristics of Cd/Zn hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **454-455**: 510-516.
- [33] Wang M, Tian Q X, Liao C, *et al.* The fate of litter-derived dissolved organic carbon in forest soils: results from an incubation experiment[J]. *Biogeochemistry*, 2019, **144**(2): 133-147.
- [34] Kim S, Kang H. Effects of elevated CO₂ and Pb on phytoextraction and enzyme activity [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2011, **219**: 365-375.
- [35] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010, **7**(5): 335-336.
- [36] Blaxter M, Mann J, Chapman T, *et al.* Defining operational taxonomic units using DNA barcode data [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, **360**(1462): 1935-1943.
- [37] Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, *et al.* The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools [J]. *Nucleic Acids Research*, 2013, **41**(D1): D590-D596.
- [38] Kõljalg U, Nilsson R H, Abarenkov K, *et al.* Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi [J]. *Molecular Ecology*, 2013, **22**(21): 5271-5277.
- [39] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(3): 379-423.
- [40] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(4): 623-656.

- [41] Chao A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population [J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, **11** (4): 265-270.
- [42] Jia X, Wang W K, Chen Z H, *et al.* Concentrations of secondary metabolites in tissues and root exudates of wheat seedlings changed under elevated atmospheric CO₂ and cadmium-contaminated soils[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, **107**: 134-143.
- [43] Chen B D, Liu Y, Shen H, *et al.* Uptake of cadmium from an experimentally contaminated calcareous soil by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) [J]. Mycorrhiza, 2004, **14** (6): 347-354.
- [44] Yang Y R, Song Y Y, Scheller H V, *et al.* Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Robinia pseudoacacia* in uncontaminated and heavy metal contaminated soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **86**: 146-158.
- [45] Jia X, Zhang C Y, Zhao Y H, *et al.* Three years of exposure to lead and elevated CO₂ affects lead accumulation and leaf defenses in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **349**: 215-223.
- [46] Jia X, Zhao Y H, Liu T, *et al.* Elevated CO₂ increases glomalin-related soil protein (GRSP) in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Pb- and Cd-contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 349-357.

《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)