

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

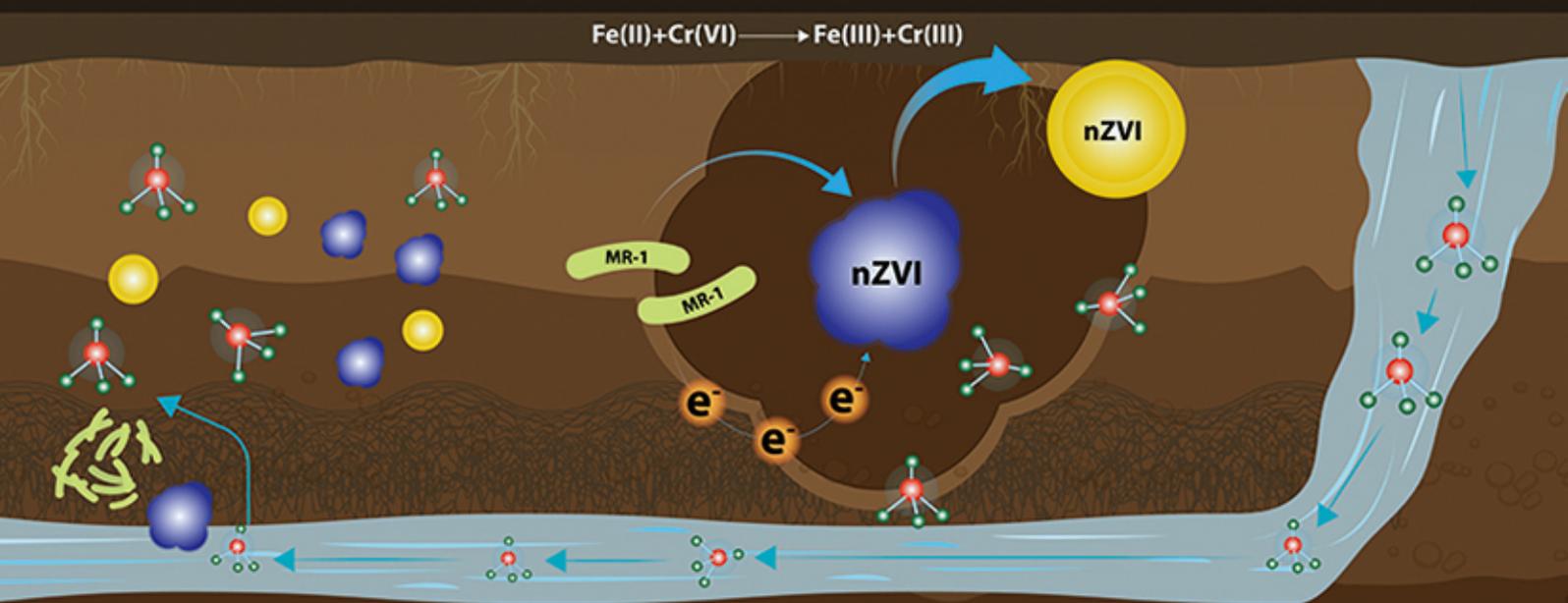
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期  
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时空分布与健康效应评估 ..... 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化模拟与分析 ..... 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM<sub>2.5</sub> 污染影响 ..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 ..... 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 ..... 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 ..... 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 ..... 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 ..... 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 ..... 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 ..... 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 ..... 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 ..... 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 ..... 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 ..... 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 ..... 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 ..... 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 ..... 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 ..... 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 ..... 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 ..... 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 ..... 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 ..... 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 ..... 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 ..... 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 ..... 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 ..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 ..... 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 ..... 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 ..... 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 ..... 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 ..... 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 ..... 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 ..... 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 ..... 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中铜元素的空间分布特征及其风险评价 ..... 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜形态的影响 ..... 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 ..... 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 ..... 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 ..... 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应 ..... 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 ..... 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 ..... 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 ..... 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 ..... 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 ..... 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 生物炭对土壤 N<sub>2</sub>O-N 排放和 NH<sub>3</sub>-N 挥发的影响 ..... 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 ..... 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 ..... 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

# 不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应

李雨桐<sup>1,2,3</sup>, 杨杉<sup>1</sup>, 张艺<sup>1</sup>, 范例<sup>1,2,3</sup>, 刘坤<sup>1\*</sup>, 张晟<sup>1</sup>

(1. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400044; 3. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为探讨农田土壤古菌群落结构与构建机制对不同类型重金属污染的响应特征及影响因素, 采集高地质背景区、涉重金属企业和工矿区周边农田土壤样品, 通过高通量测序, 结合土壤理化性质, 对土壤古菌群落组成及构建机制进行研究. 结果表明, 本研究区域内农田土壤重金属空间异质性高, 镉污染较广泛, 除工矿区部分土壤样本存在强生态风险, 其他样本存在轻微的潜在生态风险. 不同地区古菌群落结构差异较大, 泉古菌门 (Crenarchaeota) 为优势菌门, 占比 62.7% ~ 98.3%, 其次为 Halobacterota (1.1% ~ 23.2%). 环境因子中, 土壤有机质含量、pH、砷和铅含量与古菌群落显著相关 ( $P < 0.05$ ), 是古菌群落结构差异的主要驱动因子. 零模型分析表明本研究古菌群落在系统发育上聚集, 确定性过程驱动古菌群落构建, 有机质和 pH 等环境因子的异质选择作用主导古菌群落形成. 因此, 环境过滤的确定性作用最终驱动本研究古菌群落构建, 环境异质性导致了古菌群落多样性和空间异质性, 从而增强古菌抵御环境胁迫的能力, 利于农田生态系统功能的稳定性和可持续性.

**关键词:** 群落构建; 古菌群落; 环境选择; 重金属污染; 高背景地质区

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4481-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202101237

## Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions

LI Yu-tong<sup>1,2,3</sup>, YANG Shan<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, FAN Li<sup>1,2,3</sup>, LIU Kun<sup>1\*</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>

(1. Chongqing Academy of Eco-environmental Science, Chongqing 401147, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Soil archaeal communities play an essential role in the biogeochemical cycles of agricultural ecosystems. However, the response and mechanisms of soil archaeal community structure and assembly processes to heavy metal pollution remain poorly understood. This study examined the archaeal community composition and assembly process and their relationships with environmental factors in arable soils around high geological background areas, metal enterprises, and mining areas, based on high-throughput sequencing. The arable soils within the study area exhibited high spatial heterogeneity of heavy metal content, as well as severe cadmium pollution. The ecological risk levels were high in some soil samples from mining areas, but low to moderate in other soil samples. Crenarchaeota (62.7%-98.3%) was the dominant phyla in all soil samples, followed by Halobacterota (1.1%-23.2%). The pH, organic matter, arsenic, and lead contents of the soil were significantly correlated with the archaeal community ( $P < 0.05$ ), making them the main driving factors of archaeal community structure. The null-model analysis showed that the assembly process of the archaeal community was mainly influenced by heterogeneous processes, including heterogeneous selection (deterministic process) and dispersal limitation (stochastic process). Heterogeneous selection played a vital role in our study areas, while homogeneous selection only occurred in samples around the metal enterprises. Therefore, environmental selection was the ultimate driver of the archaeal community assembly process in this study, and its relative importance varied according to habitat type. Environmental heterogeneity increased the contribution of heterogeneous selection to community assembly, thus enhancing the community's resistance to environmental stress, and contributing to the stability and sustainability of the agricultural ecosystem.

**Key words:** community assembly; archaeal community; environmental selection; heavy metals pollution; high geological background area

过去几十年里,我国土壤重金属污染状况一直是备受关注的热点问题<sup>[1-4]</sup>. 第一次全国土壤环境质量调查报告显示, 19.4% 的农业土壤样品存在汞、砷、铬、铅和镉超标的现象<sup>[5]</sup>. 土壤重金属污染具有累积性、潜伏性、长期性和不可逆性的特点, 直接威胁土地质量和动植物的生长发育, 还会通过食物链危及人类健康. 我国农田土壤重金属污染分布广泛, 空间异质性高, 分人为和自然两种成因<sup>[3, 6]</sup>. 在过去, 人们对施肥、污水灌溉、采矿冶金和交通运

输等人类活动引起的重金属污染已有深入地研究<sup>[1-4]</sup>, 认为人为源的重金属污染生态风险较高. 仅有部分研究关注自然成因导致的土壤重金属污

收稿日期: 2021-01-23; 修订日期: 2021-02-25

基金项目: 重庆市生态环境局科研项目(2019-130); 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyjmsxmX0784); 重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jsex-mszdX0064)

作者简介: 李雨桐(1994~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤微生物生态学, E-mail: liyutonglyt@126.com

\* 通信作者, E-mail: liukun\_cqraes@126.com

染<sup>[7-9]</sup>,发现自然源的重金属污染对生态系统的危害较轻.然而以往评估生态风险都是基于指数法,而忽略了直接影响土壤健康的微生物指标.

微生物对重金属胁迫的响应远比动植物要敏感<sup>[10]</sup>,细微的环境变化都能引起微生物群落的改变,因此,土壤微生物被认为是表征土壤环境质量的指标之一,可能会更直观地反映不同污染源的生态效应,及时反映土壤污染状况<sup>[11]</sup>.土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,可以驱动物质循环和促进作物生长,对吸收和转移污染物以及缓解重金属毒性起到关键作用<sup>[11-13]</sup>.近年来人们开始关注土壤微生物对重金属污染的响应.有研究表明,变形菌和放线菌等细菌在不同污染程度的土壤表现出不同的耐受性<sup>[11]</sup>.Li等<sup>[13]</sup>的研究也发现高含量重金属会降低微生物多样性以及拟杆菌和硝化螺旋菌的相对丰度.于皓等<sup>[14]</sup>的研究则发现铬污染显著影响土壤细菌群落结构与构建机制.总的来说,土壤重金属污染显著影响了微生物群落结构和构建过程.

然而目前较少研究关注土壤古菌群落对重金属污染的响应特征及群落构建机制.古菌是一类数量丰富、种类多样且分布广泛的微生物,对全球气候和生物地球化学循环发挥重要作用<sup>[15,16]</sup>.之前,古菌被认为只存在于极端环境,但高通量测序技术揭示了自然界大量未培养古菌,特别是氨氧化古菌的发现彻底改变了人们对细菌主导氮循环的认识.Li等<sup>[12]</sup>的研究认为古菌类群对重金属污染具有更高的抗性,可以通过改变重金属价态降低其毒性,从而利于其他生物类群的生存.因此,土壤古菌在生态系统中起到举足轻重的地位.Jiao等<sup>[17]</sup>的研究认为pH、温度和地理距离等都可以显著影响土壤古菌群落构建.Zheng等<sup>[18]</sup>的研究发现古菌群落构建受pH和采样深度等影响.群落构建直接决定群落组成和结构,进而影响群落功能,因此揭示群落构建机制对深入理解土壤古菌群落如何适应重金属污染有重要意义.

西南地区地形复杂,长期自然风化过程中,成土母质中的重金属会被黏土矿物吸附,在土壤中大量富集,形成高地质背景带<sup>[9]</sup>,伴随着人类活动,土壤中重金属不断累积和再分配,加剧了污染程度.因此本文选取3种不同污染源的重金属污染区域周边的农田土壤为研究对象,包括高地质背景区、工矿区和涉重金属生产企业,采用高通量测序技术研究不同地区土壤古菌群落组成与结构,深入挖掘不同程度重金属胁迫下土壤古菌群落构建机制和驱动因素,以为农业土壤的防控治理和可持续发展提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究分别在重庆市潼南区某工业园周边(TN、TJ)、秀山县西北部典型汞矿周边(LD、YM)和秀山-酉阳典型地质高背景带(CJ、HF)附近农田采集5~10个表层土壤样品.3个研究区域位置分布见图1,均属于亚热带湿润季风气候,气温正常,降水充沛.采用200 m×200 m网格布样法布设点位,每一个样点采用棋盘式采样法采集0~20 cm的表层土壤样品,使用木铲直接采取样品,去除植物根、石块等杂物,混匀后组成一个复合样品,装入样品袋.土壤样品风干、研磨后送实验室测试.另取一份于无菌离心管中,放入装有冰袋的保温箱内,迅速带回实验室,-80℃冰箱冷冻干燥保存,用于DNA提取.

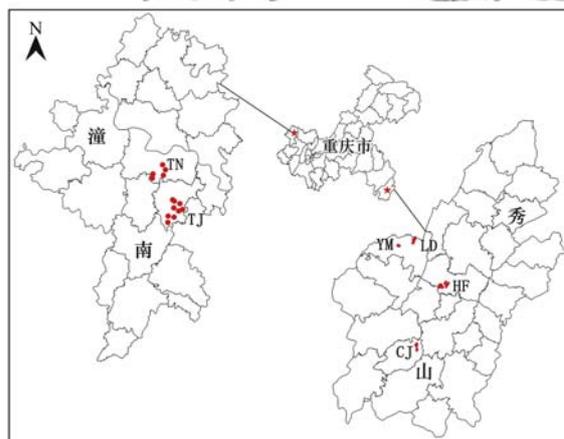


图1 采样区点位分布示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

### 1.2 土壤环境指标监测

土壤pH采用电位法测定,水土比2.5:1;土壤有机质含量采用重铬酸钾法测定;土壤重金属镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、锌(Zn)、铜(Cu)、铬(Cr)、镍(Ni)和类金属砷(As)用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher, 美国)测定.

### 1.3 土壤DNA提取

依托上海美吉生物医药科技有限公司进行土壤DNA提取与Illumina MiSeq高通量测序.利用Qiagen DNA Extraction Kits试剂盒(Qiagen GmbH, 德国)进行DNA提取,根据说明书进行操作.选择引物524F(5'-TGTCAGCCGCCGCGTAA-3')和958R(5'-YCCGGCGTTGAVTCCAATT-3')对16S rRNA的V4~V5区进行PCR扩增.

### 1.4 数据分析

下机后得到的测序数据依托上海美吉生物医药科技有限公司的云平台进行处理和分析.简单来说,

利用 FLASH (V1.2.11, <http://ccb.jhu.edu/software/FLASH/>) 对每个样品的序列进行拼接, 根据 QIIME (V1.9.1, <http://qiime.org/>) 质控流程进行质量控制并去除嵌合体, 得到有效序列后利用 Uparse 7.0 按照 97% 的相似性聚类成操作分类单元 (operational taxonomic units, OTUs), 并采用 SILVA 数据库 (<http://www.arb-silva.de/>) 对 OTUs 进行注释. 运用 Mothur 计算群落  $\alpha$  多样性, QIIME 构建系统发育树、计算群落  $\beta$  多样性等. 使用 R 软件 (V 3.6.2) 进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 和 Spearman 相关性分析等.

根据 Stegen<sup>[19]</sup> 的研究方法, 使用 R 的 “picante” 包计算平均最近分类距离 (mean nearest taxon distance, MNTD), 随后利用零模型将系统发育树分支末端的物种随机置换 999 次, 比较 MNTD 观测值与零模型生成的随机值之间的偏差, 得到最近分类指数 (nearest taxon index, NTI). NTI 表示群落内所有物种与其亲缘关系最近的种间距离的平均值, NTI > 0 表示组内样品聚类, NTI < 0 表示组内样品存在过度分散. 进一步计算平均最近种间距离 (between-community mean nearest taxon distance,  $\beta$ MNTD) 用来量化群落系统发育周转率, 最近  $\beta$  分类指数 (between-community nearest taxon index,  $\beta$ NTI) 量化  $\beta$ MNTD 观测值和零模型生成的随机值之间偏差.  $|\beta$ NTI| > 2 表示随机过程,  $|\beta$ NTI| < 2 表示确定过程, 计算公式如下.

$$\text{MNTD} = \sum_{i_k=1}^{n_k} f_{i_k} \min(\Delta i_{kj_m}) \quad (1)$$

$$\beta\text{MNTD} = 0.5 \left[ \sum_{i_k=1}^{n_k} f_{i_k} \min(\Delta i_{kj_m}) + \sum_{i_m=1}^{n_m} f_{i_m} \min(\Delta i_{mj_k}) \right] \quad (2)$$

$$\text{NTI} = \frac{\text{MNTD}_{\text{obs}} - \text{MNTD}_{\text{null}}}{\text{sd}(\text{MNTD}_{\text{null}})} \quad (3)$$

$$\beta\text{NTI} = \frac{\beta\text{MNTD}_{\text{obs}} - \beta\text{MNTD}_{\text{null}}}{\text{sd}(\beta\text{MNTD}_{\text{null}})} \quad (4)$$

式中,  $f_{i_k}$  和  $f_{i_m}$  是群落  $k$  和  $m$  中 OTU <sub>$i$</sub>  相对丰度;  $n_k$  和  $n_m$  是群落  $k$  和  $m$  中 OTU 数量;  $\min(\Delta i_{kj_m})$  和  $\min(\Delta i_{mj_k})$  分别是群落  $k$  中 OTU <sub>$i$</sub>  与  $m$  中 OTU <sub>$j$</sub>  和群落  $m$  中 OTU <sub>$i$</sub>  与  $k$  中 OTU <sub>$j$</sub>  之间的最小系统发育距离.  $\text{MNTD}_{\text{obs}}$  和  $\beta\text{MNTD}_{\text{obs}}$  是观察到的平均实际值,  $\text{MNTD}_{\text{null}}$  和  $\beta\text{MNTD}_{\text{null}}$  是零模型随机分配 999 次得到的平均预测值.

此外, 根据 Stegen 等<sup>[19]</sup> 的研究方法计算  $\text{RC}_{\text{bray}}$  (Bray-Curtis-based Raup-Crick) 来量化基于 Bray-Curtis 相异性的 Raup Crick 指数观测值和零模型随机值之间差异. 结合  $\beta$ NTI 和  $\text{RC}_{\text{bray}}$  结果, 确定性构建过程由同质性选择 ( $\beta$ NTI < -2) 和异质性选择 ( $\beta$ NTI > 2) 组成, 随机性过程包括扩散限制 ( $|\beta$ NTI| < 2,  $\text{RC}_{\text{bray}} > 0.95$ ) 和同质性扩散 ( $|\beta$ NTI| < 2,  $\text{RC}_{\text{bray}} < -0.95$ ). 如果  $|\beta$ NTI| < 2,  $|\text{RC}_{\text{bray}}| < 0.95$ , 则群落构建过程由未知因素控制.

### 1.5 土壤重金属生态风险评价

采用 Hakanson<sup>[20]</sup> 的潜在生态危害指数法评价研究区土壤重金属生态风险, 分级标准见表 1, 计算公式如下.

$$\text{RI} = \sum \text{EI} = \sum (T_i \times C_i) = \sum (T_i \times C_i / C_n) \quad (5)$$

式中, RI 为综合潜在生态风险指数; EI 为单项潜在生态风险指数;  $C_i$  为某重金属的单因子污染指数;  $C_i$  为土壤中某重金属的实测值;  $C_n$  为某重金属的评价标准, 本文采用筛选值作为评价标准;  $T_i$  为重金属的毒性响应系数, 即 Zn(1) < Cr(2) < Cu、Ni、Pb(5) < As(10) < Cd(30) < Hg(40).

表 1 Hakanson 潜在生态风险分级标准

Table 1 Indices used to assess the potential ecological risks

生态危害	轻微	中等	强	很强	极强
EI	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥ 320
RI	< 150	150 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1 200	≥ 1 200

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤理化特征

6 个地区土壤样品 pH 和有机质 (SOM) 含量如表 2 所示. 可以看出, 不同地区理化性质差异较大. pH 的顺序为 TJ > TN > LD > HF > CJ > YM, 除 TN 和 TJ 外, 其他 4 个地区均为酸性土壤. TN 和 TJ 土壤样品 SOM 含量在 10.0 ~ 47.5 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值显著

高于其他采样区 ( $P < 0.01$ ), 可能与较高的肥料投入有关. 整体上, 小空间尺度下的土壤样品间理化性质差异较小, 灌溉方式、肥料用量和土壤质地等因素都会导致理化因子的异质性. 然而矿区周边农田人类活动干扰最大, 样品间土壤理化性质差异显著 ( $P < 0.01$ ), YM 周边矿业开采时间久, 土壤酸化严重.

### 2.2 土壤重金属分布特征及污染评价

如表 2 所示, 不同地区重金属含量差异明显, 在

土壤中分布不均匀. 整体上,各重金属含量按平均值由大到小依次为:Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Hg > Cd. 对比《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018),所有土壤样品 Cu、Pb、Cr、Ni 和 Zn 含量均没有超过风险筛选值,而 Cd 和 Hg 超标率分别为 56.6% 和 28.3%. 仅有 YM 地区部分样品 As 含量超标. 6 个地区土壤样品的 Cd 均有超标, CJ 样品的 Cd 超标率最高(88.9%), TJ 样品的 Cd 超标率最低(20.0%). 只有 YM 和 LD 周边样品存在 Hg 超标. 如表 2 所示,重金属综合潜在生态危害(RI)从大到小依次为 YM > LD > CJ > HF > TJ > TN. 结果表明矿区周边土壤污染 RI 值最高,存在轻微到强生态风险. 高地质背景区和涉重金属企业周边农田土壤的 RI 值都低于 150,存在轻微生态风险,但 CJ 有 55.6% 的样品 Cd 的潜在生态风险指数大于 40,存在轻微至强生态风险.

表 2 土壤重金属含量及污染指数<sup>1)</sup>

采样区域	pH	SOM /g·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Hg /mg·kg <sup>-1</sup>	As /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Cr /mg·kg <sup>-1</sup>	Ni /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>	RI
CJ	5.7 ± 0.9b	19.6 ± 4.6c	0.7 ± 0.4a	0.8 ± 0.4c	15.6 ± 5.0ab	35.0 ± 9.2a	26.0 ± 3.3bc	68.3 ± 9.3b	31.0 ± 8.8a	92.3 ± 21.4a	98.4 ± 41.4c
HF	5.7 ± 1.2b	19.1 ± 4.1c	0.3 ± 0.1b	0.5 ± 0.2cd	18.9 ± 5.6a	32.5 ± 6.7ab	40.3 ± 9.2a	80.5 ± 10.3a	37.5 ± 10.6a	95.5 ± 12.8a	54.2 ± 10.8d
LD	6.8 ± 1.0ab	16.4 ± 5.0c	0.5 ± 0.3ab	9.3 ± 15.9b	17.3 ± 5.4a	28.3 ± 7.4b	40.7 ± 8.5a	68.8 ± 12.3b	32.9 ± 8.0a	85.1 ± 17.4b	188.4 ± 181.3b
YM	4.9 ± 0.6c	24.8 ± 2.4b	0.5 ± 0.3ab	18.9 ± 21.0a	13.3 ± 5.2ab	35.2 ± 11.7a	32.0 ± 5.0b	80.0 ± 7.3a	37.7 ± 8.7a	98.8 ± 19.1a	634.7 ± 652.0a
TN	7.8 ± 0.9a	30.2 ± 12.9ab	0.3 ± 0.1b	0.0 ± 0.0d	8.4 ± 2.0b	26.6 ± 5.6b	20.7 ± 3.6c	66.7 ± 17.4b	36.8 ± 10.9a	74.6 ± 14.5c	23.0 ± 8.0e
TJ	7.9 ± 0.3a	34.0 ± 7.8a	0.3 ± 0.1b	0.0 ± 0.0d	8.2 ± 0.9b	24.3 ± 2.0bc	20.2 ± 2.8c	64.8 ± 16.6b	33.5 ± 6.5a	74.0 ± 6.9c	25.1 ± 9.0e

1) 同列不同小写字母表示不同区域之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 2.3 土壤古菌多样性和群落组成

测序数据处理后共得到 508 个 OTUs, 分类获得 12 门 25 纲 37 目 51 科 69 属 146 种. 不同地区样品 OTU 数目平均值从大到小依次为 TN(82) > TJ(78) > YM(30) > LD(26) > CJ(25) > HF(22), TN 和 TJ 样品土壤古菌多样性显著高于其他地区, 而高地质背景区样品多样性最低. 门水平上(图 2), 泉古菌门(Crenarchaeota)在 6 个地区土壤古菌群落都占据明显的优势, 其在 TN 和 TJ 样品中占比 61.2% 和 64.6%, 在其他 4 个地区占比 90% 以上. Halobacterota 在 TN 样品中平均相对丰度最高, 为 22.8%. 此外, 还检测到了广古菌门(Euryarchaeota)、Thermoplasmata 及其它未分类的古菌门类等.

将所有样品根据 RI 值分为 3 个污染水平, OTU 数目平均值从大到小依次为轻微(44) > 强(30) > 中等(26), 表明重金属轻微生态风险条件下土壤古菌呈现出最高的多样性. 目水平上(图 3), 随生态风险等级的增加, 亚硝化球菌

以上结果表明, 本研究土壤重金属空间异质性强, 与成土母质、农业管理方式及周边人类活动都有关. 污染最严重且分布广泛的重金属元素是 Cd, 其次是 Hg. 有研究表明, Cd 和 Hg 是农田土壤最普遍的污染物<sup>[2-4]</sup>. Cd 来源广泛, 自然成土过程中的迁移与再分配、污水灌溉和化肥农药的投入, 都能造成土壤 Cd 污染. 酸性土壤中 Cd 活性高且迁移性强, 易在植株中累积, 对人类健康产生威胁<sup>[7]</sup>. 因此, Cd 在 YM 样品中存在强生态危害, TN 样品中生态危害低. Hg 污染主要来源于矿业开采活动, 大气沉降、地面径流和地下径流等使采矿冶炼释放出来的 Hg 在周边农田土壤严重富集<sup>[3,4]</sup>. Hg 会被生物转化为毒性强的有机 Hg, 抑制生物细胞代谢, 降低机体功能<sup>[3,4]</sup>. Hakanson<sup>[20]</sup> 的评价尽管考虑了生态风险, 但是基于重金属总量, 未考虑重金属元素多种赋存形态和价态产生的生物毒性, 因此研究土壤微生物对重金属胁迫的响应十分必要.

(Nitrososphaerales) 平均相对丰度从 72.0% 降低到 53.4%, 而亚硝化杆菌(Nitrosotaleales) 平均相对丰度从 5.9% 增加到 33.5%. 此外还有少量的 Methanocellales 等产甲烷菌分布在各个样品中. Nitrososphaerales 相对丰度随 pH 的升高先升高后降低, Nitrosotaleales 则相反. 本研究结果表明古菌分布可能与 pH 有关.

Crenarchaeota 在本研究的农田土壤中占主导地位. Crenarchaeota 广泛存在于海洋、热泉和土壤等环境, 可以将氨氧化为亚硝酸盐进行化能自养生长, 是自然界数量最多、分布最广泛的氨氧化古菌类群<sup>[15,21,22]</sup>. 氨氧化过程是硝化作用的第一步, 是氮肥利用的关键, 可以控制温室气体 N<sub>2</sub>O 排放速率, 进而影响氮循环<sup>[21]</sup>. 此外, 这类古菌还被报道具有无机碳固定的功能<sup>[23-25]</sup>. Nitrososphaerales 和 Nitrosotaleales 为 Crenarchaeota 的优势类群, 除了氨氧化, 还具有生物膜形成、细胞表面修饰、糖类及芳香族化合物代谢等能力, 以此应对环境胁迫<sup>[23,24]</sup>. Halobacterota 是从广古菌门分出的新古菌门, 分类

到其门下的 Methanocellales 等产甲烷古菌, 可以进行厌氧发酵生成甲烷, 参与全球碳循环. 低污染的 TN 和 TJ 样本中有机质丰富, pH 偏碱性, 需要氨氧化古菌和产甲烷古菌协同进行物质循环, 因此群落多样性最高. 中等污染的 CJ 和 HF 样本中, pH 接近中性, 低浓度的重金属可以提供细胞生长和代谢所需的微量元素, 适宜微生物生长, 古菌多样性最低可能是因为细菌的大量繁殖. YM 样本中, 极端酸性和高浓度的重金属胁迫抑制细胞生长, 使得耐受菌生存下来获得生态位, 导致具有相同功能的优势菌 Nitrososphaerales 占比减少而 Nitrosotaleales 占比增加.

总而言之, 本研究典型重金属污染农田土壤古菌群落, 由氨氧化古菌和产甲烷古菌主导, 其相对贡献取决于土壤环境. 这一发现与 Jiao 等<sup>[17]</sup> 和 Liu 等<sup>[26]</sup> 的研究结果相似, 古菌在农田土壤主要促进硝化作用, 从而驱动农田生态系统碳氮循环.

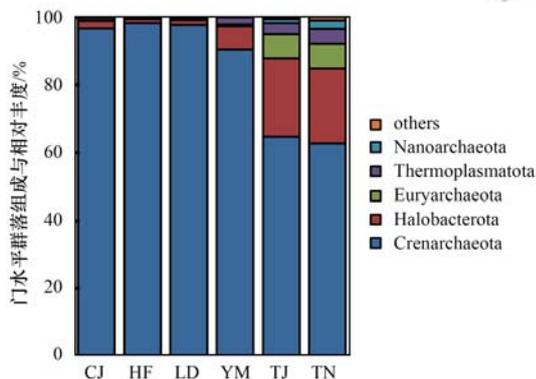
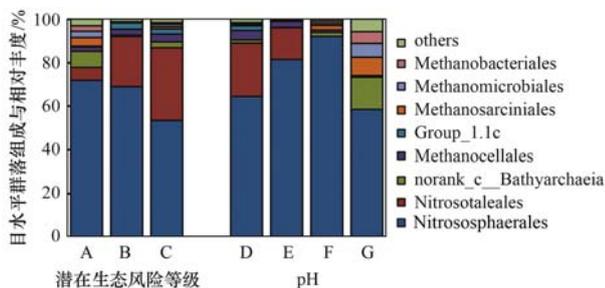


图 2 不同地区门水平土壤古菌群落结构

Fig. 2 Archaeal community composition of different typical areas at the phylum level



潜在生态风险等级: A. 轻微, B. 中等, C. 强;

pH: D < 5.5, E 5.5 ~ 6.5, F 6.5 ~ 7.5, G > 7.5

图 3 目水平土壤古菌群落结构

Fig. 3 Archaeal community composition at the order level

## 2.4 土壤古菌群落与环境因子的关系

RDA 结果显示 (图 4), CJ、HF、YM 和 LD 样品由于地理位置较近而聚集, 群落结构较为相似, TN 和 TJ 样品较分散. 第 1 轴 (RDA1) 和第 2 轴 (RDA2) 共贡献 67%, 表明环境因子可以很好地解

释群落结构差异. Envfit 检验表明, SOM ( $R^2 = 0.63$ ,  $P = 0.001$ )、pH ( $R^2 = 0.37$ ,  $P = 0.001$ )、Pb ( $R^2 = 0.36$ ,  $P = 0.001$ ) 和 As ( $R^2 = 0.33$ ,  $P = 0.001$ ) 对土壤古菌群落结构具有显著影响. 总体上, SOM 贡献最大, 与 Crenarchaeota 呈负相关, 与 Halobacterota 呈正相关, 对 TN 和 TJ 样品群落有显著的驱动作用. Pb 和 As 等重金属箭头方向与 CJ、HF、YM 和 LD 样品排列方向一致, 且对 Crenarchaeota 有正面影响. 图 5 显示 pH 与 Nitrosotaleales、Group\_1.1c 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), SOM 与 Nitrososphaerales 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 而二者与 Methanobacteriales 等呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), Hg、As 和 Pb 对 Methanobacteriales 等产甲烷菌呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), Pb 与 Nitrososphaerales 呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ).

整体上, 土壤 SOM 是本研究农田土壤古菌群落结构分异的主要驱动因素, 然而有研究表明 pH 主导古菌群落结构<sup>[26-28]</sup>. 据报道, SOM 对产甲烷古菌类群影响较大, 而 pH 对氨氧化古菌影响显著<sup>[17,28]</sup>. TN 和 TJ 样品较高的 pH 导致氨氧化古菌活性下降, 而丰富的有机质使产甲烷的 Halobacterota 类群占据生态位<sup>[28]</sup>, 导致该地区截然不同的群落结构空间格局. 此外, Crenarchaeota 类群对重金属耐受性更强, Nitrososphaerales 表现出较高的耐 Pb 和 As 性, 而 Nitrosotaleales 表现出较高的耐 Hg 性. 尽管 Pb 和 As 未构成污染, 但其含量与大多优势菌有显著的负相关关系, 可能是  $Pb^{2+}$  和  $As^{3+}$  的累积破坏细胞结构从而影响土壤古菌群落结构. 相反, Cd 含量对古菌群落作用较小, 可能是地质高背景区和中性土壤样品中, Cd 活性较低. 先前研究表明, Crenarchaeota 类群丰度与 Cd、Pb 和 As 等重金属含量呈正相关, 与本研究的結果相似<sup>[12,29]</sup>. 因此, 重金属等环境因子的空间异质性使得功能相似的古菌类群产生不同的响应, 从而导致群落结构的差异.

本研究中 pH 没有形成明显的环境梯度, 这可能是 pH 不是主导因素的原因, 但 pH 通过调节有毒金属的浸出和土壤养分的转化<sup>[27]</sup>, 间接影响古菌群落组成和构建. Cao 等<sup>[28]</sup> 的研究发现除 pH 外, 土壤养分含量与古菌丰度呈正相关, 此外古菌群落分布还受盐度、温度、海拔和纬度等因素影响<sup>[17,26,27]</sup>. 由于古菌群落之间、古菌与细菌之间和古菌与环境之间均存在复杂的互作网络, 本研究采样范围有限, 今后还需配合更大时空尺度的土壤污染调查, 才能更好地揭示污染农田土壤古菌群落组成和驱动因素.

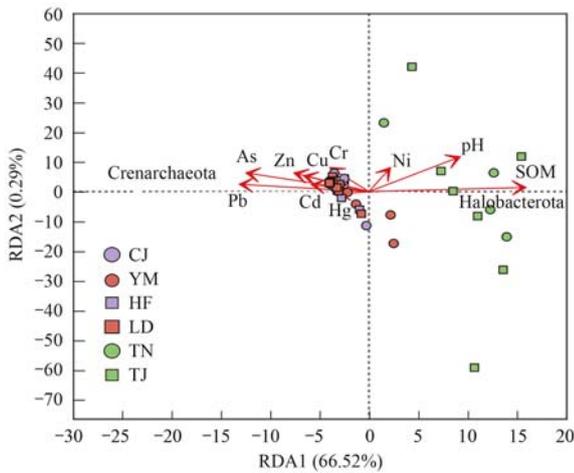
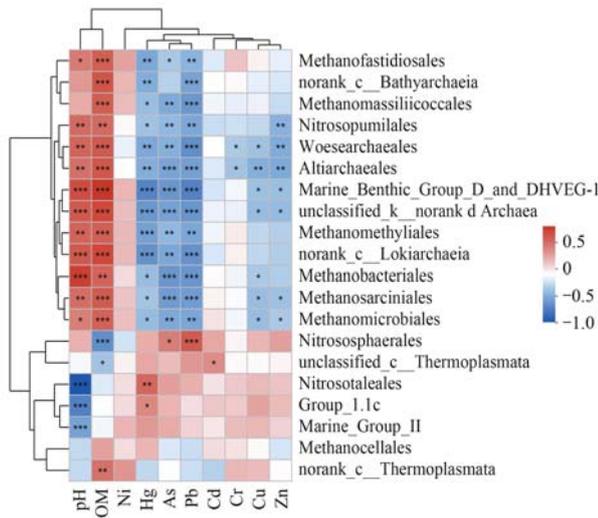


图 4 冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis



\*\*\* 表示  $P < 0.001$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

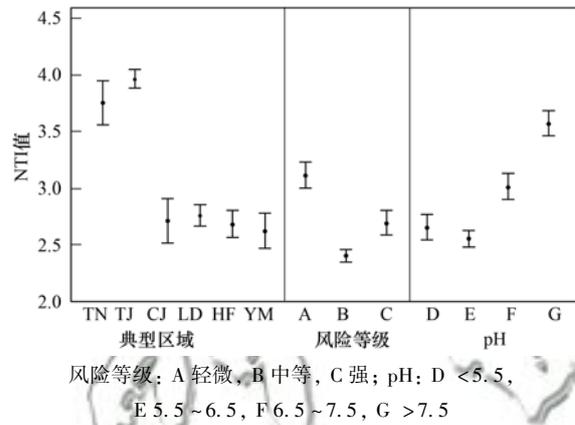
图 5 古菌群落与土壤理化性质的相关性热力图

Fig. 5 Spearman's correlation of archaeal communities and environmental factors

2.5 古菌群落构建机制分析

如图 6 所示,所有样本 NTI 指数平均值显著大于 0,表明各样本古菌群落在系统发育上聚类,聚类强度从大到小依次为  $TJ > TN > LD > CJ > HF > YM$ , TJ 和 TN 样本古菌群落有明显高于预期的系统发育聚类,表现出较强的确定性过程. 根据不同风险等级来看, NTI 值在轻微风险样品中最高,中等风险样品中最低,与 OTU 数量变化一致,表明重金属轻微污染刺激古菌群落表现出较高的系统发育聚类. 单因素方差分析结果表明  $pH > 7.5$  的样品中, NTI 平均值显著高于其他样品 ( $P < 0.05$ ),表明碱性土壤中古菌群落种间亲缘关系更紧密,而在中酸性土壤, NTI 随着 pH 的降低先降低后升高,这与图 3 群落组成的差异类似,表明重金属污染和 pH 可能是影响群落构建的重要因素. 此外,本研究结合  $\beta NTI$  和

$RC_{bray}$  指数分析不同地区土壤古菌群落构建过程,结果如图 7 所示. CJ、HF、YM 和 LD 周边农田土壤古菌群落构建主要是异质过程(异质选择 + 扩散限制)占主导,占比 80.0%~93.9%,其中异质选择(确定过程)占 53.3%~71.2%,扩散限制(随机过程)占 20.5%~26.7%,但均未发现同质选择过程. TJ 和 TN 农田土壤古菌群落构建过程中,确定过程占比 72.8%和 70.0%,其中异质选择分别占 54.3%和 50.0%,同质选择分别占 18.5%和 20.0%,而随机过程由扩散限制主导,分别占比 14.8%和 20.0%,相比其他地区,同质选择和确定过程的相对重要性增加. 整体上,本研究确定过程的相对贡献高于随机过程,二者共同驱动农田土壤古菌群落构建.



风险等级: A 轻微, B 中等, C 强; pH: D  $< 5.5$ , E  $5.5 \sim 6.5$ , F  $6.5 \sim 7.5$ , G  $> 7.5$

图 6 NTI 值

Fig. 6 Nearest taxon index

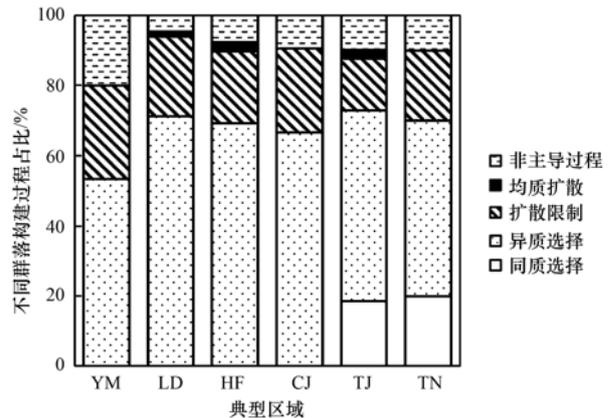


图 7 不同地区古菌群落构建过程占比

Fig. 7 Archaeal community assembly of different areas

越来越多证据表明,随机过程和确定过程会同时发生在群落构建中,二者相对作用大小随物种、研究区域和作物类型的不同而有所差异<sup>[30,31]</sup>. 一般来说,小时空尺度下环境选择起主要作用,大时空尺度下,扩散限制起主要作用<sup>[30]</sup>. 而 Jiao 等<sup>[17]</sup>的研究中,农田土壤古菌群落构建由环境过滤选择,古菌表现出强烈的生境偏好,如极端 pH 和温度等. 本研究采样区空间尺度较小,频繁的人类活动和持续的外

源重金属输入等使环境剧烈变化,土壤环境空间异质性高,古菌群落构建过程主要受异质选择影响,地理距离引起的扩散限制作用较小. RDA 结果表明(图4),pH、SOM、Pb 和 As 等都是本研究中用于筛选物种的环境过滤条件,只有具有特定功能性状的古菌,才能被环境过滤选入本地群落. 图5显示, Nitrososphaerales 这类自养菌在低营养的土壤中竞争力更强,因此在不同地区群落中都占优势,而在高营养环境中, Halobacterota 菌被丰富的 SOM 筛选入 TN 和 TJ 群落进行有机物代谢,因此 SOM 的空间异质性导致了不同营养型古菌群落构建的差异;而 pH 对古菌的选择作用更为直接,低 pH 将嗜酸的 Nitrosotaleales 和 Group\_1.1c 类群筛入 YM 群落中生存下来获得生态位, Halobacterota 类群不能适应则失去竞争优势; Nitrososphaerales 与 Pb 和 As 之间以及 Nitrosotaleales 与 Hg 之间呈显著的正相关,体现了重金属对古菌的正向选择作用,低重金属污染下这些古菌可能会改变 Pb、As 和 Hg 的价态降低其毒性从而成功定殖<sup>[12]</sup>. 因此,环境选择最终驱动本研究古菌群落的构建,使得抗性高、营养需求低和竞争力强的 Crenarchaeota 成为优势类群,而环境的异质性增加了异质选择对群落构建的贡献,使古菌群落空间分布格局因地制宜.

于皓等<sup>[14]</sup>的研究认为铬污染土壤中细菌群落构建是同质选择占主导<sup>[14]</sup>,随着铬含量的升高,环境选择对群落的确定性逐渐增加. 本研究 TN 和 TJ 区域也存在一定比例的同质选择作用,可能因为该地区受工业活动影响较小,污染较轻,而长期固定的耕作和施肥模式使得局域内土壤环境变化不大,环境选择的压力也是均一的,因此同质选择的相对重要性增加,群落周转率降低,缩小了样点间群落结构的差异.

有研究表明,随机过程在资源丰富和环境压力较小的生境下起主导作用<sup>[32,33]</sup>,由于微生物易于迁移,通过扩散迁移到新生境进行定殖,从而导致空间上均匀的群落结构. 本研究区域内土壤古菌群落空间分布尽管差异很大,但存在一定比例的扩散限制作用. 各采样点与工业区之间有着不同的距离,形成一定的污染梯度,污染达到某个程度,古菌向新生境的扩散受到限制,使古菌在特定的生态位定殖下来,从而产生更多的物种多样性以及生态系统功能,加大了群落空间异质性<sup>[32]</sup>. Jiao 等<sup>[34]</sup>的研究发现,随机过程与确定过程之间的平衡受到环境因子的调节,环境异质性会改变不同生态过程对古菌群落构建的相对贡献. 总的来说,本研究环境的异质性驱动了不同生态位偏好的古菌群落构建,异质选择强化

了古菌群落在特定生境下的功能,从而增强了古菌抵御环境胁迫和参与碳氮循环的能力,有助于维持农田生态系统稳定性和可持续性.

本研究揭示了古菌在不同类型重金属污染地区农田土壤中的群落组成与响应机制,证明研究古菌群落构建对阐明农田生态系统物质循环和应对胁迫的机制有重要意义. 然而确定性过程除了环境选择,还包括种间关系等生物因素,本文未考虑土壤微生物群落物种间的共存互作网络,将在下一步工作中深入研究.

### 3 结论

(1) 不同类型重金属污染地区土壤理化差异明显,重金属空间分布异质性高,镉是最主要的污染物,除工矿区部分样点土壤存在强生态风险,其他样品的潜在生态风险为轻微~中等.

(2) 不同地区古菌群落结构差异较大,优势门为泉古菌门,优势目是亚硝化球菌和亚硝化杆菌,其相对丰度取决于土壤环境.

(3) 土壤有机质、pH 通过影响不同优势菌相对丰度驱动本研究农田土壤古菌群落结构分异,铅和砷是对群落结构差异贡献较高的重金属元素.

(4) 古菌群落构建过程主要受确定性过程影响,异质选择主导本研究古菌群落构建.

#### 参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [2] Duan Q N, Lee J, Liu Y S, *et al.* Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **97**(3): 303-309.
- [3] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114961.
- [4] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833.  
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. *Environmental Science*, 2019, **41**(6): 2822-2833.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
- [6] Zhang Q C, Wang C C. Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: a review [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, **231**(7), doi: 10.1007/s11270-020-04728-2.
- [7] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.  
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high

- geochemical background of cadmium, Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [ 8 ] 唐瑞玲, 王惠艳, 吕许朋, 等. 西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J]. *现代地质*, 2020, **34**(5): 917-927.  
Tang R L, Wang H Y, Lü X P, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in farmland system from an area with high background of heavy metals, Southwestern China [ J ]. *Geoscience*, 2020, **34**(5): 917-927.
- [ 9 ] 孙斌, 魏志敏, 张力浩, 等. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. *土壤学报*, 2020, doi: 10.11766/trxb202001030003.  
Sun B, Wei Z M, Zhang L H, *et al.* Distribution of heavy metals and microbial community structure in soils high in geological background value[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, doi: 10.11766/trxb202001030003.
- [ 10 ] Gómez-Sagasti M T, Alkorta I, Becerril J M, *et al.* Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(6): 3249-3262.
- [ 11 ] Lin Y B, Ye Y M, Hu Y M, *et al.* The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 557-564.
- [ 12 ] Li X Q, Meng D L, Li J, *et al.* Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 908-917.
- [ 13 ] Li C C, Quan Q, Gan Y D, *et al.* Effects of heavy metals on microbial communities in sediments and establishment of bioindicators based on microbial taxa and function for environmental monitoring and management [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2020, **749**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141555.
- [ 14 ] 于皓, 安益君, 金德才, 等. 铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1197-1204, doi: 10.13227/j.hjx.202010209.  
Yu H, An Y J, Jin D C, *et al.* Effects of chromium pollution on soil bacterial community structure and assembly processes [ J ]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1197-1204, doi: 10.13227/j.hjx.202010209.
- [ 15 ] Baker B J, De Anda V, Seitz K W, *et al.* Diversity, ecology and evolution of Archaea [ J ]. *Nature Microbiology*, 2020, **5**(7): 889-900.
- [ 16 ] 邓隼. 古菌研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, **46**(28): 11-14, 47.  
Deng F. Research progress of archaea [ J ]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(28): 11-14, 47.
- [ 17 ] Jiao S, Xu Y Q, Zhang J, *et al.* Environmental filtering drives distinct continental atlases of soil archaea between dryland and wetland agricultural ecosystems[J]. *Microbiome*, 2019, **7**(1), doi: 10.1186/s40168-019-0630-9.
- [ 18 ] Zheng Y M, Cao P, Fu B J, *et al.* Ecological drivers of biogeographic patterns of soil archaeal community [ J ]. *PLoS One*, 2013, **8**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0063375.
- [ 19 ] Stegen J C, Lin X J, Fredrickson J K, *et al.* Quantifying community assembly processes and identifying features that impose them [ J ]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(11): 2069-2079.
- [ 20 ] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [ J ]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [ 21 ] Brochier-Armanet C, Boussau B, Gribaldo S, *et al.* Mesophilic Crenarchaeota; proposal for a third archaeal phylum, the Thaumarchaeota [ J ]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(3): 245-252.
- [ 22 ] Dang H Y, Zhang X X, Sun J, *et al.* Diversity and spatial distribution of sediment ammonia-oxidizing Crenarchaeota in response to estuarine and environmental gradients in the Changjiang Estuary and East China Sea [ J ]. *Microbiology*, 2008, **154**(7): 2084-2095.
- [ 23 ] Kerou M, Offre P, Valledor L, *et al.* Proteomics and comparative genomics of *Nitrososphaera viennensis* reveal the core genome and adaptations of archaeal ammonia oxidizers [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(49): E7937-E7946.
- [ 24 ] Alves R J E, Minh B Q, Urich T, *et al.* Unifying the global phylogeny and environmental distribution of ammonia-oxidising archaea based on *amoA* genes [ J ]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-018-03861-1.
- [ 25 ] Zhang L M, Offre P R, He J Z, *et al.* Autotrophic ammonia oxidation by soil thaumarchaea [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(40): 17240-17245.
- [ 26 ] Liu J J, Yu Z H, Yao Q, *et al.* Biogeographic distribution patterns of the archaeal communities across the black soil zone of northeast China [ J ]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.00023.
- [ 27 ] Tripathi B M, Kim M, Tateno R, *et al.* Soil pH and biome are both key determinants of soil archaeal community structure [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 1-8.
- [ 28 ] Cao P, Zhang L M, Shen J P, *et al.* Distribution and diversity of archaeal communities in selected Chinese soils [ J ]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **80**(1): 146-158.
- [ 29 ] Gough H L, Stahl D A. Microbial community structures in anoxic freshwater lake sediment along a metal contamination gradient [ J ]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(3): 543-558.
- [ 30 ] 贺纪正, 王军涛. 土壤微生物群落构建理论与时空演变特征 [ J ]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6575-6583.  
He J Z, Wang J T. Mechanisms of community organization and spatiotemporal patterns of soil microbial communities [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6575-6583.
- [ 31 ] 褚海燕, 冯毛毛, 柳旭, 等. 土壤微生物地理学: 国内进展与国际前沿 [ J ]. *土壤学报*, 2020, **57**(3): 515-529.  
Chu H Y, Feng M M, Liu X, *et al.* Soil microbial biogeography: recent advances in China and research frontiers in the world [ J ]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(3): 515-529.
- [ 32 ] Chase J M, Myers J A. Disentangling the importance of ecological niches from stochastic processes across scales [ J ]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, **366**(1576): 2351-2363.
- [ 33 ] Dini-Andreote F, Stegen J C, van Elsas J D, *et al.* Disentangling mechanisms that mediate the balance between stochastic and deterministic processes in microbial succession [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(11): E1326-E1332.
- [ 34 ] Jiao S, Yang Y F, Xu Y Q, *et al.* Balance between community assembly processes mediates species coexistence in agricultural soil microbiomes across Eastern China [ J ]. *The ISME Journal*, 2020, **14**(1): 202-216.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020 .....	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter .....	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols .....	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan .....	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm .....	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM <sub>2.5</sub> -bound Metals in Xinxiang .....	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea .....	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin .....	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China .....	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai .....	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta .....	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin .....	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years .....	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province .....	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin .....	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula .....	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area .....	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou .....	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park .....	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism .....	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands .....	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment .....	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period .....	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff .....	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone .....	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment .....	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation .....	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process .....	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System .....	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration .....	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China .....	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau .....	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area .....	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter .....	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System .....	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium .....	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L. ....	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions .....	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau .....	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area .....	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities .....	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms .....	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland .....	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N <sub>2</sub> O Emission from Potted Maize .....	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Loaded Biochar .....	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard .....	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019 .....	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)