

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

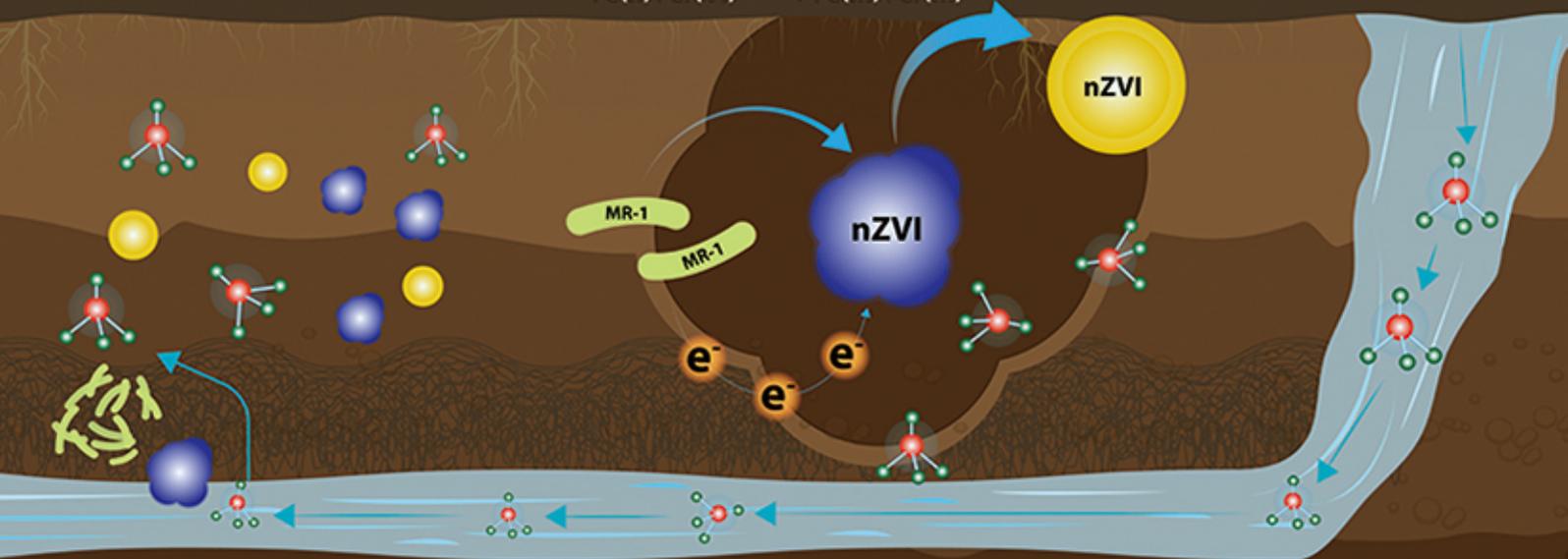
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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_{2.5}和O₃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_{2.5}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_{2.5}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_{2.5}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-农作物系统中镉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镉形态的影响..... 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, 何品晶 (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..... 马宸菲, 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N₂O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NH₄⁺-N生物炭对土壤N₂O-N排放和NH₃-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)

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^{1,2}, 任俊达^{1,2}, 吕凡^{1,2}, 章骅^{1,2}, 何晶晶^{1,2*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 黄土广泛分布于我国西北地区, 因气候干旱和暴雨侵蚀等因素, 土壤养分贫瘠、微生物量稀缺且盐碱化严重, 限制了土壤生态承载力, 是区域土地荒漠化主要成因之一。餐厨垃圾发酵产生的生物发酵液含有大量的有机酸和氮、磷等营养元素, 并且可工业化生产和配施, 有望成为一种针对黄土特性的土壤调理剂。以我国黄土高原代表性的甘肃兰州地区黄土为研究对象, 采集不同发酵液配施后的黄土进行理化性质和微生物分析, 发现施用发酵液后, 黄土中全氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别提升 363%、577%、308% 和 204%; 结合白芨盐生草和苜蓿等植被种植后, 土壤综合肥力进一步提升, 土壤全盐含量年均分别下降 2.3 g·kg⁻¹ 和 1.2 g·kg⁻¹; 黄土的结构得到改善; 发酵液能够促进部分微生物生长, 细菌和古菌生物量提升了 22 倍, 真菌生物量提升了 8.3 倍, 有利于进一步形成植物-微生物共生体系。餐厨垃圾生物发酵液结合耐盐碱植物种植, 能够有效提升黄土地区生态环境质量。

关键词: 黄土; 发酵液; 土壤调理; 土壤肥力; 兰州

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4500-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012234

Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area

SHAO Li-ming^{1,2}, REN Jun-da^{1,2}, LÜ Fan^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, HE Pin-jing^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: Loess is widely distributed in northwestern China. Due to the arid climate and rainstorm erosion, lack of nutrients and microorganisms, as well as severe salinization limits the ecosystem carrying capacity of loess soil, which has become one of the major causes of regional land desertification. The fermentation broth derived from food waste usually contains substantial organic acids and nutrients such as nitrogen and phosphorus, and it has the advantages of being easily produced industrially and applied as fertilizer. Hence, this broth has the potential to become a soil amendment for loess soils. This work studied the Lanzhou loess, which is a typical soil of the Loess Plateau of China, fertilized with fermentation broth for the evaluation of physicochemical properties and microbial analyses. After the application of the broth amendment, the total nitrogen, available phosphorus and potassium, and organic matter content increased by 363%, 577%, 308%, and 204%, respectively. After planting grass, including *Halogeton arachnoideus* Moq. and *Medicago sativa* L., the comprehensive soil fertility level was further improved and the total salt content of the soil was decreased by 2.3 g·kg⁻¹ and 1.2 g·kg⁻¹, respectively. Meanwhile, the fermentation broth promoted the growth of microorganisms, including bacteria and archaea, which increased by 22 times, and fungi by 8.3 times. Therefore, food waste fermentation broth is conducive to further forming plant-microorganisms symbiosis, improving the ecological environment quality of loess soils.

Key words: loess; fermentation broth; soil conditioning; soil fertility; Lanzhou

甘肃兰州地处黄土高原丘陵沟壑区, 属大陆性季风气候, 气候干旱且降水时空分布不均^[1], 土壤易受暴雨侵蚀, 水土流失严重^[2]。在暴雨淋溶和阳光暴晒的作用下, 土壤有机物含量低, 盐分在土壤表层聚集^[3], 引发土壤盐碱化和沙化等问题, 植物难以生长, 是导致黄土地区植被覆盖率低, 生态环境脆弱的重要原因^[4]。

目前, 应用于黄土等贫瘠土壤的改良调理技术主要有: 秸秆还田、施用有机肥、生物炭和沼液等。如 Chen 等^[5]的研究, 采用秸秆还田与锌配合施用的方法, 提升了黄土中有机碳的含量, 并促进了小麦对锌的吸收利用; 吴丹等^[6]将浒苔生物炭用于滨海盐碱土修复, 发现土壤 Na⁺/K⁺ 降低 55.73%, 矿物质元素增加 1 倍以上, 有机质提高 42.64%; Li

等^[7]探究了蚯蚓粪对黄土高原典型土壤团聚体及相关碳的影响, 发现蚯蚓粪能够显著提高黄土中的有机碳及可交换性钙的含量; 蔡函臻等^[8]的研究采用经过秸秆炭和石灰等碱性固体调质后的污泥堆肥得到的产品对黄褐土进行改良, 发现土壤有机质和氮磷钾含量显著增加; 张哲超等^[9]的研究采用丛枝菌根和生物炭对内蒙古地区的风沙土进行改良, 发现丛枝菌根、生物炭及联合改良方式均对风沙土生物量及矿质营养元素吸收有促进作用; 王康等^[10]的研究利用沼液对滩涂盐碱地进行改良, 发现沼液

收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903700); 国家自然科学基金项目(41877537)

作者简介: 邵立明(1962~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体废物处理与资源化, E-mail: slm0039@163.com

* 通信作者, E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

能够促进碱蓬及芦苇生长并提升深层土壤肥力. 然而, 秸秆还田和生物炭仅适合土壤微生物丰富的耕作用地; 石灰和沼液等调理剂偏碱性, 不适合黄土盐碱化特性; 有机肥施用需要翻耕配合也不适合面积大且坡度陡的黄土生态用地改良调理.

近年来, 有研究发现了有机酸类物质对植物生长的调节作用, 也有研究探索了纯组分非挥发性有机酸对改良土壤结构的作用^[11,12], 然而, 因纯物质成本过高, 尚无现场应用研究的报道. 餐厨垃圾发酵产生的生物发酵液以有机酸为主要组分, 同时含有氮、磷和氨基酸等对土壤和植物有益的物质^[13], 针对黄土特性, 有机酸能补充土壤有机质, 可能降低土壤碱性, 氮和磷等元素能够提高土壤肥力^[14,15]; 发酵液中的氨基酸^[16]及胞外水解酶^[17], 植物激素^[18]和植物根际促生细菌, 均有助于构建良好的土壤微生境. 同时, 餐厨垃圾生物发酵液源于废物, 可工业化生产和机械化配施, 有望成为适合黄土生态用地调理剂.

本文以甘肃兰州地区施用餐厨垃圾生物发酵液调理的土壤为对象, 研究施用发酵液前后及不同植被条件下的黄土样品理化性质变化特征、微生物多样性及微生物群落演变规律, 探究生物发酵液对黄土的调理机制, 以期为黄土丘陵区边坡生态复绿等实际工程应用提供一定的参考.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究的现场试验地位于甘肃省兰州市七里河区西果园镇某西北-东南走向的黄土坡, 位于东经 103°45', 北纬 36°01'; 属于黄土坡地, 土壤质地为粉

壤土, 海拔 1 560 m 左右. 兰州市皋兰气象站数据显示, 该地区年均气温 8.0 °C 左右, 平均风速 1.6 m·s⁻¹, 平均相对湿度 57.8%, 年日照时数 2 361 h, 年降水量为 303 ~ 383 mm. 试验田黄土的基本理化性质见表 1.

表 1 试验田黄土的基本理化性质

指标名称	数值	指标名称	数值
pH	8.59 ± 0.04	全磷(TP)/mg·kg ⁻¹	558 ± 4
EC/mS·m ⁻¹	90.3 ± 0.4	有效磷(AP)/mg·kg ⁻¹	6.4 ± 0.4
水溶性盐总量/g·kg ⁻¹	2.1 ± 0.1	全钾(TK)/mg·kg ⁻¹	12 409 ± 192
有机质(OM)/g·kg ⁻¹	3.7 ± 0.4	速效钾(AK)/mg·kg ⁻¹	145 ± 2
全氮(TN)/mg·kg ⁻¹	193 ± 3		

1.2 试验设计

本试验于 2017 年 1 月 ~ 2019 年 1 月分别在 6 个 3 m × 5 m 的试验田块上开展, 共设计 2 个对照 (O1、O2)、3 个处理 (L1、L2 和 L3) 和 1 个参考 (L4), 详细信息见表 2. 试验地黄土为开挖和人工平整后形成的阶梯式缓坡. ①O1 为 2015 年开挖并闲置、2017 年平整的旧开挖面土; ②O2 为 2017 年开挖并平整的新开挖面土; ③L1 为新开挖面土, 一次性喷洒每亩 5 t 的发酵液, 无播种; ④L2 为新开挖面土, 每亩、每年喷洒 5 t 发酵液, 延续 2 a, 播种白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus* Moq.); ⑤L3 为新开挖面土, 发酵液施用同 L2, 播种苜蓿 (*Medicago sativa* L.). ①和②均为裸地, ③ ~ ⑤播种前需进行喷洒、旋耕和磨平操作, 播种后不再进行人工灌溉和翻耕等操作, ① ~ ⑤的日常管理方式相同. L4 为试验地坡下厂区灌木绿化带内已种植海棠 7 a 并规律灌溉及施用有机肥的黄土, 作为绿化土, 用于土壤质量和边坡复绿的生态功能参考.

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

样品	O1	O2	L1	L2	L3	L4
经纬度	36°01'35.94"N 103°45'40.88"E	36°01'29.00"N 103°45'51.54"E	36°01'29.00"N 103°45'51.54"E	36°01'29.00"N 103°45'51.54"E	36°01'29.00"N 103°45'51.54"E	36°01'38.00"N 103°45'53.20"E
种植年限	/	/	/	2 a	2 a	7 a
植物类型	/	/	/	白茎盐生草	苜蓿	海棠
植被盖度	<5%	<5%	<5%	90%	80%	70%
播种方式	/	/	/	撒播	撒播	/
播种量	/	/	/	1 kg·(hm ² /15) ⁻¹	10 kg·(hm ² /15) ⁻¹	
调理剂施用类型	/	/	发酵液	发酵液	发酵液	有机肥
施用时间	/	/	/	2 a	2 a	7 a
施用量	/	/	5 t·(hm ² /15) ⁻¹	5 t·(hm ² /15) ⁻¹	5 t·(hm ² /15) ⁻¹	5 t·(hm ² /15) ⁻¹
施用频率	/	/	1 次	1 次·a ⁻¹	1 次·a ⁻¹	3 次

L1、L2、L3 和 L4 样品采集选用了“规则栅格采样”中的“对角线五点取样法”^[19], 即在 3 m × 5 m 试验田块上的 4 个角及对角线中心位置进行了取样, 共采集 20 个土壤样品 (约每个样品 1 kg), 再将

L1、L2、L3 和 L4 的 5 点样品分别混合, 得到相应处理的混合样品. O1 和 O2 在裸地单点取样, 在 0 ~ 30 cm 土层取样, 充分混合. 所有样品均取约 3 kg, 置于室温风干后, 用清洁纸袋保存.

1.3 餐厨垃圾及发酵液的基本性质

发酵所使用的餐厨垃圾来源于城市餐饮企业、酒店宾馆及学校等产生的各类餐厨垃圾. 基本物料特性为: 含水率 74.94%, 固形物含量 25.06%, 固体中有机物占比 91.37%; 粗蛋白 16.46%, 粗脂肪 24.31%, 总淀粉 25.72%, 粗纤维 3.31%; 碳氮比 16.43, 磷和钾元素分别为 0.38% 和 1.03%.

湿式厌氧发酵过程为: 对餐厨垃圾进行粗筛和巴氏灭菌后, 于 50 °C 水解, 并将水解液在 (30 ± 2) °C、pH = 3.5 的条件下酸化 3 d, 得到生物发酵液 (F). 发酵液 pH 为 3.52 ± 0.05, 总碳为 (12.5 ± 2.2) g·L⁻¹, 总有机碳为 (12.3 ± 2.2) g·L⁻¹, TN 为 (3 202 ± 72) mg·L⁻¹, TP 为 (242 ± 4) mg·L⁻¹, TK 为 (1 402 ± 32) mg·L⁻¹; 主要有机酸浓度: L-乳酸为 (114 ± 6) mmol·L⁻¹, 乙酸为 (14 ± 1) mmol·L⁻¹, 丙酸为 (1.6 ± 0.2) mmol·L⁻¹. 发酵液中的水溶性盐总量为 (14.7 ± 0.5) g·L⁻¹.

1.4 理化性质指标及测定方法

本研究中, pH、水溶性盐总量、TN、AK、AP、黄土容重以及机械组成根据农业行业标准土壤检测系列方法进行测定^[20], EC 采用电极法测定^[21], TK 和 TP 的测量采用改进的四酸消解法测定^[22]. OM 测定包括浸出液、浸出土和土壤总有机质测定, 浸出液有机质则在室温下按照水土比为 5:1 振荡浸出 24 h 后采用 TOC 仪测定, 浸出土和土壤总有机质采用热重铬酸钾-浓硫酸氧化法测定^[20].

1.5 微生物分析

微生物分析前, 对发酵液进行预处理, 取一定量发酵液用 16 000 g 离心 10 min 得到足量的微生物沉淀. 随后取 0.25 ~ 0.30 g 沉淀或土壤样品, 一同采用 PowerSoil™ DNA 分离试剂盒 (MoBio Laboratories

Inc., 美国) 提取样品中的 DNA. 随后对提取的 DNA 进行 PCR 扩增, 其中细菌和古菌的扩增引物为 ArBa515F/Arch806R^[23], 真菌的扩增引物为 ITS1F/ITS2R^[24], 使用 Illumina PE300 平台测序, 并进行微生物 OTU 聚类、物种分类学分析及生物多样性计算.

利用实时荧光定量系统 (q-PCR) 法测定微生物数量. 古菌、细菌及真菌引物分别为: Ar364f/Ar934r^[25]、341f/515r^[26] 和 5.8s/ITS1f^[27]. 反应在 PCR 仪上进行.

1.6 土壤综合评级

对土样进行土壤肥力综合评价和盐碱度评价. 其中, 肥力综合评价参考文献^[28], 选取 pH、EC、容重、质地、OM、TN、AP 及 AK 等 8 个指标, 根据内梅罗公式计算得到 *N* 值, 分为四级评价: 优 (*N* ≥ 2.7)、良 (1.8 ≤ *N* < 2.7)、中 (0.9 ≤ *N* < 1.8) 和差 (*N* < 0.9). 盐度评价参考文献^[29], 选取土壤含盐量及 pH 指标, 对土壤进行盐化和酸碱化程度评估.

1.7 数据分析与处理

各指标取样测定设置 3 个平行. 采用 SPSS 19.0 软件统计数据, 并采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对不同处理样品进行显著性检验. 微生物数据采用 R 软件进行基于距离的冗余分析 (distance-based redundancy analysis, db-RDA), 并使用 Adobe Illustrator cc 软件进行图像绘制和处理.

2 结果与分析

2.1 黄土机械组成

各土样粒径分析结果见图 1(a), 按粒径将土壤颗粒分为黏粒 (*D* < 0.002 mm)、粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm) 和砂粒 (0.05 ~ 2 mm) 进行分布统计 (见表 3),

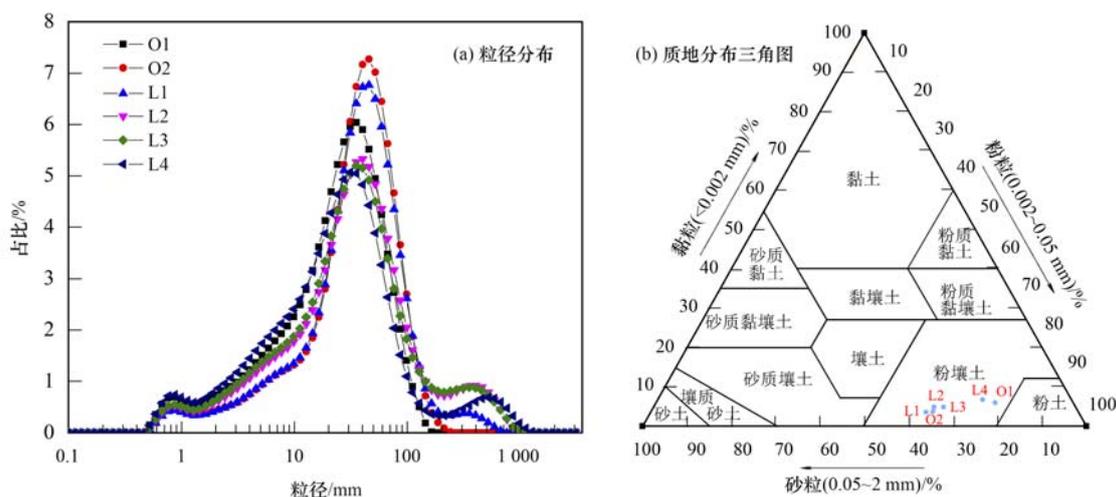


图 1 6 种处理样品组成

Fig. 1 Mechanical composition of the six treated samples

并根据美国农业部制定方法绘制质地三角图^[30],如图 1(b)所示. 6 种处理样品的质地均属粉壤土. 其中,未施用发酵液黄土旧开挖面(O1)与新开挖面(O2)比较,黏粒比接近,粉粒比高(73.6%和 61.4%),砂粒比相应低(20.5%和 34.6%),应是旧开挖面长期暴露,受到自然侵蚀剥离所致. 同为新开挖面,施用发酵液的 L1、L2 和 L3 中黏粒比有序

表 3 6 种处理样品的粒径分布¹⁾

土壤类型	累积粒径/ μm		
	D_{10}	D_{50}	D_{90}
O1	3.78 ± 0.01	27.07 ± 0.12	70.0 ± 0.4
O2	6.49 ± 0.02	39.4 ± 0.1	89.0 ± 0.1
L1	6.65 ± 0.03	39.7 ± 0.2	100.0 ± 2.0
L2	4.77 ± 0.07	35.5 ± 0.6	160 ± 22
L3	4.40 ± 0.07	33.3 ± 0.6	164 ± 29
L4	3.32 ± 0.04	25.7 ± 0.3	100.0 ± 8.0

1) D_{10} 表示颗粒累积分布为 10%的粒径; D_{50} 表示颗粒累积分布为 50%的粒径,即中位径或中值粒径; D_{90} 表示颗粒累积分布为 90%的粒径

表 4 6 种处理样品 pH、EC 和水溶性盐总量

Table 4 The pH, EC, and total water-soluble salt of the six treated samples

样品	O1	O2	L1	L2	L3	L4
pH(土:水=1:2.5)	8.70 ± 0.06	8.59 ± 0.04	8.66 ± 0.04	8.79 ± 0.06	8.93 ± 0.04	8.83 ± 0.37
EC/ $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$	277 ± 3	90.3 ± 0.4	220 ± 2	55.6 ± 0.4	147 ± 3	60.5 ± 0.5
水溶性盐总量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.4 ± 0.1	2.1 ± 0.1	5.6 ± 0.7	1.1 ± 0.6	3.3 ± 0.3	0.9 ± 0.1

2.3 黄土中氮、磷和钾含量

样品的 TN、TP、AP、TK 和 AK 含量如图 2 所示. 可见, O1 和 O2 黄土 TN 水平较低, 分别为 225 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 193 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 发酵液施用后的样品(L1、L2 和 L3) TN 含量明显提升($P < 0.001$), 其中 L3 的 TN 高达 1460 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 应与其植被为固氮植物苜蓿有关; L1 和 L2 的 TN 也与长期种植施肥的 L4 相当. 施用发酵液的黄土 TP 和 AP 含量均明显提高($P < 0.001$), L1 的 TP 最高为 O2 的 141%; AP 最高为 L3, 与 O2 比较增长了 1022%. 施用发酵液的黄土 TK 含量在 11 685 ~ 12 587 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 与 O2 相近; 但 AK 明显上升($P < 0.001$), 相比于 O2, 调理后的黄土 L1、L2 和 L3 分别增长了 308%、221% 和 373%, 也均高于 L4.

2.4 黄土有机质含量

黄土样品总有机质、浸出损失和剩余有机质测试结果如图 3 所示, 施用发酵液黄土有机质含量提高($P < 0.001$). 相比于 O2, 施用 1 次发酵液的 L1 总有机质增长 2 倍, 与施用有机肥多年 L4 大致相当, 多次施用的 L2 和 L3 增长更多; 施用后增加的有机质与黄土颗粒稳定结合, L1、L2 和 L3 浸出损失均低于 10%.

提升, 与土壤有机质含量变化一致. L4 经长期的绿化种植和有机肥施用, 粉粒和黏粒含量均最高.

2.2 黄土盐碱指标

样品的 pH、EC 和水溶性盐总量如表 4 所示. 施用发酵液的 L1、L2 和 L3 的 pH 略高于同为新开挖面的 O2. 黄土中含有大量碱性难溶的固体成分(如 CaCO_3 等), 发酵液中有有机酸与碳酸盐反应后, pH 变化较小, 主要是土壤的酸碱缓冲体系所致^[31]. 在盐分方面, 旧开挖面 O1 的水溶性盐总量为新开挖面 O2 的 2.6 倍; 施用发酵液无植被的 L1 水溶性盐总量增长约 1.6 倍, 可能是由于发酵液带入部分盐分, 或黄土中盐分溶解所致; 施用发酵液并有植被的 L2 和 L3 的水溶性盐总量分别减少 40% 和增加约 50%. 长期种植绿化的 L4 水溶性盐总量不足 O2 的 50%, 应是绿地规律灌溉稀释盐分、植物吸收、盐分向下转移的综合结果.

2.5 黄土微生物群落

采用 q-PCR 对发酵液及各黄土样品的微生物生物量进行测定, 结果见图 4. 发酵液中的微生物以细菌为主, 其生物量达到 $3.28 \times 10^6 \text{copies}\cdot\mu\text{L}^{-1}$, 古菌生物量为 $5.66 \times 10^2 \text{copies}\cdot\mu\text{L}^{-1}$, 真菌生物量为 $2.73 \times 10^2 \text{copies}\cdot\mu\text{L}^{-1}$. 施用发酵液黄土的 3 种微生物生物量均提升了 1 ~ 2 个数量级($P < 0.001$); 其中, L3 生物量尚高于长期种植绿化的 L4.

在科水平上进行微生物多样性统计, 细菌、古菌及真菌的结果分别见图 5 和图 6. 细菌和古菌中, O1 和 O2 有相似性, 假单胞菌科(Pseudomonadaceae) 和微球菌科(Micrococcaceae) 丰度合计约 20%, O1 根瘤菌科(Rhizobiaceae) 丰度较高(10%). L1、L2 和 L3 的优势种群没有一致性, 丰度最高的分别为黄单胞菌科(Xanthomonadaceae) 占 9%、微球菌科占 20%、甲烷杆菌科占 24%, 应为土壤种植条件差异所致; L4 优势菌落为微球菌科, 约占 16%.

真菌群落中, O1 中肉座菌目(Hypocreales) 丰度最高, 占 71%; O2 主要为丛赤壳科(Nectriaceae)、Plectosphaerellaceae 科和被孢霉科(Mortierellaceae), 分别占 29%、29% 和 19%. 调理后, L1 优势种群为小囊菌科(Microascaceae), 占 67%; L2 中粪壳菌科

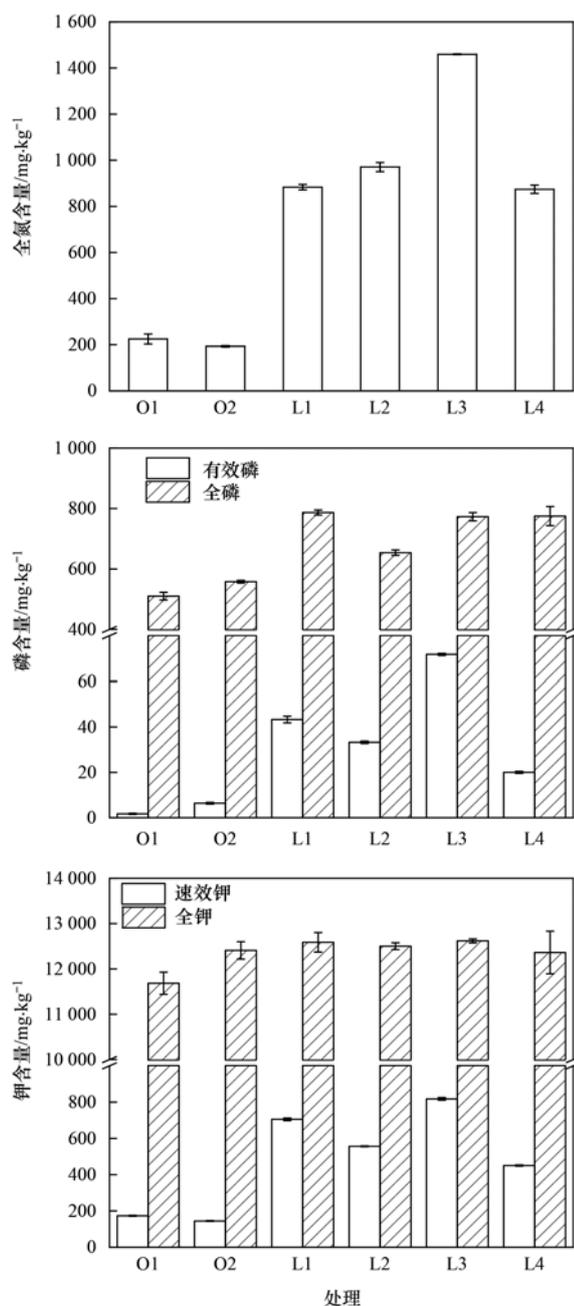


图2 6种处理样品的TN、AP、TP、AK和TK含量

Fig. 2 TN, AP, TP, AK, and TK content of the six treated samples

(Sordariaceae)丰度最高,占55%;L3中丰度最高的为一种未被鉴定的真菌,占29%,其次为被孢霉科(Mortierellaceae)和火丝菌科(Pyronemataceae),各占21%;L4中丰度最高的真菌为火丝菌科,占21%.

3 讨论

3.1 生物发酵液提升黄土肥力水平

发酵液含大量的有机物和丰富的植物营养元素(氮、磷和钾),一次施用后L1相较于O2的全氮明显增加、磷和钾略有增加(见图2),与发酵液中营养元素含量比例一致;有效磷和速效钾明显增加,

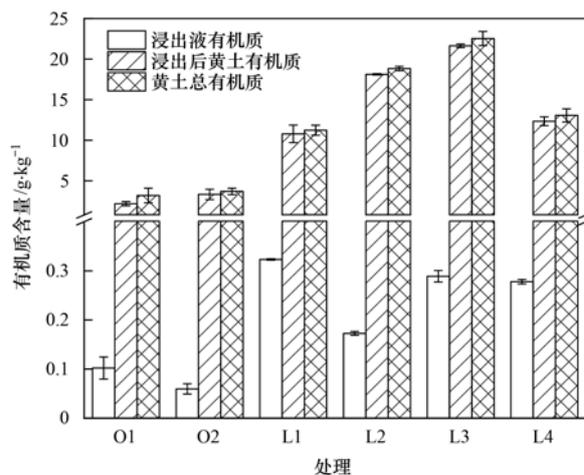


图3 6种处理样品的总有机质、浸出后黄土有机质及浸出液有机质含量的对比

Fig. 3 Comparison of total organic matter, organic matter of loess after leaching, and organic matter content of leaching liquid of the six treated samples

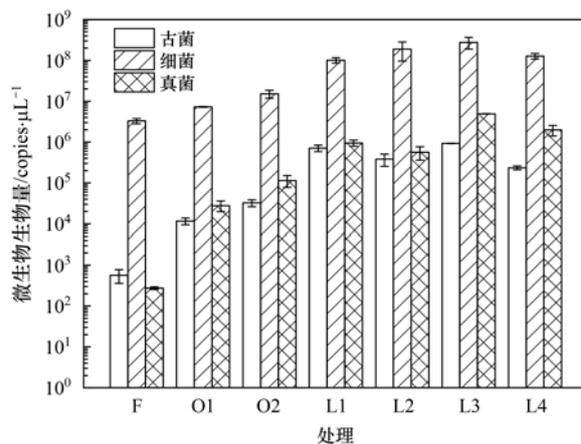


图4 6种处理样品及发酵液的古菌、细菌及真菌的生物量

Fig. 4 Biomass of archaea, bacteria, and fungi of the six treated samples and fermentation broth

主要因发酵液中有有机酸与钙、铁等金属离子反应,释放了与这些离子结合的难溶磷^[32],而黄土的矿物主要成分之一的伊利石的碱性K₂O含量通常可达10~17 g·kg⁻¹^[33].而发酵液中的有机酸能够与氧化物K₂O反应,使黄土中部分全钾快速活化为速效钾.同样,因发酵液输入的有机物,L1相比O2土壤有机质也明显增加(见图3).

多次施用发酵液并生长植被后,与L1相比,除L3全氮增长,L2和L3其它养分元素总量和速效量均没有明显增长,这是植物生长吸收和输入间物质平衡的体现;L3的氮进一步升高,依据该土样植被为苜蓿、土壤中检出较高比例的根瘤菌科(Rhizobiaceae)细菌,因此L3肥力水平提升可能是形成了“苜蓿-根瘤菌”共生体系固氮所致^[34~36].没有固氮效应的L2,营养元素总量与长期施用有机肥

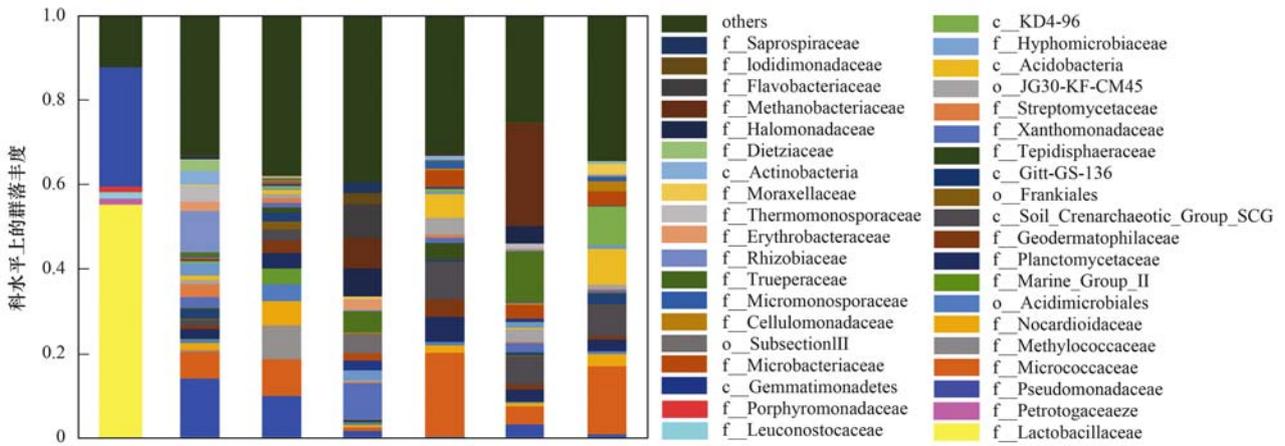


图 5 发酵液及黄土的细菌和古菌在科水平上的群落丰度

Fig. 5 Community abundance of bacteria and archaea of the fermentation broth and loess at family level

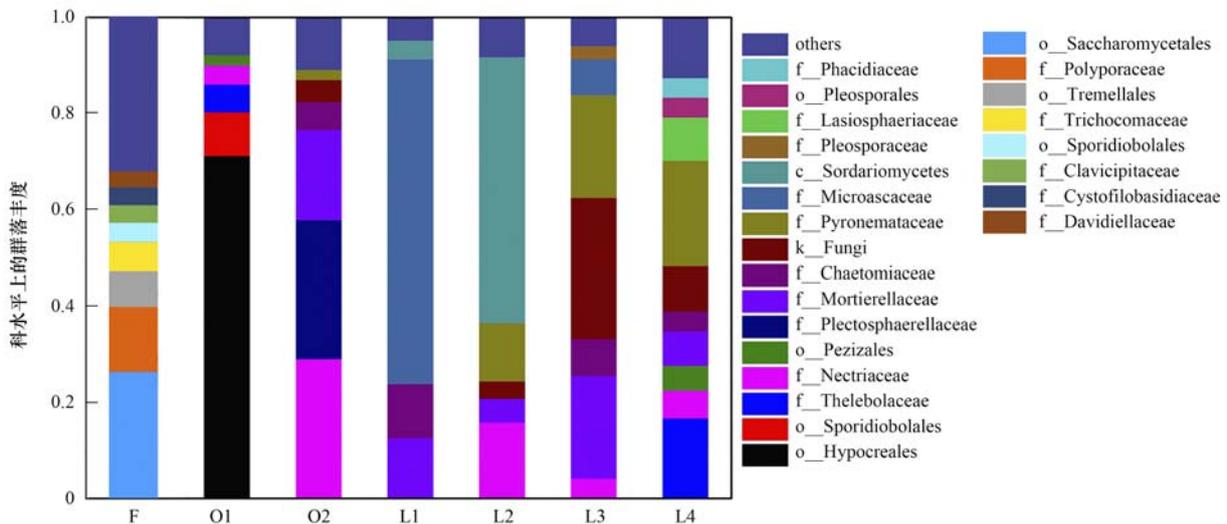


图 6 发酵液及黄土的真菌在科水平上的群落丰度

Fig. 6 Community abundance of fungi of the fermentation broth and loess at family level

并人工灌溉的 L4 相当,有效磷和速效钾更高,体现了发酵液有机酸释放养分的作用。

发酵液施用同样增加了黄土的有机质含量(见图 3),L1、L2 和 L3 的有机质增加量与施用量和土壤微生物量(见图 4)呈正相关,表明发酵液添加和

微生物代谢衍生是黄土有机质增加的主要途径;植物种植则通过改变微生物生态影响有机质增长^[37]。

各土样肥力综合评价结果见表 5,显示配施发酵液能够明显提升黄土氮、磷、钾及有机质含量,有效改善黄土肥力水平;植物生长可进一步提升调理水平。

表 5 黄土肥力综合评价各项指标的标准化参数、内梅罗参数及等级¹⁾

Table 5 Standardized parameters, Nemerow parameters, and grades of various indexes of loess fertility comprehensive evaluation

项目	O1	O2	L1	L2	L3	L4
pH	0.6	0.8	0.7	0.4	1.1	0.1
EC	0	1.8	0.1	2.7	0.9	2.8
容重	3	3	3	3	3	3
质地	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
有机质	0.27	0.3	0.94	1.9	2.3	1.1
全氮	0.03	0.03	0.12	0.13	0.19	0.12
有效磷	0.2	0.6	3	3	3	3
速效钾	2.7	2.4	3	3	3	3
$N_{average}$	1.188	1.454	1.695	2.104	2.024	1.978
N_{min}	0	0.03	0.1	0.13	0.19	0.1
内梅罗参数(N)	0.7347	0.8996	1.0505	1.3041	1.2576	1.2250
综合评价结果	差	差	中	中	中	中

1) $N_{average}$ 表示各单项指标标准化参数; N_{min} 表示各单项指标标准化参数中的最小值; 综合评价等级划分: 优($N \geq 2.7$)、良($1.8 \leq N < 2.7$)、中($0.9 \leq N < 1.8$)和差($N < 0.9$)

3.2 黄土中微生物群落的演化规律

土壤的微生物群落对于调控土壤物质循环和改善土壤质量有关键性作用^[9]. 由比较图2、图3和图5可见,古菌、细菌和真菌的生物总量变化与土壤肥力指标的变化趋势一致,表明发酵液提升土壤肥力和增加有机质,为微生物生长提供细胞养分和所需能量是土壤微生物增殖的主要原因; L2和L3的微生物总量和构成与L1不同,表明植物对根部土壤的生境作用同样对土壤微生物菌落生态群落结构发展构成影响.

采用Shannon-Wiener指数对黄土微生物 α 多样性水平进行评估. 调理前后,古菌和细菌生物多样性指数基本维持在较为恒定的水平. 其中, O1和O2指数较为接近,分别为4.26和4.30,调理后L1、L2和L3多样性指数分别为4.55、4.27和3.76. 绿地土L4的指数为4.27,与L1、L2和L3接近. 真菌多样性方面,L1、L2和L3的多样性指数渐次上升,分别为1.55、1.67和2.15,反映出真菌多样性随着植被生长逐渐提高,是真菌与植物根系形成共生体系的体现^[38]. Zeng等^[39]对黄土高原地区细菌和真菌驱动生态系统功能的机制进行了研究,发现土壤有机碳增加会提升土壤真菌多样性,而非细菌多样性,与本研究结果具有一致性. 科学合理的植物种植对土壤水稳性团聚体、微生物生物量和酶活性等具有重要意义^[40],本研究中,发酵液施用配合植物种植对土壤真菌多样性提升确有促进作用,有助于提升黄土生态系统功能.

在微生物群落方面(见图6和图7),施用发酵液的L1、L2和L3优势物种较O1和O2出现了较大变化,而且,因植物种植条件差异,L1、L2和L3的优势微生物也不相同. L1中专性厌氧的古菌甲烷

杆菌科(*Methanobacteriaceae*)占比较大,与发酵液有机物大量进入耗氧造成的土壤局部缺氧有关; L2以专性好氧的微球菌科(*Micrococcaceae*)^[41]为主,与白茎盐生草的根系分布较浅、密集分布于0~30cm的表层土壤^[42]使土壤透气性强化有关; L3也以甲烷杆菌科为主,因苜蓿为直根型植物^[43],根系对土壤透气性影响较小. 有植物生长的L2和L3中均有土壤泉古菌纲(soil Crenarchaeotic group),这是一类氨氧化古菌,在调节土壤根际物质碳和氮循环中有着重要作用^[44]. 真菌方面,施用发酵液后,无植被的L1中优势真菌较为单一,主要为小囊菌科(*Microascaceae*),是典型腐生类群^[45]; 有植被的L2和L3均含有火丝菌科(*Pyrenomataceae*),能与植物共生形成菌根或囊盘,对土壤有团聚胶结作用^[46]. L3中的主要真菌被孢霉科(*Mortierellaceae*)是土壤有机质和养分含量丰富的标志类群^[47],表明L3肥力水平较高,与前述肥力指标的结果一致. 绿地土L4微生物群落结构与L2相似,均以微球菌科为主,并含有泉古菌和火丝菌科真菌,展现了发酵液结合白茎盐生草植被调理后的黄土与长期绿地土微生物群落具有相似性,说明土壤微生境质量在发酵液和植被共同作用下的提升.

上述结果表明土壤微生物丰度和土壤肥力水平变化一致,同时受植物种植的影响^[48]. 对微生物群落与土壤理化指标进行基于距离的冗余分析(db-RDA),探究不同环境因子的影响,选取具有显著性影响的环境因子和微生物进行作图,结果见图7. OM、AP、AK和TN为塑造细菌和古菌群落的重要影响因子,与甲烷嗜热杆菌属(*Methanothermobacter*)、*Pseudarthrobacter*属、微球菌科(*Micrococcaceae*)呈正相关,与根瘤菌属

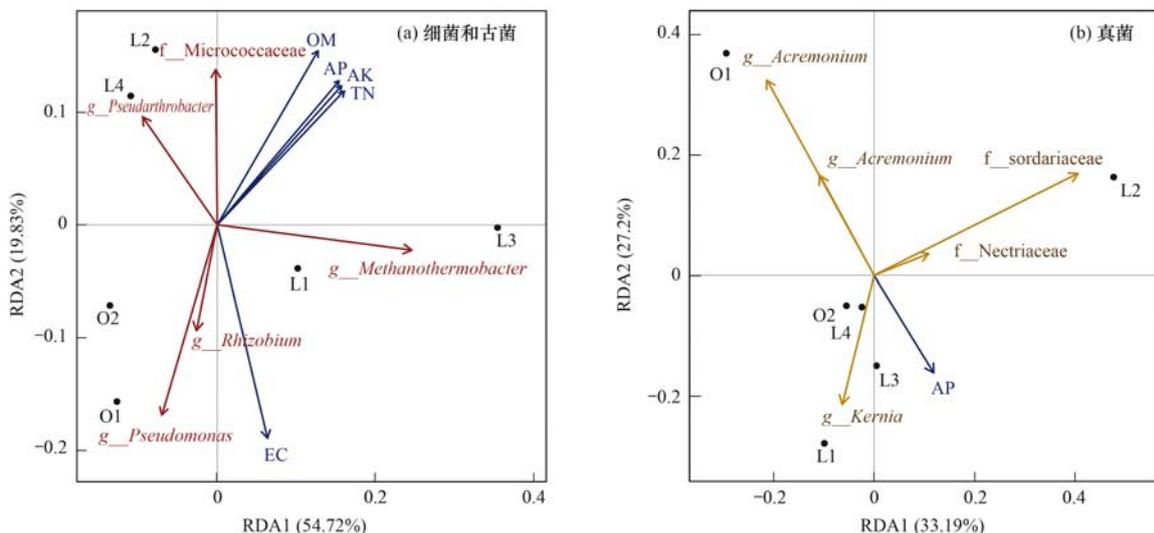


图7 黄土中微生物与环境因子基于距离的冗余分析

Fig. 7 Distance-based redundant analysis of microorganisms in loess and environmental factors

(*Rhizobium*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)比例呈负相关,表明发酵液施加导致根瘤菌数量降低. AP 为塑造真菌群落的重要影响因子,与 *Kernia* 属、丛赤壳科(*Nectriaceae*)和粪壳科(*Sordariaceae*)呈正相关,即 AP 释放促进了上述真菌生长;而与枝顶孢霉属(*Acremonium*)为负相关,说明 AP 会显著抑制该真菌生长. 各样品点分布符合微生物和理化性质的箭头指向,表明黄土样品与微生物和理化性质具有一致性.

3.3 生物发酵液与耐盐植物结合缓解黄土盐碱化程度

对发酵液施用前后的黄土进行盐碱度评价. 6 种样品的 pH 值在 8.5 ~ 9.0 区间,均处于轻度碱化状态,未因发酵液出现明显改善,可能是黄土中的碳酸盐缓冲所致^[31].

在盐化分级中, O1 和 L1 为重度盐化, O2 为轻度盐化, L2 为未盐化, L3 为中度盐化. 此外,长期种植耐盐碱海棠植被的绿地土 L4 为未盐化^[49]. O1 盐化程度高于 O2,是因为旧开挖面黄土在雨水淋溶后,底层盐分由于毛细作用渗析到了土壤表层^[3]. 调理后黄土 L1 浸出液盐分出现了增长. 发酵液水溶性总盐量为 $14.7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,按照每亩 5 t 的浇灌量计算,其带入的盐分约为 $0.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,小于 O2 和 L1 的差值 $3.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明发酵液不仅将少许盐分带入了黄土,同时发酵液中酸性物质还可能通过酸化、螯合、离子交换或还原等途径^[50],将难溶物质转化成可溶盐^[51],从而导致盐分提升. L2 和 L3 所种植物均具有一定耐盐碱特性,其中 L2 植被为白茎盐生草,其肉质叶片能够贮藏大量的水分和盐分,能够快速将土壤孔隙中的可溶性盐分吸收. 王文等^[42]发现白茎盐生草播种一年后, 0 ~ 20 cm 土壤全盐总量下降 $1.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本研究中,白茎盐生草植被下的 L2 样品与 L1 相比年均脱盐量为 $2.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. L3 植被为苜蓿,具有发达的根系,入土深度可达 2 m^[43]. 黄土中的盐分通常随土壤毛细水上升^[3],而植物的根系会破坏土壤原有的孔隙结构,并在土壤深层提水吸收盐分,进而阻止盐分上析,缓解表层土壤盐渍化. 本研究中,苜蓿植被下的 L3 样品年均脱盐量为 $1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 郑普山等^[52]的研究发现紫花苜蓿作用下的 0 ~ 20 cm 层土壤脱盐量为 $1.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 20 ~ 40 cm 层盐碱土壤脱盐量为 $1.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与本试验数据较为接近. 施用发酵液增加了土壤肥力和水溶性盐分,结合植被种植,有利于盐生植物吸收养分和盐分生长,进而缓解土壤盐化和提升生物多样性,构建更良好的土壤生境. 由前述结果可知,发酵液能够提升土壤氮、磷、钾及有机质等肥力指标,改善了土壤

微生境,有利于白茎盐生草等耐盐植物生长,通过盐分指标测定可知,耐盐植物能将发酵液带入和土壤溶出的盐分及土壤原有的盐分吸收,实现了黄土有效减盐.

4 结论

(1)餐厨垃圾发酵产生的生物发酵液施用后,黄土综合肥力水平显著提高. 施用发酵液的黄土样品肥力综合等级由差级提升至中级. 发酵液中有有机酸和植物养分能够提升土壤中的氮、磷、钾等养分和有机质含量,为土壤微生物生长提供能量和养分.

(2)发酵液配施后,微生物生物量显著增加,配合植物种植后真菌多样性增加. 发酵液能够为土壤微生物生长提供能量和养分,促进微生物生长,结合植被条件为土壤根系真菌提供共生条件;真菌等微生物能够形成菌丝团聚土壤,有利于形成植物-真菌共生体系,提高黄土地区生态环境质量.

(3)发酵液结合耐盐植物种植,能够明显缓解土壤盐化程度;种植耐盐碱植被的黄土样品土壤盐化程度评级均有下降.

(4)综上所述,发酵液施用于黄土中可有效改善土壤质量,增强黄土的肥力,构建良好的土壤微生境,对黄土质量的改善具有可持续性.

参考文献:

- [1] 赵一飞, 邹欣庆, 张勃, 等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1325-1332. Zhao Y F, Zou X Q, Zhang B, et al. Precipitation variation in association with climate indices in loess plateau of Gansu Province, Northwest China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1325-1332.
- [2] 王志强, 杨萌, 张岩, 等. 暴雨条件下黄土高原陡坡耕地细沟侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 129-135. Wang Z Q, Yang M, Zhang Y, et al. Rill erosion of long and steep cropland on the Loess Plateau under heavy rainstorm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 129-135.
- [3] 王钦, 吴自立. 黄土丘陵沟壑区沟谷地土壤盐分态动研究[J]. 中国草业科学, 1987, (3): 18-22.
- [4] 丁少男, 薛莲, 刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2146-2154. Ding S N, Xue S, Liu G B. Effects of fertilization on soil enzyme activities and water-soluble organic carbon and nitrogen content in farmland on hilly loess plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2146-2154.
- [5] Chen Y L, Shi J L, Dong J J, et al. Synergistic improvement of soil organic carbon storage and wheat grain zinc bioavailability by straw return in combination with Zn application on the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 2021, 197, doi: 10.1016/j.catena.2020.104920.
- [6] 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1941-1949. Wu D, Sun P, Lu P Z, et al. Effect and approach of

- Enteromorpha prolifera* biochar to improve coastal saline soil[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1941-1949.
- [7] Li Y P, Wang J, Shao M A. Application of earthworm cast improves soil aggregation and aggregate-associated carbon stability in typical soils from Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111504.
- [8] 蔡函臻, 宁西翠, 王权, 等. 碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4848-4856.
- Cai H Z, Ning X C, Wang Q, *et al.* Effect of alkali solids amendment on sewage sludge aerobic composting and the potential of related products on infertile soil amelioration [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**: 4848-4856.
- [9] 张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 等. 微生物群落驱动 AM 真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2066-2079.
- Zhang Z C, Yang J Y, Hao B H, *et al.* Potential of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar, and combined amendment on sandy soil improvement driven by microbial community [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2066-2079.
- [10] 王康, 许玉超, 戴辉, 等. 沼液在土壤改良上的应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(24): 299-303.
- [11] 刘永红, 马舒威, 岳霞丽, 等. 土壤环境中的小分子有机酸及其环境效应[J]. *华中农业大学学报*, 2014, **33**(2): 133-138.
- Liu Y H, Ma S W, Yue X L, *et al.* Low molecular weight organic acids in soils and its environmental effects[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, **33**(2): 133-138.
- [12] 张耀, 胡再强, 陈昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(4): 681-688.
- Zhang Y, Hu Z Q, Chen H, *et al.* Experimental study on evolution of loess structure using acid solution [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(4): 681-688.
- [13] Liu F, Cai T, Shao L M, *et al.* Resource potential of liquid digestate from food and kitchen waste digestion associated with particle size fractionation [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, **31**(4): 661-668.
- [14] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(1): 89-96.
- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(1): 89-96.
- [15] 张金波, 程谊, 蔡祖聪. 土壤调配氮素迁移转化的机理[J]. *地球科学进展*, 2019, **34**(1): 11-19.
- Zhang J B, Cheng Y, Cai Z C. The mechanisms of soil regulating nitrogen dynamics [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, **34**(1): 11-19.
- [16] 李香兰, 刘玉民. 西北黄土地区土壤腐殖物质的研究[J]. *土壤学报*, 1989, **26**(3): 298-304.
- Li X L, Liu Y M. Studies on humic substances of soils in loess area of northwest China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, **26**(3): 298-304.
- [17] Zhang B, He P J, Lü F, *et al.* Extracellular enzyme activities during regulated hydrolysis of high-solid organic wastes [J]. *Water Research*, 2007, **41**(19): 4468-4478.
- [18] Kostenberg D, Marchaim U, Watad A A, *et al.* Biosynthesis of plant hormones during anaerobic digestion of instant coffee waste [J]. *Plant Growth Regulation*, 1995, **17**(2): 127-132.
- [19] 王子龙, 陈伟杰, 付强, 等. 土壤优化采样策略研究进展[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(5): 205-212.
- Wang Z L, Chen W J, Fu Q, *et al.* Research progress of soil sampling strategy optimization [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(5): 205-212.
- [20] NY/T 1121-2006, 土壤检测[S].
- [21] HJ 802-2016, 土壤电导率的测定 电极法[S].
- [22] Zhang H, He P J, Shao L M. Flow analysis of heavy metals in MSW incinerators for investigating contamination of hazardous components [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(16): 6211-6217.
- [23] Callahan B J, McMurdie P J, Rosen M J, *et al.* DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data [J]. *Nature Methods*, 2016, **13**(7): 581-583.
- [24] Adams R I, Miletto M, Taylor J W, *et al.* Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(7): 1262-1273.
- [25] Kemnitz D, Kolb S, Conrad R. Phenotypic characterization of Rice Cluster III archaea without prior isolation by applying quantitative polymerase chain reaction to an enrichment culture [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(4): 553-565.
- [26] Majeed M Z, Miambi E, Riaz M A, *et al.* Characterization of N₂O emission and associated bacterial communities from the gut of wood-feeding termite *Nasutitermes voeltzkovi* [J]. *Folia Microbiologica*, 2015, **60**(5): 425-433.
- [27] Rousk J, Bååth E, Brookes P C, *et al.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(10): 1340-1351.
- [28] DB31/T 1191-2019, 绿化土壤肥力质量综合评价方法[S].
- [29] HJ 964-2018, 环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)[S].
- [30] 郭彦彪, 戴军, 冯宏, 等. 土壤质地三角图的规范制作及自动查询[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(6): 1221-1225.
- Guo Y B, Dai J, Feng H, *et al.* Standard mapping of soil textural triangle and automatic query of soil texture classes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(6): 1221-1225.
- [31] Magdoff F R, Bartlett R J. Soil pH buffering revisited [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, **49**(1): 145-148.
- [32] Hu H, Tang C, Rengel Z. Influence of phenolic acids on phosphorus mobilisation in acidic and calcareous soils [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 173-180.
- [33] 齐雁冰, 常庆瑞, 刘梦云. 风蚀水蚀交错区黄土粘土矿物特征及环境意义[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 159-162, 278.
- Qi Y B, Chang Q R, Liu M Y. Clay mineral characteristics of loess as well as environmental significance in wind-water erosion crisscross region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 159-162, 278.
- [34] 韩可, 孙彦, 张昆, 等. 接种不同根瘤菌对紫花苜蓿生产力的影响[J]. *草地学报*, 2018, **26**(3): 639-644.
- Han K, Sun Y, Zhang K, *et al.* Effect of different rhizobium on productivity of *Medicago sativa* L. [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, **26**(3): 639-644.
- [35] 喻文虎, 杨鹏翼, 贾德荣. 红豆草、紫花苜蓿根瘤菌接种研究[J]. *草业科学*, 1995, **12**(3): 22-25.
- Yu W H, Yang P Y, Jia D R. Legume inoculation experiment on *Onobrychis viciaefolia* and *Medicago sativa* [J]. *Pratacultural Science*, 1995, **12**(3): 22-25.
- [36] 魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 等. 黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(2): 305-313.

- Wei Y C, Ma T E, Wei X R, *et al.* Effects of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(2): 305-313.
- [37] 胡伟, 张亚红, 李鹏, 等. 不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2858-2868.
- Hu W, Zhang Y H, Li P, *et al.* Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration rates and soil biochemical properties in an alfalfa grassland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2858-2868.
- [38] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(3): 298-310.
- Wu L K, Lin X M, Lin W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(3): 298-310.
- [39] Zeng Q C, Liu D, An S S. Decoupled diversity patterns in microbial geographic distributions on the arid area (the Loess Plateau) [J]. *CATENA*, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104922.
- [40] Xiao L, Huang Y M, Zhao J F, *et al.* Effects of planting structure on soil water-stable aggregates, microbial biomass and enzyme activity in a catchment of Loess Plateau terraces, China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, **159**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103819.
- [41] Schellenberger S, Drake H L, Kolb S. Functionally redundant cellobiose-degrading soil bacteria respond differentially to oxygen [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(17): 6043-6048.
- [42] 王文, 张德罡. 白茎盐生草对盐碱土壤的改良效果 [J]. *草业科学*, 2011, **28**(6): 902-904.
- Wang W, Zhang D G. Effects of *Halogeton arachnoideus* on saline soil improvement [J]. *Pratacultural Science*, 2011, **28**(6): 902-904.
- [43] 南丽丽, 师尚礼, 张建华. 不同根型苜蓿根系发育能力研究 [J]. *草业学报*, 2014, **23**(2): 117-124.
- Nan L L, Shi S L, Zhang J H. Study on root system development ability of different root-type alfalfa [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(2): 117-124.
- [44] 李双异, 刘旭, 张维俊, 等. 长期施肥与覆膜对土壤细菌、真菌和氨氧化微生物丰度的影响 [J]. *土壤通报*, 2019, **50**(4): 891-898.
- Li S Y, Liu X, Zhang W J, *et al.* Effects of long-term fertilization and mulching on the abundance of bacteria, crenarchaeota, and ammonia oxidizers in brown earth [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(4): 891-898.
- [45] 李静, 孙琴, 赵筱萌, 等. 中国小囊菌科的研究 [J]. *菌物研究*, 2012, **10**(1): 13-19.
- Li J, Sun Q, Zhao X M, *et al.* Study of the microascaceae from China [J]. *Journal of Fungal Research*, 2012, **10**(1): 13-19.
- [46] 刘超洋, 庄文颖. 火丝菌科(盘菌目)部分属的系统学研究 [J]. *菌物学报*, 2006, **25**(4): 546-558.
- Liu C Y, Zhuang W Y. Phylogeny of some genera in the Pyronemataceae (Pezizales, Ascomycetes) [J]. *Mycosystema*, 2006, **25**(4): 546-558.
- [47] 孟令男, 许修宏, 李洪涛, 等. 污泥堆肥对氯嘧磺隆残留及土壤中真菌群落结构的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(3): 495-501.
- Meng L N, Xu X H, Li H T, *et al.* Effects of sewage sludge compost on chlorimuron-ethyl residue and fungal community structure in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(3): 495-501.
- [48] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(10): 1672-1679.
- Ding W X, Cai Z C. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(10): 1672-1679.
- [49] 胡丁猛, 许景伟, 王立辉, 等. 海棠无性系耐盐碱区试研究 [J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(21): 40-47.
- Hu D M, Xu J W, Wang L H, *et al.* Salt and alkali tolerance regional test of crabapple clones [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(21): 40-47.
- [50] 宋子腾, 左继超, 胡红青. 柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1152-1157.
- Song Z T, Zuo J C, Hu H Q. Effect of citric acid and phosphorus coexistence on cadmium adsorption by soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1152-1157.
- [51] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响 [J]. *华北农学报*, 2008, **23**(S1): 182-186.
- Li Y, Huang X F, Ding W L. Root exudates and their effects on plant rhizosphere soil micro-ecology environment [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, **23**(S1): 182-186.
- [52] 郑普山, 郝保平, 冯悦晨, 等. 紫花苜蓿对盐碱地的改良效果 [J]. *山西农业科学*, 2012, **40**(11): 1204-1206.
- Zheng P S, Hao B P, Feng Y C, *et al.* Preliminary study on the ameliorating effect of alfalfa to saline-alkali land [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2012, **40**(11): 1204-1206.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} -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 ₂ 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 ₄ ⁺ -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)