

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响

王莹燕^{1,2}, 熊子怡¹, 罗东海¹, 王子芳¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 绵阳师范学院资源环境工程学院, 绵阳 621000)

摘要:为明确化肥减量配施有机肥处理非根际/根际土壤功能微生物(硝化、反硝化和溶磷微生物)对柠檬产量和品质的影响,以柠檬果实和非根际/根际土壤为研究对象,将传统果实品质测定与分子生物学技术相结合,探究化肥减量配施有机肥处理非根际/根际土壤功能微生物与柠檬产量和品质之间的相互关系。结果表明:①70%化肥+30%腐熟猪粪处理显著增加硝化强度和磷酸酶活性,但有效控制反硝化酶活性。②化肥减量配施有机肥显著降低硝化微生物和 *nirS* 和 *nirK* 基因反硝化微生物的丰度。同时,增加 *nosZ* 基因反硝化微生物和 *phoD* 基因溶磷微生物的丰度。但是,功能微生物群落结构多样性在化肥减量配施有机肥处理没有明确的规律性。③相较于化肥和有机肥,70%化肥+30%腐熟猪粪处理柠檬产量最高,果实品质最佳。④氮素及其转化的相关微生物通过柠檬内在和外观品质显著影响柠檬产量;而磷素及其转化微生物主要通过柠檬内在品质影响柠檬产量。此外,非根际土和根际土对柠檬内在品质的影响因子存在明显的分异现象。由上可知,70%化肥+30%腐熟猪粪处理显著影响土壤氮、磷功能微生物进而提升柠檬产量和品质。

关键词:化肥减量;根际土;氮、磷功能微生物;柠檬产量和品质

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1768-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202042

Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality

WANG Ying-yan^{1,2}, XIONG Zi-yi¹, LUO Dong-hai¹, WANG Zi-fang¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resource, Environment and Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China)

Abstract: To clarify the effects of non-rhizosphere/rhizosphere soil functional microbes (nitrifiers, denitrifiers, and phosphorus-solubilizing microorganisms) on lemon yield and quality, the lemon fruit and non-rhizosphere/rhizosphere soil were selected as subjects. To explore the correlation between non-rhizosphere/rhizosphere soil functional microbes and lemon yield and quality under a chemical fertilizer reduction substitute with organic fertilizer, traditional fruit quality determination and multiple molecular techniques were used. The results showed that: ① 30% chemical fertilizer reduction substitute with organic fertilizer increased the nitrification intensity and phosphatase activity but effectively controlled the denitrifying enzyme activity. ② The chemical fertilizer reduction substitute with organic fertilizer significantly decreased the abundances of nitrifiers and *nirS/nirK*-harboring denitrifiers and significantly increased the abundances of *nosZ*-harboring denitrifier and *phoD*-harboring microorganisms. However, the diversities of functional microbial community structure did not have clear regularity under chemical fertilizer reduction substitute with organic fertilizer. ③ Compared with that under the application of chemical fertilizer and organic fertilizer alone, lemon yield and quality were the highest under the 30% reduction of chemical fertilizer substitute with organic fertilizer. ④ Nitrogen and its related microbes significantly affected lemon yield through internal and external quality. Phosphorus and its related microbes affected lemon yield mainly through internal quality. In addition, the influence factors of non-rhizosphere soil and rhizosphere soil on lemon intrinsic quality were obviously different. Altogether, these results showed that the 30% reduction of chemical fertilizer substitute with organic fertilizer significantly affected soil nitrogen and phosphorus functional microorganisms and further improved lemon yield and quality.

Key words: chemical fertilizer reduction; rhizosphere soil; nitrogen and phosphorus functional microbes; lemon yield and quality

化肥投入与农业生产力的提升密切相关,但是化肥长期和不合理施用会导致土壤养分失衡且造成一系列的生态环境问题,更对农业可持续发展、生物多样性保护与人类健康产生了不利影响^[1]。联合国粮食及农业组织(FAO)最新资料显示,2018年全球化肥单位面积施用量为 120.7 kg·hm⁻²^[2]。虽然,2019年我国单位面积施用量已降至 325.65 kg·hm⁻²^[3],但远高于全球单位施用量。面对国内依然严峻的化肥减量问题,2021年全国农技中心提出了“十四五化肥减量增效发展方向和五大行动”。在“五大行动”中明确提出有机肥替代化肥的行动。其中,养分丰富且数量巨大的畜禽粪便成为替代化肥

的主流趋势。

随着分子生物学技术及生物信息分析的快速发展,功能微生物的研究也进一步发展。如含有 *amoA* 基因的氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)和氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)^[4]、含有 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因的反硝化菌^[5],它们调控氮素循环的硝化过程和反硝化过程并显著影响土壤中氮素形态的转化^[6]。此外,含有

收稿日期: 2022-02-09; 修订日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019)

作者简介: 王莹燕(1991~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤微生物生态, E-mail: 398766403@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

phoD 基因的溶磷菌会释放碱性磷酸酶水解磷酸单酯和二酯为植物可利用的无机磷^[7,8]. 已有研究显示,在不影响蔬菜产量的情况下,有机物料与化肥减量配施处理显著降低土壤 AOA 丰度,而提高 AOB 的丰度,同时提高氮肥的利用率^[9]. Luo 等^[10]设置的长期定位肥料试验的结果表明,与化肥相比,有机肥配施使土壤中碱性磷酸酶活性提高了 232%~815%. 不稳定有机磷、中度不稳定有机磷和富里酸有机磷含量与 *phoD* 基因溶磷菌丰度显著相关. 同时,土壤有机碳含量与 *phoD* 基因溶磷菌的群落组成和丰度显著相关. 此外,根系在植物生长发育的过程中扮演重要的角色,它从土壤中吸收植物所需的养分和水分,又向土壤分泌各种化合物. 因此,将它对土壤发生影响的区域称为根际. 在根际区域的微生物在获得充足的碳源后,会提高根际养分有效性,如溶磷菌在根际更易将难溶态磷酸盐有效化. 近几年,有机肥替代对草本植物根际微生物的研究逐渐增多. 如蔡秋华等^[11]研究了有机肥配施减量化肥对烤烟青枯病及其根际微生物的影响. 但与须根系草本植物不同,目前仅少部分研究者将有机肥替代运用到果树的研究^[12,13],更鲜见从调节土壤养分循环的功能微生物群落角度,分析化肥减量如何从非根际和根际影响果树产量和品质. 但事实上,根际微生物是果树根系微生态系统中土壤物质循环和能量流动的主要承担者,使土壤氮、磷素参与到果树生长发育的各新陈代谢过程中^[14]. 因此,研究化肥减量配施有机肥下土壤功能微生物对果实生长发育的影响对果园肥料管理意义重大.

近几年,四川、重庆大力发展柠檬(尤力克)产业,种植面积已达 1 050 km²,产量超过 80 万 t,产值近百亿元,为农民脱贫致富增收起到了巨大的作用. 但果农不合理的施肥管理,导致柠檬园生态系统中土壤酸化、土壤结构退化和土壤养分失衡,也间接影响柠檬品质安全. 因此,本试验设计不同化肥减量配施有机肥处理并结合分子生物学技术,研究化肥减量配施有机肥下非根际和根际功能微生物群落和酶活性的变化,及其对柠檬的产量和品质的影响. 本文对柠檬园的节本增效、绿色发展以及柠檬产量和品质安全有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区及材料概况

试验地位于重庆市潼南国家农业科技园区柠檬种质资源圃内(E105°45'09", N30°04'29"),海拔为 300~450 m,年平均气温为 17.9℃. 最高气温(7月)平均值为 34.0℃,最低气温(1月)平均值为

5.0℃,≥10℃积温为 5 433℃,年降雨量为 990 mm,年日照时数为 1 228.4 h,为亚热带湿润季风气候.

供试柠檬品种为尤力克,来自潼南柏梓镇小岭村的智能化柠檬脱毒育苗中心. 供试土壤为紫色潮土,是在紫色土区琼江河台地冲积物(Q₄)上经早耕熟化而成,广泛分布于重庆紫色土区. 基本理化性质: pH 为 5.19、 ω (有机碳)为 8.68 g·kg⁻¹、 ω (全氮)为 0.679 g·kg⁻¹、 ω (全磷)为 0.221 g·kg⁻¹、 ω (碱解氮)为 57.31 mg·kg⁻¹、 ω (速效钾)为 244.12 mg·kg⁻¹和 ω (有效磷)9.14 mg·kg⁻¹. 供试肥料:氮、磷、钾肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%). 新鲜猪粪和腐熟猪粪均取自潼南温氏种猪场,腐熟猪粪其含氮量(N) 2.291%,含磷量(P₂O₅)为 2.21%,含钾量(K₂O)为 0.88%,pH 为 8.89;新鲜猪粪其含氮量(N) 2.146%,含磷量(P₂O₅)为 1.53%,含钾量(K₂O)为 0.79%,pH 为 8.61. 猪粪当季(120 d)碱解氮、速效磷和速效钾的缓释效率为 35.3%、34.8%和 41.5%^[15]. 微肥来自北美农大集团生产的硼锌锰铁镁钙硅复合微量元素水溶肥料,各元素总含量(包括:B、Zn、Mg、Si、Ca、Mn 和 Fe)≥12%,pH 为 6.0.

1.2 试验处理

选取随机排列为 18 个能独立排灌的样区,每个样区用 PVC 板间隔开(深度:60 cm). 每个样区 6 株柠檬,株行距 3 m×3 m. 单株年施氮 90 g、磷 50 g、钾 40 g(逐年增加 10 g),每年施肥 5 次^[16]. 共设 5 个等氮处理:传统施肥(FM)、腐熟猪粪(P)、新鲜猪粪(NP)、70%化肥+30%腐熟猪粪(70FP)、50%化肥+50%腐熟猪粪(50FP)和一个对照处理(CK),每个处理 3 个重复(表 1). 施肥和采样的时间安排:第 1 次夏肥,2019 年 6 月 2 日;第 2 次秋肥,2019 年 9 月 4 日;第 3 次冬肥 2019 年 12 月 1 日;第 4 次春肥,2020 年 3 月 5 日;第 5 次夏肥,2020 年 9 月 20 日. 5 次施肥量相同,每次围绕树冠滴水线,挖深、宽各 15~20 cm 的环状浅沟,撒入肥料后将土壤回填铺平.

1.3 测定项目和方法

土壤样本的采集和测定:根据柠檬植株的叶片滴水线向地面开环沟(0~20 cm 土层),然后直接采集须根集中的根系团,用无菌自封袋封装,每棵柠檬树收集不少于 2 kg 的土样. 根据抖土法^[17],将根系团剧烈抖动且抖落于 1 m×1 m 的牛皮纸上的土定义为非根际土;然后用细毛刷刷轻轻刷下黏附在须根上的土定义为根际土,分别将非根际土和根际土混匀,用 3 个无菌自封袋收集. 土壤样品根据测定的需

求量分为不等量的 3 份,1 份土样于 -4°C 冰箱保存,用于测定土壤铵态氮 (NH_4^+) 和硝态氮 (NO_3^-)^[18],硝化强度^[19]、反硝化酶活性^[20]和根据试剂盒测定碱性和酸性磷酸酶活性(科铭科生物有限公司,苏州).1 份土样在经过自然风干后测定土

壤 pH、土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)的含量^[21].1 份土样于 -20°C 冰箱保存,使用 FastDNA® SPIN Kit for soil (MP Biomedicals, LLC) 试剂盒提取土壤总 DNA.

表 1 各施肥处理单株柠檬总施肥量¹⁾

Table 1 Total fertilizer volume of each lemon tree in different fertilizations

施肥处理	化肥/g			腐熟猪粪 /kg	新鲜有机肥 /kg	微量元素 /g
	尿素	过磷酸钙	氯化钾			
对照处理(CK)	—	—	—	—	—	—
传统施肥(FM)	204.35	450	73.33	—	—	21.6
腐熟猪粪(P)	—	—	—	11.62	—	—
新鲜猪粪(NP)	—	—	—	—	12.41	—
70% 化肥 + 30% 腐熟猪粪(70FP)	143.05	315	51.33	3.49	—	—
50% 化肥 + 50% 腐熟猪粪(50FP)	102.18	225	36.67	5.81	—	—

1) “—”表示该项肥料施肥量为 0

功能微生物群落和丰度的测定:利用荧光定量 PCR 技术定量分析氮、磷功能基因丰度^[22],选用荧光定量 PCR 引物扩增 *amoA* 细菌/古菌(F/R, Arch-amoAF、Arch-amoAR)^[23,24]、*nirS/nirK* (*nirSCd3aF/R3cd*、*nirK876/nirK1040*)^[25~27]、*nosZ* (*nosZF*、*nosZ1622*)^[23,27] 和 *phoD* (*phoD-F733/phoD-R1083*)^[28] 基因片段具体步骤见文献[29].

末端限制性片段长度多态性分析 (terminal restriction fragment length polymorphism analysis, T-RFLP) 用于分析氮、磷功能微生物群落结构^[30]. 基因片段的扩增,选用正向引物 5'端带荧光物质 FAM 标记的引物扩增 *amoA* 细菌/古菌、*nirS/nirK*、*nosZ* 和 *phoD* 基因片段,所用引物与荧光定量 PCR 分析一致,具体步骤见文献[29].

果实产量和品质指标:果实商品成熟期后对各处理进行采摘取样,以全树套袋的冬果重量作为柠檬的产量数据.为了避免着生方位给对柠檬品质带来的差异,采摘均从每棵树的向阳面采果 4~5 个,将一棵树上的果实作为一个样本,则一个处理 18 个样本.单果重用电子天平测量,果实横、纵径和果皮厚度用游标卡尺测量.果汁的可溶性固形物(TSS)含量由手持折光仪测定,采用酸碱滴定法测定果汁可滴定酸(TA)含量,采用 2,6-二氯酚法测定果汁维生素 C 含量,采用斐林氏容量法测定果实的总糖含量.具体测定详细步骤见文献[31].

1.4 数据分析

通过 SPSS 21.0 软件,对土壤理化性质、微生物拷贝数和土壤酶活的原始数据进行正态性检验和方差齐性检验后,进行 one-way ANOVA 单因素方差分析(LSD 和 Duncan 分析).基于 T-RFLP 数据,群落结构 α -多样性指数分析,即丰富度指数 (richness,

S)、均匀度指数 (evenness, *J'*)、香农-威纳指数 (shannon-weiner index, *H'*) 利用 Excel 2016 完成;利用 CANOCO 软件和皮尔逊相关分析研究果实产量和品质与土壤环境因子进行基于距离尺度的冗余分析 (distance-based redundancy Analysis, db-RDA),并运用蒙特卡罗置换检验 (Monte Carlo permutation test) 去检验约束排序模型的显著性 (用 *F* 值作为统计量).

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤理化性质的变化情况

不同施肥处理土壤理化性质的差异见表 2. 除 FM 处理,其他施肥处理均显著增加土壤 pH 值. 无论是非根际或根际土, NP 和 P 处理中土壤 pH 值最高,其次是 70FP 和 50FP 处理,最后是 FM 处理. 此外,非根际土中 pH 值明显高于根际土. 无论是非根际土或是根际土,各施肥处理中 SOC 的含量由小到大的排序为: NP 和 P 处理 > 70FP 和 50FP 处理 > FM 处理 > CK 处理. 此外,根际土中 SOC 含量均高于非根际土. 与 CK 处理相比较,施肥处理均显著增加土壤全量养分的含量. 其中,70FP 处理显著增加 TN 的含量; 50FP 处理显著增加 TK 的含量; NP 处理显著促进 TP 含量. 相反地, FM 处理对土壤全量养分的促进效果最弱. 70FP 处理显著增加非根际土中速效养分的含量,分别增加 22% AN、245% AP 和 9% AK 的含量; 而 P 处理显著促进根际土中速效养分的含量,分别增加 20% AN、433% AP 和 8% AK 的含量. FM 处理显著增加土壤中铵态氮的含量. 在非根际土中 FM 处理硝态氮含量最高; 而根际土中 70FP 处理其含量最高. NP 处理显著增加土壤 WC, 其次是 70FP 处理. 由上可知, NP 和 P 处理显著增

加土壤 pH、SOC 和总量养分的含量；而 70FP 和 50FP 处理显著增加速效养分的含量。

表 2 不同施肥处理的土壤理化性质¹⁾

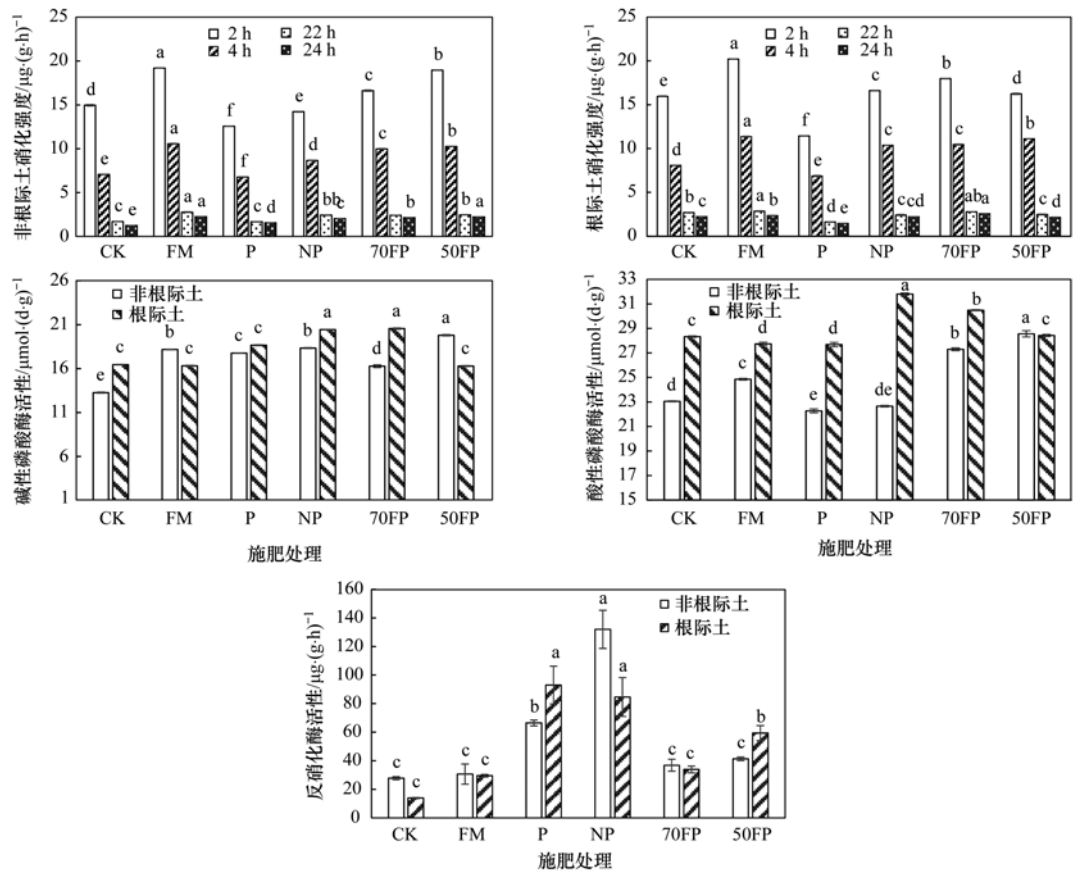
Table 2 Physicochemical properties of soil under different fertilization treatments												
项目	施肥处理	pH 值	WC /%	$\omega(\text{SOC})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TK})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AN})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NO}_3^--\text{N})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
非根际土	CK	4.48 ± 0.003e	20.29 ± 0.11bc	3.54 ± 0.04e	0.46 ± 0.00e	0.23 ± 0.00e	3.81 ± 0.16d	80.66 ± 0.50d	6.25 ± 0.06e	138.53 ± 0.28e	7.22 ± 0.11b	5.24 ± 0.02d
	FM	4.28 ± 0.002f	15.83 ± 0.18d	4.17 ± 0.01d	0.79 ± 0.00d	0.25 ± 0.00d	6.91 ± 0.15c	97.10 ± 0.43a	12.66 ± 1.21c	155.08 ± 0.22b	19.98 ± 0.29a	16.62 ± 0.83a
	P	5.27 ± 0.002a	26.13 ± 1.48a	8.32 ± 0.01a	0.84 ± 0.01c	0.36 ± 0.00c	7.2 ± 0.01bc	90.4 ± 0.04b	9.50 ± 0.15d	148.73 ± 2.85c	9.83 ± 0.03b	6.63 ± 0.05d
	NP	5.27 ± 0.002b	21.00 ± 0.16b	8.23 ± 0.00b	0.87 ± 0.01b	0.47 ± 0.01a	7.65 ± 0.27b	82.78 ± 1.36c	18.60 ± 0.04b	143.99 ± 0.59d	8.75 ± 0.21b	6.21 ± 0.09d
	70FP	4.89 ± 0.002d	21.57 ± 0.33b	5.46 ± 0.06c	0.97 ± 0.00a	0.38 ± 0.00b	7.66 ± 0.13b	98.94 ± 0.06a	21.61 ± 0.90a	151.02 ± 0.25c	20.47 ± 1.81a	14.62 ± 0.50b
	50FP	4.95 ± 0.003c	18.78 ± 0.02c	5.38 ± 0.01c	0.89 ± 0.00b	0.39 ± 0.00b	8.57 ± 0.32a	83.14 ± 0.63c	22.22 ± 0.27a	166.96 ± 0.99a	18.09 ± 1.52a	13.2 ± 0.45c
根际土	CK	4.36 ± 0.003e	16.32 ± 0.48e	3.74 ± 0.02f	0.53 ± 0.00f	0.19 ± 0.00f	4.03 ± 0.04c	74.57 ± 0.17cd	12.17 ± 0.02f	148.08 ± 0.85d	9.14 ± 0.13d	4.69 ± 0.01f
	FM	4.27 ± 0.003f	15.23 ± 0.02d	4.44 ± 0.04e	0.77 ± 0.01e	0.26 ± 0.00e	8.39 ± 0.71b	87.43 ± 1.57a	16.64 ± 0.11e	185.03 ± 1.65a	16.68 ± 0.32b	10.44 ± 0.21a
	P	5.04 ± 0.002b	18.84 ± 0.33bc	8.44 ± 0.01b	0.92 ± 0.01c	0.45 ± 0.00b	7.82 ± 0.40b	89.8 ± 2.69a	64.34 ± 1.68a	161.38 ± 1.27c	12.08 ± 0.09c	6.59 ± 0.18c
	NP	5.22 ± 0.003a	20.52 ± 0.33a	8.91 ± 0.03a	0.99 ± 0.00b	0.49 ± 0.00a	8.16 ± 0.30b	70.29 ± 0.03d	51.57 ± 0.34b	171.10 ± 4.77b	8.39 ± 0.10f	5.34 ± 0.16e
	70FP	4.58 ± 0.003d	19.01 ± 0.25b	7.63 ± 0.02c	1.04 ± 0.01a	0.36 ± 0.00d	8.87 ± 0.30b	81.80 ± 1.99b	40.40 ± 0.40d	169.14 ± 4.96bc	20.36 ± 0.21a	6.84 ± 0.15c
	50FP	4.70 ± 0.004c	17.99 ± 0.03c	6.27 ± 0.02d	0.83 ± 0.01d	0.43 ± 0.01c	10.25 ± 0.33a	76.6 ± 0.09c	47.82 ± 0.25c	172.57 ± 1.02b	16.14 ± 0.06b	9.43 ± 0.20b

1) 数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误, 同列数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 5% 显著水平; WC: 含水量, SOC: 有机碳, TN: 总氮, TP: 总磷, TK: 总钾, AN: 碱解氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾, NO₃⁻-N: 硝态氮, NH₄⁺-N: 铵态氮

2.2 不同施肥处理土壤酶活的变化特征

由图 1 可知, 不同施肥处理土壤酶活的变化特征. 在 24 h 内硝化强度变化趋势基本相同, 即在 2 h 土壤的硝化强度最高, 随后在 2 ~ 22 h 时段硝化强度快速降低, 在 22 h 后硝化强度趋于稳定. 50FP 处

理非根际土硝化强度最高, P 处理最低; 而 FM 处理根际土硝化强度最高, P 处理最低. 对于土壤反硝化酶活性, P 和 NP 处理显著增加非根际土反硝化酶活性, 约是 CK 处理的 3.7 倍; 而 P、NP 和 50FP 处理显著增加根际土反硝化酶活性.



不同小写字母表示不同施肥处理间酶活的差异性 ($P < 0.05$)

图 1 不同施肥处理土壤酶活的差异

Fig. 1 Differences in soil enzyme activity under different fertilization treatments

土壤中碱性磷酸酶活性范围为 $13.23 \sim 20.43 \mu\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$; 而酸性磷酸酶活性范围为 $22.25 \sim 31.84 \mu\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$. 酸性磷酸酶活性高于碱性磷酸酶活性. 施肥处理均显著增加非根际土碱性磷酸酶活性, 其中 50FP 处理增加 50% 碱性磷酸酶活性; 而 NP 处理和 70FP 处理显著增加根际土碱性磷酸酶活性. 与 CK 处理相比较, 化肥添加的处理 (FM、70FP 和 50FP 处理) 显著增加非根际土酸性磷酸酶活性, 而 P 处理和 NP 处理显著减少酸性磷酸酶活性. 70FP 处理和 50FP 处理显著增加根际土酸性磷酸酶活性.

2.3 不同施肥处理功能微生物群落的变化

不同施肥处理功能微生物丰度的差异, 如图 2. 对于具有硝化作用的功能微生物, AOB 的丰度范围 (以干土计) 为 $4.74 \times 10^7 \sim 5.22 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$; AOA 的丰度范围 (以干土计) 为 $2.14 \times 10^6 \sim 2.70 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, AOB 的丰度高于 AOA. NP 处理显著增加 AOA 丰度; 而 50FP 处理显著减少根际土中 AOA 的丰度. FM 处理显著增加 AOB 丰度; 有机肥添加的处理显著减少非根际土 AOB 的丰度. 具有反硝化作用的反硝化微生物的丰度排序为: $\text{nosZ} > \text{nirS} > \text{nirK}$. 施肥处理对 nirK 基因丰度的影响不显著. 50FP 处理显著减少 nirS 基因微生物丰度. 50FP 处理显著增加 nosZ 基因微生物丰度. 对于 phoD 基因溶磷微生物的丰度, 50FP 处理显著增加 phoD 基因微生物的丰度, 其次是 FM 处理. 相反地, P 处理显著减少 phoD 基因溶磷微生物的丰度. 由上可知, 化

肥减量配施有机肥处理显著降低硝化微生物的丰度和 nirS 、 nirK 基因反硝化微生物的丰度. 同时, 显著增加 nosZ 基因反硝化微生物和 phoD 基因溶磷微生物的丰度.

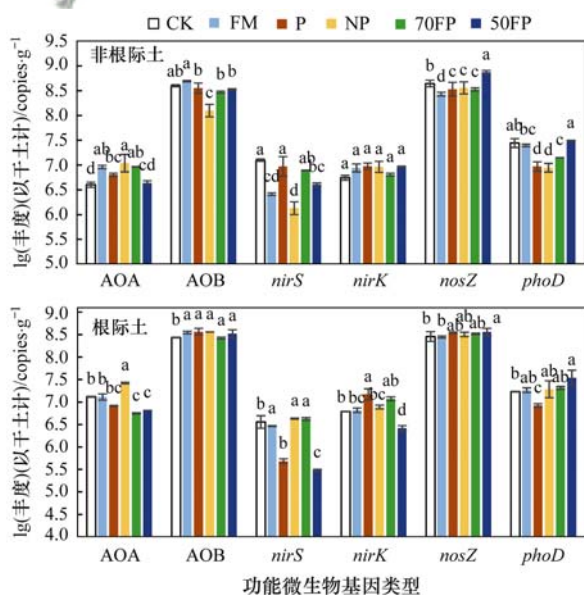
由表 3 可知, 不同施肥处理功能微生物群落结构的 α -多样性. 对于硝化微生物, 70FP 处理显著增加非根际土 AOA 群落的多样性. 50FP 处理显著增加非根际土 AOB 群落的多样性; 而 P 处理与之相反. 除 70FP 处理, 其他施肥处理均显著降低根际土 AOA 和 AOB 群落的多样性. 对于 nirS 和 nirK 基因反硝化微生物群落的多样性, 施肥处理对非根际土 nirS 基因反硝化微生物群落的影响不显著; 非根际 nirK 基因反硝化微生物群落与之相反. P 处理和 NP 处理分别显著增加根际土 nirK 和 nirS 基因反硝化微生物群落的多样性. 对于 nosZ 基因反硝化微生物群落的多样性, 施肥处理未显著影响非根际土群落的多样性; 而施肥处理显著降低根际土群落的多样性, 尤其是 P 处理. 对于 phoD 基因微生物群落的多样性, 施肥处理均显著增加非根际土群落的多样性, 各施肥处理增加效果排序: NP 处理 > 70FP 和 P 处理 > 50FP 处理 > FM 处理. FM、70FP 和 50FP 处理显著增加根际土群落的多样性.

2.4 不同施肥处理柠檬产量和品质的变化情况

由表 4 可知, 不同施肥处理柠檬每 hm^2 的产量和品质的差异. 柠檬产量范围为 $27156 \sim 35947 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 与 CK 处理相比, 各施肥处理柠檬产量的排序为: NP 处理 < P 处理 < FM 处理 < 50FP 处理 < 70FP 处理. 此外, 与 FM 处理相比较, 70FP 处理增长了 11.2%, 50FP 处理增长了 3%; 而 NP 处理降低了 4.9%. 由上可知, 化肥肥减量配施有机肥处理能显著增加柠檬的产量.

施肥处理均提升柠檬果实的外观品质. 70FP 处理显著增加柠檬的单果重, 其次是 NP 处理, 最后是 FM 处理. 与 CK 处理柠檬单果重相比, 分别是其的 1.5、1.4 和 1.2 倍. 柠檬果皮厚度的范围为 $0.53 \sim 0.83 \text{ cm}$, 其中, 70FP 处理柠檬果皮最厚, 其次是 P 处理和 NP 处理, 最薄是 FM 处理和 CK 处理. 70FP 处理柠檬的纵横径均最大, 分别可达 9.03 cm 和 7.93 cm , 约是 FM 处理的 1.27 倍. 其次是 50FP 处理分别可达 8.67 cm 和 7.56 cm , 是 FM 处理的 1.23 倍. 就果形指数而言, P 处理和 50FP 处理柠檬的果形指数最高, 其次是 70FP 处理, 最后是 FM 处理和 P 处理.

柠檬可溶性固形物的质量分数范围为 $5.1\% \sim 5.67\%$, 其中化肥减量配施有机肥处理质量分数最高, 其次是 P 处理, NP 处理最低. 与 CK 处理相比



不同小写字母表示不同施肥处理间
基因丰度的差异性 ($P < 0.05$)

图 2 不同施肥处理功能微生物基因丰度的差异

Fig. 2 Differences in the abundance of functional microbes under different fertilization treatments

表 3 不同施肥处理功能微生物群落结构的 α -多样性¹⁾

Table 3 The α -diversity of functional microbes' community structure under different fertilization treatments													
微生物类型	项目	非根际土						根际土					
		CK	FM	P	NP	70FP	50FP	CK	FM	P	NP	70FP	50FP
硝化	多样性	1.14 ± 0.02 _c	1.47 ± 0.08 _a	1.29 ± 0.02 _b	1.19 ± 0.01 _{bc}	1.46 ± 0.02 _a	1.26 ± 0.04 _{bc}	1.59 ± 0.38 _a	1.20 ± 0.01 _{ab}	1.14 ± 0.03 _{ab}	1.40 ± 0.17 _a	1.25 ± 0.01 _{ab}	0.78 ± 0.13 _b
	AOA 丰富度	1.46 ± 0.15 _a	1.65 ± 0.23 _a	1.45 ± 0.09 _a	1.45 ± 0.12 _a	1.60 ± 0.35 _a	1.44 ± 0.09 _a	1.78 ± 1.15 _a	0.68 ± 0.07 _a	0.86 ± 0.07 _a	1.06 ± 0.14 _a	0.84 ± 0.05 _a	0.54 ± 0.00 _a
	均匀度	0.41 ± 0.02 _c	0.52 ± 0.01 _{ab}	0.48 ± 0.00 _{abc}	0.43 ± 0.01 _c	0.54 ± 0.04 _a	0.46 ± 0.01 _{bc}	0.63 ± 0.01 _a	0.66 ± 0.04 _a	0.52 ± 0.00 _a	0.66 ± 0.16 _a	0.56 ± 0.01 _a	0.43 ± 0.07 _a
	多样性	1.55 ± 0.04 _{ab}	1.25 ± 0.29 _{ab}	0.87 ± 0.01 _b	1.00 ± 0.00 _{ab}	1.08 ± 0.10 _{ab}	1.80 ± 0.56 _a	1.58 ± 0.15 _{ab}	1.39 ± 0.20 _b	0.25 ± 0.05 _c	0.50 ± 0.00 _c	2.11 ± 0.43 _a	1.33 ± 0.11 _b
	AOB 丰富度	0.75 ± 0.07 _{ab}	0.63 ± 0.21 _{ab}	0.40 ± 0.03 _b	0.29 ± 0.00 _b	0.45 ± 0.08 _{ab}	1.14 ± 0.48 _a	0.70 ± 0.09 _b	0.57 ± 0.13 _b	0.22 ± 0.04 _b	0.16 ± 0.00 _b	1.43 ± 0.36 _a	0.65 ± 0.01 _b
	均匀度	0.80 ± 0.01 _b	0.85 ± 0.06 _{ab}	0.60 ± 0.02 _c	0.91 ± 0.00 _a	0.79 ± 0.01 _b	0.94 ± 0.02 _a	0.95 ± 0.01 _a	0.97 ± 0.01 _a	0.25 ± 0.02 _c	0.73 ± 0.01 _b	0.85 ± 0.10 _{ab}	0.74 ± 0.06 _b
	多样性	1.39 ± 0.11 _a	1.68 ± 0.19 _a	1.77 ± 0.14 _a	1.68 ± 0.02 _a	1.71 ± 0.01 _a	0.88 ± 0.13 _b	1.30 ± 0.01 _d	1.18 ± 0.02 _e	1.57 ± 0.03 _b	1.76 ± 0.01 _a	1.42 ± 0.02 _c	0.94 ± 0.05 _f
	<i>nirS</i> 丰富度	1.46 ± 0.03 _b	2.13 ± 0.17 _a	1.93 ± 0.09 _a	1.93 ± 0.08 _a	2.12 ± 0.06 _a	2.20 ± 0.08 _a	1.49 ± 0.06 _{ab}	1.25 ± 0.05 _{bc}	1.60 ± 0.08 _a	1.54 ± 0.06 _a	1.63 ± 0.11 _a	0.99 ± 0.09 _c
	均匀度	0.50 ± 0.04 _a	0.54 ± 0.04 _a	0.59 ± 0.04 _a	0.56 ± 0.01 _a	0.55 ± 0.05 _a	0.28 ± 0.03 _b	0.46 ± 0.00 _d	0.46 ± 0.00 _d	0.56 ± 0.01 _b	0.64 ± 0.00 _a	0.51 ± 0.00 _c	0.40 ± 0.01 _e
	反硝化	多样性	1.25 ± 0.01 _c	1.72 ± 0.05 _{ab}	1.50 ± 0.20 _{bc}	1.87 ± 0.03 _a	1.57 ± 0.04 _b	1.44 ± 0.05 _{bc}	2.07 ± 0.15 _c	2.41 ± 0.04 _{ab}	2.50 ± 0.04 _a	2.13 ± 0.10 _{bc}	2.40 ± 0.08 _{ab}
丰富度		0.48 ± 0.00 _d	0.86 ± 0.06 _b	0.86 ± 0.06 _b	1.03 ± 0.04 _a	0.71 ± 0.04 _{bc}	0.63 ± 0.04 _{cd}	1.38 ± 0.12 _b	1.53 ± 0.01 _b	1.89 ± 0.06 _a	1.61 ± 0.13 _{ab}	1.56 ± 0.12 _{ab}	1.33 ± 0.11 _b
均匀度		0.90 ± 0.01 _a	0.89 ± 0.01 _a	0.73 ± 0.08 _b	0.88 ± 0.00 _a	0.91 ± 0.01 _a	0.83 ± 0.00 _{ab}	0.86 ± 0.03 _{bc}	0.94 ± 0.01 _a	0.90 ± 0.00 _{ab}	0.82 ± 0.02 _c	0.94 ± 0.01 _a	0.91 ± 0.00 _{ab}
<i>nosZ</i>	多样性	1.41 ± 0.08 _{abc}	1.53 ± 0.10 _a	1.19 ± 0.07 _c	1.26 ± 0.03 _{bc}	1.43 ± 0.08 _{abc}	1.49 ± 0.02 _{ab}	1.86 ± 0.02 _a	1.49 ± 0.04 _b	1.37 ± 0.05 _c	1.44 ± 0.01 _{bc}	1.43 ± 0.01 _{bc}	1.43 ± 0.02 _{bc}
	丰富度	0.91 ± 0.13 _b	1.58 ± 0.32 _a	1.13 ± 0.17 _{ab}	1.07 ± 0.06 _{ab}	1.26 ± 0.20 _{ab}	1.31 ± 0.10 _{ab}	2.01 ± 0.07 _a	1.57 ± 0.11 _{cd}	1.31 ± 0.15 _d	1.89 ± 0.03 _{ab}	1.65 ± 0.03 _{bc}	1.45 ± 0.07 _{cd}
	均匀度	0.69 ± 0.01 _a	0.58 ± 0.01 _b	0.51 ± 0.00 _d	0.55 ± 0.01 _c	0.58 ± 0.00 _b	0.58 ± 0.01 _b	0.63 ± 0.01 _a	0.55 ± 0.01 _b	0.55 ± 0.00 _{bc}	0.49 ± 0.00 _e	0.51 ± 0.00 _d	0.53 ± 0.00 _c
溶磷	多样性	0.73 ± 0.02 _e	2.37 ± 0.02 _d	2.79 ± 0.01 _b	3.02 ± 0.01 _a	2.82 ± 0.01 _b	2.64 ± 0.02 _c	2.19 ± 0.01 _c	2.53 ± 0.04 _a	2.34 ± 0.01 _b	2.33 ± 0.03 _b	2.57 ± 0.03 _a	2.36 ± 0.02 _b
	丰富度	1.96 ± 0.13 _e	4.49 ± 0.16 _c	5.37 ± 0.12 _b	6.57 ± 0.04 _a	3.96 ± 0.04 _d	3.72 ± 0.08 _d	4.06 ± 0.02 _a	3.47 ± 0.03 _b	3.04 ± 0.03 _{cd}	3.30 ± 0.16 _{bc}	2.89 ± 0.11 _d	2.32 ± 0.03 _e
	均匀度	0.24 ± 0.01 _e	0.62 ± 0.00 _d	0.69 ± 0.01 _c	0.71 ± 0.00 _b	0.77 ± 0.00 _a	0.72 ± 0.00 _b	0.59 ± 0.00 _e	0.70 ± 0.01 _b	0.68 ± 0.00 _c	0.67 ± 0.00 _d	0.78 ± 0.01 _a	0.78 ± 0.00 _a

1) 数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误差, 同行数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 5% 显著水平

较, NP 处理和 50FP 处理显著增加柠檬酸的质量分数, 而 FM 处理和 70FP 处理显著降低柠檬酸的质量分数. 化肥减量配施有机肥处理柠檬总糖的质量分数最高, 其次是有机肥处理, 最后是 FM 处理, 分别是 CK 处理的 2.6、2 和 1.4 倍. 柠檬维生素 C 质量分数范围为 $17.58 \sim 24.32 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$.

表 4 不同施肥处理柠檬产量和品质¹⁾

Table 4 Yield and quality of lemon under different fertilization treatments

处理	产量 /kg·hm ⁻²	内在品质				出汁率 /%	外观品质				
		ω (可溶性固形物) /%	ω (柠檬酸) /%	ω (维生素 C) /mg·(100 g) ⁻¹	ω (总糖) /%		单果重 /g	果皮厚度 /cm	纵向长度 /cm	横向长度 /cm	果形指数
CK	27 156.15 ± 325.8e	5.10 ± 0.06de	3.02 ± 0.01c	18.85 ± 0.40e	2.91 ± 0.07f	36.18 ± 0.45d	129.82 ± 3.72d	0.53 ± 0.02e	6.90 ± 0.38e	5.50 ± 0.40e	0.84 ± 0.02c
FM	32 317.65 ± 387.6bc	5.23 ± 0.03cd	2.90 ± 0.00d	20.13 ± 0.08d	3.29 ± 0.15e	38.49 ± 0.29c	165.84 ± 2.86c	0.57 ± 0.02d	7.07 ± 0.33d	6.03 ± 0.35d	0.85 ± 0.00b
P	31 834.80 ± 381.9cd	5.30 ± 0.25bc	3.11 ± 0.00c	17.75 ± 1.08f	3.65 ± 0.04d	41.26 ± 0.65a	183.67 ± 9.41b	0.78 ± 0.02b	8.34 ± 0.23c	7.07 ± 0.49c	0.90 ± 0.05a
NP	30 819.15 ± 369.6d	5.10 ± 0.06e	3.51 ± 0.00a	20.44 ± 0.80c	3.73 ± 0.01c	38.11 ± 0.50c	194.74 ± 1.98a	0.74 ± 0.01b	6.87 ± 0.12e	6.37 ± 0.20d	0.85 ± 0.04b
70FP	35 947.35 ± 431.1a	5.67 ± 0.18a	2.90 ± 0.02d	24.51 ± 2.13a	4.34 ± 0.02a	42.07 ± 0.60a	196.80 ± 4.31a	0.82 ± 0.06a	9.03 ± 0.64a	7.93 ± 0.17a	0.86 ± 0.01ab
50FP	33 366.60 ± 400.2b	5.47 ± 0.35b	3.42 ± 0.05b	22.40 ± 3.31b	4.12 ± 0.07b	40.32 ± 0.34b	185.27 ± 1.56a	0.77 ± 0.03c	8.67 ± 0.43b	7.56 ± 0.10b	0.89 ± 0.00a

1) 除了产量数据, 其他数据为 18 次重复的平均值 ± 标准误, 同列数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 5% 显著水平

2.5 柠檬产量和品质与土壤理化性质和功能微生物之间的相互关系

柠檬产量和品质与土壤环境和功能微生物间的相互关系见图 3. 与功能微生物相比, 土壤理化性质对柠檬产量的影响更显著. 无论是非根际或根际土, 土壤 TN 是影响柠檬产量最显著的土壤理化性质, 其次是磷素 (AP、ACP 和 ALP) 及 *phoD* 基因微生物群落的多样性, 最后是 AOB 的多样性.

柠檬外观品质受非根际土 TN ($F = 28.7$, $P = 0.002$, 解释度: 64.2%) 和 *phoD* 基因微生物群落多样性 ($F = 19.2$, $P = 0.002$, 解释度: 54.6%) 的影响最显著, 其次是含水量 ($F = 7.5$, $P = 0.006$, 解释度: 10.7%)、ACP ($F = 7.7$, $P = 0.004$, 解释度: 15.4%) 和硝化强度 ($F = 7.6$, $P = 0.006$, 解释度: 10.5%), 最后是 AK ($F = 3.4$, $P = 0.036$, 解释度: 4.2%)、*nirK* 基因微生物的丰度 ($F = 3.5$, $P = 0.048$, 解释度: 4.2%)、AOB 群落的多样性 ($F = 4.8$, $P = 0.014$, 解释度: 4.3%) 和 *nirS* 基因微生物的丰度 ($F = 2.9$, $P = 0.048$, 解释度: 2.3%) 受根际土 TN ($F = 20.7$, $P = 0.002$, 解释度: 56.4%)、*nosZ* 基因微生物群落的多样性 ($F = 16.8$, $P = 0.002$, 解释度: 51.2%)、AOA 的丰度 ($F = 11.2$, $P = 0.002$, 解释度: 20.8%) 和 ACP ($F = 7.9$, $P = 0.002$, 解释度: 10.1%) 的影响最显著, 此外还受硝态氮 ($F = 5.3$, $P = 0.02$, 解释度: 11.4%)、AK ($F = 6.6$, $P = 0.016$, 解释度: 10.3%)、铵态氮 ($F = 3.5$, $P = 0.042$, 解释度: 4.7%) 和 TP ($F = 3.5$, $P = 0.018$, 解释度: 3.9%) 的显著影响.

柠檬内在品质受非根际土 AP ($F = 36.0$, $P = 0.002$, 解释度: 69.2%)、TP ($F = 12.6$, $P = 0.002$,

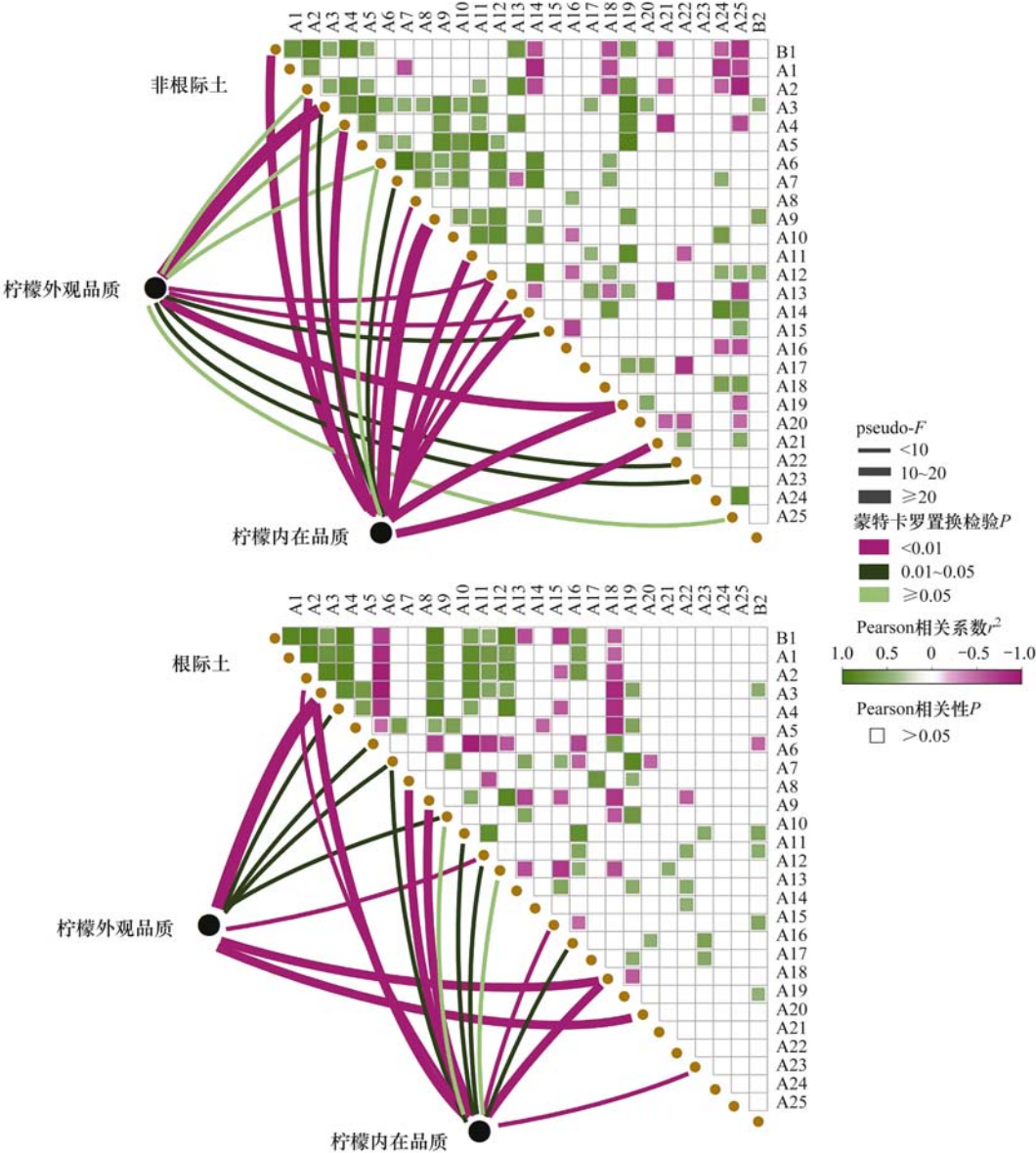
70FP 处理维生素 C 质量分数最高, 是 CK 处理的 1.6 倍; P 处理维生素 C 质量分数最低, 是 CK 处理的 85.32%. 柠檬出汁率的范围为 36.18% ~ 42.07%, 在 70FP 和 P 处理柠檬的出汁率最高, 其次是 50FP 处理, 再次是 NP 处理和 FM 处理, 最后是 CK 处理.

解释度: 2.5%)、ACP ($F = 18.5$, $P = 0.002$, 解释度: 29.1%)、ALP ($F = 10.3$, $P = 0.002$, 解释度: 5.9%) 和 *phoD* 基因微生物群落多样性 ($F = 14.3$, $P = 0.002$, 解释度: 47.2%) 的影响最显著, 其次是土壤 pH ($F = 16.7$, $P = 0.002$, 解释度: 16.2%)、硝化强度 ($F = 11.0$, $P = 0.002$, 解释度: 10.1%) 和 AOB 的丰度 ($F = 17.7$, $P = 0.002$, 解释度: 4.4%), 最后是铵态氮 ($F = 3.9$, $P = 0.032$, 解释度: 0.5%)、SOC ($F = 11.4$, $P = 0.002$, 解释度: 4.3%) 和反硝化酶活性 ($F = 5.7$, $P = 0.008$, 解释度: 1.0%). 受根际土 TN ($F = 17.9$, $P = 0.002$, 解释度: 52.7%)、AN ($F = 12.4$, $P = 0.002$, 解释度: 16.3%)、AP ($F = 13.1$, $P = 0.002$, 解释度: 9.2%)、*nosZ* 基因微生物群落多样性 ($F = 10.7$, $P = 0.002$, 解释度: 40.0%) 和 *nirS* 基因微生物丰度 ($F = 9.7$, $P = 0.002$, 解释度: 10.8%) 的影响最显著, 其次为 SOC ($F = 2.5$, $P = 0.004$, 解释度: 4.1%) 和 AOB 群落的多样性 ($F = 9.7$, $P = 0.004$, 解释度: 23.6%), 最后为铵态氮 ($F = 5.5$, $P = 0.016$, 解释度: 12.6%)、酸性及碱性磷酸酶活性 ($F = 6.0$; 5.5 , $P = 0.024$; 0.016 , 解释度: 10.9%; 3.7%) 和 *nirS* 基因微生物群落多样性 ($F = 4$, $P = 0.026$, 解释度: 3.6%). 由上可知, 柠檬外观品质主要受氮素及其转化的微生物的影响; 影响柠檬内在品质的环境因子在非根际土和根际土之间存在差异.

3 讨论

3.1 化肥减量配施有机肥对功能微生物及酶活性的影响

土壤氮循环与农业生产和生态环境安全有密切



B1. pH, B2. 产量, A1. 含水量, A2. 有机碳, A3. 总氮, A4. 总磷, A5. 总钾, A6. 硝态氮, A7. 铵态氮, A8. 碱解氮, A9. 有效磷, A10. 速效钾, A11. 碱性磷酸酶, A12. 酸性磷酸酶, A13. 反硝化酶活性, A14. 硝化强度, A15. 氨氧化细菌群落多样性, A16. *nirS* 基因细菌群落多样性, A17. *nirK* 基因细菌群落多样性, A18. *nosZ* 基因细菌群落多样性, A19. *phoD* 基因细菌群落多样性, A20. 氨氧化古菌丰度, A21. 氨氧化细菌丰度, A22. *nirS* 基因细菌丰度, A23. *nirK* 基因细菌丰度, A24. *nosZ* 基因细菌丰度, A25. *phoD* 基因细菌丰度

图3 柠檬产量和品质与土壤环境及功能微生物之间的相关性

Fig. 3 Correlation of lemon yield and quality and soil environment and functional microbes

的关系^[32],其关键步骤为硝化作用和反硝化作用^[33].本文中P处理显著减少硝化强度,而FM处理显著增加根际土硝化强度^[34](图1).这可能与AOB的丰度有关,因为已有研究显示,AOB的丰度与硝化强度显著正相关,本文中FM处理根际土AOB丰度都显著高于其他施肥处理^[35,36](图2).而P处理显著减少硝化强度是因为外源有机质的添加会促进有机酸的产生,进而抑制AOB的丰度^[37].P处理和NP处理显著增加反硝化酶活性,而FM处理对反硝化酶活性的增加效果不显著^[38,39](图1).因为介导反硝化酶活性的微生物多为异养微生物且受

碳源限制^[40],P处理和NP处理为它们提供了充足的碳源.70FP和50FP处理均属于化肥减量配施有机肥处理,但化肥和有机肥的配比差异也显著影响反硝化酶活性(图1).杨杰^[39]在中性和微碱性土壤中发现,根际土中1:1的化肥与有机肥处理反硝化酶活性显著低于3:1的化肥与有机肥处理.虽然该结果与本文的结果相反,但侧面证明不同土壤类型根际效应对反硝化酶活性的影响不同^[41,42].化肥减量配施有机肥处理显著增加*nosZ*基因微生物丰度^[43,44](图2),则该处理更多地进行完全反硝化作用,即离子态氮更多地被转化为 N_2 释放到空气中,

而不是 N_2O ^[44,45]. 因为 *nosZ* 基因反硝化微生物调控反硝化作用的最后一步是将 N_2O 转化为 N_2 的过程^[46], 且其丰度一定程度上能反映该过程的程度^[47]. 虽然与 70FP 处理相同, FM 处理反硝化酶活性增加也并不显著, 但同时降低 *nosZ* 基因微生物的丰度^[48], 则离子态氮大部分转化为 N_2O 释放到空气中^[49]. 本文中, 化肥减量配施有机肥处理硝化微生物群落多样性最高, 这与硝化微生物的营养生长有关^[50]. 在非根际土中施肥处理对反硝化微生物群落多样性的影响不显著, 已有的研究中也得到类似结果^[51,52]. 但是根际土中它们却展现出了显著的差异, P 处理 *nirS* 和 *nirK* 基因微生物多样性显著增加, *nosZ* 基因微生物群落结构显著减少, 这侧面证明根际效应对反硝化微生物群落的影响不容忽视. 本文中的试验土为酸性土, 酸性磷酸酶含量明显高于碱性磷酸酶 (图 1), 与已有研究的结果一致^[53]. 化肥减量配施有机肥处理显著增加碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性, 因为该处理显著增加 *phoD* 基因微生物的丰度和群落多样性, 而已有研究证明磷酸酶活性与溶磷菌的丰富和多样性显著正相关^[54~56]. 同时也有研究证实, 微生物的溶磷作用可能只是碳循环的副产品, 氮源和碳源供应充足促进了溶磷微生物的功能表达^[54,57]. 由上可知, 化肥减量配施有机肥处理有效调控氮、磷功能微生物.

3.2 化肥减量配施有机肥对柠檬产量和品质的影响

本研究发现, 70FP 处理显著增加柠檬产量^[13,58], P 处理和 NP 处理少量增加柠檬产量 (表 4). 但刘红明等^[13]的研究显示, 有机肥不能促进柠檬的产量, 与本文的结果相异 (表 4). 这可能与有机肥的肥源有关, 因为本文用的猪粪肥比牛粪肥所含的养分更高^[59]. 同时, 已有研究也显示, 猪粪肥处理柠檬产量高于化肥^[58]. 以上结果一定程度上证明有机肥处理对柠檬产量的促进效果取决于有机肥的肥源. 单果重、柠檬的横径和出汁率在化肥减量配施有机肥处理最高 (表 4), 与已有研究的结果一致^[11,58]. 但是, 柠檬果皮厚度对化肥减量配施处理的响应并不一致, 刘红明等^[13]发现化肥减量配施处理果皮厚度最小; 而杜玉霞等^[58]则发现了相反的结果, 与本文的结果一致. 这可能与柠檬的品种有关, 因为不同柠檬品种对肥料的响应存在一定差异^[60]. 除了柠檬酸含量, 化肥减量配施有机肥处理显著增加 VC、总糖和可溶性固形物, 特别是 70FP 处理^[11] (表 4). 这与张国显等^[61]研究番茄果实对化肥减量配施有机肥处理的响应基本一致, 即降低了果实的酸度, 同时增加 VC 和总糖的含量. 这与土

壤 pH 有关, 因为已有研究发现当土壤酸化加剧会显著增加可滴定酸含量^[62], 而本文中 70FP 处理土壤 pH 有显著的增加. 除了土壤 pH, 土壤中铁、镁和钾等矿质元素也起着不可忽视的作用. 因为, 在土壤酸化加剧接近 pH=4 时, 果肉汁细胞质和线粒体镁含量下降, 柠檬酸合成酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性降低, 此时柠檬酸合成就会受到抑制^[62], 这可能是 FM 处理 pH 降低, 柠檬酸含量也同时降低的原因.

3.3 土壤环境和功能微生物对柠檬产量和品质的影响

氮、磷养分作为果树生长发育不可缺少的大量养分其对果实产量的影响毋庸置疑^[59]. 本研究显示, 无论是非根际或根际土 TN 是影响柠檬产量最显著的土壤环境因子, 其次是磷素 (AP、ACP 和 ALP) 及其转化相关 *phoD* 基因微生物群落多样性, 最后是 AOB 多样性 (图 3). 通过进一步的相关分析可知, 氮素和磷素通过外观和内在两个方面影响柠檬产量. 其中, 氮素主要通过改善柠檬外观品质提高柠檬产量, 因为已有研究表明, 氮素会显著影响果实激素含量, 在果实的膨大期, 充足的氮素会促进 ZRs、ABA 和 IAA 等激素的释放, 进而间接影响果实成熟^[63]. 果实的外观品质会受到氮素形态的显著影响, 因为果实的单果重和果皮厚度在充足硝态氮情况下更佳^[64]. 此时, 介导硝化作用的 AOB 和 AOA 将土壤铵态氮转化为硝态氮就间接增加了果实单果重和果皮厚度. 化肥减量配施有机肥处理硝化强度和单果重均显著增加, 也进一步证实硝化微生物通过改变氮素形态影响柠檬的外观品质, 从而影响柠檬的产量. 与氮素通过影响柠檬外观品质影响柠檬产量不同, 土壤的磷素主要通过影响柠檬的内在品质影响柠檬产量. 首先, 在缺磷情况下根系会向周围土壤中分泌酸性磷酸酶将有机磷水解为正磷酸盐, 提高根际土中有效磷含量^[65]; 同时, 微生物会分泌碱性磷酸酶的胞外酶将有机磷转化为正磷酸盐被果树吸收利用^[66]. 而 *phoD* 基因微生物调控着土壤中碱性磷酸酶的释放^[66]. 总糖作为柠檬的主要内在品质之一, 而植物体内多糖形成都要通过含磷的中间化合物介导. 同时, 可溶性固形物和柠檬酸的合成都少不了磷素的参与^[67]. 以上内在品质也都会直接影响柠檬产量. 因此, 直接转化土壤有机磷为植物可利用无机磷的 *phoD* 基因微生物就间接通过影响柠檬的内在品质, 影响柠檬产量. 对于柠檬的外观品质的影响, 非根际土和根际土中氮素都基本起着主导地位; 而对于柠檬内在品质的影响, 受根际土中氮素的影响和非根际土中磷素的限制. 目前为止对于以

上现象还没有合理的解释. 但从以往的研究显示, 根际土环境更易实现磷素的有效性, 因为除了本文提及的磷酸酶以外, 根系分泌的有机酸也能很好地实现磷酸有效性^[68]. 因此, 这也是柠檬内在品质不受根际土磷素影响, 而受非根际土磷素影响的可能原因.

4 结论

化肥减量配施有机肥处理不仅明显改善土壤养分环境, 更有效地调控土壤功能微生物群落, 间接促进柠檬产量和品质的提升. 70FP 处理硝化强度虽有显著的提升, 但有效控制反硝化酶活性, 同时促进 N_2O 向 N_2 转化减少温室气体的排放. 此外, 该处理显著增加磷酸酶活性. 对于功能微生物群落, 化肥减量配施有机肥显著降低了硝化微生物和 *nirS* 和 *nirK* 基因反硝化微生物的丰度. 同时, 促进 *nosZ* 基因反硝化微生物和 *phoD* 基因溶磷微生物的丰度. 但是, 化肥减量配施有机肥处理功能微生物群落结构多样性没有明确的规律. 在 70FP 处理, 柠檬产量有显著增加, 品质也有显著的提升. 其中, 氮素及其转化相关微生物群落通过柠檬内在和外观品质显著影响柠檬产量; 而磷素及其转化微生物群落主要通过柠檬内在品质影响柠檬产量. 此外, 非根际土和根际土对柠檬内在品质的影响因子存在明显的分异现象.

参考文献:

- [1] Sharma N, Singhvi R. Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: a review [J]. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2017, **10**(6): 675-680.
- [2] FAO. World food and agriculture—statistical yearbook 2020 [M]. Geneva: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [3] 刘鑫, 王蕾, 胡飞龙, 等. 《生物多样性公约》下有关农药化肥减量要求及我国的对策建议[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(9): 1129-1136.
Liu X, Wang L, Hu F L, et al. Requirements for reduction of pesticides and fertilizers under the convention on biological diversity and the countermeasure suggestions for China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(9): 1129-1136.
- [4] Bi Q F, Zheng B X, Lin X Y, et al. The microbial cycling of phosphorus on long-term fertilized soil: insights from phosphate oxygen isotope ratios [J]. Chemical Geology, 2018, **483**: 56-64.
- [5] Yang L Q, Zhang X J, Ju X T. Linkage between N_2O emission and functional gene abundance in an intensively managed calcareous fluvo-aquic soil [J]. Scientific Reports, 2017, **7**, doi: 10.1038/srep43283.
- [6] Cavalli D, Consolati G, Marino P, et al. Measurement and simulation of soluble, exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils [J]. Geoderma, 2015, **259-260**: 116-125.
- [7] Tan H, Barret M, Mooij M J, et al. Long-term phosphorus fertilisation increased the diversity of the total bacterial community and the *phoD* phosphorus mineraliser group in pasture soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(6): 661-672.
- [8] Ragot S A, Kertesz M A, Bünenmann E K. *phoD* alkaline phosphatase gene diversity in soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, **81**(20): 7281-7289.
- [9] 黄容. 有机替代对菜园土壤温室气体排放和氮转化的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
Huang R. Effects of organic substitution on greenhouse gas emission and nitrogen transformation in the soil of vegetable field [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [10] Luo G W, Ling N, Nannipieri P, et al. Long-term fertilisation regimes affect the composition of the alkaline phosphomonoesterase encoding microbial community of a vertisol and its derivative soil fractions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, **53**(4): 375-388.
- [11] 蔡秋华, 赵正雄, 左进香, 等. 有机肥配施减量化肥对烤烟青枯病及其根际微生物的影响 [J]. 烟草科技, 2018, **51**(11): 20-27.
Cai Q H, Zhao Z X, Zuo J X, et al. Effects of organic fertilizers combined with reduced chemical fertilizers on tobacco bacterial wilt disease and rhizosphere microorganism [J]. Tobacco Science & Technology, 2018, **51**(11): 20-27.
- [12] 裴宇, 伍玉鹏, 张威, 等. 化肥减量配合有机替代对柑橘果实、叶片及橘园土壤的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021, (4): 88-95.
Pei Y, Wu Y P, Zhang W, et al. The impacts of substituting organic fertilizers for chemical fertilizer on fruit, leaf and soil in citrus orchard [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021, (4): 88-95.
- [13] 刘红明, 龙春瑞, 潘艳华, 等. 化肥减量配施有机肥对柠檬树体生长、果实产量及品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, **36**(24): 42-46.
Liu H M, Long C R, Pan Y H, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer application on growth, yield and quality of lemon trees [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, **36**(24): 42-46.
- [14] 付小猛, 毛加梅, 杨虹霞, 等. 果树根际微生物研究综述 [J]. 中国果树, 2021, (11): 5-9.
Fu X M, Mao J M, Yang H X, et al. Review on rhizosphere microorganisms of fruit trees [J]. China Fruits, 2021, (11): 5-9.
- [15] 赵明, 赵征宇, 蔡葵, 等. 畜禽有机肥料当季速效氮磷钾养分释放规律 [J]. 山东农业科学, 2004, (5): 59-61.
- [16] 谢桂琼, 邹约儒. 安岳县柠檬高产栽培技术 [J]. 中国科技纵横, 2014, (5): 240-241, 243.
- [17] 申建波, 毛达如. 植物营养研究方法 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [19] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(2): 485-491.
- [20] 和文祥, 魏燕燕, 蔡少华. 土壤反硝化酶活性测定方法及影响因素研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(1): 121-124.
He W X, Wei Y Y, Cai S H. Study on assaying method and affecting factors of soil denitrification enzyme activity [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry

- (Natural Science Edition), 2006, **34**(1): 121-124.
- [21] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [22] 张晶, 张惠文, 张成刚. 实时荧光定量 PCR 及其在微生物生态学中的应用[J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1445-1450.
Zhang J, Zhang H W, Zhang C G. Real-time fluorescent quantitative PCR and its application in microbial ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(6): 1445-1450.
- [23] Kloos K, Mergel A, Rösch C, *et al.* Denitrification within the genus *Azospirillum* and other associative bacteria[J]. Functional Plant Biology, 2001, **28**(9): 991-998.
- [24] Rothauwe J H, Witzel K P, Liesack W. The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker: molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(12): 4704-4712.
- [25] Hinić V, Brodard I, Thomann A, *et al.* Novel identification and differentiation of *Brucella melitensis*, *B. abortus*, *B. suis*, *B. ovis*, *B. canis*, and *B. neotomae* suitable for both conventional and real-time PCR systems[J]. Journal of Microbiological Methods, 2008, **75**(2): 375-378.
- [26] Michotey V, Méjean V, Bonin P. Comparison of methods for quantification of cytochrome *cd₁*-denitrifying bacteria in environmental marine samples[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(4): 1564-1571.
- [27] Throbäck I N, Enwall K, Jarvis Å, *et al.* Reassessing PCR primers targeting *nirS*, *nirK* and *nosZ* genes for community surveys of denitrifying bacteria with DGGE[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, **49**(3): 401-417.
- [28] De Cesco S, Kurian J, Dufresne C, *et al.* Covalent inhibitors design and discovery[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2017, **138**: 96-114.
- [29] 王莹燕, 王富华, 罗东海, 等. 缙云山森林植被类型对土壤产 N_2O 相关功能微生物的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2445-2454.
Wang Y Y, Wang F H, Luo D H, *et al.* Effects of different forest vegetation types on soil nitrogen-related microbial communities and functions in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2445-2454.
- [30] 马万里, Tibbits J, Adams M, 等. 土壤微生物多样性研究的新方法[J]. 土壤学报, 2004, **41**(1): 103-107.
Ma W L, Tibbits J, Adams M, *et al.* A new method for research on soil microbial diversity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(1): 103-107.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [32] Kielak A, Rodrigues J L M, Kuramae E E, *et al.* Phylogenetic and metagenomic analysis of *Verrucomicrobia* in former agricultural grassland soil[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2009, **71**(1): 23-33.
- [33] Davidson E A, Swank W T, Perry T O. Distinguishing between nitrification and denitrification as sources of gaseous nitrogen production in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, **52**(6): 1280-1286.
- [34] 王军, 申田田, 车钊, 等. 有机和无机肥配比对黄褐土硝化和反硝化微生物丰度及功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(3): 641-650.
Wang J, Shen T T, Che Z, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilizers on abundances of nitrifiers and denitrifiers and their function in yellow-cinnamon soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(3): 641-650.
- [35] Glaser K, Hackl E, Inselsbacher E, *et al.* Dynamics of ammonia-oxidizing communities in barley-planted bulk soil and rhizosphere following nitrate and ammonium fertilizer amendment[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, **74**(3): 575-591.
- [36] Wu Y C, Lu L, Wang B Z, *et al.* Long-term field fertilization significantly alters community structure of ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in a paddy soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, **75**(4): 1431-1439.
- [37] Subbarao G V, Rondon M, Ito O, *et al.* Biological nitrification inhibition (BNI)-is it a widespread phenomenon? [J]. Plant and Soil, 2007, **294**(1-2): 5-18.
- [38] Chen Z, Hou H J, Zheng Y, *et al.* Influence of fertilisation regimes on a *nosZ* - containing denitrifying community in a rice paddy soil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, **92**(5): 1064-1072.
- [39] 杨杰. 亚热带红壤不同施肥处理对根际土壤微生物硝化及反硝化作用的影响研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.
Yang J. Effects of different fertilization treatments on microbial nitrification and denitrification in rhizosphere soils in subtropical red soils[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [40] Parkin T B. Soil microsites as a source of denitrification variability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, **51**(5): 1194-1199.
- [41] Shiina Y, Itakura M, Choi H, *et al.* Relationship between soil type and N_2O reductase genotype (*nosZ*) of indigenous soybean Bradyrhizobia: *nosZ*-minus populations are dominant in Andosols[J]. Microbes and Environments, 2014, **29**(4): 420-426.
- [42] Graf R H D, Zhao M, Jones C M, *et al.* Soil type overrides plant effect on genetic and enzymatic N_2O production potential in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **100**: 125-128.
- [43] 邹湘, 易博, 张奇春, 等. 长期施肥对稻田土壤微生物群落结构及氮循环功能微生物数量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(12): 2158-2167.
Zou X, Yi B, Zhang Q C, *et al.* Effects of long-term fertilization on the microbial community structure and the population of N cycle-related functional microorganism in paddy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(12): 2158-2167.
- [44] Kong D L, Jin Y G, Yu K, *et al.* Low N_2O emissions from wheat in a wheat-rice double cropping system due to manure substitution are associated with changes in the abundance of functional microbes[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, **311**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107318.
- [45] Krauss M, Krause H M, Spangler S, *et al.* Tillage system affects fertilizer-induced nitrous oxide emissions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, **53**(1): 49-59.
- [46] Stres B, Mahne I, Avgustin G, *et al.* Nitrous oxide reductase (*nosZ*) gene fragments differ between native and cultivated Michigan soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(1): 301-309.
- [47] Liu Z X, Chen X M, Jing Y, *et al.* Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. CATENA, 2014, **123**: 45-51.
- [48] Friedl J, Scheer C, Rowlings D W, *et al.* Effect of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on N-turnover, the N_2O reductase-gene *nosZ* and N_2O : N_2 partitioning from agricultural soils[J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-59249-z.
- [49] Liu B B, Frostegård Å, Bakken L R. Impaired reduction of N_2O to N_2 in acid soils is due to a posttranscriptional interference with the expression of *nosZ*[J]. mBio, 2014, **5**(3), doi: 10.1128/

- mBio.01383-14.
- [50] Liu H Y, Li J, Zhao Y, *et al.* Ammonia oxidizers and nitrite-oxidizing bacteria respond differently to long-term manure application in four paddy soils of south of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 641-648.
- [51] 王培欣, 杨亚东, 王占海, 等. 施肥制度对水稻土壤 *nosZ* 型反硝化细菌群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(7): 2072-2079.
- Wang P X, Yang Y D, Wang Z H, *et al.* Responses of the *nosZ*-denitrifying bacterial communities to fertilization regimes in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(7): 2072-2079.
- [52] Chen Z, Luo X Q, Hu R G, *et al.* Impact of Long-term fertilization on the composition of denitrifier communities based on nitrite reductase analyses in a paddy soil[J]. *Microbial Ecology*, 2010, **60**(4): 850-861.
- [53] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. *北京林业大学学报*, 2008, **30**(S2): 139-143.
- Geng Y Q, Bai C X, Zhao G L, *et al.* Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, **30**(S2): 139-143.
- [54] Luo G W, Sun B, Li L, *et al.* Understanding how long-term organic amendments increase soil phosphatase activities: Insight into *phoD*- and *phoC*-harboring functional microbial populations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **139**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107632.
- [55] Luo G W, Li L, Friman V P, *et al.* Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: a meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **124**: 105-115.
- [56] Chen X D, Jiang N, Chen Z H, *et al.* Response of soil *phoD* phosphatase gene to long-term combined applications of chemical fertilizers and organic materials[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **119**: 197-204.
- [57] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **61**: 69-75.
- [58] 杜玉霞, 李晶, 高俊燕, 等. 有机无机配施对柠檬产量和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, **33**(7): 92-97.
- Du Y X, Li J, Gao J Y, *et al.* Effect of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield and quality of lemon[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(7): 92-97.
- [59] 谢德体. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [60] 洪林, 谢永红. 11 个柠檬品种的生物学特性及果实品质评价[J]. *南方农业学报*, 2012, **43**(7): 1000-1004.
- Hong L, Xie Y H. Evaluation on biological characteristics and fruit quality of eleven introduced lemon varieties[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, **43**(7): 1000-1004.
- [61] 张国显, 范永怀, 赵凤艳, 等. 化肥减量配施有机物料对设施番茄生长、光合特性、产量及品质的影响[J]. *中国科技论文*, 2018, **13**(6): 698-703.
- Zhang G X, Fan Y H, Zhao F Y, *et al.* Effects of organic materials combined application with mineral fertilizer on the growth, photosynthesis, yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *China Sciencepaper*, 2018, **13**(6): 698-703.
- [62] 高国震. 土壤酸化对柠檬果实酸度的影响及生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- Gao G Z. Effect of soil acidification on acidity of lemon fruit and its physiological mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [63] 彭福田. 氮素对苹果果实发育与产量、品质的调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2001.
- Peng F T. Regulation of nitrogen to apple fruit development, yield and quality[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2001.
- [64] 徐新娟. 氮素形态对番茄果实生长和有机酸代谢动态变化的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- Xu X J. Effects of nitrogen forms on the dynamic changes of growth and organic acid metabolism of tomato fruit[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [65] 李玉京, 刘建中, 李滨, 等. 高等植物对磷饥饿自我拯救的分子生物学机制[J]. *生物技术通报*, 1999, **21**(3): 1-8.
- Li Y J, Liu J Z, Li B, *et al.* Molecular mechanisms of self-rescue of higher plants for phosphorus starvation[J]. *Biotechnology Information*, 1999, **21**(3): 1-8.
- [66] Apel A K, Sola-Landa A, Rodríguez-García A, *et al.* Phosphate control of *phoA*, *phoC* and *phoD* gene expression in *Streptomyces coelicolor* reveals significant differences in binding of PhoP to their promoter regions[J]. *Microbiology*, 2007, **153**(10): 3527-3537.
- [67] 黄楠, 赵跃, 刘继培, 等. 减施磷肥对京郊设施番茄产量、品质及土壤有效磷的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, **34**(16): 65-69.
- Huang N, Zhao Y, Liu J P, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer reduction on yield, quality and soil available phosphorus of greenhouse tomato in suburb of Beijing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(16): 65-69.
- [68] Marschner P, Crowley D, Rengel Z. Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern iron and phosphorus acquisition along the root axis-model and research methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(5): 883-894.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)