

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM_{2.5}浓度调控模拟 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM_{2.5}碳质组分特征 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM₁中金属元素污染特征及健康风险评估 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及来源分析 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有有机性能 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH₄、CO₂和N₂O浓度的时空变化特征及影响因素 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 *phoD* 基因细菌群落的影响

夏鑫^{1,2}, 乔航^{1,2}, 孙琪^{1,2}, 刘坤平^{1,3}, 陈香碧¹, 何寻阳¹, 胡亚军^{1,4*}, 苏以荣^{1*}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 广西 547100; 4. 湖南农业大学农学院, 长沙 410125)

摘要: 针对喀斯特地区有机物料盈余、土壤养分贫瘠和易流失的特点, 设置长期有机物料还田小区定位试验, 试验包括 6 个处理: 不施肥对照 (CK)、无机肥 (NPK)、无机肥 + 玉米秸秆 (NPKS)、无机肥 + 农家肥 (NPKM)、无机肥 + 滤泥 (NPKL) 和无机肥 + 甘蔗灰 (NPKA)。研究不同有机物料投入对土壤磷素赋存形态和磷活化功能微生物 (含有机磷矿化基因细菌) 群落结构的影响。通过 3 a 断续的观测, 结果表明, 土壤全磷 (TP)、速效磷 (Olsen-P) 和二钙磷 ($\text{Ca}_2\text{-P}$) 含量呈逐年增加趋势, 而氯化钙磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) 含量呈先降低再增加的趋势; 与不施肥对照相比, 有机物料投入尤其是滤泥配施能显著提高土壤全氮 (TN)、TP、Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量, 其次是甘蔗灰和农家肥配施处理; 相关分析表明, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 均与土壤交换性钙 (Ca-ex) 含量显著正相关; 冗余分析 (RDA) 表明土壤 TN、Ca-ex、有机碳 (SOC) 和土壤全钾 (TK) 含量是影响土壤磷组分的关键因子。高通量测序分析含有机磷矿化基因 (含 *phoD* 基因) 细菌群落结果表明, 与不施肥对照相比, 秸秆还田配施无机肥处理显著增加土壤含 *phoD* 基因细菌丰富度, 但各处理间含 *phoD* 基因细菌群落结构无显著差异。RDA 分析结果表明, 土壤 Ca-ex、TK、Olsen-P、pH 和 SOC 是驱动含 *phoD* 基因细菌群落变化的关键因子。总体上看, 无机肥配施滤泥、甘蔗灰和农家肥是广西喀斯特地区农田土壤较为合适的养分管理方式。研究可为喀斯特地区有机废弃物资源利用与土壤磷素管理提供科学依据。

关键词: 喀斯特地区土壤; 有机物料; 磷素有效性; 含 *phoD* 基因细菌群落; 土壤微生物

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4636-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202111304

Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and *phoD*-harboring Bacterial Community in Karst Soil

XIA Xin^{1,2}, QIAO Hang^{1,2}, SUN Qi^{1,2}, LIU Kun-ping^{1,3}, CHEN Xiang-bi¹, HE Xun-yang¹, HU Ya-jun^{1,4*}, SU Yi-rong^{1*}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huanjiang Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Guangxi 547100, China; 4. College of Agronomy, Hunan Agriculture University, Changsha 410125, China)

Abstract: Efficient utilization of organic materials based on the rich resources in the karst region can promote soil fertility. Microorganisms have a crucial influence on soil phosphorus availability. *phoD* is considered to be the encoding phosphatase gene that can reflect the hydrolysis of organophosphorus compounds for the soil bacterial community. Molecular analysis of the *phoD*-harboring bacterial gene provides insight into promoting soil phosphorus availability under different fertilization managements. However, the effects of organic materials on soil phosphorus fractions associated with *phoD*-harboring bacterial communities are poorly understood. This study comprehensively investigated the effects of organic materials on soil phosphorus availability and explored environmental drivers of *phoD*-harboring bacteria in the Karst region. Here, six treatments were designed in the field as follows: non-fertilized control (CK), inorganic fertilization (NPK), inorganic fertilization combined with straw (NPKS), inorganic fertilization combined with manure (NPKM), inorganic fertilization combined with sludge (NPKL), and inorganic fertilization combined with sugarcane ash (NPKA). The *phoD*-harboring bacterial community in Karst region soil was analyzed using high-throughput sequencing. The results showed that the content of total P (TP), Olsen-P, and $\text{Ca}_2\text{-P}$ increased with the years after organic material application, whereas the content of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ first decreased and then increased. Compared to that under the CK treatment, organic material application, especially NPKL treatment, significantly increased soil total nitrogen (TN), TP, Olsen-P, $\text{CaCl}_2\text{-P}$, and $\text{Ca}_2\text{-P}$ contents, followed by those in the NPKA and NPKM treatments. Correlation analysis showed that the contents of $\text{CaCl}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_2\text{-P}$, and Olsen-P were significantly positively correlated with soil exchangeable calcium (Ca-ex) content. Redundancy analysis (RDA) showed that TN, Ca-ex, soil organic carbon (SOC), and total potassium (TK) contents were the key factors affecting soil P fractions. Using high-throughput sequencing, we found that only NPKS increased the richness of *phoD*-harboring bacteria compared to that under the control treatment. No significant difference was observed in the *phoD*-harboring bacterial community among all treatments. The RDA model selected the Ca-ex, TK, Olsen-P, pH, and SOC as the key environmental predictors for the *phoD*-harboring bacterial community. In summary, soil phosphorus availability can be improved through the input of organic materials and inorganic fertilizer combined with manure, sludge, and ash. These additions were suitable for nutrient management and sustainable development in farmland soil in the Karst region of Guangxi.

Key words: karst soil; organic materials; phosphorus availability; *phoD*-harboring bacterial community; soil microorganism

磷(P)是作物生长发育的必需营养元素,是影响作物生长和产量的关键因素。大量施用磷肥是保障作物高产的重要措施。土壤富含的钙、铝和铁锰氧化物等对磷素专性吸附和固定的能力强,一般土

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601260)

作者简介: 夏鑫(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态与农业环境和喀斯特地区土壤磷活化, E-mail: xiaxin191@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yjhu@isa.ac.cn; yrsu@isa.ac.cn

壤磷肥的当季利用率不足 20%^[1], 被土壤吸附固定的盈余磷素具有导致面源污染的潜在风险, 提高磷肥利用率是磷肥安全利用的前提, 也是土壤学科研究的前沿。

土壤中磷素具有复杂的无机磷和有机磷形态, 磷素的赋存形态在很大程度上决定了其有效性的供给。土壤无机磷一般分为钙磷酸盐、铝铁磷酸盐和闭蓄态磷。在石灰性土壤中, 无机磷以钙磷酸盐为主, 根据顾益初等^[2]的研究, 将钙磷酸盐分成二钙磷 ($\text{Ca}_2\text{-P}$)、八钙磷 ($\text{Ca}_8\text{-P}$) 和十钙磷 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 这 3 种类型, 其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 有效性最高, 是作物的第一有效磷源^[3]。土壤可溶性磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) 是能够被作物根系直接吸收的磷素, 也能反映土壤磷素的潜在流失风险^[4]。土壤有机磷 (Po) 是土壤磷库重要的组成部分, 但不同类型的土壤中有机磷含量变幅较大。微生物通过分泌磷酸酶、植酸酶等胞外酶实现有机磷的矿化, 释放磷酸根离子^[5-8]。*phoD* 基因编码碱性磷酸酶是土壤细菌负责矿化有机磷的关键基因^[9,10], 已有研究表明含 *phoD* 基因细菌群落结构受到有机物料投入的影响^[11,12]。因此, 在石灰性土壤中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Po 这 3 个磷组分可能会对磷素有效性影响较大。

有机物料投入一般被认为是提高土壤磷素有效供给的农业措施^[13-16]。一方面, 有机物料在分解过程中产生低分子量有机酸阴离子与土壤中吸附态磷产生竞争吸附^[17,18]; 另一方面, 有机物料作为微生物的碳源, 显著提高微生物数量与活性, 能够促进无机磷的活化与有机磷的矿化^[19]。有研究表明, 化肥与秸秆配施显著降低土壤磷吸附量, 而与牛粪配施则增强土壤磷吸附量, 表明有机物料类型对无机磷吸附解析的差别影响, 进而可能会对有效磷供给产生差异调控^[20]。近年来有研究发现长期不同有机物料的投入对含 *phoD* 基因细菌群落结构的影响存在差异^[21-24], 有机物料类型对含 *phoD* 基因细菌群落结构的影响有待进一步研究。

我国西南喀斯特地区贫困人口众多, 耕地面积小, “人-地”矛盾突出, 容易陷入“贫困→土地高强度利用→土壤退化→贫困加剧”的恶性循环。该地区的农田土壤在长期高强度利用下退化严重^[25]。长期田间试验证实, 有机物料的投入能显著改善土壤肥力, 提高作物养分利用率^[26-30]。目前广西喀斯特地区养殖业、制糖工业发展迅速, 产生了大量秸秆、粪便、滤泥和糖渣等有机废弃物, 这为实现有机废弃物资源的可持续发展, 提升喀斯特地区农田土壤地力条件奠定了基础^[31,32]。本研究通过设置对照、无机肥、无机肥 + 玉米秸秆、无机肥 + 农家肥、无机肥 + 滤泥和无机肥

+ 甘蔗灰这 6 个处理, 通过探究不同有机物料投入对喀斯特地区磷素有效供给和磷活化功能细菌群落的影响, 以期提高废弃物资源利用率。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期小区定位试验样地位于广西壮族自治区河池市 ($108^{\circ}18'E$; $24^{\circ}43'N$)。该区属亚热带季风气候区, 年均降水量 1 389.1 mm, 年均气温 19.9℃, 主要地貌为典型喀斯特地貌。试验场地选择在典型的喀斯特峰丛洼地上。

1.2 试验设计

田间小区定位试验于 2011 年布置, 作物种植模式为玉米-大豆轮作模式, 设置 6 个处理: ① 不施肥对照 (CK); ② 无机肥 (NPK); ③ 50% 无机肥 + 50% 玉米秸秆 (NPKS); ④ 50% 无机肥 + 50% 农家肥 (NPKM); ⑤ 50% 无机肥 + 50% 滤泥 (NPKL) 和 ⑥ 50% 无机肥 + 50% 甘蔗灰 (NPKA)。每个处理设置 4 个重复小区, 每个小区面积 18 m² (3 m × 6 m), 共 24 个小区。定位小区各施肥处理氮磷钾养分投入为玉米季 N 200 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻² 和 K₂O 100 kg·hm⁻²; 大豆季 N 22.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 40 kg·hm⁻² 和 K₂O 50 kg·hm⁻²。以有机肥替代无机肥的 50% 为基准, 其中 NPKS 和 NPKA 处理的施肥量按钾素计算, 不足 50% 的氮磷用无机肥补充, 而 NPKM 和 NPKL 处理的施肥量按氮素计算, 不足 50% 的磷钾用无机肥补充, 保证所有不同无机有机配施处理氮磷钾投入总含量相等。有机物料氮、磷和钾含量如表 1 所示。

表 1 不同有机物料中氮、磷和钾含量/%

Table 1 Nutrient contents of organic materials/%

有机物料	氮	磷	钾
玉米秸秆	0.64	0.18	1.12
牛粪	0.38	0.22	0.28
滤泥	1.41	0.73	0.19
甘蔗灰	0.20	0.65	1.81

1.3 样品的采集与测定

本研究于 2012、2015 和 2019 这 3 个年度采集土壤样品, 其中 2012 年和 2015 年土壤样品在作物的休闲季采集 (冬季), 考虑到土壤微生物在作物休闲季活性较低, 在 2019 年玉米季的大喇叭口期采集土壤样品, 用于分析含 *phoD* 基因细菌群落结构。3 个年度的土壤样品均分析土壤理化性质和磷组分。土壤样品采集使用多点随机采样法, 用直径为 5 cm 的土钻在每个小区随机采集 10 个 0~20 cm 的土芯, 混合为一个土壤样品, 2012 和 2015 年采集的土壤样品直接运回

实验室, 2019 年采集的土壤样品采用冰袋运回实验室. 所有土壤样品经去除残存根系和碎石, 过 2 mm 筛并充分混匀, 2012 和 2015 年的土壤样品经室内风干后用于分析土壤理化性质和磷组分, 2019 年混合均匀的土壤样品分为两份, 一份样品在冷冻干燥后储存在 -80°C 进行 *phoD* 基因的分析, 另一份室内风干后测定土壤理化性质及磷组分状况.

土壤 pH 采用 Mettler-toledo 320 pH 计测定, 水土比为 2.5:1; 土壤有机碳 (SOC) 采用硫酸-重铬酸钾容量法测定^[33]; 全氮 (TN) 采用半微量凯氏法-流动注射仪分析法^[33], 用流动注射仪 (AA3, SEAL, DE) 自动上机测定; 全钾 (TK) 采用浓硫酸-高氯酸消煮法, 原子吸收仪 (NOVAA350, Analytik Jena, DE) 测定^[33]; 土壤交换性钙 (Ca-ex) 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵溶液浸提, 电感耦合等离子体-原子发射光谱仪 (ICP-OES-5110, Agilent, USA) 测定^[33]; 全磷 (TP) 采用浓硫酸-高氯酸消煮, 钼锑抗显色法测定^[33]; Olsen-P 采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠溶液浸提, 钼锑抗显色法测定^[33]; $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 采用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙溶液浸提, 鉴于 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量较低, 采用灵敏度更高的孔雀石绿比色法测定^[34]; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 采用 $0.25\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠溶液浸提, 钼锑抗显色法测定^[33]; 土壤 Po 采用差减法测定^[33], 具体方法为: 将 1.00 g 土壤平均分为两份, 其中一份用 550°C 灼烧 1 h, 取出冷却, 一份不灼烧, 两份样品分别用 $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸溶液浸提, 钼锑抗显色法测定, 灼烧后土壤样品与未灼烧的土壤样品测定差值即为有机磷含量.

采用 PowerSoil DNA 试剂盒 (Mobio, Carlsbad, CA, USA) 提取土壤 DNA, 使用超微量分光光度计 (NanoDrop one, Thermo Fisher, USA) 测定所提取土壤 DNA 的质量和浓度. 采用 *phoD*-F733 (5'-TGGGAYGATCAYGARGT-3') 和 *phoD*-R1083 (5'-CTGSGCSAKSACRTTC CA-3') 引物对 *phoD* 基因片段进行扩增^[35], $25\text{ }\mu\text{L}$ 的 PCR 反应体系如下: 正向和反向引物各 $0.8\text{ }\mu\text{L}$, $12.5\text{ }\mu\text{L}$ DNA 聚合酶, $1\text{ }\mu\text{L}$ DNA, 无菌水 $9.9\text{ }\mu\text{L}$. PCR 扩增程序为: 95°C 变性 5 min, 95°C 下 30 s, 58°C 下 30 s, 72°C 下 30 s, 30 个循环, 最后 72°C 延伸 5 min. PCR 产物经过纯化后, 采用 Novogene 公司的 Illumina NovaSeq 6000 测序仪 ($2\times 250\text{ bp}$ 双端测序) 对 PCR 产物进行测序. 测序得到的原始图像数据经 base calling 转化为序列数据, 再对序列数据进行过滤. 分析流程大致如下: ① 过滤掉序列数据中的引物和 bar-code 序列; ② 用 flash 软件将有重叠的序列数据对进行拼接; ③ 使用 QIIME 软件对拼接数据进行过滤, 过滤掉含 N 较多或含低质量碱基较多的序列; ④ 过滤掉拼接

序列中的嵌合体序列; ⑤ 参考 Hu 等^[36] 功能基因高通量测序分析方法, 采用 Usearch 以 75% 的相似度进行 OTU 聚类, 提取每个 OTU 代表序列在 NCBI 数据库中进行比对, 去除比对结果为非 *phoD* 基因序列; ⑥ 合并所有样品序列, 综合所有数据再次进行 OTU 聚类及序列比对. 在计算 *phoD* 基因丰富度之前, 对每个样品进行抽平, 以消除不均匀的序列偏差, 每个样本抽取 14 653 条序列.

1.4 数据的统计与分析

采用 SPSS 19.0 统计软件对土壤理化性质和磷组分数据进行正态性、方差齐性检验, 并通过该软件采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中的 Duncan 检验法分别比较了不同有机物料投入处理和不同年限对土壤理化性质和磷组成影响的差异; 采用 R 语言 (4.0.5) 进行土壤磷组分与各理化因子之间的相关分析、土壤磷组分与有效磷之间的回归分析、不同有机物料投入处理下含 *phoD* 基因细菌群落的非度量多维尺度分析 (NMDS) 和相似性分析 (ANOSIM), 其中相关性分析通过 ggcor 包实现, 回归分析通过 lm 函数实现, NMDS 和 ANOSIM 分析通过 vegan 包实现; 采用 CANOCO5.0 分别以磷组分和含 *phoD* 基因细菌群落为响应变量, 土壤理化因子为解释变量进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 分析各个土壤理化因子对磷组成和含 *phoD* 基因细菌群落影响的大小.

2 结果与分析

2.1 长期不同有机物料投入下土壤养分性质的变化

各处理间土壤基本理化性质在 2012 年无显著差异. 在 2015 年, NPKA 处理的 SOC 含量显著高于 NPK 处理, 但这两个处理均与其他处理无显著差异; NPK 处理的土壤 TN 含量显著低于其他各处理, 且其他各处理差异不显著; 土壤 $\omega(\text{TP})$ 的变化范围为 $0.62\sim 0.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 NPK 处理最高; 土壤 pH、TK 和 Ca-ex 各处理间差异不显著. 在 2019 年, 土壤 pH 在 NPK 处理最低, 显著低于 CK、NPKM、NPKL 和 NPKA 处理, 与 NPKS 无显著差异; 土壤 TN 含量在 CK 处理最低, 各处理的土壤 TN 含量较 CK 均有增加; 土壤 $\omega(\text{TP})$ 的变化范围为 $0.72\sim 0.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各处理的土壤 TP 含量较 CK 处理有不同幅度的增加, NPKL 和 NPKA 处理增幅最大; 各处理 SOC、TK 和 Ca-ex 无显著差异. 整体上, 2012~2019 年各处理间 TP 和 Ca-ex 呈显著增加趋势, 而土壤 SOC、TN 和 TK 均无明显变化 (表 2).

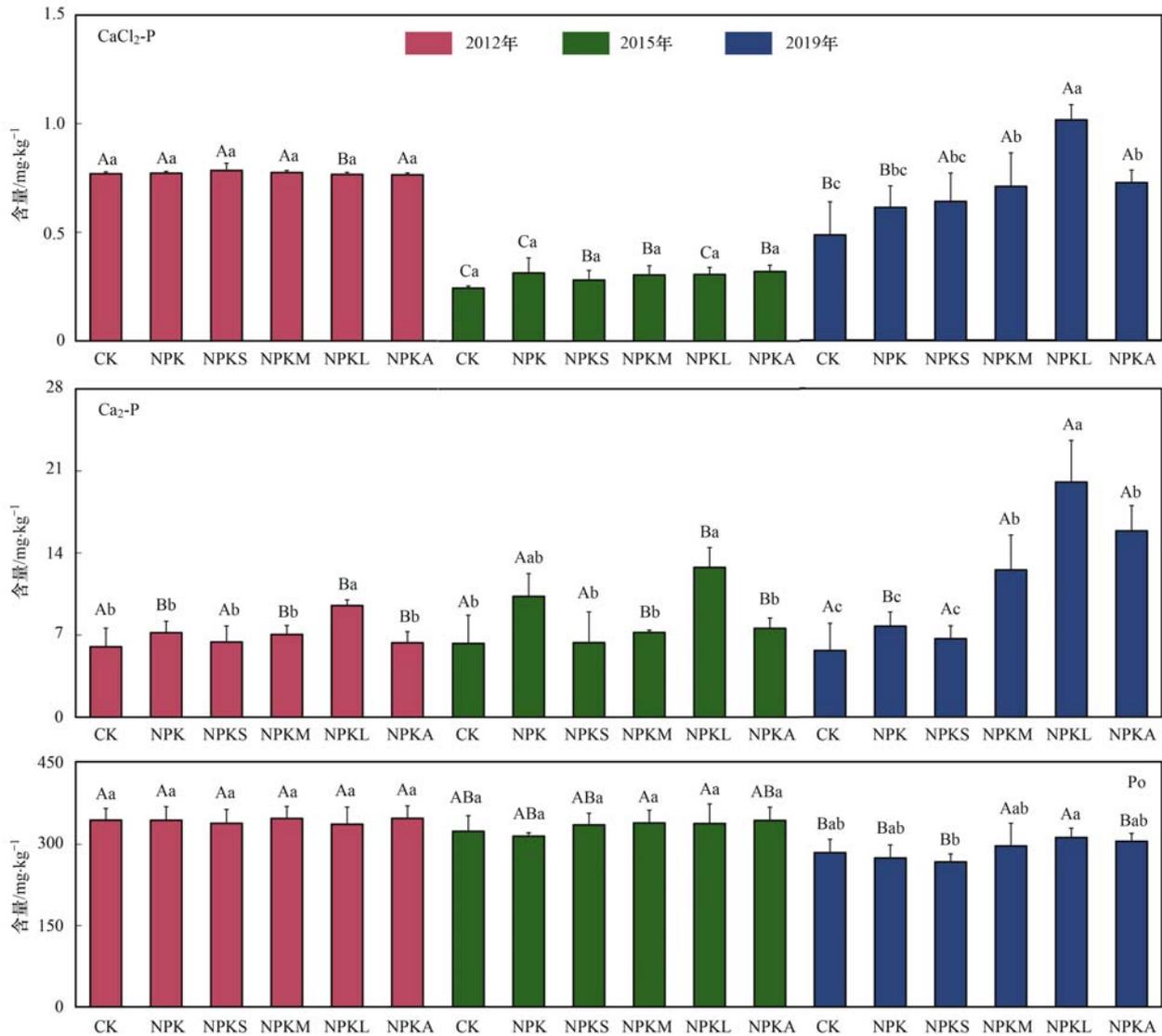
2.2 长期不同有机物料投入下土壤磷赋存形态变化
如图 1, 各处理 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量在 2012 年和 2015

表 2 不同有机物料下土壤养分概况¹⁾

Table 2 Soil nutrients under different organic materials application

年份	处理	pH	ω (有机碳) /g·kg ⁻¹	ω (全氮) /g·kg ⁻¹	ω (全磷) /g·kg ⁻¹	ω (全钾) /g·kg ⁻¹	ω (交换性钙) /g·kg ⁻¹
2012	CK	6.71 ± 0.13 Aa	9.14 ± 0.66 Aa	0.86 ± 0.07 Aa	0.60 ± 0.03 Ba	4.10 ± 0.36 Aa	1.62 ± 0.29 Ba
	NPK	6.76 ± 0.16 Aa	8.58 ± 0.45 Aa	0.80 ± 0.05 Aa	0.60 ± 0.02 Ba	4.12 ± 0.42 Aa	1.58 ± 0.31 Ba
	NPKS	6.69 ± 0.19 Aa	9.00 ± 0.89 Aa	0.86 ± 0.06 Aa	0.59 ± 0.05 Ba	4.02 ± 0.43 Aa	1.63 ± 0.23 Ba
	NPKM	6.77 ± 0.11 Aa	9.19 ± 1.56 Aa	0.8 ± 0.08 Aa	0.64 ± 0.04 Ca	4.04 ± 0.40 Aa	1.66 ± 0.35 Ba
	NPKL	6.82 ± 0.16 Aa	9.44 ± 1.12 Aa	0.86 ± 0.07 Aa	0.62 ± 0.07 Ba	4.32 ± 0.30 Aa	1.71 ± 0.31 Ba
	NPKA	6.78 ± 0.24 Aa	9.04 ± 0.77 Aa	0.8 ± 0.03 Aa	0.60 ± 0.04 Ca	4.09 ± 0.31 Aa	1.63 ± 0.24 Ba
2015	CK	6.81 ± 0.16 Aa	7.71 ± 1.04 Aab	0.82 ± 0.07 Aa	0.62 ± 0.03 Bb	4.11 ± 0.10 Aa	1.50 ± 0.29 Ba
	NPK	6.69 ± 0.19 Aa	7.00 ± 0.34 Bb	0.67 ± 0.12 Ab	0.74 ± 0.10 Aa	4.33 ± 0.31 Aa	1.39 ± 0.10 Ba
	NPKS	6.68 ± 0.20 Aa	7.84 ± 0.52 Aab	0.84 ± 0.08 Aa	0.62 ± 0.04 Bb	4.34 ± 0.28 Aa	1.56 ± 0.52 Ba
	NPKM	6.74 ± 0.16 Aa	8.17 ± 0.94 Aab	0.83 ± 0.11 Aa	0.73 ± 0.08 Ba	4.3 ± 0.28 Aa	1.52 ± 0.31 Ba
	NPKL	6.77 ± 0.07 Aa	7.79 ± 1.03 Aab	0.81 ± 0.07 Aab	0.73 ± 0.07 Ba	4.47 ± 0.23 Aa	1.68 ± 0.23 Ba
	NPKA	6.67 ± 0.12 Aa	8.61 ± 1.19 Aa	0.84 ± 0.12 Aa	0.68 ± 0.06 Bab	4.35 ± 0.2 Aa	1.39 ± 0.23 Ba
2019	CK	6.7 ± 0.05 Aa	8.37 ± 1.07 Aa	0.71 ± 0.05 Bb	0.72 ± 0.00 Ac	3.97 ± 0.52 Aa	2.43 ± 0.31 Aa
	NPK	6.52 ± 0.16 Ab	7.72 ± 0.91 Aa	0.76 ± 0.06 Aab	0.69 ± 0.18 Abc	4.10 ± 0.53 Aa	2.27 ± 0.28 Aa
	NPKS	6.6 ± 0.12 Aab	8.99 ± 1.75 Aa	0.84 ± 0.09 Aab	0.82 ± 0.05 Aabc	4.21 ± 0.64 Aa	2.42 ± 0.36 Aa
	NPKM	6.75 ± 0.03 Aa	9.18 ± 1.89 Aa	0.82 ± 0.12 Aab	0.84 ± 0.03 Aab	4.14 ± 0.47 Aa	2.56 ± 0.22 Aa
	NPKL	6.72 ± 0.06 Aa	8.34 ± 1.34 Aa	0.85 ± 0.08 Aa	0.89 ± 0.07 Aa	4.38 ± 0.27 Aa	2.66 ± 0.42 Aa
	NPKA	6.71 ± 0.16 Aa	9.27 ± 0.46 Aa	0.79 ± 0.07 Aab	0.86 ± 0.03 Aab	4.26 ± 0.29 Aa	2.53 ± 0.23 Aa

1) 不同小写字母表示不同处理之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同年份之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 下同



不同小写字母表示不同处理之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同年份之间的显著性差异 ($P < 0.05$)

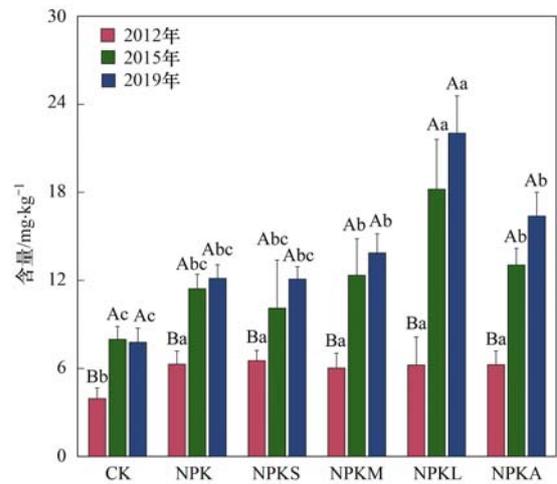
图 1 不同有机物料投入下土壤磷组分含量

Fig. 1 Content of soil phosphorus fractions under different organic material applications

年无显著差异, 2019 年 NPKL 处理的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量显著高于其他处理, NPKM、NPKA 处理 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量显著高于 CK 处理, 整体上, 从 2012 ~ 2019 年, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量呈先递减再递增的趋势. NPKL 处理的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量在 2012 年和 2019 年均显著高于其他处理, 在 2015 年显著高于 CK、NPKS、NPKM 和 NPKA 处理, 且从 2012 ~ 2019 年 NPKL、NPKM 和 NPKA 处理的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量呈现递增趋势, 而 CK 和 NPK 处理变化不显著. 各处理的土壤 Po 含量在 2012 年和 2015 年均无显著差异, 在 2019 年 Po 含量在各处理中呈现差异, 其中 NPKS 处理最低, NPKL 处理最高, 从 2012 ~ 2019 年, CK、NPK、NPKS 和 NPKA 处理的 Po 含量有递减的趋势, 而 NPKM 和 NPKL 无明显变化(图 1). 整体上, 2012 ~ 2019 年各处理 Olsen-P 含量有递增的趋势. 2012 年各施肥处理的 Olsen-P 含量均显著高于 CK 处理; NPKL 处理 Olsen-P 含量在 2015 年和 2019 年均显著高于其他处理, 且 NPKM 和 NPKA 处理的 Olsen-P 含量显著高于 CK 处理(图 2).

2.3 土壤环境因子与磷组分的相关关系

相关分析结果表明(图 3): Olsen-P 与 TP、TK

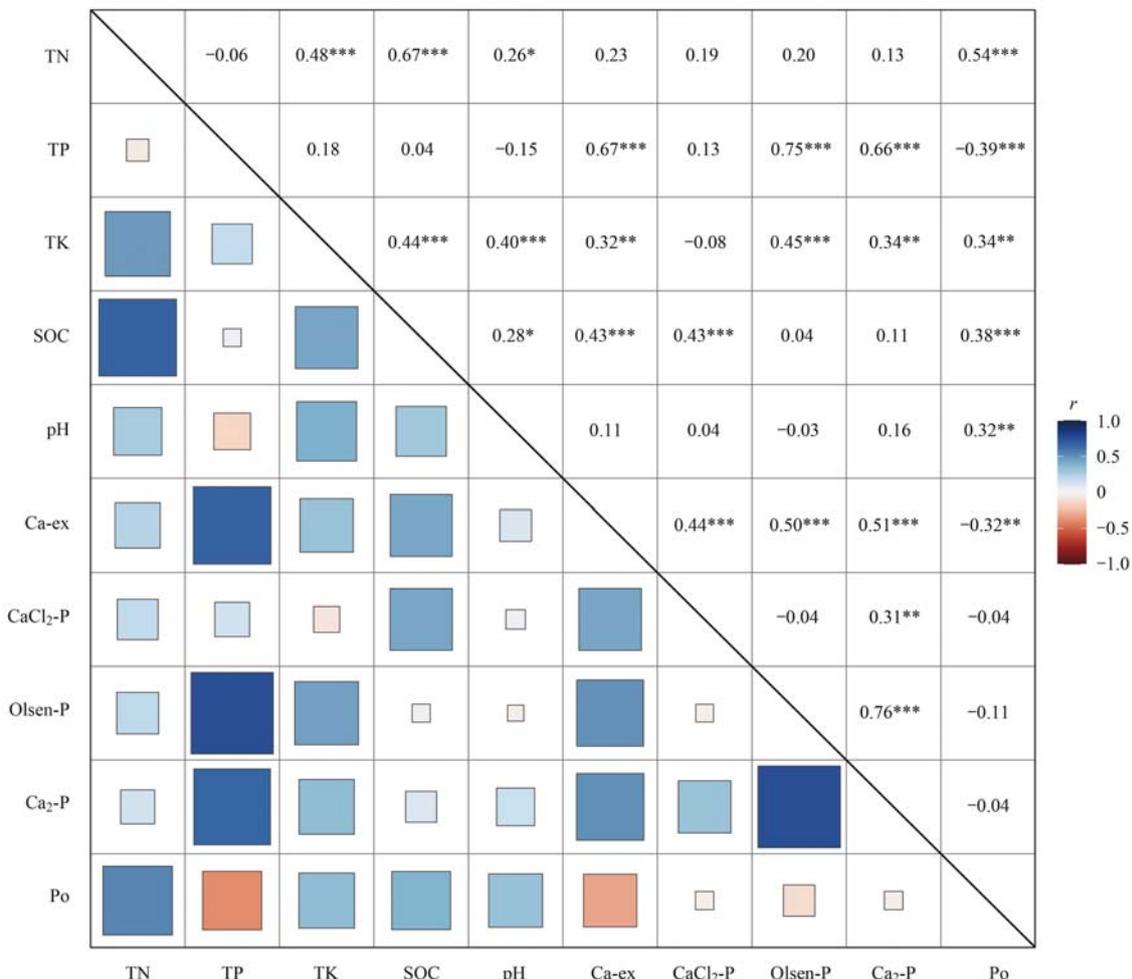


不同小写字母表示不同处理之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同年份之间的显著性差异 ($P < 0.05$)

图 2 不同有机物料投入下土壤有效磷含量

Fig. 2 Soil available phosphorus under different organic material applications

和 Ca-ex 呈显著正相关; $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 SOC 和 Ca-ex 呈显著正相关; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 TP、TK、 Ca-ex 、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 呈显著正相关; 土壤 Po 与 TN、TK、



不同颜色表示相关系数(蓝色和红色分别表示正相关和负相关); *、** 和 *** 分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$

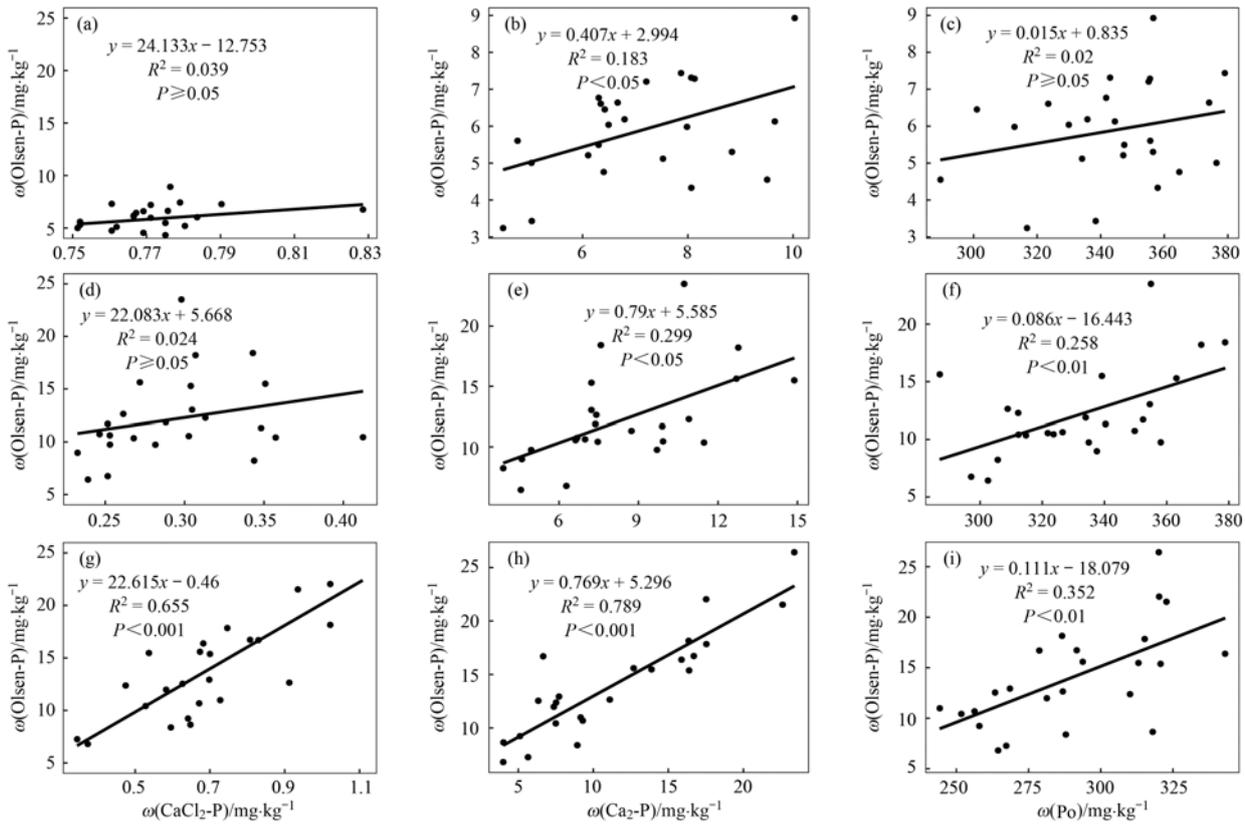
图 3 土壤环境因子与土壤磷组分的相关关系

Fig. 3 Relationships between fractions of the soil phosphorus with environmental factors

SOC 和 pH 呈显著正相关, 与 TP 和 Ca-ex 呈显著负相关, 见图 3.

土壤磷组分与 Olsen-P 回归分析表明(图 4), 2012 ~ 2019 年各磷组分与 Olsen-P 相关性逐年

增强, CaCl₂-P 和 Po 与 Olsen-P 从相关关系不显著到显著正相关, Ca₂-P 与 Olsen-P 的相关性从弱相关关系 ($P < 0.05$) 到强相关关系 ($P < 0.001$). 2019 年, Ca₂-P 与 Olsen-P 的相关性高 ($R^2 = 0.789$, $P <$



(a) ~ (c) 表示 2012 年, (d) ~ (f) 表示 2015 年, (g) ~ (i) 表示 2019 年

图 4 土壤 CaCl₂-P、Ca₂-P 和 Po 组分与 Olsen-P 的回归关系

Fig. 4 Relationships between soil Olsen-P content and the fractions of phosphorus

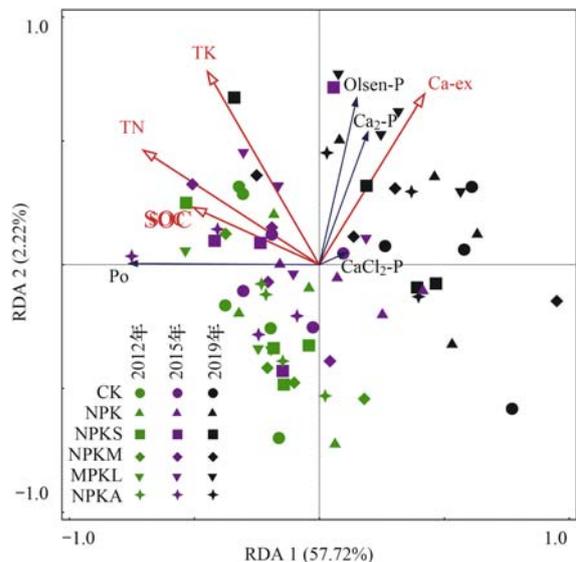
0.001), Po 与 Olsen-P 的相关性较低 ($R^2 = 0.352$, $P < 0.01$).

采用冗余分析探究环境因子对土壤磷组分的影响(图 5). 因子筛选结果表明, TN ($F = 27.3$, $P = 0.002$)、Ca-ex ($F = 27.3$, $P = 0.002$)、SOC ($F = 7.2$, $P = 0.014$) 和 TK ($F = 6.3$, $P = 0.01$) 是影响磷素组分的显著因子. 且 Po 与 TN、SOC 和 TK 呈显著正相关, CaCl₂-P、Ca₂-P 和 Olsen-P 与 Ca-ex 呈显著正相关.

2.4 有机物料投入对含 *phoD* 基因细菌多样性与群落结构的影响

与 CK 相比, 所有处理均有增加含 *phoD* 基因细菌的丰富度的趋势, 但仅 NPKS 处理差异显著, 香农多样性指数在所有处理间差异不显著(图 6).

各处理中蓝细菌门(Cyanobacteria)相对丰度最高(39.3%), 其次为浮霉菌门

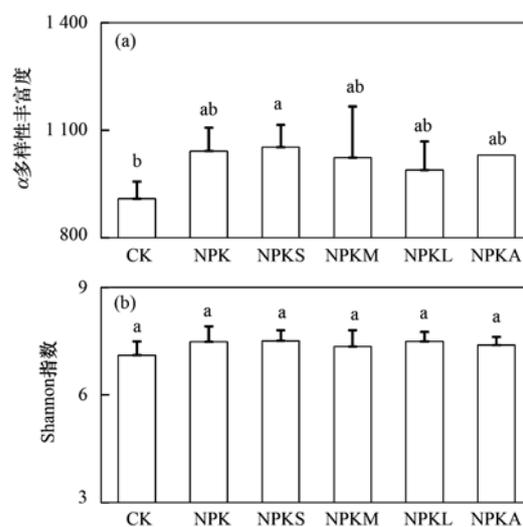


蓝线和红线分别表示为土壤磷组分和土壤环境因子

图 5 环境因子与土壤磷组分的 RDA 分析

Fig. 5 Redundancy analysis revealing the effects of environmental factors on soil phosphorus fractions

(Planctomycetes, 17.2%)、变形菌门(Proteobacteria, 6.6%)、厚壁菌门(Firmicutes, 4.9%)、放线菌门(Actinobacteria, 0.7%) (图7). 相对丰度排序前6的物种丰度在各处理间均无显著差异(图8). RDA分析结果表明, Ca-ex ($F = 7.8$, $P = 0.002$)、TK ($F = 4.1$, $P = 0.002$)、Olsen-P ($F = 3.5$, $P = 0.008$)、pH ($F = 2.6$, $P = 0.032$) 和 SOC ($F = 2.7$, $P = 0.036$) 是影响含 *phoD* 基因细菌群落结构的关键因子, 所有预测因子共解释群落结构变异的 57.15% [图9(a)]. 基于 Bray-Curtis 距离的非度量多维尺度排序结果表明, 未施肥对照处理与所有有机物料投入处理的含 *phoD* 基因细菌群落结构存在分离趋势, 但相异性统计结果表明, 各处理含 *phoD* 基因细菌群落结构差异不显著 [$P > 0.05$, 图9(b)].



不同小写字母表示不同处理之间的显著性差异 ($P < 0.05$)

图6 含 *phoD* 基因的细菌 α 多样性丰富度和香农多样性指数

Fig. 6 The α diversity of *phoD*-harboring bacterial richness and Shannon index

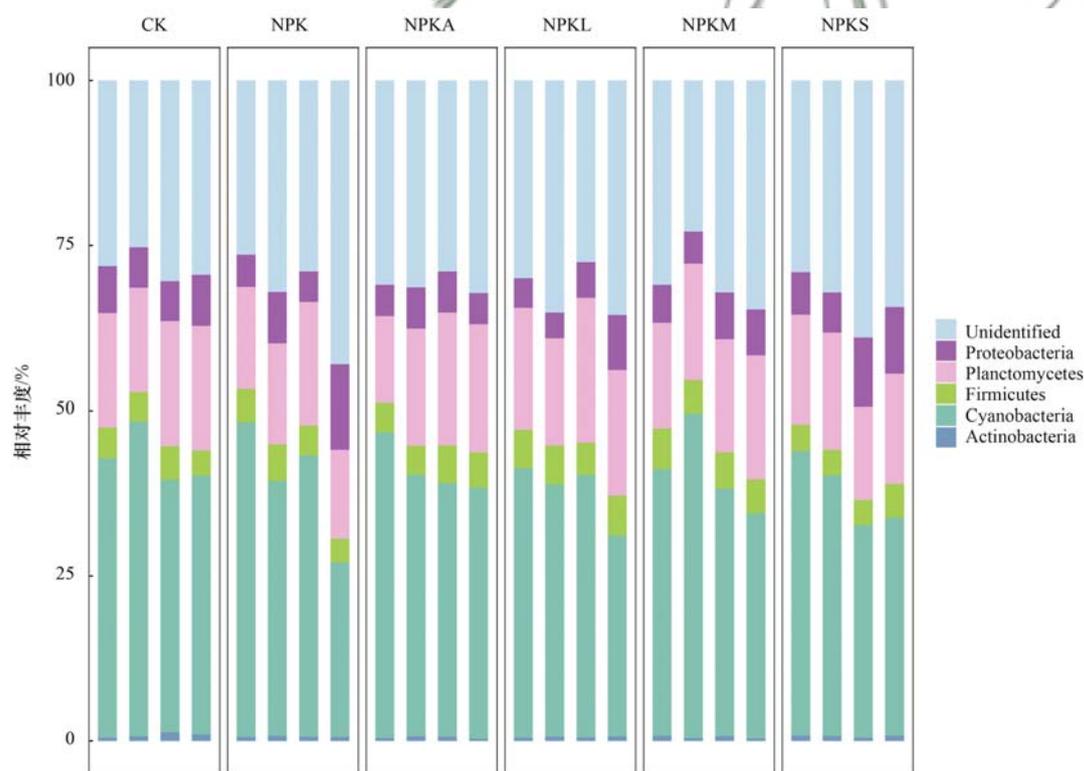


图7 门分类水平上含 *phoD* 基因细菌群落比较

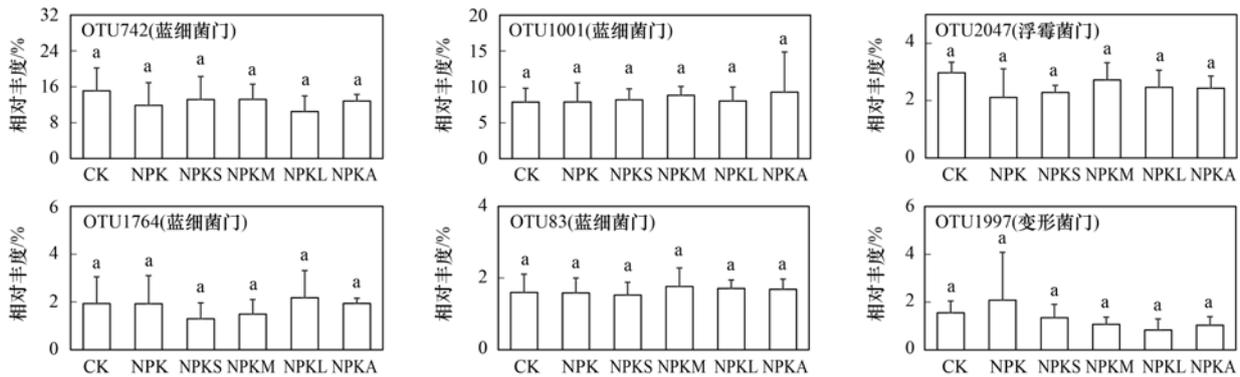
Fig. 7 Comparison of soil *phoD*-harboring bacterial groups at phylum level

3 讨论

3.1 土壤磷含量及其组分对有机物料投入的响应

8 a 田间试验结果表明, 各有机物料处理下土壤有效磷在前 4 a 增幅较快, 后 4 a 增幅变缓, 该结果表明持续有机物料投入提高土壤有效磷供给可能是非线性的. 本试验前期有机物料投入对有效磷供给

影响较大, 其原因可能是有机物料矿化分解过程的中间产物如有机酸等, 对土壤钙离子具有络合作用, 产生对磷素的竞争吸附, 从而提高磷素的有效性. 在试验后期, 有机物料矿化的中间产物对钙离子的络合趋于饱和, 导致中间产物的竞争吸附能力下降, 从而使有机物料促进磷活化的能效降低. 总体上, 土壤 Ca-ex 含量与 Olsen-P 和磷组分均呈极显著正相关



不同小写字母表示不同处理之间的显著性差异 ($P < 0.05$)

图 8 相对丰度排序前 6 的 OTU

Fig. 8 OTU with relative abundance in the top six

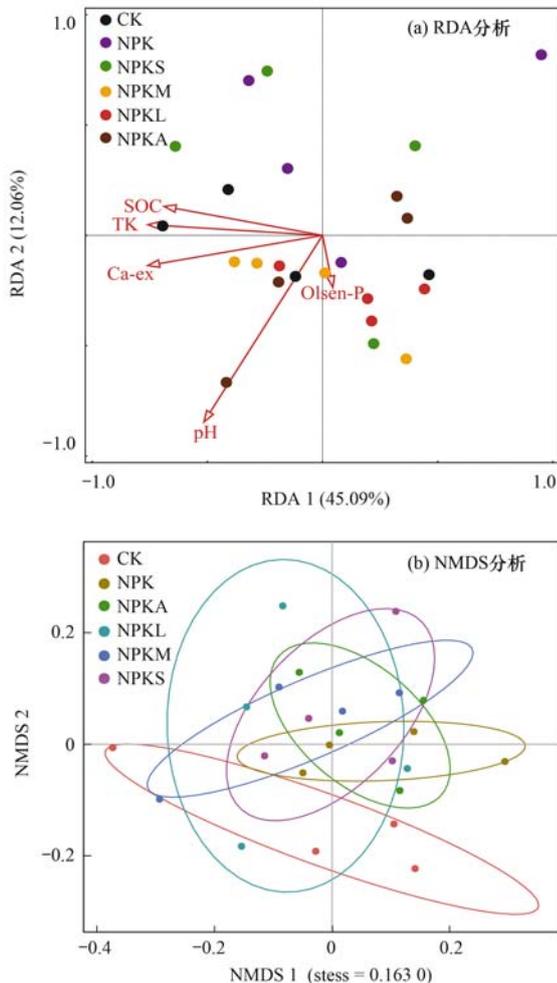


图 9 含 *phoD* 基因细菌群落结构与环境因子变化的 RDA 分析和含 *phoD* 基因细菌群落结构排序

Fig. 9 RDA analysis between *phoD*-harboring bacterial community and environmental factors and the diagram of *phoD*-harboring bacterial community structure based on Bray-Curtis dissimilarity

($P < 0.001$), 这一结果与 Tunesi 等^[37]的研究结果一致, 表明提高土壤 Ca-ex 含量能够促进磷素有效性。

滤泥、农家肥和甘蔗灰投入能够持续增加

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量, 而 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤中有有效磷和植物磷吸收的主要来源^[38], 说明相较于玉米秸秆, 这 3 种有机物料活化磷素的能力更强. 3 种有机物料对磷素的活化机制可能存在共性机制, 也存在差异机制. 有机物料投入引起的磷素竞争吸附机制是主要的共性机制, 而不同有机物料的特点也会导致磷素活化的差异, 比如: 农家肥的投入引入了较多的外源微生物, 这些微生物中可能存在多种解磷菌^[39]. 甘蔗灰质地细小、疏松多孔, 比表面积大, 稳定性高, 其竞争吸附能力可能高于农家肥和滤泥^[40]. 滤泥中含较多的活性碳源, 能够为微生物提供碳源底物, 从而促进微生物磷素活化. 各处理 Po 含量超过 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但有效磷和 Po 的回归系数 (0.352) 远小于和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的回归系数 (0.789), 表明有效磷主要来源于土壤无机磷组分, 而不是有机磷组分. 值得注意的是, 未施肥对照的 Po 含量并未低于各施肥处理, 理论上, 在不施肥处理中, 微生物为满足自身磷的需求, 有机磷的矿化速率会加快, 导致 Po 含量的降低. 造成这一结果可能原因是不施肥土壤中, 有效磷的含量高于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 已经能够满足微生物的基本需求. 有趣的是, 本研究发现各有机物料处理下的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 在 8 a 内先降低后增加, 而 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 是作为磷素流失风险评估的指标之一, 这说明长期施加有机物料对降低磷素流失风险可能具有时效性, 在有机物料投入前期增加的速度磷能够被植物和微生物利用, 使得磷素流失风险降低, 而后期持续增加的速度磷造成盈余磷增加, 可能加剧磷素流失风险。

3.2 含 *phoD* 基因细菌群落对有机物料响应

本研究中有有机物料投入与不施肥和无机肥处理的含 *phoD* 基因细菌群落呈现分离, 但差异不显著, 这与另一个喀斯特长期有机无机肥配施定位试验结果不一致^[36]. 这可能存在多方面的原因, 一是本研究采用的引物与前述研究不一致, 本研究采用的引

物扩增范围更宽,可能导致群落差异不显著;二是本研究处理时间不够长;三是本研究采集土壤样品是处于雨季,土壤含水量高,某一类的微生物快速生长可能干扰试验处理对微生物群落的影响,本研究中也的确观察到适应水生环境的含 *phoD* 基因蓝细菌大量存在. 本研究中,相对丰度前 6 的 OTU 在各处理之间差异性不显著,与丰度较高的含 *phoD* 细菌相比,稀有的含 *phoD* 细菌可能对有机磷矿化影响较大,已有研究也证实了这一观点^[41].

与已有研究的结果一致,本研究亦发现有机碳是驱动含 *phoD* 基因细菌群落结构的主要因子,这说明了碳源底物对微生物有机磷矿化的重要性. 有研究表明碱性磷酸酶基因丰度与碳矿化相关的酶活性和基因丰度显著正相关^[42],并认为微生物对有机磷的矿化是有机碳源矿化的副产物^[43]. 另外,交换性钙也被认为是影响含 *phoD* 基因细菌群落结构的关键因子. 有研究表明,钙离子是碱性磷酸酶的重要辅酶因子,可能对特定微生物碱性磷酸酶的分泌具有促进作用,从而导致含 *phoD* 基因细菌群落产生分异^[44]. 土壤 TK 也能显著影响含 *phoD* 基因细菌群落,这与 Wang 等^[45]的研究结果一致,但土壤 TK 对含 *phoD* 基因细菌群落影响的机制尚不明确.

4 结论

(1)不同有机物料投入均能够提高土壤磷素有效性,与玉米秸秆、农家肥和甘蔗灰相比,滤泥对磷有效性的提升效果最佳. 土壤有效磷主要来源于无机 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 组分,而非有机磷组分.

(2)在喀斯特地区的土壤中,土壤磷素有效性与交换性钙含量密切相关,提高喀斯特土壤交换性钙含量能促进土壤磷素有效性. 滤泥、农家肥和甘蔗灰的投入下,交换性钙的含量相对较高.

(3)相对丰度高的含 *phoD* 基因细菌在各处理间并未表现显著差异,不同有机物料投入对含 *phoD* 基因细菌群落影响差异亦不显著,但众多的土壤因子影响了含 *phoD* 基因细菌群落结构.

参考文献:

[1] 孙克君, 赵冰, 卢其明, 等. 活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(8): 1722-1729.
Sun K J, Zhao B, Lu Q M, et al. Study on release characteristics, fertilizer effect and activated mechanism of activated phosphoric fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, **40**(8): 1722-1729.

[2] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, **22**(2): 101-102, 110.

[3] 尹金来, 沈其荣, 周春霖, 等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤有机磷组分及有效性的影响[J]. 土壤学报, 2001, **38**(3): 295-300.

Yin J L, Shen Q R, Zhou C L, et al. Effects of pig slurry and phosphatic fertilizer on organic-p fractions and their availabilities [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, **38**(3): 295-300.

[4] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, **23**(12): 2689-2701.
Lv J L. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, **23**(12): 2689-2701.

[5] Dai Z M, Liu G F, Chen H H, et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. The ISME Journal, 2020, **14**(3): 757-770.

[6] Fraser T D, Lynch D H, Gaiero J, et al. Quantification of bacterial non-specific acid (*phoC*) and alkaline (*phoD*) phosphatase genes in bulk and rhizosphere soil from organically managed soybean fields[J]. Applied Soil Ecology, 2017, **111**: 48-56.

[7] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3985-3996.
Jin Y T, Li X F, Cai Y, et al. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3985-3996.

[8] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 422-432.
Feng H L, Xu C S, He H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 422-432.

[9] 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.

[10] Xie Y Y, Wang F H, Wang K, et al. Responses of bacterial *phoD* gene abundance and diversity to crop rotation and feedbacks to phosphorus uptake in wheat[J]. Applied Soil Ecology, 2020, **154**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103604.

[11] Liu W B, Ling N, Luo G W, et al. Active *phoD*-harboring bacteria are enriched by long-term organic fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, **152**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.108071.

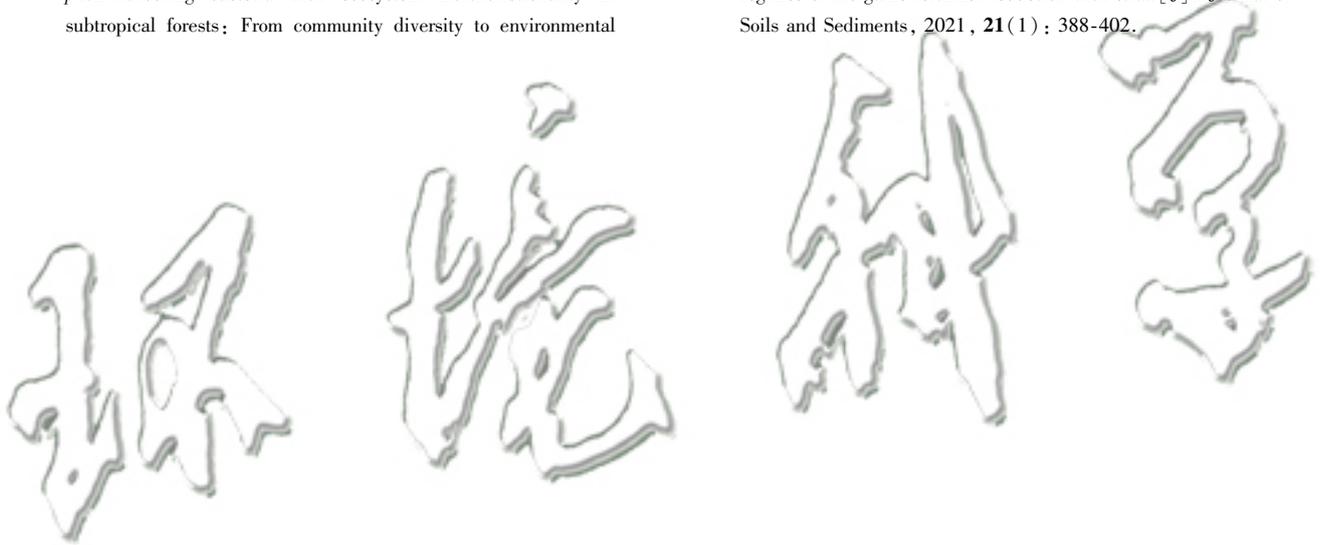
[12] 杨文娜, 余砾, 罗东海, 等. 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 1040-1049.
Yang W N, Yu L, Luo D H, et al. Responses of soil *phoC* and *phoD* gene microbial communities to the combined application of biochar with chemical fertilizers and organic fertilizers [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 1040-1049.

[13] 向书江, 余砾, 熊子怡, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 6067-6077.
Xiang S J, Yu L, Xiong Z Y, et al. Effects of combined application of biochar with chemical fertilizers and organic fertilizers on nutrients and phosphorus forms in purple soils[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 6067-6077.

[14] 马星竹, 周宝库, 郝小雨, 等. 小麦-大豆-玉米轮作体系长期不同施肥黑土磷素平衡及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(6): 1672-1678.
Ma X Z, Zhou B K, Hao X Y, et al. Phosphorus balance and

- availability in black soil under long-term wheat-soybean-maize rotation and fertilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(6): 1672-1678.
- [15] 陈利军, 蒋璐璐, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. *土壤*, 2020, **52**(3): 451-457.
Chen L J, Jiang Y J, Wang H T, *et al.* Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J]. *Soils*, 2020, **52**(3): 451-457.
- [16] Ma Q X, Wen Y, Ma J Z, *et al.* Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: A combined metagenomic and $^{33}\text{P}/^{14}\text{C}$ labelling study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107959.
- [17] 杨茜, 石艳, 江韬, 等. 有机酸对三峡库区消落带土壤无机磷形态转化和有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(4): 272-277.
Yang X, Shi Y, Jiang T, *et al.* Effects of organic acids on form transformation and availability of soil inorganic phosphorus in the water-fluctuation zone of Three Gorge Reservoir Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(4): 272-277.
- [18] Garg S, Bahl G S. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13): 5773-5777.
- [19] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **61**: 69-75.
- [20] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, **26**(6): 1034-1038.
Lin C, Wang F, Lin X J, *et al.* The effect of phosphorus adsorption and desorption of long-term fertilization on South yellow clayey soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, **26**(6): 1034-1038.
- [21] Chen X D, Jiang N, Condon L M, *et al.* Soil alkaline phosphatase activity and bacterial *phoD* gene abundance and diversity under long-term nitrogen and manure inputs [J]. *Geoderma*, 2019, **349**: 36-44.
- [22] Sun Q, Qiu H S, Hu Y J, *et al.* Cellulose and lignin regulate partitioning of soil phosphorus fractions and alkaline phosphomonoesterase encoding bacterial community in phosphorus-deficient soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(1): 31-42.
- [23] Chen X D, Jiang N, Condon L M, *et al.* Impact of long-term phosphorus fertilizer inputs on bacterial *phoD* gene community in a maize field, Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **669**: 1011-1018.
- [24] Fraser T D, Lynch D H, Bent E, *et al.* Soil bacterial *phoD* gene abundance and expression in response to applied phosphorus and long-term management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 137-147.
- [25] 蔡晓布, 张永青, 邵伟. 不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征[J]. *生态学报*, 2008, **28**(3): 1034-1044.
Cai X B, Zhang Y Q, Shao W. Characteristics of soil fertility in alpine steppes at different degradation grades[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(3): 1034-1044.
- [26] 黄晶, 高菊生, 张杨珠, 等. 长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(7): 1889-1894.
Huang J, Gao J S, Zhang Y Z, *et al.* Change characteristics of rice yield and soil organic matter and nitrogen contents under various long-term fertilization regimes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(7): 1889-1894.
- [27] 柳开楼. 长期施肥下 pH 和有机碳影响红壤团聚体钾素分配的机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
Liu K L. Mechanism of pH and organic carbon levels influencing aggregate-associated potassium distribution in red soil under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [28] 侯建勋, 张水梅, 袁静超, 等. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性与酶活性的提升效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(4): 610-618.
Hou J X, Zhang S M, Yuan J C, *et al.* Effects of maize straw-derived organic materials on improving soil nutrient availability and enzyme activities in a Mollisol[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(4): 610-618.
- [29] 王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(4): 825-834.
Wang D C, Wu J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under mono-cropping of soybean [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(4): 825-834.
- [30] 季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代 20% 化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(3): 491-499.
Ji J P, Zhao X Y, Wu J G, *et al.* Replacing 20% of chemical nitrogen with manures to increase soil nutrient availability and maize yield in a chernozem soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(3): 491-499.
- [31] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(16): 178-185.
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(16): 178-185.
- [32] 南镇武, 梁斌, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对冬小麦籽粒品质的影响[J]. *华北农学报*, 2015, **30**(4): 162-167.
Nan Z W, Liang B, Liu S T, *et al.* Effect of long-term fertilization on grain quality of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, **30**(4): 162-167.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] Deluca T H, Glanville H C, Harris M, *et al.* A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 110-119.
- [35] Ragot S A, Kertesz M A, Bünemann E. *phoD* alkaline phosphatase gene diversity in soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(20): 7281-7289.
- [36] Hu Y J, Xia Y H, Sun Q, *et al.* Effects of long-term fertilization on *phoD*-harboring bacterial community in Karst soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 53-63.
- [37] Tunesi S, Poggi V, Gessa C. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: the role of calcium ions in solution and carbonate minerals [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **53**(3): 219-227.
- [38] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(8): 1459-1472.
Jiao Y P, Qi P, Wang X J, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical

- farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(8): 1459-1472.
- [39] 郭莹, 王一明, 巫攀, 等. 长期施用粪肥对水稻土中微生物群落功能多样性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, **25**(3): 593-602.
- Guo Y, Wang Y M, Wu P, *et al.* Influence of long-term manure application in paddy soil on the functional diversity of microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, **25**(3): 593-602.
- [40] 李丹琼, 周来, 张谷春, 等. 生物质灰理化特性及其应用于土壤改良的研究进展[J]. *能源环境保护*, 2020, **34**(1): 1-7.
- Li D Q, Zhou L, Zhang G C, *et al.* Review on the physicochemical properties of biomass ash and its application in soil amelioration and remediation [J]. *Energy Environmental Protection*, 2020, **34**(1): 1-7.
- [41] Wan W J, He D L, Li X, *et al.* Linking rare and abundant *phoD*-harboring bacteria with ecosystem multifunctionality in subtropical forests: From community diversity to environmental adaptation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148943.
- [42] 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.
- [43] Ragot S A, Kertesz M A, Mészáros é, *et al.* Soil *phoD* and *phoX* alkaline phosphatase gene diversity responds to multiple environmental factors [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(1), doi: 10.1093/femsec/fiw212.
- [44] Kageyama H, Tripathi K, Rai A K, *et al.* An alkaline phosphatase/phosphodiesterase, *phoD*, induced by salt stress and secreted out of the cells of *Aphanothece halophytica*, a halotolerant cyanobacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(15): 5178-5183.
- [45] Wang Y Y, Huang R, Xu G X, *et al.* Soil alkaline phosphatase activity and bacterial *phoD* gene abundance and diversity under regimes of inorganic fertilizer reduction with straw[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, **21**(1): 388-402.



CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)