

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>空间分布特征 .....姚青,丁净,杨旭,蔡子颖,韩素芹 (2487)

基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析 .....周红,王鸣,柴文轩,赵昕 (2497)

基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测 .....杨晓彤,康平,王安怡,臧增亮,刘浪 (2507)

海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估 .....符传博,林建兴,唐家翔,丹利 (2516)

京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估 .....高冉,李琴,车飞,张艳平,祖永刚,刘芬 (2525)

2022年北京市城区PM<sub>2.5</sub>水溶性离子含量及其变化特征 .....陈圆圆,崔迪,赵泽熙,常森,景宽,沈秀娥,刘保献 (2537)

郑州市冬春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征、来源及健康风险评估 .....陶杰,闫慧姣,徐艺斐,荆海涛 (2548)

淄博市供暖前后PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险 .....孙港立,吴丽萍,徐勃,高玉宗,赵雪艳,姬亚芹,杨文 (2558)

西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析 .....李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元 (2571)

天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析 .....卢苗苗,韩素芹,刘可欣,唐晓,孔磊,丁净,樊文雁,王自发 (2581)

基于空间尺度效应的山东省PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化及空间分异地理探测 .....徐勇,韦梦新,邹滨,郭振东,李沈鑫 (2596)

我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势 .....武婷,崔焱文,肖成德,翟增秀,韩萌 (2613)

廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析 .....张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮 (2622)

景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析 .....王玉仓,杜晶晶,张禹,吴昊,胡敏韵,陈丁江 (2631)

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源 .....孟佳靖,婁红,陈哲,周石磊,底怡玲,武辰彬,王晨光,张家丰,崔建升 (2640)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析 .....胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹 (2651)

庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价 .....刘海,魏伟,宋阳,徐洁,管政亭,黄健敏,赵国红 (2665)

农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价 .....王蔚青,徐雄,刘权震,林利华,吕婧,王东红 (2678)

黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征 .....韦程宸,魏枫沂,夏慧,黄魁 (2686)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析 .....金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥 (2694)

再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征 .....贺赞,李雪梅,李宏权,魏琳琳,姜春晖,姜大伟,李魁晚 (2707)

水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响 .....梅渝,黄平,王鹏,朱凯 (2715)

银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系 .....蒙俊杰,刘双羽,邱小琼,周瑞娟 (2727)

热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析 .....张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然 (2741)

市政污水中吗啡来源辨析 .....耶雪婷,赵悦彤,蒋冰,裴伟,李彦莹,谭冬芹,王德高 (2748)

溱沔河流域生态环境动态遥感评价 .....李艳翠,袁金国,刘博涵,郭豪 (2757)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素 .....王奕洪,洪学莹 (2767)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例 .....蔡进,危小建,江平,梁玉琦 (2780)

贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因 .....李月,冯霞,吴路华,罗光杰,罗红芬 (2793)

2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子 .....周怡婷,严俊霞,刘菊,王璞 (2806)

基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量 .....崔霞,董燕,张露尹,王荣耀 (2817)

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响 .....武爱彬,陈辅国,赵艳霞,秦彦杰,刘欣,郭小平 (2828)

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响 .....江可,贾亚男,杨琰,陈坚淇,禹朴家 (2840)

不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析 .....黄世威,赵一锴,朱馨雨,刘贺雷,刘姣姣,陈稍,陈佳永,张阿凤 (2848)

基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测 .....胡志瑞,赵万伏,宋根先,王芳,林妍敏 (2859)

不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响 .....孙凯,崔玉涛,李顺晋,魏冰丽,王媛,杨宏博,王孝忠,张伟 (2871)

集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性 .....周连昊,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰 (2881)

控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响 .....高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵 (2891)

生物炭对黄绵土中NO<sub>3</sub>-N运移过程影响及模拟 .....白一茹,刘旭,张钰涵,张睿媛,马艳,王幼奇 (2905)

中国农田土壤重金属污染分析与评价 .....杨雳,白宗旭,薄文浩,林静,杨佩佳,陈涛 (2913)

城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望 .....王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,王碧莲,林锦阔,颜梦霞,毕世杰 (2926)

场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展 .....陈玥如,高文艳,陈虹任,薛生国,吴川 (2939)

黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析 .....戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霖红,张培培,樊洪明 (2952)

拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价 .....韩双宝,袁磊,张秋霞,郑焰,李甫成 (2962)

银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析 .....于路加,马海军,王翠平 (2971)

基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估 .....陈莲,邹子航,张培珍,王雨茜,王振江,林森,唐翠明,罗国庆,钟建武,李智毅,王圆 (2983)

西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型 .....唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧 (2995)

贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划 .....韦美溜,周浪,黄燕玲,庞瑞,王佛鹏,宋波 (3005)

柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应 .....刘梦宇,罗绪锋,辜娇峰,易轩韬,周航,曾鹏,廖柏寒 (3016)

改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响 .....肖乃川,王子芳,杨文娜,谢永红,代文才,高明 (3027)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响 .....郑晨格,裴欢欢,张亚珊,李嘉欣,刘奋武,乔星星,秦俊梅 (3037)

基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应 .....姜继韶,侯睿,崔慧林,闫广轩,刘栋 (3047)

微塑料对土壤N<sub>2</sub>O排放及氮素转化的影响研究进展 .....刘一戈,杨安琪,陈舒欣,牛奕奕,卢瑛,李博 (3059)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响 .....戴柳云,侯磊,王化,符立松,王艳霞,李晓琳,王万宾,梁启斌 (3069)

养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征 .....宋可心,贺金成,李昌文,解思琦,刘宝瑛,黄伟,冯志华 (3078)

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响 .....王志超,李哲,李嘉辰,屈忠义,胡文煊,李卫平 (3088)

鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测 .....俞锦丽,赵俊凯,罗思琦,景文慧,杨启武,刘淑丽 (3098)

粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径 .....徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡 (3107)

电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析 .....徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪 (3119)

# 不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响

孙凯<sup>1,2,3,4</sup>, 崔玉涛<sup>1,2,3</sup>, 李顺晋<sup>1,2,3</sup>, 魏冰丽<sup>1,3</sup>, 王媛<sup>1,3</sup>, 杨宏博<sup>1,2</sup>, 王孝忠<sup>1,2,4</sup>, 张伟<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715; 3. 西南大学农业科学研究院, 重庆 400715; 4. 农业农村部西南山地农业绿色低碳重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 当前以土壤有机质提升为核心的耕地质量提升是保证粮食安全的基础, 但在有机质提升过程中土壤磷素的累积和转化特征仍不清楚. 在等碳施用条件下, 研究对比不同有机物料投入对菜地不同土层土壤磷的累积、转化和迁移规律, 以期同步实现有机质提高和磷肥高效管理. 试验设置对照(不施肥)、农户传统施肥、生物炭、鸡粪、餐厨废弃物和玉米秸秆施用这 6 个处理, 于辣椒收获期测定各处理下不同土层有效磷(Olsen-P)和水溶性磷(CaCl<sub>2</sub>-P)含量、土壤磷组分、有机质(SOM)和 pH 等指标. 在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层中, 农户传统施肥处理有效磷含量最高, 4 种有机物料处理下有效磷顺序依次为: 秸秆>生物炭>鸡粪>餐厨废弃物, 秸秆和生物炭处理较餐厨废弃物分别增加 59.6%~67.3% 和 29.1%~36.9%. 秸秆处理最易于提升土壤活性磷库, 0~5 cm 土层土壤活性磷较鸡粪和餐厨废弃物处理分别增加 47.3% 和 35.1%. 随着土层深度增加鸡粪处理的有效磷降低比例最少, 20~30 cm 土层有效磷占表土层的 55.9%, 而在其他 3 种物料处理下仅占 16.0%~34.0%. 和农户传统施肥相比, 有机物料施用后 pH 显著升高 0.18~0.36 个单位, 鸡粪和餐厨废弃物处理的 pH 显著高于生物炭和秸秆( $P < 0.05$ ). 生物炭处理下 SOM 含量相比其他 3 种有机物料显著增加 7.7%~17.6%. 4 种有机物料中, 秸秆提高土壤活性磷库的效果最佳, 有利于快速提升植物可利用磷; 鸡粪处理下磷素最易向下迁移; 在基于土壤地力提升的农田管理下, 施用生物炭既有利于改善土壤酸碱度和提高 SOM, 也可避免磷素在耕层过量积累, 降低环境风险.

**关键词:** 有机物料; 磷组分; 有效磷(Olsen-P); pH; 累积; 转化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2871-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306092

## Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields

SUN Kai<sup>1,2,3,4</sup>, CUI Yu-tao<sup>1,2,3</sup>, LI Shun-jin<sup>1,2,3</sup>, WEI Bing-li<sup>1,3</sup>, WANG Yuan<sup>1,3</sup>, YANG Hong-bo<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-zhong<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Key Laboratory of Green and Low-carbon Agriculture in Southwest Mountain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Presently, the improvement of soil organic matter is the basis to ensure food security, but the accumulation and transformation characteristics of soil phosphorus (P) as affected by organic matter remain unclear. The accumulation, transformation, and migration characteristics of soil P in different soil layers of vegetable fields were researched under the application of organic materials. Six treatments were set up in the experiment: control (no fertilization), traditional fertilizer application by farmers, biochar, chicken manure, food waste, and straw application. Available phosphorus (Olsen-P), water-soluble phosphorus (CaCl<sub>2</sub>-P) content, soil phosphorus forms, soil organic matter (SOM), and pH were determined during the pepper harvest period. In the 0-5 cm and 5-10 cm soil layers, the available phosphorus content of traditional fertilization of farmers was higher, and the available phosphorus content of the four organic materials was in the order of straw > biochar > chicken manure > food waste. Compared to that with food waste, the straw and biochar treatments increased soil available phosphorus by 59.6%-67.3% and 29.1%-36.9%, respectively. The straw treatment could easily enhance the soil labile P pool, and soil labile P in the 0-5 cm soil layer increased by 47.3% and 35.1% compared with that under the chicken manure and food waste treatments, respectively. With the increase in soil depth, the proportion of available phosphorus in the chicken manure treatment decreased the least, and available phosphorus of the 20-30 cm soil layer accounted for 55.9% of the topsoil layer but only accounted for 16.0%-34.0% under treatment with the other three materials. Compared with that under the traditional fertilization of farmers, the pH significantly increased by 0.18-0.36 units after the application of organic fertilizer, and the pH of the chicken manure and food waste treatments was significantly higher than that of biochar and straw ( $P < 0.05$ ). SOM content under the biochar treatment significantly increased by 7.7%-17.6% compared to that under the other three organic materials. Among the four organic materials, the straw treatment boosted the labile P pool the most, which was conducive to the rapid increase in plant-available P. Phosphorus was most likely to migrate downward under the chicken manure treatment. In the field management based on soil fertility enhancement, the application of biochar could not only improve soil pH and SOM but also avoid excessive accumulation of phosphorus in the surface layer, which decreases environmental risks.

**Key words:** organic material; phosphorus composition; available phosphorus (Olsen-P); pH; accumulation; transformation

磷是蔬菜生产中重要营养元素之一, 在促根、平衡营养生长和生殖生长方面起着重要作用. 但由于磷素极易被吸附固定, 化学磷肥在施入土壤后很快转化为植物难以利用的形态<sup>[1]</sup>. 而农户在蔬菜生产中长期大量投入磷肥, 导致土壤磷素盈余严重, 土壤质量下降, 磷肥利用率低, 蔬菜品质受到

威胁<sup>[2-5]</sup>.

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901501); 国家自然科学基金项目(32002139)

作者简介: 孙凯(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为养分资源综合管理, E-mail: kaisun1999@163.com

\* 通信作者, E-mail: zw0730@swu.edu.cn

近40余年,在我国农业面源污染分布中,化肥逐渐成为总磷污染的主要来源<sup>[6,7]</sup>。另一方面,随着畜牧业生产发展和人类生活水平提高,产生了大量有机废弃物,这些废弃物逐渐作为养分资源投入到农田中<sup>[8,9]</sup>。有机肥替代化肥成为一种趋势,一定程度上改善了土壤板结和酸化问题,并且合理的有机物料可以兼顾作物产量和环境效益<sup>[10]</sup>。但是由于不同有机物料中的C/N/P化学计量比差异较大,且与作物需求不完全匹配,前人在进行大量的有机肥替代氮肥研究后发现,在满足作物氮素需求条件下,土壤磷素大量盈余,增加了径流风险,加速水体富营养化<sup>[11]</sup>。

当前有机质提升是培肥地力、维持健康土壤的基础。2021年国务院出台的《2030年前碳达峰行动方案》指出,加强生态文明建设,推进农业农村固碳减排工作<sup>[12]</sup>。因此在农田管理中保证土壤碳平衡,提高土壤有机质是高产优质高效型农业的前提,也是当前农业发展的必然趋势<sup>[13]</sup>。有研究表明,农田施用有机物料有助于提升土壤肥力。连续5a配施粪肥增加了土壤有机碳含量,并驱动土壤微生物群落结构变化和微生物量增加<sup>[14]</sup>;秸秆还田可以有效补充土壤活性碳库,一方面会影响有机碳结构,促进稳定性碳组分向活性组分的转化,另一方面通过激发有机质分解维持土壤碳库的动态平衡<sup>[15,16]</sup>。另外,有机肥也可以通过刺激土壤微生物活性,加速土壤磷组分间的转化。李蕴慧等<sup>[17]</sup>认为菌渣和树叶分别增加了土壤中等活性和稳定性有机磷,提升了土壤的供磷潜力,而长期施用生物炭增加了土壤活性磷和中等活性有机磷含量<sup>[18]</sup>,前人已经证明土壤磷库的这种动态变化受到碳组分的调控<sup>[19]</sup>。即使不同类型有机物料都能促进地力提升,但是由于不同有机物料的组成差异较大,可能会导致土壤磷素失衡。在低磷土壤上,低碳磷比有机物料更能有效提升磷有效性<sup>[20]</sup>,而高碳磷比物料通过提高微生物量磷减少磷损失,降低环境风险<sup>[21]</sup>。同时,农田施用有机物料带入大量有机磷,需经过矿化过程才能转化为作物可吸收的磷酸盐,短期内不会被大量固定,在满足作物养分供应的同时加剧了向下迁移的损失风险。因此,协同实现有机质提升和农田磷素管理尤为重要。

目前国内外研究在有机磷肥农田管理中往往忽视地力提升,且多聚焦于磷素在耕层土壤的累积,鲜有研究同时关注土壤碳固存、淋溶和迁移过程。本研究在基于土壤有机质提升条件下明确磷素累积、转化和迁移特征及其影响机制,通过科学指导施肥,规避环境风险。本研究以菜地为试验对象,

设置4个有机物料处理,挖掘不同物料处理下磷肥管理对土壤碳固存和磷素变化规律的影响,以期为菜地合理施肥提供理论支撑,同时保证蔬菜生产的绿色可持续性。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况及供试材料

本研究于2019~2021年在重庆北碚国家紫色土肥力与肥料效益监测站(北纬29°48',东经106°24')进行,试验地为辣椒-大白菜轮作体系,10月到次年1月种植大白菜,5~9月种植辣椒,总面积为283.5 m<sup>2</sup>。试验地土壤类型为石灰性紫色土,由侏罗系沙溪庙组紫色砂页岩风化残积物发育而成,质地为壤土<sup>[22]</sup>,属于亚热带季风性湿润气候,具有空气湿润,降雨多,日照少等特点。年均气温18.2℃,年均降雨量1156.8 mm。试验地初始耕层基础理化性质如下:pH为8.44, $\omega$ [土壤有机质(SOM)]为8.09 g·kg<sup>-1</sup>, $\omega$ [全氮(TN)]为0.37 g·kg<sup>-1</sup>, $\omega$ (Olsen-P)为14.10 mg·kg<sup>-1</sup>, $\omega$ [速效钾(AK)]为211 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验共设置6个处理,包括:对照(CK,不施肥),基于农户调研的传统施肥处理(CONV),生物炭(BC),鸡粪(CM),餐厨废弃物(KW)和秸秆处理(ST)。每个处理设置3个重复,所有小区随机区组分布,各小区面积约15.8 m<sup>2</sup>。农户传统施肥量为1200 kg·hm<sup>-2</sup>(以C计)、450 kg·hm<sup>-2</sup>N、450 kg·hm<sup>-2</sup>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和300 kg·hm<sup>-2</sup>K<sub>2</sub>O,4种有机物料处理为优化施肥,施肥量为1700 kg·hm<sup>-2</sup>(根据作物碳需求、根系固存、土壤碳固存、二氧化碳释放等碳养分循环利用计算所得,以C计)、250 kg·hm<sup>-2</sup>N、160 kg·hm<sup>-2</sup>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和300 kg·hm<sup>-2</sup>K<sub>2</sub>O,有机物料用量是基于碳需求所得,其余养分不足时用化肥(尿素、过磷酸钙、硫酸钾)补平至优化水平。生物炭购自勤丰众成生物质新材料有限公司,以秸秆和稻壳为原料经高温(500℃)裂解炭化过程制备而得,成品为粉末状,具有较大比表面积;鸡粪购自重庆西山坪生物有机肥公司,经高温密闭罐式发酵腐熟而成;餐厨废弃物购自四川嘉博文生物科技有限公司,将餐厨废弃物和复合微生物菌种、水分调整材料混合均匀,在60~80℃环境中好氧发酵8~10 h制备为有机物料;秸秆来源于监测站内玉米田。生物炭、鸡粪、餐厨废弃物和秸秆养分含量如下: $\omega$ [有机碳(OC)]分别为32.2%、36.0%、31.0%和33.4%; $\omega$ (TN)分别为1.5%、2.3%、1.2%和0.7%; $\omega$ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)分别为0.4%、4.1%、0.6%和0.1%。有机物料撒施后翻耕,于辣椒种植前作为基肥一次性施

入. 采用当地传统模式统一管理.

### 1.3 样品采集及测定

于 2021 年 9 月 6 日辣椒期取样, 植株样品分部位采取, 洗净烘干并称重, 粉碎待测; 土样采用五点取样法在各小区随机选点, 按照 0~5、5~10、10~20、20~30 和 30~60 cm 的梯度利用土钻(0~30 cm)分层采取, 分别在土钻 5、10、20 和 30 cm 处标记, 每个点打两钻, 第一钻取完擦除附着土壤, 第二钻为 30~60 cm 土样, 以此区分不同土层样品, 剔除石砾、根系和肥料块后混匀装袋, 带回实验室风干过筛(2 mm 和 0.15 mm), 用于分析土壤理化性质. 植株采用  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  法消解, 利用电感耦合等离子体光谱发射仪(ICP-OES)分析磷含量; 土壤 TP 采用钼锑抗比色法测定; 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法测定; 有效磷(Olsen-P)通过  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ (pH = 8.5, 土水比为 1:20)浸提,  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  通过  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ (土水比为 1:5)浸提, 二者的浸提液采用钼锑抗比色法比色; pH 采用电位法(土水比为 1:2.5)测定. 采用 Tiessen 和 Moir 提出的顺序提取法进行磷组分分级, 将不同组分按有效性分为 4 种磷库, 分别为活性磷库[树脂态磷(Resin-P)、 $\text{NaHCO}_3$  态无机磷( $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ )、 $\text{NaHCO}_3$  态有机磷( $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ )], 中等活性磷库[ $\text{NaOH}$  态无机磷( $\text{NaOH-P}_i$ )、 $\text{NaOH}$  态有机磷( $\text{NaOH-P}_o$ )], 稀 HCl 态无机磷( $\text{dil.HCl-P}_i$ )、低活性磷库[浓 HCl 态无机磷( $\text{conc.HCl-P}_i$ )、浓 HCl 态有机磷( $\text{conc.HCl-P}_o$ )]和惰性磷库[残留态磷(Residual-P)]<sup>[23]</sup>.

### 1.4 数据分析及统计

P 吸收量按以下公式计算:

$$\text{P 吸收量} = \text{P 含量} \times \text{干重}$$

耕层(0~20 cm)土壤磷组分含量通过 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层中含量加权平均而得; 采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 26.0、Origin 2023 和 Powerpoint 2019 进行数据分析与绘图, 利用 Amos 24.0 对研究指标进行相互关系模拟; 使用 Duncan 法对数据进行多重比较,  $P < 0.05$  时处理间差异具有统计学意义.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机物料对辣椒生长和土壤养分的影响

相比于对照, 施肥处理均显著增加辣椒产量和磷吸收量(表 1). 4 种有机物料优化施肥处理下, 生物炭和餐厨废弃物处理下辣椒产量达到农户传统施肥相似水平, 显著高于秸秆和鸡粪; 生物炭处理下辣椒磷吸收量显著高于其他 3 种物料 6.5%~20.5%, 鸡粪处理最低.

除农户传统施肥的 C:N 外, 所有施肥处理的 SOM、TN、TP 和 C:N、C:P 均显著增加(表 2). 其中农户传统施肥下 SOM、TN 和 TP 含量增幅分别为 103.7%、124.9% 和 63.9%, 而有机物料处理下 3 种养分增幅分别为 147.2%~190.6%、81.3%~93.8% 和 39.8%~49.4%. 4 种有机物料对 SOM 的提升作用不同, 其中以生物炭效果最佳, 顺序为: 生物炭>餐厨废弃物>秸秆>鸡粪; 不同有机物料处理间土壤 TN 无显著差异, 生物炭处理下土壤 TP 含量最高, 其次是餐厨废弃物, 秸秆和鸡粪没有差异. 此外, 由于有机物料成分差异, 导致 4 个处理下有机替代磷肥比例不同.

表 1 全生育期辣椒产量和磷吸收对不同有机物料的反应<sup>1)</sup>

Table 1 Pepper yield in whole growth period and phosphorus uptake in response to different organic materials

| 处理   | 产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ | $\omega(\text{P})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |       |        | P 吸收量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ |      |      | 总计     |
|------|-----------------------------------|--|-------|--------|---------------------------------------|------|------|--------|
|      |                                   | 果  | 叶     | 茎      | 果                                     | 叶    | 茎    |        |
| CK   | 4.1d                              | 7.47ab   | 3.73b | 1.37c  | 6.10                                  | 1.37 | 0.80 | 8.27e  |
| CONV | 30.2a                             | 7.67a  | 5.43a | 1.93a  | 25.20                                 | 4.27 | 3.13 | 32.60a |
| BC   | 29.5a                             | 7.13ab   | 5.40a | 1.87ab | 22.30                                 | 3.97 | 2.83 | 29.10b |
| CM   | 24.0c                             | 6.97b  | 5.20a | 1.77b  | 18.30                                 | 3.83 | 2.03 | 24.16d |
| KW   | 28.8a                             | 7.03b  | 5.13a | 1.87ab | 21.00                                 | 3.80 | 2.53 | 27.33c |
| ST   | 26.4b                             | 6.97b  | 5.17a | 1.83ab | 20.20                                 | 3.80 | 2.36 | 26.36c |

1) 相同小写字母表示各处理间没有显著差异( $P < 0.05$ )

### 2.2 不同有机物料对不同土层 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响

除餐厨废弃物处理的 5~10 cm 土层外, 所有施肥处理的 0~5 cm 和 5~10 cm 土层 Olsen-P 含量均显著高于对照, 整体表现为: 农户传统施肥>秸秆>生物炭>鸡粪>餐厨废弃物>对照[图 1(a)]. 耕层土壤中, 农户传统施肥的 Olsen-P 最高. 在 0~10

cm 土层中, 4 种有机物料以秸秆对磷的活化作用最佳, 在表土层(0~5 cm)显著高于鸡粪和餐厨废弃物, 分别增加 49.5% 和 67.3%, 次表层(5~10 cm)分别增加 32.4% 和 59.6%, 而与生物炭处理无明显差异. 对于  $\text{CaCl}_2\text{-P}$ [图 1(b)], 所有施肥处理均高于对照, 农户传统施肥相比于对照显著增加, 但不同有机物料对其影响不大, 餐厨废弃物略高

表 2 土壤养分对不同有机物料的反应及各有机物料处理下有机替代磷肥的比例<sup>1)</sup>

Table 2 Response of soil nutrients to different organic materials and the proportion of organic fertilizer replacing phosphorus fertilizer under different treatments

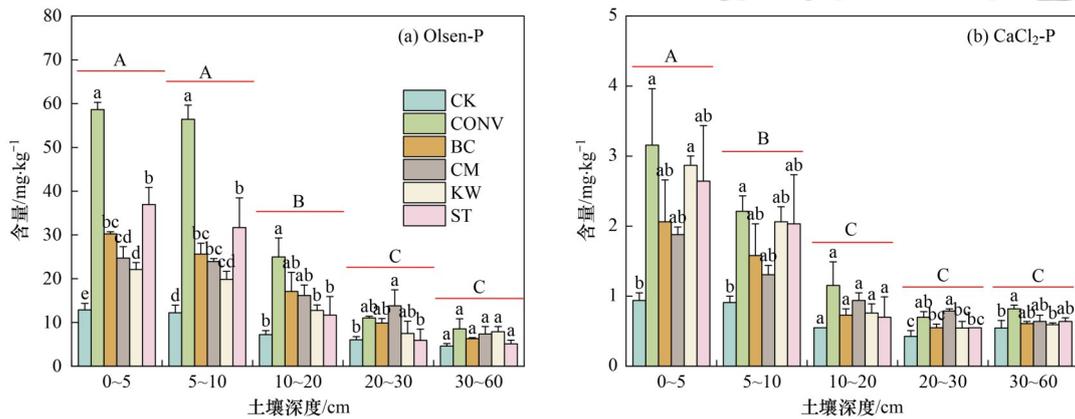
| 处理   | $\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 碳氮比(C/N) | $\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 碳磷比(C/P) | 有机替代率 <sup>2)</sup> /% |
|------|--|---|----------|---|----------|------------------------|
| CK   | 2.99f  | 0.32c   | 9.23d    | 0.83e   | 3.60e    | — <sup>3)</sup>        |
| CONV | 6.09e  | 0.71a   | 8.62d    | 1.36a   | 4.49d    | —                      |
| BC   | 8.69a  | 0.58b   | 15.0a    | 1.24b   | 6.99a    | 30.0                   |
| CM   | 7.39d  | 0.62b   | 12.1c    | 1.16d   | 6.36c    | 100                    |
| KW   | 8.07b  | 0.59b   | 13.6b    | 1.21c   | 6.68b    | 46.8                   |
| ST   | 7.69c  | 0.61b   | 12.7c    | 1.18d   | 6.53bc   | 7.23                   |

1)相同小写字母表示各处理间没有显著差异( $P < 0.05$ );2)有机替代率为替代磷肥比例;3)“—”表示没有数据

于秸秆,其次是生物炭,鸡粪最低.在表土层和次表层中,餐厨废弃物处理分别是鸡粪的1.53倍和1.58倍.总体而言,连续两年施用不同有机物料对土壤Olsen-P和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的累积主要集中在0~20 cm土层.

在4种有机物料中,鸡粪处理的Olsen-P向下迁移最多,5~10、10~20和20~30 cm土层Olsen-P

分别占表土层的96.8%、65.4%和55.9%,而秸秆处理下Olsen-P多集中在表层和次表层,向下迁移最少,20~30 cm土层仅为表土层的16.0%,餐厨废弃物处理下磷素向下迁移程度略高于生物炭;对于 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 来说,鸡粪处理下磷素迁移比例最多,20~30 cm土层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 占表土层的42.0%,而餐厨废弃物处理仅为19.2%.



相同小写字母表示不同处理间没有差异,相同大写字母表示不同深度间没有差异( $P < 0.05$ )

图 1 不同土层深度下土壤Olsen-P和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 受施肥处理的影响Fig. 1 Soil Olsen-P and  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  at different soil depths affected by fertilization treatments

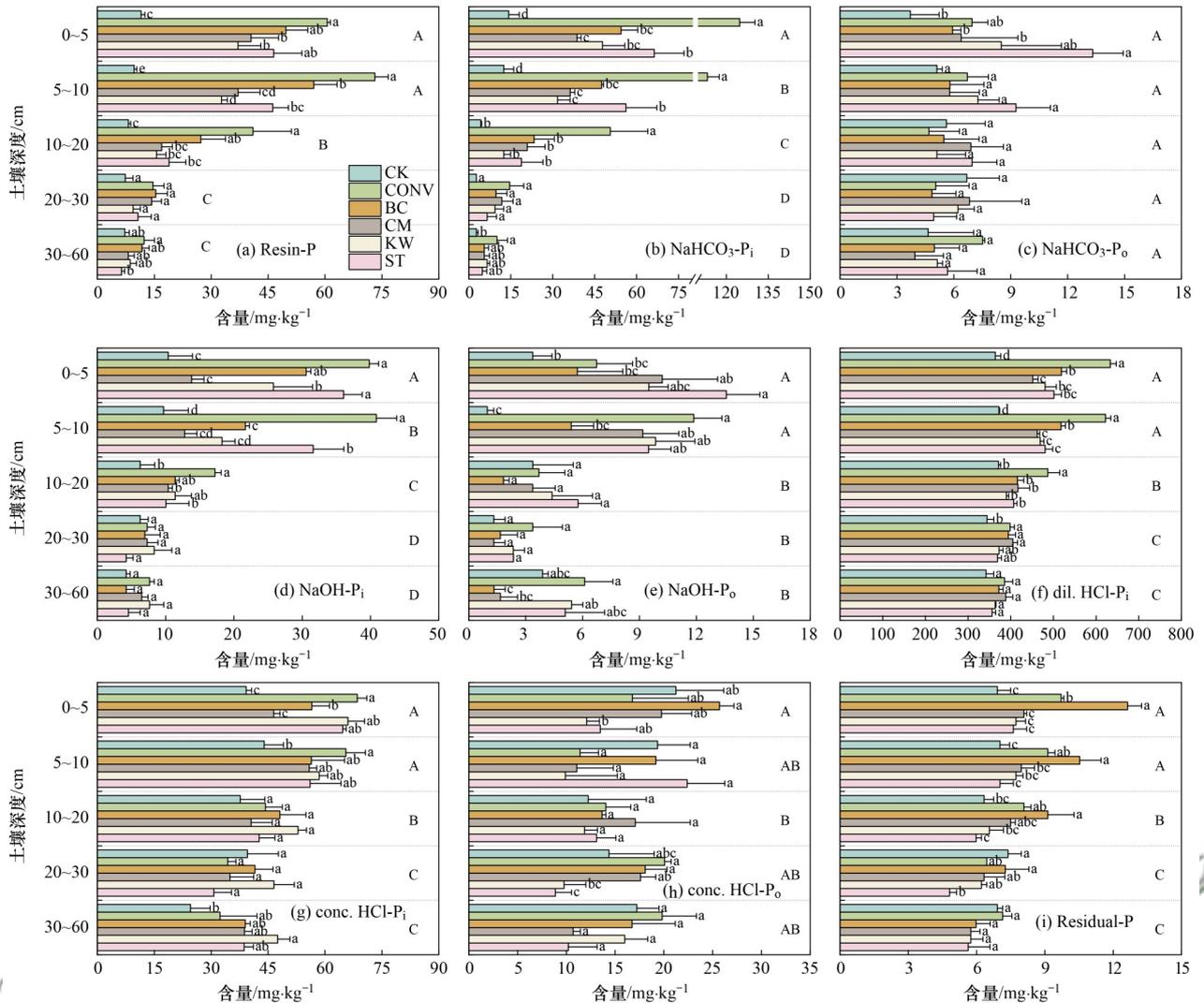
### 2.3 不同有机物料对各土层土壤磷组分和各种磷质量分数的影响

各土层的不同磷组分对4种有机物料的反应不同(图2).整体而言,相比于对照,施用有机物料后土壤各磷库含量均增加或显著增加.秸秆促进了土壤磷向 $\text{NaOH-P}_i$ 的转化,在0~5 cm和5~10 cm土层其含量分别为另外3种物料的1.18~2.61倍和1.46~2.48倍;而生物炭更有利于 $\text{dil.HCl-P}_i$ 累积,在0~5 cm和5~10 cm土层高于或显著高于其他物料处理,尤其是鸡粪; $\text{conc.HCl-P}_i$ 组分变化规律与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 一致,表现为:餐厨废弃物>秸秆>生物炭>鸡粪.由图3可知,秸秆在提高土壤活性磷方面表现出更大的优势,相比于生物炭、鸡粪和餐厨废弃物分别增加14.6%、47.3%和35.1%.土壤磷主要以中等活性磷库的形式存在,占总磷的70.0%~80.0%.

在有机物料处理下中等活性磷库大小规律为:生物炭>秸秆>餐厨废弃物>鸡粪,相比于对照增加了26.0%~46.9%,生物炭和秸秆处理下中等活性磷库占比差异不大,而鸡粪处理以该形式储存的磷占比最多,约74.8%.惰性磷库在土壤中占比最小,在生物炭处理下显著高于鸡粪、餐厨废弃物和秸秆处理,分别增加56.4%、63.4%和66.0%.整体来看,随着土壤深度增加,不同土壤磷组分含量显著降低,各组分在20 cm以下没有差异.

### 2.4 有效磷和不同磷组分间的相关性分析

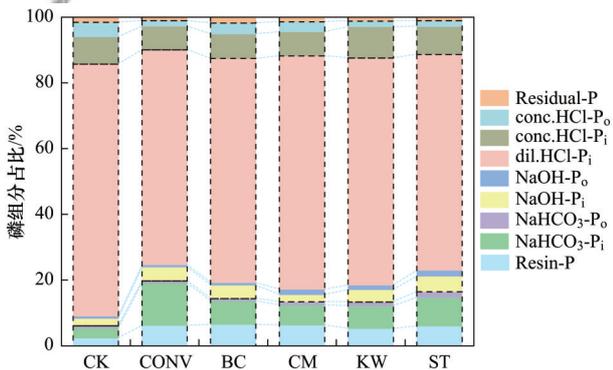
如图4所示,将土壤活性磷库、中等活性磷库、低活性磷库和惰性磷库分别与有效磷(Olsen-P)进行相关性分析发现,活性磷库和中等活性磷库中, $\text{Resin-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_i$ 和 $\text{dil.HCl-P}_i$ 与有效磷呈极显著相关( $P < 0.001$ ),低活性磷库和惰性磷库



相同小写字母表示不同处理间没有差异,相同大写字母表示不同深度间没有差异( $P < 0.05$ )

图2 不同土层深度下土壤磷组分受施肥处理的影响

Fig. 2 Soil P fractions at different soil depths affected by fertilization treatments



黑色虚线框表示9种磷组分被分为4种磷库:活性磷库包括 Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$  和  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ ;中等活性磷库包括  $\text{NaOH-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_o$  和  $\text{dil. HCl-P}_i$ ;低活性磷库包括  $\text{conc. HCl-P}_i$  和  $\text{conc. HCl-P}_o$ ;惰性磷库包括 Residual-P

图3 表层土壤(0~5 cm)中各种磷组分占比受施肥处理的影响

Fig. 3 Proportion of each soil P fraction affected by fertilization treatments in the surface soil (0-5 cm)

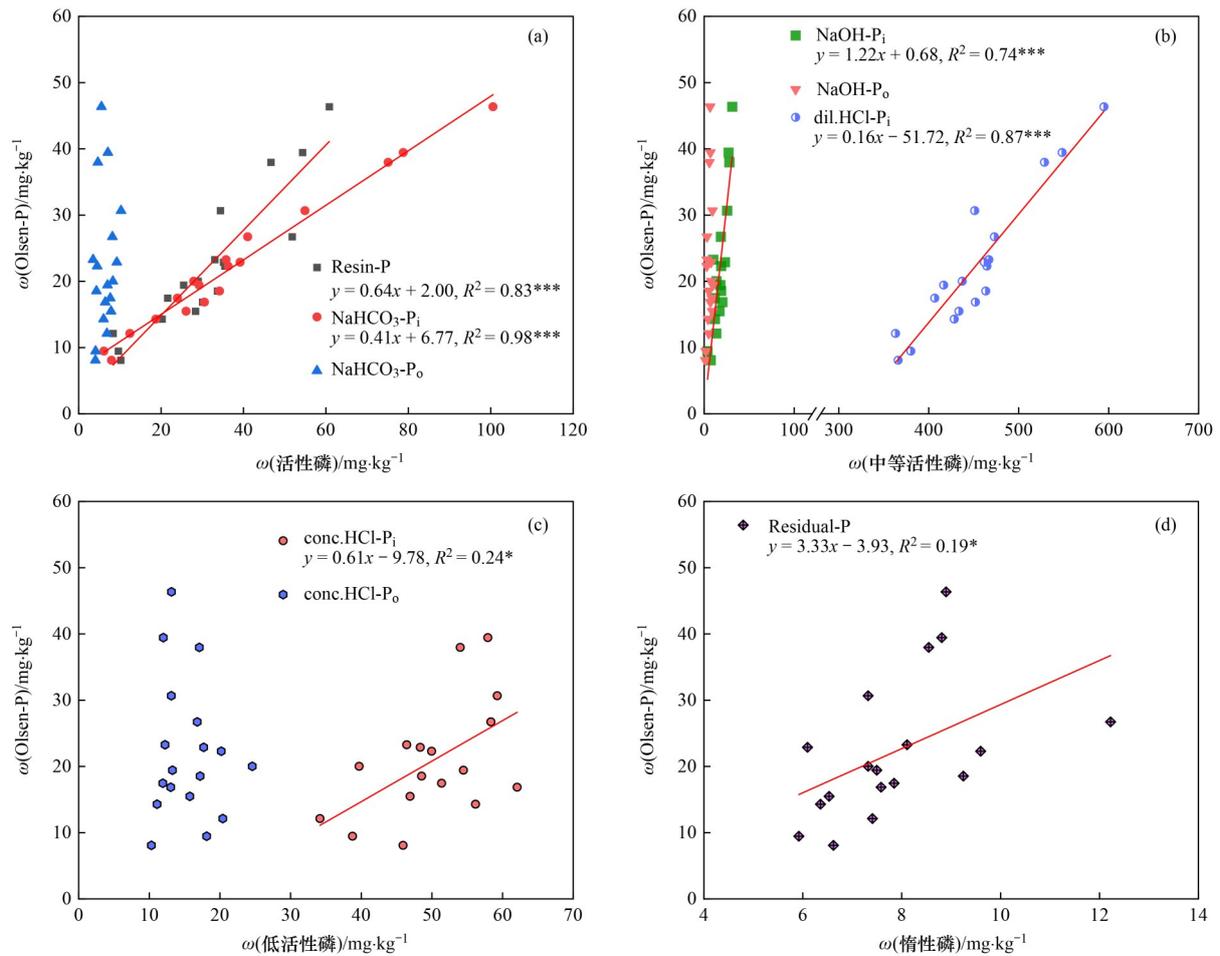
中,  $\text{conc. HCl-P}_i$  和 Residual-P 与有效磷显著相关 ( $P < 0.05$ ), 且所有斜率均为正数, 表明有效磷含量

随各磷库含量增加而增加. 在所有磷组分中,  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$  与有效磷相关性最强,  $R^2$  值为 0.98.

### 2.5 有机无机配比、pH、磷组分和有效磷间关系模型

在碱性菜地上连续两年施用不同类型有机物料, 所有施肥处理的 pH 均显著下降(图 5). 相比于对照, 农户传统施肥处理表层土 pH 降低 0.51 个单位, 施用有机物料降低 0.15 ~ 0.33 个单位. 不同有机物料处理的土壤 pH 顺序为: 鸡粪>餐厨废弃物>生物炭>秸秆, 鸡粪和餐厨废弃物处理显著高于生物炭和秸秆.

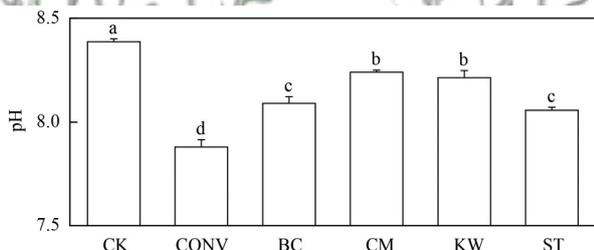
通过结构方程模型(structural equation modeling, SEM)构建有机无机配比、土壤环境因子、磷组分和有效磷(Olsen-P)间的相互关系[图 6(a)], 结果显示, 土壤有效磷受多种因子调控, 有机物料投入一方面通过降低土壤 pH 直接提高土壤磷素有效性, 合适的土壤酸碱度有利于作物生长和养分循环; 另



不同形状样点表示各处理下不同磷组分和有效磷对应的样本值; \*和\*\*\*分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.001$  时显著回归

图4 耕层土壤中,有效磷与土壤活性磷、中等活性磷、低活性磷和惰性磷的关系

Fig. 4 Relationship between available phosphorus and soil labile P, moderately labile P, sparingly labile P, and non-labile P in cultivated soil



相同小写字母表示不同处理间没有差异 ( $P < 0.05$ )

图5 土壤 pH 受施肥处理的影响

Fig. 5 Effect of fertilization treatments on soil pH

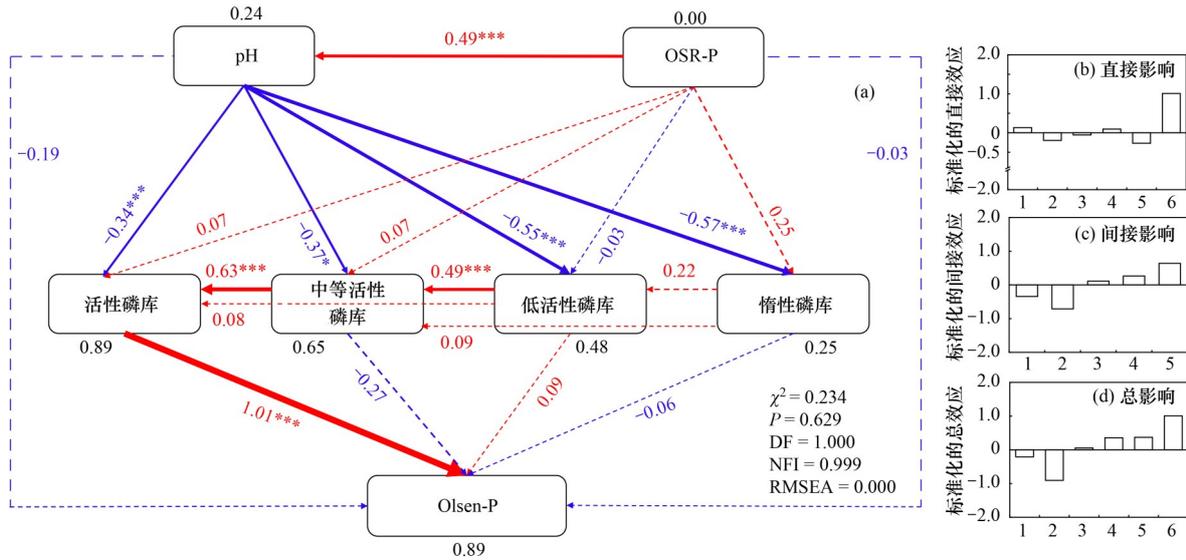
一方面通过改变有机无机磷肥配比,直接或间接地作用于磷素转化过程。pH 的改变影响了中等活性磷库、低活性磷库和惰性磷库,加速稳定性磷库向活性磷库的转化,进而提高有效磷含量。另外,有机物料对磷源的补充多为稳定性磷库,需要长时间矿化才能转化为植物可利用磷源。有机物料投入也会直接影响土壤有效磷含量,合适的有机无机配比可以提高土壤磷有效性。在磷素转化过程中,中等活性磷库和低活性磷库更易于向活跃组分转化,而惰性磷库向低活性磷库的转化以及磷库间跨级转化较

难发生。在影响土壤有效磷的众多因子中,土壤 pH 和活性磷库是关键的因素,路径系数分别为 0.49 和 1.01,而其他 3 个磷库对 Olsen-P 影响不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 有机物料类型对土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响

在本研究中,农户传统施肥处理积累了较高 Olsen-P, 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层的  $\omega(\text{Olsen-P})$  分别为 58.6、56.4 和 25.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著高于有机物料处理,主要原因是农户传统施肥处理下肥料自身投入量过高,远超作物带走的养分量,多余的养分留存在土壤中。长期过量施用磷肥会增加土壤磷素积累和浸出量<sup>[24]</sup>,廖文华等<sup>[25]</sup>研究证明,菜田过量施肥导致土壤磷素处于盈余状态,当单季用量为 180~720  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $\text{P}_2\text{O}_5$  时,土壤磷年累积量为 41.2~478.7  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,而 180  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $\text{P}_2\text{O}_5$  的用量即可满足作物需求,王瑞等<sup>[26]</sup>研究发现果菜类菜田的环境磷阈值为 56.7~58.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,过高的养分投入并



1. OSR-P(有机肥替代磷肥比例), 2. pH, 3. 惰性磷库, 4. 低活性磷库, 5. 中等活性磷库, 6. 活性磷库; 结构方程模型中红色和蓝色线条分别表示正向和负向影响, 实线表示影响显著, 虚线表示影响不显著, 线条旁数值是标准化的路径系数, 线条的粗细程度表示路径系数的大小; 各变量上方的黑色数值是  $R^2$  值, 表示变量解释的方差比例; \*和\*\*\*分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.001$  水平上显著相关

图6 菜田上有机替代比例、pH、磷组分和有效磷间的相互关系模型

Fig. 6 Relationship model of organic substitution ratio, pH, P fraction, and available phosphorus on vegetable field

不会促进作物增产增收, 反而增加了环境风险. 另外, 相比于对照, 优化施肥的有机物料处理显著增加土壤磷素积累. 在本研究中将玉米秸秆施入菜田对有效磷的提升作用最强, 显著高于鸡粪和餐厨废弃物, 与生物炭没有差异. 这与前人的研究结果不完全一致, 吕春玲等<sup>[27]</sup>通过整合分析发现, 有机肥类型对土壤有效磷提升幅度不同, 具体表现为粪肥 > 秸秆类 > 城市垃圾类. 这与所施物料的组成有关, 秸秆具有较高的 C/P, 一方面高碳低养分的特性利于建立土壤微生物区系, 对于改善新菜地土壤, 活化养分至关重要; 另一方面在保证土壤碳平衡, 提升地力的前提下, 秸秆处理的有机无机配比较低. 而鸡粪处理仅为粪肥磷源, 磷素有效性相对较低.

肥料投入不仅促进磷素积累, 也加剧了磷向深层的迁移, 并且迁移程度对不同类型有机物料的反应不同. 有研究发现, 在菜田连续施用两年高量化肥, 土壤 Olsen-P 多集中在 0 ~ 20 cm 土层, 而有机肥可迁移至 30 cm 土层, 且磷素下移深度因有机肥类型和种植年限改变而改变<sup>[28-31]</sup>. 在本试验采用的 4 种有机物料中, 鸡粪处理向下迁移的有效磷占比最多, 具有向地下水源迁移的潜在风险, 原因是鸡粪低 C/P 导致该处理多为有机磷源, 不易被土壤颗粒吸附固定. 秸秆处理下的有效磷多集中在上层, 说明秸秆具有最好的固磷作用<sup>[32]</sup>. 但需要注意的是, 在长期施用秸秆后应注意减施磷肥. 在菜田添加生物炭有效缓解了土壤磷向下迁移风险, 正如 Xie 等<sup>[33]</sup>所研究的, 生物炭添加通过诱导土壤有机质增

加改变了磷淋溶变化点, 降低了磷淋溶风险. 另外, 樊红柱等<sup>[31]</sup>发现施用新鲜猪粪会加速土壤磷向下移动, 长期施肥可达 100 cm 以下; 而当采用腐熟牛粪作为有机肥源时, 对土壤有效磷的影响主要集中在 0 ~ 40 cm, 60 cm 以下的磷含量与不施肥处理相当<sup>[30]</sup>. 因此, 不同有机肥类型导致磷素在土壤中的变化规律存在很大差异. 本研究是在提升菜田土壤有机质的前提下对比连续施用两年不同有机物料后土壤有效磷的累积和迁移特征, 为农户选择合理的有机肥源提供理论支撑.

施用磷肥增加了上层土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量, 除餐厨废弃物外其他处理与 Olsen-P 累积规律基本一致, 这种差异与试验所采用的餐厨废弃物自身的特殊性质或堆肥发酵过程有关. 虽然不同物料对土壤 Olsen-P 累积作用不同, 但各处理下  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  没有显著差异, 原因是由于种植年限太短, 尚未造成环境压力. Qin 等<sup>[34]</sup>分析了华北潮土上过度施肥造成的土壤磷累积和流失风险发现, 连续过量施用有机肥超过 10 a 土壤磷超过环境阈值, 引起环境风险. 因此, 在长期大量投入肥料后需及时监控土壤磷素变化.

### 3.2 有机物料类型对菜田磷组分变化的影响

活性磷库可以直接被吸收利用, 对作物生长发育至关重要. 由图 6 可以看出, 在土壤有效磷的累积过程中, 活性磷库是最直接和关键的因子. 试验结果表明, 有机物料显著增加土壤活性磷库绝对含量和占比, 促进中等和低活性磷向活性磷的转化. 这与前人的研究一致, 相比于单施化肥, 配施粪肥通

过减少土壤颗粒对磷素的固定促进土壤非活性磷向活性磷的补充<sup>[35]</sup>. 保留秸秆与磷肥结合, 除了直接促进活性磷库累积, 还可以通过提高土壤酶活性(包括植酸酶和酸性磷酸酶)和 *phoD* 基因丰度间接影响活性无机磷库<sup>[36]</sup>. Zhang 等<sup>[24]</sup> 研究认为长期添加秸秆更多的是促进中等活性磷库积累, 进而减少土壤磷流失. 在本研究中, 相比于其他有机物料, 秸秆更多的是促进了向活性磷库的转化, 原因是秸秆具有较高的 C/P, 加快了解磷菌的活动, 从而促进磷周转<sup>[37]</sup>; 生物炭处理下中等活性磷库含量最高, 更具有减少磷损失和补充有效磷的潜力. 相比于对照, 有机物料投入均降低了低活性磷库占比.

### 3.3 土壤有效磷变化的影响因素

肥料施用并非单一地增加土壤养分, 而是通过调控各种土壤性质因子共同起作用. 本研究利用结构方程模型模拟发现, 在各种有机物料搭配不同比例化学磷肥施入土壤后, 通过降低土壤 pH 加速了相对低活性磷向高活性磷组分的转化, 直接或间接地提高了土壤磷素有效性. 在一项为期 32 a 的定位试验中, 农田长期施用有机肥, 土壤有效磷与 pH 显著负相关<sup>[38]</sup>. Yuan 等<sup>[19]</sup> 在添加了不同有机物料后发现用生物炭和秸秆作为土壤改良剂都可以提高土壤有机碳和影响碳组分, 不同的碳组分具有不同的受众菌群, 从而重塑微生物区系, 刺激磷酸酶酶解作用, 提高土壤磷含量. 在一项氮磷协同吸收的研究中发现, 高氮肥施用促进有机磷积累过程中, pH 值是最重要的驱动因子, 在主成分分析中解释了含 *phoD* 基因的细菌群落组成的 79.4% 的差异<sup>[39]</sup>, 这与本研究的结果相似.

在基于土壤有机质提升条件下施用不同有机物料, 分别对应不同的有机无机磷肥配比. 由图 6(a) 可以看出, 不同替代比例通过影响 pH 间接影响土壤磷素累积. 有研究表明, 粪肥替代 30% 磷肥显著提高了土壤磷有效性<sup>[40]</sup>, 但不同物料可替代的比例不同, 目前仍缺乏不同有机肥类型替代磷肥效果的同田对比. 合适的物料类型有助于维持土壤有效磷合理水平, 保证作物正常生长的同时避免养分累积造成的环境压力.

### 3.4 基于有机质提升的磷肥综合管理

综上, 本研究在基于菜田地力提升的基础上对比不同有机物料对土壤磷的影响发现, 过量施肥造成磷素在土壤中大量积累; 等养分输入下不同物料类型对土壤总磷提升程度不同, 这主要与土壤磷素的流失有关. 有研究表明有机物料类型是造成土壤磷流失的重要因子<sup>[41,42]</sup>. 农田添加生物炭通过影响磷组分降低损失风险<sup>[40]</sup>, 但相比秸秆, 生物炭处理导

致更多的  $\text{PO}_4^{3-}$  流失<sup>[32]</sup>; 沼渣是比粪肥更有效控制磷流失的环保型肥源<sup>[43]</sup>. 同时有机物料通过促进土壤团聚体形成增加磷吸附能力, 但不同类型物料对团聚体的形成及稳定性存在差异<sup>[44]</sup>. 本研究中生物炭和秸秆处理下有效磷无显著差异, 但秸秆具有较强的固磷作用, 需及时监控磷素动态变化; 鸡粪处理难以建成高肥力土壤且易向下迁移; 餐厨废弃物处理下积累了较高的水溶性磷, 可能会造成较大的环境压力. 尽管有机肥在提高土壤有机质方面作用显著, 但碳平衡条件下土壤磷素管理面临很大问题. 基于此, 在磷肥管理中应注意: 在提高土壤有机质的同时应基于作物需求投入养分, 最大限度发挥作物根系生物学潜力, 避免养分盈余对根系造成的负面效应; 在基于碳平衡进行有机肥替代化肥时应根据物料的碳磷比确定有机无机配比, 避免短期内活性磷被大量固定或因缺乏启动磷肥导致作物根系无法建成<sup>[45,46]</sup>; 不同有机物料向下迁移程度不同, 应注意物料性质及土壤养分状况选择有机肥类型, 并及时监控土壤磷动态.

## 4 结论

(1) 施磷条件下, 土壤有效磷随土层深度增加而降低. 秸秆和生物炭对有效磷的累积作用优于餐厨废弃物和鸡粪. 菜田生物炭施用条件下, 土壤有效磷含量与秸秆处理的有效磷含量水平相当, 但生物炭能够兼顾土壤磷素有效性和有机质提升.

(2) 当前土壤中磷多以中等活性磷库形式存在. 菜田施用有机物料加速中等活性磷库和低活性磷库向活性磷库转化, 秸秆处理下活性磷库磷含量最高.

(3) 等碳量条件下鸡粪处理的土壤有效磷向下层迁移相对量最高, 连续施用两年鸡粪后土壤磷素可迁移至 30 cm 土层.

### 参考文献:

- [1] 安迪, 杨令, 王冠达, 等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J]. 化工进展, 2013, 32(8): 1967-1973.  
An D, Yang L, Wang G D, et al. Mechanisms of phosphorus fixation in soils and efficient utilization of phosphate fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(8): 1967-1973.
- [2] He R, Shao C F, Shi R G, et al. Development trend and driving factors of agricultural chemical fertilizer efficiency in China[J]. Sustainability, 2020, 12(11), doi: 10.3390/su12114607.
- [3] Chowdhury R B, Moore G A, Weatherley A J, et al. Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140: 945-963.
- [4] 许琛, 沈素素, 何竹, 等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2506-2514.  
Xu C, Shen S S, He Z, et al. Effects of long-term application of

- inorganic phosphate fertilizer to soil phosphorus pools in yellow-mud soil paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(11): 2506-2514.
- [ 5 ] 方兵, 陈林, 王阳, 等. 设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 452-462.  
Fang B, Chen L, Wang Y, *et al.* Accumulation, migration, and transformation of soil phosphorus in facility agriculture and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 452-462.
- [ 6 ] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, *et al.* Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978-2017 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [ 7 ] 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 等. 流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法: 以铜陵市顺安河流域为例[J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3835-3845.  
Liu G W C, Chen L, Li J Q, *et al.* Simulation of pollution apportionment and optimization of control methods in watershed scale: a case study of the Shun'an watershed in Tongling City [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3835-3845.
- [ 8 ] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.  
Liu X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [ 9 ] Liu X W, Zhang Y, Cheng M J, *et al.* Recycling phosphorus from waste in China: recycling methods and their environmental and resource consequences [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, **188**, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106669.
- [ 10 ] Chen S, Jiang J Y, Wei L L, *et al.* Partial substitution of chemical fertilizers with manure alters soil phosphorus fractions and optimizes vegetable production in alkaline soil [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, **69**(4): 583-598.
- [ 11 ] Lemming C, Oberson A, Magid J, *et al.* Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2019, **270-271**: 65-75.
- [ 12 ] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. *生态学报*, 2022, **42**(23): 9405-9416.  
Zhao M Y, Liu Y X, Zhang X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(23): 9405-9416.
- [ 13 ] 渠晨晨, 任稳燕, 李秀秀, 等. 重新认识土壤有机质[J]. *科学通报*, 2022, **67**(10): 913-923.  
Qu C C, Ren W Y, Li X X, *et al.* Revisit soil organic matter [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(10): 913-923.
- [ 14 ] 李倩, 马琨, 冶秀香, 等. 不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(12): 1866-1875.  
Li Q, Ma K, Ye X X, *et al.* Effect of fertilization managements on soil organic carbon and microbial community structure [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(12): 1866-1875.
- [ 15 ] 丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(4): 811-823.  
Cong P, Pang H C, Wang J, *et al.* Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(4): 811-823.
- [ 16 ] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(6): 1381-1392.  
Zhang Y Y, Mo F, Han J, *et al.* Research progress on the native soil carbon priming after straw addition [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(6): 1381-1392.
- [ 17 ] 李蕴慧, 吴景贵, 赵欣宇, 等. 农业废弃物对黑土有机磷形态长期动态影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(1): 260-264, 271.  
Li Y H, Wu J G, Zhao X Y, *et al.* Dynamic changes of organic phosphorus forms applied different agricultural waste materials in black soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(1): 260-264, 271.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Yuan J H, Wang Y, Zhao X, *et al.* Seven years of biochar amendment has a negligible effect on soil available P and a progressive effect on organic C in paddy soils [J]. *Biochar*, 2022, **4**(1), doi: 10.1007/s42773-021-00127-w.
- [ 20 ] Rinasoa S, Nishigaki T, Rabeharisoa L, *et al.* Organic materials with high P and low C: P ratio improve P availability for lowland rice in highly weathered soils: Pot and incubation experiments [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, **185**(4): 475-485.
- [ 21 ] Zhang L, Ding X D, Peng Y, *et al.* Closing the loop on phosphorus loss from intensive agricultural soil: a microbial immobilization solution? [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.00104.
- [ 22 ] 王珂, 徐春丽, 张宇亭, 等. 长期不同施肥下紫色土作物体系镉累积及安全性评估[J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(18): 3542-3550.  
Wang K, Xu C L, Zhang Y T, *et al.* Cd accumulation and safety assessment of soil-crop system induced by long-term different fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(18): 3542-3550.
- [ 23 ] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [ 24 ] Zhang Y J, Gao W, Luan H A, *et al.* Long-term organic substitution management affects soil phosphorus speciation and reduces leaching in greenhouse vegetable production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **327**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129464.
- [ 25 ] 廖文华, 刘建玲, 黄欣欣, 等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(4): 894-903.  
Liao W H, Liu J L, Huang X X, *et al.* Responses of vegetable yield and changes of phosphorus fractions in cinnamon soil to long-term excess phosphorus application [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(4): 894-903.
- [ 26 ] 王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷素环境与农学阈值研究进展[J]. *土壤*, 2022, **54**(1): 1-8.  
Wang R, Zhong Y M, Li H M, *et al.* Research progresses on environmental and agriculture thresholds of soil phosphorus in high-input vegetable fields [J]. *Soils*, 2022, **54**(1): 1-8.
- [ 27 ] 吕春玲, 陈延华, 何文天, 等. 玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的Meta分析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(9): 2011-2022.

- Lv C L, Chen Y H, He W T, *et al.* Response of soil phosphorus availability to long-term application of organic fertilizer under maize cropping system: a meta-analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(9): 2011-2022.
- [28] Zhang W, Zhang Y W, An Y L, *et al.* Phosphorus fractionation related to environmental risks resulting from intensive vegetable cropping and fertilization in a subtropical region[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116098.
- [29] 柳开楼, 都江雪, 邬磊, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, **39**(6): 1115-1123.
- Liu K L, Du J X, Wu L, *et al.* Effects of long-term fertilization on phosphorus distribution in soil aggregates of different depths in paddy fields [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, **39**(6): 1115-1123.
- [30] 温延臣, 李海燕, 袁亮, 等. 长期定位施肥对潮土剖面养分分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(21): 4460-4469.
- Wen Y C, Li H Y, Yuan L, *et al.* Effect of long-term fertilization on nutrient distribution of Fluvo-Aquic soil profile [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(21): 4460-4469.
- [31] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 等. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(8): 1520-1529.
- Fan H Z, Chen Q R, Qin Y S, *et al.* Characteristics of phosphorus accumulation and movement in a calcareous purple paddy soil profile as affected by long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(8): 1520-1529.
- [32] 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 等. 化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地壤中流磷流失风险[J]. *环境科学*, 2023, **44**(8): 4541-4553.
- Lai J X, Deng H, Zhu H Y, *et al.* Biochar or straw substituting chemical fertilizer increase the risk of phosphorus loss in subsurface runoff in sloping farmland [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4541-4553.
- [33] Xie Z J, Yang X S, Sun X L, *et al.* Effects of biochar application and irrigation rate on the soil phosphorus leaching risk of fluvisol profiles in open vegetable fields [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147973.
- [34] Qin X C, Guo S F, Zhai L M, *et al.* How long-term excessive manure application affects soil phosphorous species and risk of phosphorous loss in Fluvo-Aquic soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115304.
- [35] Wang Q, Qin Z H, Zhang W W, *et al.* Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, **21**(9): 2720-2733.
- [36] Cao N, Zhi M L, Zhao W Q, *et al.* Straw retention combined with phosphorus fertilizer promotes soil phosphorus availability by enhancing soil P-related enzymes and the abundance of *phoC* and *phoD* genes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, **220**, doi: 10.1016/j.still.2022.105390.
- [37] Chen W J, Zhan Y B, Zhang X J, *et al.* Influence of carbon-to-phosphorus ratios on phosphorus fractions transformation and bacterial community succession in phosphorus-enriched composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, **362**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127786.
- [38] Li C L, Zhang P, Zhang J J, *et al.* Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, **67**(9): 1256-1271.
- [39] Chen S, Yan Z J, Zhang S, *et al.* Nitrogen application favors soil organic phosphorus accumulation in calcareous vegetable fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(5): 481-496.
- [40] Jin J W, Fang Y Y, He S, *et al.* Improved phosphorus availability and reduced degree of phosphorus saturation by biochar-blended organic fertilizer addition to agricultural field soils [J]. *Chemosphere*, 2023, **317**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.137809.
- [41] 夏鑫, 乔航, 孙琪, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4636-4646.
- Xia X, Qiao H, Sun Q, *et al.* Effects of organic materials on phosphorus fractions and *phoD*-harboring bacterial community in Karst Soil [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4636-4646.
- [42] Zhang S, Wang L Y, Chen S, *et al.* Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: insights from a long term study with equal phosphorus input [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **306**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114451.
- [43] Ran X L, Uppuluri N S T, Deng Y, *et al.* Comparison of phosphorus species in livestock manure and digestate by different detection techniques [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **874**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162547.
- [44] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [45] 俞映惊, 王逸之, 杨祺, 等. 太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3902-3912.
- Yu Y L, Wang Y Z, Yang B, *et al.* Effects of fertilizer application strategy adjustments on nitrogen and phosphorus loss from typical crop systems in Taihu lake region [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3902-3912.
- [46] Muller A, Schader C, El-Hage Scialabba N, *et al.* Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**, doi: 10.1038/s41467-017-01410-w.

## CONTENTS

|   |   |
|---|---|
| Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition                       | YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i> (2487)                    |
| Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest  | ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (2497)             |
| Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model   | YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i> (2507)           |
| Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model   | FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i> (2516)      |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020          | GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i> (2525)                        |
| Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022  | CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i> (2537)              |
| Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou                           | TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (2548)                |
| Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City                 | SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (2558)                  |
| Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution               | LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2571)             |
| Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin                                    | LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i> (2581)            |
| Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect | XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i> (2596)                  |
| Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China   | WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i> (2613)             |
| Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang                       | ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i> (2622)        |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis   | WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2631)            |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season                                    | MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (2640)               |
| Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing  | HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i> (2651)              |
| Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)                           | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (2665)                     |
| Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)  | WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i> (2678)          |
| Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River                                     | WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i> (2686)            |
| Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets                                     | JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i> (2694)          |
| Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water                                      | HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i> (2707)                |
| Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir   | MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i> (2715)                   |
| Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals   | MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2727)      |
| Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System  | ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i> (2741)              |
| Source Apportionment of Morphine in Wastewater  | SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i> (2748)        |
| Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing   | LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i> (2757)            |
| Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin   | WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)                                       |
| Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin                        | CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i> (2780)              |
| Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau   | LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i> (2793)                     |
| Spatial-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021   | ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i> (2806)               |
| Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios   | CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i> (2817)                 |
| Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration                      | WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i> (2828)            |
| Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China   | JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i> (2840)                  |
| Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses  | HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i> (2848)          |
| Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm                                    | HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i> (2859)          |
| Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields   | SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i> (2871)                |
| Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity  | ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> (2881) |
| Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System  | GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i> (2891)             |
| Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation  | BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i> (2905)                 |
| Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis   | YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i> (2913)                |
| Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust   | WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i> (2926)      |
| Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site  | CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i> (2939)         |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong   | DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i> (2952)                 |
| Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin  | HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i> (2962)         |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City                            | YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)                           |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models                                       | CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (2983)          |
| Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China | TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i> (2995)               |
| Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province  | WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3005)          |
| Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China   | LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (3016)          |
| Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice   | XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i> (3027)       |
| Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper   | ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i> (3037)     |
| Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis   | JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i> (3047)             |
| Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation   | LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> (3059)             |
| Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin  | DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i> (3069)                  |
| Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay   | SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-hua, <i>et al.</i> (3078)         |
| Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils   | WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i> (3088)              |
| Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China  | YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i> (3098)              |
| Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang  | XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i> (3107)               |
| Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck  | XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i> (3119)   |