



环境科学研究

Research of Environmental Sciences

几种土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性及酶活性的影响

李平 聂浩 郎漫 施明杨 杨彬妍 罗小三

Effects of Several Soil Conditioners on Nutrient Availability and Enzyme Activity in Heavy Metal Contaminated Soil

LI Ping, NIE Hao, LANG Man, SHI Mingyang, YANG Binyan, LUO Xiaosan

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.05>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石灰组配有机改良剂对农田铅镉污染土壤微生物活性的影响

Effects of Lime Mixed with Organic Modifiers on Microbial Activity in Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil

环境科学研究. 2020, 33(10): 2361-2369. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.04.27>

农业耕作和外来植物入侵对金沙江下游库区新生消落带土壤养分和酶活性的影响

Effects of Agricultural Farming and Alien Plants Invasion on Soil Nutrients and Enzymes in New Water Level Fluctuation Zone in Reservoirs of the Lower Jinsha River

环境科学研究. 2024, 37(6): 1315-1325. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.11>

硅酸钾及其与锰硫配施防控水稻复合重金属污染的效果

Control Effects of Combined Heavy Metal Pollution in Rice by Using Silicate and Its Mixing of Mn/S

环境科学研究. 2023, 36(6): 1199-1209. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.04.08>

负载磷酸盐生物质炭材料对重金属复合污染土壤的稳定化机制研究

Stabilization Mechanism of Phosphate-Loaded Biochar Materials in Heavy Metal Contaminated Soils

环境科学研究. 2022, 35(8): 1893-1901. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.04.14>

重金属污染河流生态修复区挺水植物对重金属的吸收特性

Absorption Characteristics of Heavy Metals by Emergent Plants from Polluted River in Ecological Restoration Areas

环境科学研究. 2020, 33(9): 2110-2117. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.02.06>

金沙江干热河谷不同区段土壤碳氮磷化学计量和酶活性研究

Stoichiometry of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus and Soil Enzyme Activity at Various Reaches of the Dry-Hot Valley of Jinsha River

环境科学研究. 2022, 35(11): 2486-2494. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.07.21>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

几种土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性与酶活性的影响

李平, 聂浩, 郎漫, 施明杨, 杨彬妍, 罗小三

南京信息工程大学生态与应用气象学院, 江苏南京 210044

摘要: 重金属污染是我国耕地面临的一个重要问题, 土壤中重金属的有效性可能会对土壤养分状况产生潜在影响。为探究土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性与酶活性的影响, 以铜(Cu)、镉(Cd)污染水稻土为对象, 开展水稻盆栽试验, 分析施用0.1%和0.4%(质量比)的聚丙烯酸(PAA)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)和腐殖酸(HA)这4种土壤结构改良剂后土壤有机质、速效养分与酶活性的变化, 并阐明其相互关系。结果表明: 与不施土壤结构改良剂的对照(CK)处理相比, 施用土壤结构改良剂处理土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加了7.4%~22.7%、4.9%~68.9%、5.3%~20.7%和5.1%~108.5%, 土壤结构改良剂施用量越高, 各养分含量增幅越大。施用0.1%和0.4%的PAA后收获期水稻根中全磷含量较CK处理分别增加了78.8%和90.6%, 其余处理水稻根中全氮、全磷和全钾含量则分别降低了11.6%~41.7%、26.4%~70.6%和18.3%~58.7%; 施用4种土壤结构改良剂处理水稻秸秆全氮、全磷和全钾含量较CK处理分别增加了14.0%~87.1%、62.0%~524.2%和6.4%~31.9%; 施用0.1%和0.4%的PAM后稻米全氮含量较CK处理分别降低了15.1%和12.2%, 而施用PAA、PVA和HA后稻米全氮含量增加了6.1%~23.1%, 施用4种土壤结构改良剂后稻米全磷和全钾含量较CK处理分别增加了7.3%~21.1%和2.4%~20.1%。施用4种土壤结构改良剂处理土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性较CK处理分别增加了17.8%~94.3%、18.5%~163.0%和2.0%~22.0%, 施用PAA和HA后土壤脲酶活性较CK处理降低了3.3%~5.0%, 而施用PAM和PVA处理土壤脲酶活性较CK处理增加了3.8%~71.0%。综上, 施用土壤结构改良剂能够提高重金属污染土壤的养分有效性及蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性, 有利于土壤肥力和生产力的保持, 研究结果可为重金属污染土壤治理修复过程中的养分管理提供科学依据。

关键词: 结构改良剂; 重金属污染; 养分有效性; 酶活性

中图分类号: X53; S156 文章编号: 1001-6929(2025)03-0599-11

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.05

Effects of Several Soil Conditioners on Nutrient Availability and Enzyme Activity in Heavy Metal Contaminated Soil

LI Ping, NIE Hao, LANG Man, SHI Mingyang, YANG Binyan, LUO Xiaosan

School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Heavy metal contamination is an important issue for cultivated land in China, as the presence of heavy metals in soil can potentially affect the status of soil nutrients. To investigate the effects of soil conditioners on the availability of nutrients and enzyme activities in heavy metals contaminated soil, a rice pot experiment was conducted using paddy soil contaminated by copper (Cu) and cadmium (Cd) after applying 0.1% and 0.4% (mass ratio) of four soil conditioners such as polyacrylic acid (PAA), polyacrylamide (PAM), polyvinyl alcohol (PVA), and humic acid (HA). The changes in organic matter, available nutrients, and enzyme activities were examined, and their interconnections were clarified. The results showed that the application of soil conditioners increased soil organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, and available potassium by 7.4%-22.7%, 4.9%-68.9%, 5.3%-20.7%, and 5.1%-108.5%, respectively, as compared to the control treatment (CK) without soil conditioner application. Higher application rates of soil conditioners resulted in greater increase in the nutrient contents. Application of 0.1% and 0.4% PAA increased the total phosphorus content in rice roots

收稿日期: 2024-08-18 修订日期: 2024-09-26

作者简介: 李平(1982-), 男, 江西吉水人, 副教授, 博士, 主要从事土壤环境化学过程与污染控制、土壤氮循环及其生态环境效应研究, pli@nuist.edu.cn

基金项目: 中央土壤污染防治资金项目(新集采单[2021]1468)

Supported by National Special Fund Project for Soil Pollution Prevention and Control, China ([2021]1468)

at the harvesting stage by 78.8% and 90.6%, respectively, while the total contents of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice roots in the other treatments decreased by 11.6%-41.7%, 26.4%-70.6%, and 18.3%-58.7%, respectively, as compared to the CK treatment. The soil conditioner treatments increased nitrogen, phosphorus, and potassium content in rice straw by 14.0% to 87.1%, 62.0% to 524.2%, and 6.4% to 31.9%, respectively, as compared to the CK treatment. Conversely, the application of 0.1% and 0.4% PAM reduced the total nitrogen content in rice grain by 15.1% and 12.2%, respectively. In contrast, application of PAA, PVA, and HA increased the total nitrogen content in rice grain by 6.1%-23.1%, as compared to the CK treatment. The application of the four soil conditioners increased the total contents of phosphorus and potassium in rice grain by 7.3%-21.1% and 2.4%-20.1%, respectively, as compared to the CK treatment. Compared to the CK treatment, the activities of sucrase, acid phosphatase, and catalase activities in the treatments with four soil conditioners applied increased by 17.8%-94.3%, 18.5%-163.0%, and 2.0%-22.0%, respectively. Application of PAA and HA decreased soil urease activity by 3.3%-5.0%, while PAM and PVA increased soil urease activity by 3.8%-71.0%, as compared to the CK treatment. In general, the application of soil conditioners enhances nutrient availability and the activity of sucrase, acid phosphatase, and catalase in the heavy metal contaminated soils, which is beneficial for the maintenance of soil fertility and productivity. These findings provide a valuable scientific basis for managing nutrients in the remediation of heavy metal contaminated soils.

Keywords: soil conditioner; heavy metal contamination; nutrient availability; enzyme activity

“三废”排放及农药化肥的长期过量施用往往会 导致土壤重金属污染问题,这也是导致耕地土壤质量退化的重要原因之一。一方面,污染土壤中的锌、镉等重金属会抑制作物对氮、磷、钾等养分元素的吸收^[1],由此影响作物生长。研究表明,土壤添加高浓度的锌可使小麦减产 6.1%^[2]。我国每年因土壤重金属污染导致的粮食减产超过 1 000 万吨,经济损失达 200 亿元^[3]。另一方面,粮食作物的籽粒吸收积累的过量重金属也会通过食物链进入人体,威胁人体健康^[4]。因此,采取一定措施对重金属污染土壤进行改良修复以保持其生产力,对于保障我国粮食安全具有重要意义。目前,向污染土壤中添加诸如石灰^[5]、生物炭^[6]、海泡石^[7]、改性生物炭^[8-9]及土壤结构改良剂^[10]等有机、无机材料以降低土壤重金属生物有效性,抑制作物吸收积累重金属的原位化学修复技术是应用最为广泛的治理修复技术。

土壤结构改良剂是指多聚糖、腐殖酸和泥炭等天然有机物以及氨基聚合物、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等人工合成的高分子有机化合物^[11],这类高分子材料因富含酰胺基、羧基和羟基等强亲水性基团,常被作为保水剂用于改善土壤团粒结构,提高土壤通透性,促进降水入渗,减少地表径流^[11-12]。土壤结构改良剂除了具备超高的吸水 and 保水能力外,还具有很好的保肥性能。陈晓佳等^[13]研究发现,常规肥料配施 0.15% 和 0.3% 的聚丙烯酰胺 (PAM) 可使土壤中肥料磷和钾的淋溶损失分别减少 27.0%、36.8% 和 11.5%、17.7%。研究表明,添加聚乙烯醇 (PVA) 有利于某弱酸性砂壤土中的尿素缓释,从而潜在提高氮肥利用率^[14];聚丙烯酸 (PAA) 能显著提高土壤有效磷和速效钾含量^[15];腐殖酸 (HA) 可以吸附固定土壤中的

氮、磷和钾等养分元素,保持土壤肥力,促进作物生长^[16]。然而,前述研究均是基于清洁土壤开展,对于重金属污染土壤而言,施用土壤结构改良剂后土壤养分转化及有效性的变化是否和清洁土壤一致尚不可知。

土壤酶是一类由微生物、根系、土壤动物分泌或释放的具有催化活性的蛋白质,参与有机质分解、土壤微生物能量转化和营养获取、污染物降解等重要生态过程^[17]。研究发现,土壤酶活性直接影响到土壤碳、氮、磷生物化学循环过程的强度,且与土壤养分有效性密切相关。脲酶活性的强弱是尿素进入土壤后转化分解为有效氮的关键影响因素^[18];土壤磷酸酶可以加快有机磷的矿化作用,其活性与土壤速效磷含量呈显著正相关^[19]。土壤酶也能发挥解毒作用,如过氧化氢酶可以加速分解过氧化氢,减少活性氧进入植物体内对细胞造成的毒害^[20]。因此,土壤酶活性对于土壤养分变化、农田生态管理利用方式高度敏感,能够灵活、及时、准确地反映出土壤肥力及健康状况^[21]。土壤酶活性受土壤 pH、温度、水分、重金属含量等多种因素的影响,土壤水分含量和温度的轻微变化就能影响土壤酶活性^[22]。研究^[23]表明,Cd、Zn 污染显著抑制了土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性,不同酶类对重金属的胁迫响应也存在差异^[24]。因此,基于土壤酶活性测定高效、成本低、对重金属污染敏感等优点,开展金属污染土壤的化学修复工作时,可以选择土壤酶活性的变化作为评价钝化材料修复效果的一个重要指标。

已有研究发现,污染条件下土壤中过量的重金属会对氮、磷、钾等养分元素的有效性产生不利影响。有研究^[25-27]表明,添加 175 mg/kg 的铅显著降低了酸

性红壤碱解氮含量; 土壤中 Cd 含量超标会降低土壤对钾离子的吸附固定, 导致土壤速效钾含量下降; 添加 500 mg/kg 的 Cu 显著降低了弱酸性土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量。前期研究结果^[10]表明, 施用 PAA、PAM、PVA 和 HA 4 种土壤结构改良剂显著降低了污染土壤有效态 Cu、Cd 含量, 水稻不同部位 Cu、Cd 的吸收积累量均有不同幅度的降低, 4 种土壤结构改良剂均表现出较好的修复效果。但对土壤结构改良剂在降低土壤重金属活性的同时, 是否会影响土壤养分有效性和酶活性还不明确, 相关研究鲜见报道。因此, 该研究以典型 Cu 和 Cd 污染水稻土为对象, 通过水稻盆栽试验, 探讨施用 4 种结构改良剂 (PAA、PAM、PVA 和 HA) 对土壤养分有效性和酶活性的影响, 以期为重金属污染土壤的治理修复和地力提升提供新的思路和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为某 Cu、Cd 污染水稻田耕作层土壤 (0~20 cm), 土壤基本理化性质: pH=5.37, 有机质含量为 33.7 g/kg, 全氮、全磷和全钾含量分别为 1.77、10.2 和 0.43 g/kg, 全 Cu 和 Cd 含量分别为 96.9 和 2.45 mg/kg, 分别为 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》风险值 (Cu, 50 mg/kg; Cd, 0.3 mg/kg) 的 1.94 倍和 8.17 倍, 有效态 Cu 和有效态 Cd 含量分别为 18.6 和 0.81 mg/kg, 属轻度 Cu 污染及重度 Cd 污染。供试土壤结构改良剂为聚丙烯酸 (PAA)、聚丙烯酰胺 (PAM)、聚乙烯醇 (PVA) 和腐殖酸 (HA), 其中 PAA、PAM 和 PVA 购自国药集团化学试剂有限公司, HA 购自上海巨枫化学科技有限公司。供试水稻品种为中早 35, 属籼型常规早稻品种。

1.2 试验设计

采用水稻盆栽试验的方法, 试验在南京信息工程大学玻璃温室进行。共设置 9 个处理: CK(不施土壤结构改良剂)、PAA-1[施用 0.1%(以风干土质量的百分比计) 聚丙烯酸]、PAA-2(施用 0.4% 聚丙烯酸)、PAM-1(施用 0.1% 聚丙烯酰胺)、PAM-2(施用 0.4% 聚丙烯酰胺)、PVA-1(施用 0.1% 聚乙烯醇)、PVA-2(施用 0.4% 聚乙烯醇)、HA-1(施用 0.1% 腐殖酸) 和 HA-2(施用 0.4% 腐殖酸), 每个处理 4 个重复。各土壤结构改良剂的施用采用液施法, 将按设计用量配置的土壤结构改良剂水溶液、10 kg 风干土壤及适量满足水稻生长所需的氮、磷和钾肥[分别为尿素 (以 N 计) 150 kg/hm²、KH₂PO₄(以 P 计) 38 kg/hm² 和 KCl (以 K 计) 150 kg/hm²]充分混匀后置于一个高 23 cm、

直径 31 cm 的塑料桶中, 加水保持土壤表面有 3 cm 淹水层, 平衡 1 周后移栽水稻秧苗, 每桶 3 株。水稻生育前期保持 3 cm 浅层淹水状态, 灌浆期后不再淹水, 保持土面处于湿润状态, 水稻收获前晒田 1 周。水稻分蘖期添加 30 kg/hm² 的尿素 (以 N 计) 作为追肥。

1.3 样品采集与测定

水稻成熟收获后采集植物样品, 将水稻根系、秸秆和籽粒三部分分离并分别经自来水、去离子水清洗后于 105 °C 下杀青 30 min, 然后在 70 °C 下烘干用于测定氮、磷、钾含量; 同时采集适量土壤样品, 风干过筛后用于测定土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量及酶活性。

植物样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 消煮液中全氮含量采用蒸馏法测定, 全磷含量采用钼锑抗比色法测定, 全钾含量采用火焰光度法测定; 土壤 pH 采用电位法测定 (水土比为 2.5:1); 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 土壤全氮含量采用开氏法测定; 土壤全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 土壤全钾含量采用酸溶-火焰光度法测定; 土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定; 土壤速效磷含量采用 HCl-NH₄F 溶液浸提-钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定; 土壤 Cu、Cd 全量采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮^[28], 土壤有效态 Cu、Cd 采用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液提取^[29], 消煮液和提取液中 Cu、Cd 浓度采用原子吸收分光光度计测定, 每批实验均做 3 个空白和 20% 的样品重复, 土壤 Cu、Cd 全量测定过程中插入土壤标准物质 (GBW07450) 进行质量控制, 标准物质中 Cu 和 Cd 的回收率分别为 94%~107% 和 93%~105%; 土壤蔗糖酶和脲酶活性采用关松荫等^[30]的方法; 土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性采用李振高等^[31]的方法。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Origin 9.0 软件进行试验数据的分析与制图; 采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析, 采用 Duncan 法进行各处理间的差异显著性分析 ($p < 0.05$), 相关性分析方法采用皮尔逊相关性分析。

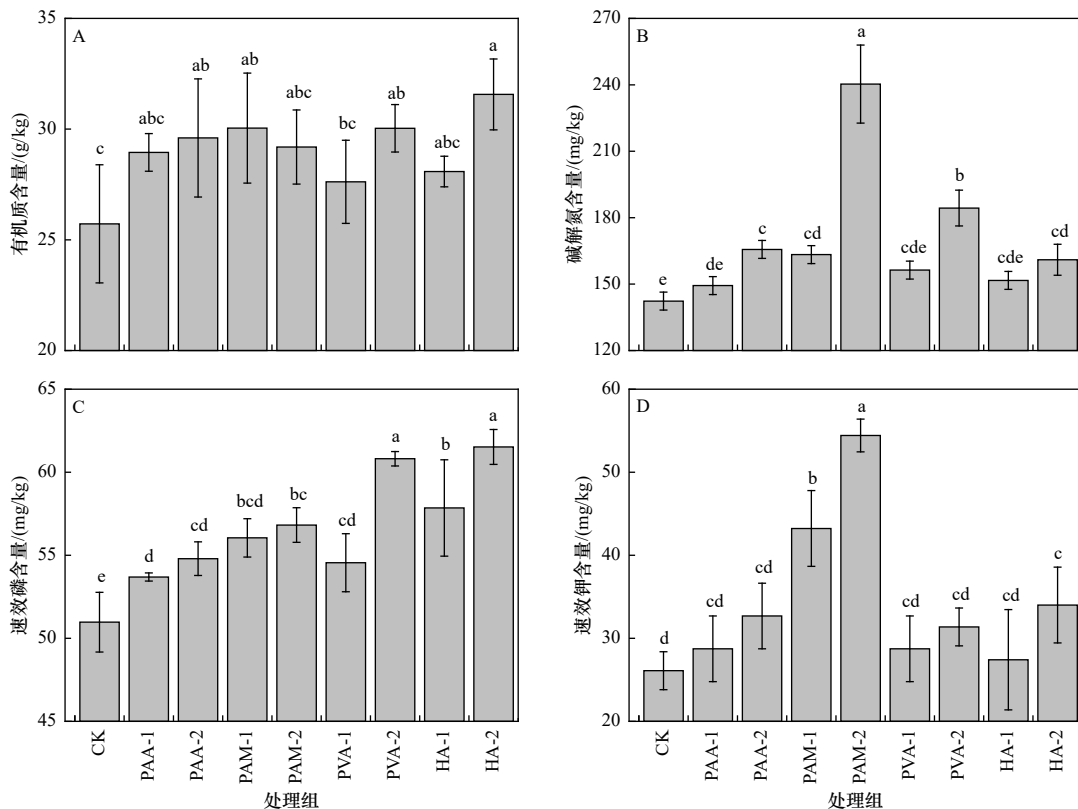
2 结果与分析

2.1 土壤养分含量

由图 1 可见, 施用 4 种土壤结构改良剂均提高了土壤养分含量。与不施土壤结构改良剂的 CK 处理相比, 施用土壤结构改良剂处理土壤有机质含量增加了 7.38%~22.7%, 但仅 PAM-1、PAA-2、PVA-2 和 HA-2 处理的增幅达显著水平 ($p < 0.05$)。施用 0.1% 的 PAA、

PVA 和 HA 对土壤碱解氮含量没有显著影响 ($p>0.05$), 但其余土壤结构改良剂处理土壤碱解氮含量较 CK 处理显著增加了 13.1%~68.9% ($p<0.05$)。供试土壤磷有效性较高, CK 处理土壤有效磷含量高达 51.0 mg/kg。施用 4 种土壤结构改良剂显著影响了土壤中磷的有效性, 各土壤结构改良剂处理土壤速效磷含量较 CK 处理显著增加了 5.34%~20.7% ($p<0.05$)。对于土壤速效钾而言, 施用 0.1% 和 0.4% 的 PAM 以及 0.4% 的 HA 后土壤速效钾含量较 CK 处理显著增加

了 34.0%~54.4% ($p<0.05$), 而其余处理土壤速效钾含量与 CK 处理间没有显著差异 ($p>0.05$)。从图 1 还可以看出, 土壤结构改良剂的施用量越大, 土壤速效养分含量越高, 但各速效养分在不同处理间的大小顺序有所不同。总体看来, 4 种土壤结构改良剂对土壤有机质含量的影响差异不大, 施用 PAM 对提高土壤碱解氮和速效钾含量的效果优于 PAA、PVA 和 HA, 而施用 HA 后土壤速效磷含量要高于其他 3 种土壤结构改良剂。



注: 图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p<0.05$)。下同。

图 1 不同处理土壤养分含量

Fig.1 Contents of soil nutrients in different treatments

2.2 水稻养分含量

由图 2(A) 可知, 与 CK 处理相比, 施用土壤结构改良剂处理水稻根全氮含量降低了 3.2%~41.7%, 除 PVA-2 和 HA-2 处理外, 其余处理水稻根全氮含量均显著低于 CK 处理 ($p<0.05$)。与水稻根全氮含量的降低不同, 施用 4 种土壤结构改良剂后水稻秸秆全氮含量较 CK 处理显著增加了 14.0%~87.1% ($p<0.05$), 土壤结构改良剂用量越高, 其增幅越大。从图 2(A) 还可以看出, 不同土壤结构改良剂对水稻稻米全氮含量的影响有所差异。与 CK 处理相比, 施用 0.1% 和 0.4% 的 PAM 后稻米全氮含量分别显著降低了 12.2% 和 15.1% ($p<0.05$); 而施用 PAA、PVA 和 HA 后稻米全氮含量

则增加了 6.08%~23.1%, 但仅 PAA-1、PAA-2 和 HA-2 处理的增幅显著 ($p<0.05$)。土壤结构改良剂用量越高, 稻米全氮含量越高, 不同处理稻米全氮含量表现为 PAA>HA>PVA>CK>PAM。

由图 2(B) 可知, 施用 0.1% 和 0.4% 的 PAA 后水稻根全磷含量较 CK 处理分别显著增加了 78.8% 和 90.6% ($p<0.05$), 而施用 PAM、PVA 和 HA 后水稻根全磷含量则显著降低了 26.4%~70.6% ($p<0.05$)。与 CK 处理相比, 施用土壤结构改良剂后水稻秸秆全磷含量显著增加了 62.0%~524.2% ($p<0.05$), 并以 PAM 处理的增幅最大。从图 2(B) 还可以看出, 施用土壤结构改良剂显著增加了稻米全磷含量, 较 CK 处理增

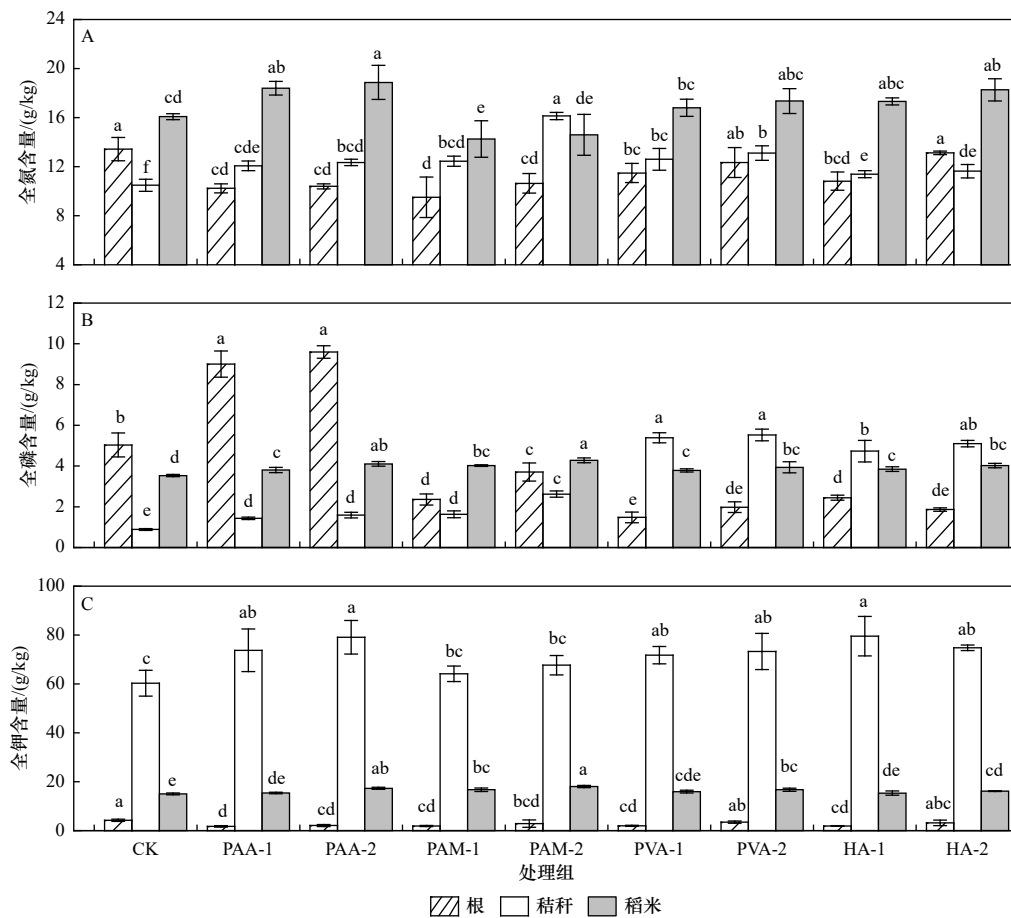


图 2 不同处理水稻不同部位养分含量

Fig.2 Contents of nutrients in different parts of rice in different treatments

加了 7.27%~21.1% ($p < 0.05$), 4 种土壤结构改良剂以施用 PAM 的效果最好。土壤结构改良剂的用量越高, 水稻各部位全磷含量越高。

与氮、磷含量的变化类似, 施用土壤结构改良剂后水稻根全钾含量有不同程度的下降。与 CK 处理相比, PVA-2 和 HA-2 处理差异不显著, 而其余处理水稻根全钾含量则显著降低了 31.7%~58.7% ($p < 0.05$)。图 2(C) 显示: 施用土壤结构改良剂增加了水稻秸秆钾含量, PAM-1 和 PAM-2 处理的变化 (6.39%、12.2%) 不显著, 而其余处理水稻秸秆全钾含量比 CK 处理显著增加了 19.0%~31.9% ($p < 0.05$); 施用 0.1% 的 PAA、PVA 和 HA 对稻米全钾含量没有显著影响, 而其余土壤结构改良剂处理稻米全钾含量较 CK 处理显著增加了 7.60%~20.1% ($p < 0.05$)。土壤结构改良剂用量越高, 水稻各部位全钾含量越高。相关分析结果表明, 土壤碱解氮含量与秸秆全氮含量呈极显著正相关; 土壤速效磷含量与秸秆全量呈极显著正相关, 与稻米全磷含量呈显著正相关; 土壤速效钾含量与稻米全钾含量呈极显著正相关 (见表 1)。由此

可见, 施用土壤结构改良剂降低了氮磷钾养分在水稻根中的积累, 但促进了水稻地上部对养分的吸收积累。

2.3 土壤酶活性

土壤结构改良剂对土壤酶活性的影响见图 3。由图 3(A) 可知, 与 CK 处理相比, 施用土壤结构改良剂后土壤蔗糖酶活性显著增加了 17.8%~94.3% ($p < 0.05$), 但相同施用量下各土壤结构改良剂处理间差异不显著。由图 3(B) 可知, 施用 PAA 和 HA 后土壤脲酶活性较 CK 处理降低了 3.27%~4.95%, 而施用 PAM 和 PVA 后土壤脲酶活性则显著增加了 3.78%~71.0% ($p < 0.05$)。从图 3(C) 可以看出, 施用土壤结构改良剂显著增加了土壤酸性磷酸酶活性, 4 种土壤结构改良剂处理土壤酸性磷酸酶活性较 CK 处理增加了 18.5%~163.0% ($p < 0.05$)。图 3(D) 显示, 施用 0.1% 的 PAA 和 HA 对土壤过氧化氢酶活性没有显著影响, 但其他土壤结构改良剂处理土壤过氧化氢酶活性较 CK 处理显著增加 7.28%~22.0% ($p < 0.05$)。相关分析结果表明, 土壤脲酶活性与土壤碱解氮和速效钾含量

表1 土壤养分含量与水稻不同部位养分含量的相关性

Table 1 Correlations between nutrient contents in soil and nutrient contents in different parts of rice

项目	有机质含量	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量	pH	根全氮含量	根全磷含量	根全钾含量	秸秆全氮含量	秸秆全磷含量	秸秆全钾含量	稻米全氮含量	稻米全磷含量	稻米全钾含量
有机质含量	1	0.27	0.54**	0.29	-0.49**	-0.14	-0.08	-0.07	0.21	0.20	0.21	0.15	0.47*	0.22
碱解氮含量	0.27	1	0.29	0.81**	-0.15	-0.13	-0.14	0.06	0.90**	0.08	-0.08	-0.35	0.71**	0.72**
速效磷含量	0.54**	0.29	1	0.16	-0.50**	0.14	-0.50**	0.09	0.23	0.67**	0.25	0.11	0.41*	0.25
速效钾含量	0.29	0.81**	0.16	1	-0.28	-0.34	-0.14	-0.07	0.73**	-0.17	-0.21	-0.54**	0.66**	0.68**
pH	-0.49**	-0.15	-0.50**	-0.28	1	0.03	-0.06	-0.01	-0.08	-0.09	-0.29	-0.19	-0.53**	-0.32
根全氮含量	-0.14	-0.13	0.14	-0.34	0.03	1	-0.27	0.58**	-0.31	0.29	-0.22	0.26	-0.24	-0.36
根全磷含量	-0.08	-0.14	-0.50**	-0.14	-0.06	-0.27	1	-0.17	-0.10	-0.70**	0.17	0.42*	0.00	0.02
根全钾含量	-0.07	0.06	0.09	-0.07	-0.01	0.58**	-0.17	1	-0.09	0	-0.32	-0.12	-0.24	-0.14
秸秆全氮含量	0.21	0.90**	0.23	0.73**	-0.08	-0.31	-0.10	-0.09	1	0.08	-0.06	-0.35	0.65**	0.71**
秸秆全磷含量	0.20	0.08	0.67**	-0.17	-0.09	0.29	-0.70**	0	0.08	1	0.38	0.19	0.07	-0.02
秸秆全钾含量	0.21	-0.08	0.25	-0.21	-0.29	-0.22	0.17	-0.32	-0.06	0.38	1	0.62**	0.21	0.09
稻米全氮含量	0.15	-0.35	0.11	-0.54**	-0.19	0.26	0.42*	-0.12	-0.35	0.19	0.62**	1	-0.10	-0.21
稻米全磷含量	0.47*	0.71**	0.41*	0.66**	-0.53**	-0.24	0.00	-0.24	0.65**	0.07	0.21	-0.10	1	0.71**
稻米全钾含量	0.22	0.72**	0.25	0.68**	-0.32	-0.36	0.02	-0.14	0.71**	-0.02	0.09	-0.21	0.71**	1

注: $n=36$ 。*和**分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 的显著水平。

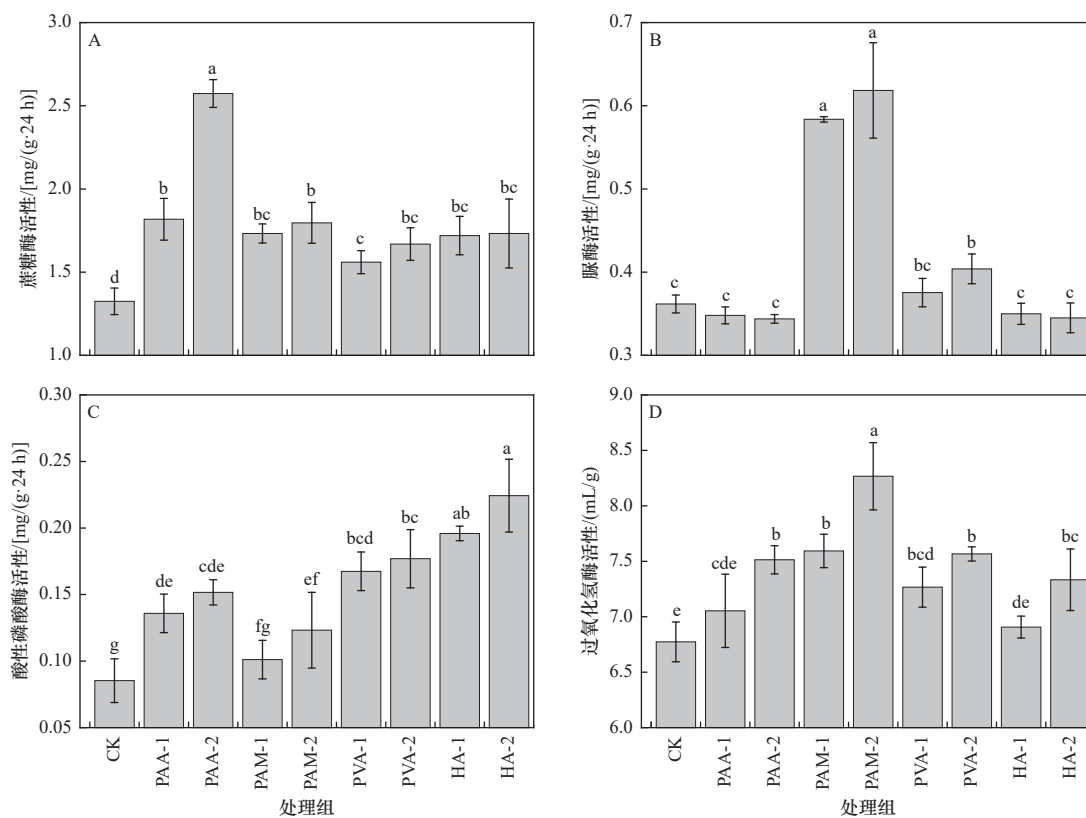


图3 不同处理土壤酶活性

Fig.3 Soil enzyme activities in different treatments

呈极显著正相关, 土壤酸性磷酸酶活性与土壤速效磷含量呈极显著正相关, 土壤过氧化氢酶活性与土壤碱解氮和速效钾含量呈极显著正相关 (见表 2)。综合

土壤养分含量结果, 施用土壤结构改良剂能够通过调节土壤养分有效性的提高土壤酶活性, 且施用量越高, 土壤酶活性越大。

表 2 土壤酶活性与土壤养分含量的相关性

Table 2 Correlations between enzyme activities and nutrient contents in soil

项目	蔗糖酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	有机质含量	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量
蔗糖酶活性	1	-0.06	0.19	0.26	0.27	0.14	0.05	0.12
脲酶活性	-0.06	1	-0.42*	0.68**	0.13	0.72**	0.06	0.86**
酸性磷酸酶活性	0.19	-0.42*	1	-0.07	0.26	-0.07	0.64**	-0.24
过氧化氢酶活性	0.26	0.68**	-0.07	1	0.33	0.85**	0.26	0.81**
有机质含量	0.27	0.13	0.26	0.33	1	0.27	0.54**	0.29
碱解氮含量	0.14	0.72**	-0.07	0.85**	0.27	1	0.28	0.80**
速效磷含量	0.05	0.06	0.64**	0.26	0.54**	0.28	1	0.16
速效钾含量	0.12	0.86**	-0.24	0.81**	0.29	0.80**	0.16	1

注: $n=36$ 。*和**分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 的显著水平。

3 讨论

3.1 土壤结构改良剂对土壤养分有效性及水稻吸收养分的影响

氮、磷、钾是维持作物生长的必需营养元素, 土壤有机质和速效养分含量的多少反映了土壤肥力的高低。该研究结果显示, 土壤结构改良剂的施用不同程度地提高了土壤中有机碳和速效氮、磷、钾含量, 进而促进水稻生长及其对土壤养分的吸收。作为高分子有机化合物, 施入土壤的 PAA、PAM、PVA 和 HA 可以通过生物降解的形式释放有机碳以提高土壤有机碳含量^[32]。彭丽成等^[33]的研究也发现, 施用腐殖酸和高吸水树脂两种高分子聚合物可以有效提高土壤有机质含量。土壤结构改良剂在提高土壤有机质含量的同时, 也会影响土壤中氮、磷、钾养分元素的循环转化过程, 提高其有效性。究其原因: ①土壤结构改良剂富含酰胺基、羧基和羟基等强亲水性官能团, 这些官能团的存在使土壤结构改良剂具有良好的絮凝性与吸附性, 施入土壤的土壤结构改良剂溶于水后可以通过氢键吸附和絮凝土壤中的黏粒, 促使土壤中水稳性大团聚体的形成, 提高土壤养分的吸附固持^[34]。邢世和等^[35]的研究表明, 施用 PAM 和 HA 增加了土壤对氮、磷和钾的吸附固定, 降低了它们通过淋溶损失的可能性, 间接提高了土壤养分有效性。刘慧军等^[15]也报道, 聚丙烯酸盐类改良剂能够显著提高土壤中速效氮、磷、钾养分含量, 保持土壤肥力。②土壤养分有效性的提升还可能与土壤酶活性的变化有关。有研究^[36-37]表明, 土壤酶活性对长期施肥的响应与土壤养分有效性的响应一致, 土壤酶活性与土壤速效养分含量呈显著正相关。该研究结果也表明,

施用土壤结构改良剂显著提高了土壤酶活性, 且土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性与碱解氮、速效磷和速效钾含量均呈显著正相关 (见图 3 和表 2), 这与已有研究结果^[38]一致。此结果进一步证实, 土壤结构改良剂在修复重金属污染土壤过程中, 可以通过调节土壤养分有效性而影响土壤酶活性。

对于重金属污染土壤而言, 土壤中重金属元素与养分元素间的拮抗作用会对植物吸收土壤养分造成不利影响^[35]。该研究中施用土壤结构改良剂后水稻地上部氮、磷、钾等速效养分含量均有不同程度的增加, 说明土壤结构改良剂降低了土壤 Cu、Cd 的生物有效性^[25], 缓解了 Cu、Cd 对土壤养分有效性的负面影响, 直接促进水稻对氮、磷、钾养分的吸收与转运。农传江等^[39]研究发现, 施用含 PAM 的有机肥显著提高了土壤有机质和速效氮、磷、钾含量, 促进生菜对土壤氮、磷、钾的吸收积累。刘红恩等^[40]也曾报道, 施用腐殖酸尿素促进了土壤养分转化, 土壤速效氮、磷、钾含量和小麦氮、磷、钾吸收量显著高于施用普通尿素处理。戴竞雄等^[41]认为, 土壤有机质是影响水稻地上部吸收积累氮、磷、钾养分的关键因子, 一定范围内土壤有机质含量与植物养分吸收累积量呈显著正相关。该研究中土壤结构改良剂的施用显著增加了土壤有机质和速效养分含量 (见图 1), 说明土壤结构改良剂能够减缓重金属污染对养分有效性的抑制作用, 使得更多的土壤有效养分能够被水稻吸收利用, 土壤速效养分含量与水稻秸秆和稻米养分含量呈显著正相关 (见表 1)。此外, 土壤结构与土壤肥力关系密切, 土壤有机质有助于促进团粒结构的形成, 保持土壤结构稳定性, 提高土壤透气性能和保水性能,

有利于水稻的生长及其对土壤养分的吸收^[42]。

该研究结果发现,虽然施用土壤结构改良剂显著增加了水稻秸秆和稻米全氮、全磷、全钾含量,但水稻根系全氮、全磷、全钾含量反而比CK处理有不同程度的下降,造成这一现象的原因可能与施用土壤结构改良剂后水稻根系生物量的显著增加带来的“稀释效应”有关。此外,水稻全生育期内对土壤养分的吸收及养分在水稻不同部位的转运是动态变化的,利用土壤结构改良剂修复重金属污染土壤时,改良剂除了能够缓解重金属对作物的毒害效应而促进作物生长和吸收养分外,还可能通过促进氮、磷、钾养分元素从水稻根系向地上部的转运来增加地上部养分含量,但其中的影响机理还不清楚。因此,有必要针对土壤结构改良剂对作物养分吸收、转运、累积的动态影响及其机理开展更深入的研究,以为重金属污染土壤治理修复过程中的养分管理和合理施肥提供科学参考。

3.2 土壤结构改良剂对土壤酶活性的影响

已有研究^[22,43]表明,土壤重金属含量过高会破坏酶的蛋白质空间结构,占据酶与底物结合的位点,导致酶活性下降,重金属还可以与酶分子的巯基、胺基和羧基的结合而抑制酶活性降低^[44]。魏玮等^[10]研究发现,施用PAA、PAM、PVA和HA显著降低了土壤中Cu、Cd的生物有效性,土壤有效态Cu、Cd含量显著下降,缓解了Cu、Cd的毒性,这可能是该研究中施用土壤结构改良剂后土壤酶活性出现不同幅度提升的原因之一,土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性与有效态Cu含量(r 分别为-0.81和-0.43, p 均小于0.05)和有效态Cd含量(r 分别为-0.77和-0.42, p 均小于0.05)间的显著负相关关系也证实了这一点。郭碧林等^[44]的外源Cd添加培养试验结果也发现,土壤过氧化氢酶和脲酶活性随着Cd添加浓度的增加而降低。该研究中,土壤脲酶和酸性磷酸酶活性与有效态Cu、Cd含量间没有显著相关性,而施用土壤结构改良剂后土壤脲酶和酸性磷酸酶活性均显著下降(见图3),说明土壤酶活性对重金属污染的响应不仅仅受重金属含量及有效性的影响。土壤微生物是土壤酶的主要来源,酶活性也直接关系到微生物对土壤中各种化学反应的影响程度^[45]。施用土壤结构改良剂对土壤微生物的生长和繁殖具有良好的刺激作用,可以通过提高土壤微生物量而间接提高土壤酶活性,其中的作用机理还有待于更深入的研究。

该研究也发现,施用PAA和HA后土壤脲酶活性较CK处理稍降低了3.27%~4.95%,但差异未达显

著水平。曲贵伟等^[46]利用聚丙烯酸盐修复重金属污染矿区土壤的研究也发现,施用聚丙烯酸铵和聚丙烯酸钾后土壤蔗糖酶、纤维素酶和酸性磷酸酶活性显著提高,而脲酶活性则显著下降。该研究中PAA和HA处理土壤脲酶活性的降低可能与土壤pH的下降有关,施用PAA和HA处理土壤pH显著低于CK处理^[10],而在一定pH范围内,土壤脲酶活性与土壤pH呈显著负相关^[36]。然而施用PVA和PAM后土壤pH没有显著变化,但土壤有效态Cu、Cd含量却显著下降,且土壤脲酶活性显著高于CK处理,说明该研究中pH可能不是影响土壤酶活性的主要因素。

作为高分子有机化合物,土壤结构改良剂施入土壤后提高了土壤有机质含量,并通过有机质的胶结作用有效改善土壤物理性状,为酶促反应创造更合适的环境条件,进而促进酶活性的提升。已有研究^[47]发现,施用土壤结构改良剂后土壤团聚体结构稳定性、保水能力及微生物群落结构都得到了显著改善,土壤酶活性也随之显著增加^[48-49],这可能是因为土壤结构和水分状况的改善为土壤微生物提供充足的氧气和水分,有利于其生命活动的进行,而土壤结构改良剂生物降解补充的有机碳也为酶反应提供充足的底物,进而促进酶活性的提高^[50-51]。土壤过氧化氢酶可以判断有机质的转化情况^[23],而蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶则参与土壤中碳、氮、磷的循环过程^[22]。该研究中土壤结构改良剂的施用显著提高了土壤速效氮、磷、钾养分含量(见图1),且土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性与土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量呈显著正相关(见表2),说明施用土壤结构改良剂后土壤酶活性的提升除了归功于土壤重金属有效性及毒性的显著下降外,土壤速效养分含量的增加也发挥着重要的作用,这是因为土壤酶活性大小受土壤有效养分含量的影响^[52]。袁访等^[38]利用生物炭培肥黄壤的田间试验结果发现,生物炭可以通过提高土壤有机碳、碱解氮、速效磷含量而间接增加土壤过氧化氢酶和磷酸酶活性。

综上,土壤结构改良剂在修复Cu、Cd污染土壤的同时也增加了土壤速效养分含量,而土壤养分有效性的变化间接提高了土壤酶的活性,加速了土壤中碳、氮、磷养分的循环转化过程,促进了水稻对土壤养分的吸收转运。土壤酶活性作为评价土壤重金属生态毒理效应的重要指标,其对重金属毒性的响应受多种土壤性质的影响。因此,未来在开展重金属污染土壤治理修复工作时,应加强对作物全生育期内土壤速效养分和酶活性的动态监测,尤其是从生理和分子角度

探讨酶活性、土壤养分有效性与作物养分吸收的相互影响机理,为重金属污染土壤治理修复过程中的土壤养分管理和合理施肥提供科学依据。

4 结论

a) 作为高分子有机化合物,聚丙烯酸(PAA)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)和腐殖酸(HA)等土壤结构改良剂的施用显著增加了土壤有机质含量,且增幅随土壤结构改良剂用量的增加而增大。

b) 施用土壤结构改良剂显著增加了土壤碱解氮和速效磷含量,但对速效钾含量的影响没有碱解氮和速效磷明显。土壤养分有效性的提升也促进了水稻对养分的吸收和转运,施用土壤结构改良剂后水稻根中氮、磷、钾含量有不同幅度的下降,而水稻秸秆和稻米中氮、磷、钾含量则显著增加。

c) 施用4种土壤结构改良剂均显著提高了土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性,施用PAM和PVA显著增加了土壤脲酶活性,而施用PAA和HA后土壤脲酶活性有轻微的下降。土壤酶活性与土壤有效态Cu、Cd含量呈显著负相关,而与土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量呈显著正相关。

参考文献(References):

- [1] 徐卫红,王宏信,王正银,等. 锌、镉复合污染对重金属蓄集植物黑麦草养分吸收及锌、镉积累的影响[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(1):70-74.
XU W H, WANG H X, WANG Z Y, et al. Effects of zinc, cadmium and their combined pollution on nutrient uptake and Zn, Cd accumulation in ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(1):70-74.
- [2] 张晶,王姣爱,党建友,等. 重金属 Cu、Zn 污染对小麦旗叶生理及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(11):229-233.
ZHANG J, WANG J A, DANG J Y, et al. Effects of heavy metals Cu, Zn pollution on yield and physiological of wheat flag leaves [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(11):229-233.
- [3] 赵其国,黄国勤,钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6):1127-1134.
ZHAO Q G, HUANG G Q, QIAN H Y. Ecological agriculture and food safety [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6):1127-1134.
- [4] 龙新宪,刘文晶,仇荣亮. 中国农田土壤重金属污染的人体健康风险评估:研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5):1188-1200.
LONG X X, LIU W J, QIU R L. Research progress and prospects of human health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5):1188-1200.
- [5] 王晓晶,张东明,曹阳,等. 钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果[J]. *环境科学*, 2024, 45(2):1098-1106.
WANG X J, ZHANG D M, CAO Y, et al. Safe utilization effect of passivator on mild to moderate cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2):1098-1106.
- [6] WU Y, LI J F, YAO D R, et al. Effects of organic and inorganic amendments on cadmium fraction in the submersion process of contaminated paddy soil [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 30:103105.
- [7] 张路,唐婵,余海英,等. 稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应[J]. *环境科学*, 2023, 44(3):1698-1705.
ZHANG L, TANG C, YU H Y, et al. *In-situ* remediation effect of cadmium-polluted agriculture land using different amendments under rice-wheat rotation [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3):1698-1705.
- [8] HUANG H, GE L, ZHANG X W, et al. Rice straw biochar and lime regulate the availability of heavy metals by managing colloid-associated- but dissolved-heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2024, 349:140813.
- [9] YUAN S N, ZHANG J Y, TAN Z X. *In-situ* passivation mechanism of modified silicate composite biochar on soil cadmium [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6):109007.
- [10] 魏玮,李平,郎漫. 不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(9):4462-4470.
WEI W, LI P, LANG M. Effects of different soil conditioners on rice growth and heavy metal uptake in soil contaminated with copper and cadmium [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9):4462-4470.
- [11] 朱咏莉,刘军,王益权. 国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6):140-142.
ZHU Y L, LIU J, WANG Y Q. Summary of soil structure conditioners utilization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6):140-142.
- [12] 苟春林,王新爱,李永胜,等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(19):4015-4021.
GOU C L, WANG X A, LI Y S, et al. Interaction between water retaining agent and nitrogen fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(19):4015-4021.
- [13] 陈晓佳,吕晓勇,麻万诸. 保水剂对肥料淋失和百喜草生长的影响[J]. *浙江农业科学*, 2004(3):130-131.
CHEN X J, LV X Y, MA W Z. Effect of water retaining agent on fertilizer leaching and growth of *Paspalum notatum* [J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2004(3):130-131.
- [14] SARKAR K, SEN K. Polyvinyl alcohol based hydrogels for urea release and Fe(III) uptake from soil medium [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(1):736-744.
- [15] 刘慧军,刘景辉,于健,等. 聚丙烯酸盐类土壤改良剂对燕麦土壤微生物量氮及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(1):25-31.
LIU H J, LIU J H, YU J, et al. Effect of soil amendment of polyacrylate on soil microbial biomass nitrogen and soil enzyme activity [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(1):25-31.
- [16] LIU D, HUANG Z B, MEN S H, et al. Nitrogen and phosphorus adsorption in aqueous solutions by humic acids from weathered

- coal:isotherm,kinetics and thermodynamic analysis[J].*Water Science and Technology*,2019,79(11):2175-2184.
- [17] BURNS R G,DEFOREST J L,MARXSEN J,et al.Soil enzymes in a changing environment:current knowledge and future directions [J].*Soil Biology and Biochemistry*,2013,58:216-234.
- [18] 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.
- [19] 周健,李春辉,张志永,等.淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 [J].*环境科学*,2018,39(1):130-136.
- ZHOU J,LI C H,ZHANG Z Y,et al.Effects of flooding and drying on the transformation of soil inorganic phosphorus in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir,China[J].*Environmental Science*,2018,39(1):130-136.
- [20] 鲁萍,郭继勋,朱丽.东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究 [J].*应用生态学报*,2002,13(6):675-679.
- LU P,GUO J X,ZHU L.Soil catalase activity of main plant communities in *Leymus chinensis* grassland in Northeast China[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*,2002,13(6):675-679.
- [21] SCHUTTER M E,DICK R P.Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil[J].*Soil Science Society of America Journal*,2002,66(1):142.
- [22] 刘娟,张乃明,于泓,等.重金属污染对水稻土微生物及酶活性影响研究进展 [J].*土壤*,2021,53(6):1152-1159.
- LIU J,ZHANG N M,YU H,et al.Effects of heavy metal pollution on microorganism and enzyme activity in paddy soil:a review[J].*Soils*,2021,53(6):1152-1159.
- [23] 杨志新,刘树庆.Cd、Zn、Pb 单因素及复合污染对土壤酶活性的影响 [J].*土壤与环境*,2000,9(1):15-18.
- YANG Z X,LIU S Q.Effects of single element and compound pollution of Cd,Zn and Pb on soil enzyme activities[J].*Soil and Environmental Sciences*,2000,9(1):15-18.
- [24] 谭向平,何金红,郭志明,等.土壤酶对重金属污染的响应及指示研究进展 [J].*土壤学报*,2023,60(1):50-62.
- TAN X P,HE J H,GUO Z M,et al.Research progresses on soil enzymes as indicators of soil health and their responses to heavy metal pollution[J].*Acta Pedologica Sinica*,2023,60(1):50-62.
- [25] 刁展.外源重金属对不同类型土壤养分及微生物活性的影响 [D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [26] 涂从,郑春荣,陈怀满.土壤-植物系统中重金属与养分元素交互作用 [J].*中国环境科学*,1997,17(6):526-529.
- TU C,ZHENG C R,CHEN H M.Advances on interaction of heavy metals and nutrient elements in soil-plant system[J].*China Environmental Science*,1997,17(6):526-529.
- [27] 李芙蓉,尹娇阳,于波,等.铜胁迫对苹果幼苗根际土壤养分、酶活性及微生物的影响 [J].*北方园艺*,2023(19):71-77.
- LI F R,YIN J Y,YU B,et al.Effects of copper stress on soil nutrients,enzyme activities and microorganisms in the rhizosphere of apple seedlings[J].*Northern Horticulture*,2023(19):71-77.
- [28] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [29] SPARKS D L.Methods of soil analysis[M].Madison,Wisconsin: Soil Science Society of America,1996.
- [30] 关松荫.土壤酶及其研究法 [M].北京:农业出版社,1986.
- [31] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法 [M].北京:科学出版社,2008.
- [32] 陈方鑫,卢少勇,冯传平.农业秸秆复合 PAM 对湖滨带土壤改良效果的研究 [J].*农业环境科学学报*,2016,35(4):711-718.
- CHEN F X,LU S Y,FENG C P.Improvements of soil in lakeside zones using combined crop straw and PAM[J].*Journal of Agro-Environment Science*,2016,35(4):711-718.
- [33] 彭丽成,黄占斌,石宇,等.环境材料对 Pb、Cd 污染土壤玉米生长及土壤改良效果的影响 [J].*中国生态农业学报*,2011,19(6):1386-1392.
- PENG L C,HUANG Z B,SHI Y,et al.Effects of environmental materials on maize growth and soil remediation of Pb and Cd contaminated soils[J].*Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2011,19(6):1386-1392.
- [34] 张艳艳,唐泽军.PAM 调控土壤养分元素迁移与流失试验研究 [J].*水土保持通报*,2017,37(4):33-39.
- ZHANG Y Y,TANG Z J.Regulation and control of PAM on vertical transport and leaching loss of soil nutrient[J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*,2017,37(4):33-39.
- [35] 邢世和,刘春英,熊德中,等.不同改土物料对烤烟养分吸收及碳、氮代谢的影响 [J].*植物营养与肥科学报*,2006,12(5):694-700.
- XING S H,LIU C Y,XIONG D Z,et al.Effect of different soil amelioration materials on nutrient uptake and the metabolism of carbon and nitrogen of tobacco[J].*Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2006,12(5):694-700.
- [36] 林天.旱地红壤中土壤酶对施肥与养分状况的响应 [D].北京:中国科学院研究生院,2004.
- [37] 柳开楼,韩天富,胡惠文,等.红壤旱地玉米开花期土壤酶活性对长期施肥的响应 [J].*植物营养与肥科学报*,2018,24(6):1610-1618.
- LIU K L,HAN T F,HU H W,et al.Response of soil enzyme activity in flowering stages of maize to long-term fertilization in red soil[J].*Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2018,24(6):1610-1618.
- [38] 袁访,李开钰,杨慧,等.生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 [J].*环境科学*,2022,43(9):4655-4661.
- YUAN F,LI K Y,YANG H,et al.Effects of biochar application on yellow soil nutrients and enzyme activities[J].*Environmental Science*,2022,43(9):4655-4661.
- [39] 农传江,王宇蕴,范茂攀,等.含 2 种不同添加剂的有机肥对生菜生长和养分吸收利用的影响 [J].*西南农业学报*,2016,29(1):143-147.
- NONG C J,WANG Y Y,FAN M P,et al.Effect of different additives organic fertilizer on fertilizer use efficiency and growth

- of lettuce[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016,29(1):143-147.
- [40] 刘红恩,张胜男,刘世亮,等.腐植酸尿素对冬小麦产量、养分吸收利用和土壤养分的影响[J].西北农业学报,2018,27(7):944-952. LIU H E,ZHANG S N,LIU S L,et al.Effect of humic acid urea on grain yield,nutrient uptake and utilization and soil nutrient of winter wheat[J].Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018,27(7):944-952.
- [41] 戴竞雄,王飞.长期施肥对南方黄泥田水稻养分吸收利用的影响[J].中国土壤与肥料,2020(6):189-196. DAI J X,WANG F.Effects of long-term fertilization on nutrient uptake and utilization of rice in yellow-mud paddy soils in Southern China[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2020(6): 189-196.
- [42] ALBALASMEH A A,HAMDAN E H,GHARAIBEH M A,et al. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer[J].Soil and Tillage Research,2021,206:104821.
- [43] TANG B,XU H P,SONG F M,et al.Effects of heavy metals on microorganisms and enzymes in soils of lead-zinc tailing ponds[J]. Environmental Research,2022,207:112174.
- [44] 郭碧林,陈效民,景峰,等.外源 Cd 胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(9):1850-1855. GUO B L,CHEN X M,JING F,et al.Effects of exogenous cadmium on microbial biomass and enzyme activity in red paddy soil[J].Journal of Agro-Environment Science,2018,37(9):1850-1855.
- [45] 张涵,贡璐,刘旭,等.氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性[J].环境科学,2021,42(1):403-410. ZHANG H,GONG L,LIU X,et al.Soil enzyme activity in *Picea schrenkiana* and its relationship with environmental factors in the Tianshan Mountains,Xinjiang[J].Environmental Science,2021, 42(1):403-410.
- [46] 曲贵伟,Amarilis de Varennes,依艳丽.聚丙烯酸盐对长期重金属污染的矿区土壤的修复研究(II):对土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(4):653-657. QU G W,VARENNE A,YI Y L.The effect of insoluble polyacrylate polymers on plant growth and soil quality in a long-term heavy metal contaminated mine soil(II):the number of microbial and soil enzymatic activity[J].Journal of Agro-Environment Science,2009,28(4):653-657.
- [47] TIAN X M,FAN H,WANG J Q,et al.Effect of polymer materials on soil structure and organic carbon under drip irrigation[J]. Geoderma,2019,340:94-103.
- [48] ÖZTÜRK H S,TÜRKMEN C,ERDOĞAN E,et al.Effects of a soil conditioner on some physical and biological features of soils: results from a greenhouse study[J].Bioresource Technology,2005, 96(17):1950-1954.
- [49] 高转琴,王丹,牛灵安,等.冀南平原盐渍化改造区土壤过氧化氢酶活性变化研究[J].土壤通报,2019,50(6):1434-1441. GAO Z Q,WANG D,NIU L A,et al.Soil catalase activities in salinized rehabilitation area of the southern Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science,2019,50(6):1434-1441.
- [50] 易轩韬,欧阳坤,辜娇峰,等.谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应[J].环境科学,2024,45(3):1793-1802. YI X T,OUYANG K,GU J F,et al.Effect of silica fertilizer (husk ash) to improve soil quality and reduce Cd and As accumulation in rice[J].Environmental Science,2024,45(3):1793-1802.
- [51] LIU L P,LONG X H,SHAO H B,et al.Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province,China [J].Ecological Engineering,2015,81:328-334.
- [52] SARFRAZ R,SHAKOOR A,ABDULLAH M,et al.Impact of integrated application of biochar and nitrogen fertilizers on maize growth and nitrogen recovery in alkaline calcareous soil[J].Soil Science and Plant Nutrition,2017,63(5):488-498.

(责任编辑:周巧富)