

颗粒状白酒污泥对土壤养分及重金属含量的影响

张鹏¹, 吴永贵^{1,2,3}, 鲁鸿霈¹, 李夏琳¹, 袁佳艺¹, 梁婉⁴, 马幸⁴

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省劣境生态修复技术工程研究中心, 贵州 贵阳 550025; 4. 上海国惠环境科技股份有限公司, 上海 201100)

摘要: [目的] 分析白酒废水污泥施用于辣椒栽培后对土壤肥力、作物产量及重金属含量的影响, 为白酒废水污泥高效资源化利用提供理论参考。[方法] 基于白酒废水污泥富含氮磷钾, 重金属含量低的特性, 通过造粒工艺优化其性状。以辣椒为试验植物, 根据辣椒产量计算当地辣椒需肥量分别按 1 500~6 000 kg/hm² 的量将颗粒状白酒污泥施于盆栽辣椒土壤, 并以未施用白酒污泥(CK)和施用普通复合肥(F)为对照。[结果] ① 6 000 kg/hm² 的处理(W₄)综合效果最佳, 土壤 pH 值、电导率(EC)分别比对照(CK)提高了 7.37%, 59.21%; 土壤有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、碱解氮(AN)、铵态氮(NH₄⁺-N)以及硝态氮(NO₃⁻-N)含量分别提高 72.73%, 93.28%, 62.24%, 24.08%, 63.40% 和 14.91%; ② 不同处理土壤重金属含量均远低于标准限值并达到 I 类标准, 且处理后土壤中 Fe 含量、Al 含量较低不易导致土壤酸化板结; ③ 施用颗粒状白酒污泥明显促进辣椒生长, 其中 W₄ 处理的辣椒株高和叶绿素含量分别比 CK 增加 68.84%, 65.48%, 辣椒产量也最高(达 33 180 kg/hm²)。[结论] 施用颗粒状白酒污泥可显著改善土壤理化性质, 明显提升土壤肥力并有效促进辣椒的生长。

关键词: 白酒污泥; 颗粒状肥; 土壤养分; 土壤理化性质; 土壤重金属

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0035-10

中图分类号: S156.2, X131.3

文献参数: 张鹏, 吴永贵, 鲁鸿霈, 等. 颗粒状白酒污泥对土壤养分及重金属含量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 35-44. Zhang Peng, Wu Yonggui, Lu Hongpei, et al. Effects of granular Baijiu sludge on soil nutrients and heavy metal contents [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 35-44. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.038; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.038.

Effects of granular Baijiu sludge on soil nutrients and heavy metal contents

Zhang Peng¹, Wu Yonggui^{1,2,3}, Lu Hongpei¹, Li Xialin¹, Yuan Jiayi¹, Liang Wan⁴, Ma Xing⁴

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Karst Environmental Ecosystems Observation and Research Station, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Guizhou Hostile Environment Ecological Restoration Technology Engineering Research Centre, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 4. Shanghai Guohui Environmental Technology Group Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: [Objective] The influence of applying Baijiu wastewater sludge to pepper cultivation on soil fertility, crop yield, and heavy metal content is analyzed, providing a theoretical reference for the efficient resource utilization of Baijiu wastewater sludge. [Methods] Based on the characteristics of Baijiu wastewater sludge being rich in nitrogen, phosphorus, and potassium with low heavy metal content, its properties were optimized through granulation. Pepper was selected as the test plant. Granulated Baijiu wastewater sludge was applied to potted pepper soil at rates of 1 500—6 000 kg/hm² based on the local nutrient requirements calculated from pepper yield. Controls included soil with no Baijiu sludge application (CK) and soil with conventional compound fertilizer (F). [Results] ① The treatment of 6 000 kg/hm² (W₄) demonstrated the best comprehensive effect. Compared to CK,

收稿日期: 2025-05-24

修回日期: 2025-07-03

采用日期: 2025-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“黔西南汞铊尾矿中汞砷铊的释放迁移及其原位化学—生物耦合阻控机制”(521600132); 贵州省高层次创新人才培养计划项目(黔科合平台人才[2020]6002-2); 国惠集团—贵州大学技术研发项目(惠[2018]0801)

第一作者: 张鹏(2000—), 男(布依族), 贵州省黔南州人, 硕士研究生, 研究方向为环境污染效应与控制。Email: 1946164171@qq.com。

通信作者: 吴永贵(1972—), 男(汉族), 贵州省毕节市人, 博士, 教授, 主要从事污染生态效应、污染生态控制与环境生态修复方面的研究。Email: ygwu72@126.com。

it increased soil pH and electrical conductivity (EC) by 7.37% and 59.21%, respectively. Soil organic matter (OM), available phosphorus (AP), available potassium (AK), alkaline nitrogen (AN), ammonium nitrogen (NH_4^+-N), and nitrate nitrogen (NO_3^--N) increased by 72.73%, 93.28%, 62.24%, 24.08%, 63.40%, and 14.91%, respectively. ② The heavy metal contents in soil under different treatments were far below the standard limits and met class I standards. Furthermore, the contents of iron (Fe) and aluminum (Al) in the treated soil were relatively low, making soil acidification and compaction unlikely. ③ Application of granular Baijiu sludge significantly promoted pepper growth. Specifically, the W_4 treatment increased plant height and chlorophyll content by 68.84% and 65.48%, respectively, compared to CK, and the pepper yield was the highest, reaching 33 180 kg/hm². [Conclusion] Application of granular Baijiu sludge can significantly improve soil physicochemical properties, markedly enhance soil fertility, and effectively promote pepper growth.

Keywords: Baijiu sludge; granular fertilizer; soil nutrients; soil physicochemical properties; soil heavy metals

白酒产业是贵州省的传统优势产业,到2025年末贵州省白酒产业总产值达到2 500亿元^[1],而在白酒产能迅速增加的同时也将产生大量的白酒废水污泥(以下简称“白酒污泥”)。据统计,每生产1 t 65°(酒精度数)的白酒约耗水60 t,产生白酒废水48 t,而污泥产量约为白酒废水量的3%^[2],由此可预见,白酒污泥产量大且处置也将更为困难。将白酒污泥进行土地利用时,由于其含有较高浓度的养分(盐分),在施用于土壤时会因污泥中养分N、P、K等流失速率过快而导致其对土壤和地下水的污染。尤其是在土壤盐分急剧上升后对植物产生肥害和盐害而导致植物枯萎死亡^[3];同时,由于白酒污泥中含有大量聚合氯化铝或聚合氯化铁或聚丙烯酰胺等絮凝剂,如直接施用或施用过多,易造成严重的土壤板结问题^[4];加上白酒污泥中易腐有机质(OM)含量高,含水率高等特性,不仅导致污泥易发生腐解而滋生大量病原微生物,且在腐解耗氧后易导致局部高温烧根烧苗而使植物根系缺氧发黑死亡,因此白酒污泥如果不经处理而直接施用或施用量不当,均会对环境、土壤及植物造成严重的负面影响^[5]。为此,在对白酒污泥土地利用前通常需经一定处理以抑制其对土壤造成的负面影响^[6]。白酒废水污泥中富含OM、N、P、K等营养元素及多种微量元素,与一般城市污泥相比,重金属含量及有毒有害物质相对较低^[7],各重金属含量均远低于《农用污泥污染物控制标准(GB 4284—2018)》中A级污泥产物的污染物浓度限值,具有突出的农用潜力。如继续使用传统的焚烧和填埋等传统处理方法,将会严重浪费宝贵的肥力资源^[8]。

近年来,已有多项研究对白酒污泥的资源化利用展开探索。Kaira等^[9]使用季节性批次的酿酒厂污泥进行一系列生化甲烷潜力测试,在不同的接种物与基质比例和温度下添加和不添加选定的微量营养

素(Co, Cu, Ni)后发现它具有高浓度的N和C及所有必需微量营养素而适合作为农业肥料。Marcos等^[10]将两种废蘑菇基质和葡萄酒厂污泥以1:1:2的比例进行堆肥,发现堆肥产物电导率(EC)和养分含量显著提升,可用于植物栽培。Mishra等^[11]研究表明,施用量为3 t/hm²的白酒污泥改良土壤最有利于甘蔗生长。卢雨霞^[12]将白酒污泥与刺梨果渣按3:1堆肥后种植小白菜可显著提高蔬菜产量。李哲^[13]、李文洪^[14]则将白酒污泥制成有机肥,实现了资源化;亦有研究将其转化为生物炭,用于吸附水溶液中的亚甲基蓝^[15]。总体来看,白酒污泥在土地利用方面展现出极高的潜力,然而传统堆肥法周期长,占地广,易造成养分流失及氨、硫化氢等恶臭气体无组织排放,亟需发展高效、低耗、环保的新型处置工艺。

本研究拟以贵州酱香型白酒污泥为对象,探讨其安全高效资源化利用策略,旨在在解决污泥处置难题的同时,高效满足特色农作物植株生长发育的营养需求,有效改善土壤理化性质与肥力,并协同抑制土壤板结、养分流失及环境污染问题。为此,将白酒污泥以10:1比例与米糠混合均匀后进行直接快速挤压造粒工艺制备成颗粒状白酒污泥,分别按1 500~6 000 kg/hm²的量施于盆栽辣椒土壤,并以未施用白酒污泥和传统施用的普通复合肥为对照,综合运用主成分分析及Pearson相关性分析,系统评估不同处理对土壤理化性质(pH, EC);土壤养分含量(土壤总碳TC,总氮TN,总磷TP,总钾TK,有机质OM,有效磷AP,速效钾AK,碱解氮AN,铵态氮 NH_4^+-N ,硝态氮 NO_3^--N);土壤重金属(Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, As, Cd);土壤碱金属及碱土金属(K, Na, Mg)含量;土壤Fe, Al含量和辣椒的生长生理指标(株高和叶绿素)及辣椒产量的影响,相关研究结果将为白酒污泥的安全高效资源化利用及辣椒高产优质种植提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与制备

白酒污泥取自贵州省仁怀市某酱香型白酒酒厂中的污水处理厂(其理化性质及重金属含量详见表1)。将污泥自然风干后用破碎机进行粉碎,以重量比1:10的比例将米糠加入污泥后加入适量水进行混合搅拌均匀,将其缓慢倒入磨盘孔径为8 mm的挤压式造粒机中制得颗粒状白酒污泥(肥)。辣椒(*Capsicum*)品种为“红耀小米辣”,辣椒苗由贵州省龙里县湾滩河镇蔬菜基地提供。

表1 白酒污泥理化性质及重金属含量
Table 1 Physicochemical properties and heavy metal contents of Baijiu sludge

理化指标	数值	重金属	含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
pH值	7.57±0.22	As	4.36±1.02
电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	20.10±0.21	Cd	0.16±0.05
含水率/%	78.00±2.50	Cr	35.58±4.35
有效氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	242.26±18.6	Cu	28.6±2.84
有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	162.00±12.50	Pb	3.56±1.20
有效钾/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	288.60±5.61	Zn	180.8±20.9
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	526.84±12.45	Fe	7 486±340

注:数值为平均值±标准误。下同。

1.2 试验方案及操作步骤

将制得的颗粒状白酒污泥放入直径为19 cm,高度为30 cm的塑料种植盆中,每盆放入5 kg土壤(相关理化性质及重金属含量详见表2),白酒污泥颗粒埋深5—8 cm后作为底肥(基肥),随后种植辣椒。

各处理及试验代号如下:对照组(CK),污泥颗粒1 500 kg/hm^2 (W_1),污泥颗粒3 000 kg/hm^2 (W_2),污泥颗粒4 500 kg/hm^2 (W_3),污泥颗粒6 000 kg/hm^2 (W_4),传统施用的普通复合肥(N:P:K为20%:10%:10%)900 kg/hm^2 (F),以上各处理分别设置3个平行。辣椒盆栽试验于2024年5月14日开始移栽种植,2024年8月21日采集第1批成熟辣椒样品检测品质指标,辣椒产量为多次分批测产,分别于8月21日、9月5日、9月18日、10月10日分4批次将成熟辣椒采摘,土壤样品采集于10月10日辣椒收获完成。

1.3 测试方法

土壤样品采用五点取样法,在各盆栽采集0—19 cm土壤并分为两部分,一部分新鲜土保存在-4 °C冰箱中,备用于 NH_4^+-N 以及 NO_3^--N 含量的后续检测,另一部分则经自然风干和过筛后用于其他土壤理化指标测定。将土-水以1:2.5混合振荡

30 min后,采用电极法测定悬浮液的pH值和电导率(EC);土壤OM的测定采用低温重铬酸钾比色法,该方法采用重铬酸钾和硫酸的混合物氧化土壤样品;碱解扩散法测定AN,该原理是NaOH释放后被 H_3BO_3 吸收;在pH值为8.5的 NaHCO_3 溶液中提取AP,采用钼锑抗比色法测定磷含量;AK使用醋酸铵浸提法测量,随后使用耦合等离子体光学发射光谱法(ICP-OES, Thermo-Scientific iCAP 7000系列ICP光谱仪,美国)进行定量;准确称取土壤0.1 g加入1 ml浓盐酸和4 ml浓硝酸,1 ml氢氟酸,将消解管放在电热板上消解,温度为175 °C,待消解完全后使用耦合等离子体光学发射光谱法(ICP-OES, Thermo-Scientific iCAP 7000系列ICP光谱仪,美国)分析土壤中金属(Fe, Al, Mg, K和Na)及重金属含量(Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, As, Cd)。 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定,根据土壤和KCl按1:10比例进行提取(最低检出限为0.01 mg/kg)。

表2 试验用土的理化性质及重金属含量
Table 2 Physicochemical properties and heavy metal contents of tested soil

理化指标	数值	重金属	含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
pH值	6.59±0.18	Cr	35.80±1.25
电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	98.00±3.10	Cu	4.98±0.33
有效氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	75.63±1.90	Zn	18.85±3.14
有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	21.94±0.35	Pb	5.31±0.58
有效钾/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	120.23±10.70	Cd	1.08±0.05
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	18.03±0.27	As	2.59±0.16

对采收的所有辣椒用电子天平称量质量并计算产量,叶绿素(SPAD)含量用(SPAD-502)测量仪测定,采用卷尺测量植株株高。

1.4 数据处理

采用Excel 2024及SPSS 27.0软件对试验数据进行分析处理,采用单因素方差分析法对显著性差异分析。在方差分析显示 $p<0.05$ 时,使用最小显著性差异检验来区分平均值。采用Origin 2021进行相关性分析作图。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对土壤pH和电导率的影响

土壤pH值可直接影响养分的存在状态、微生物活动以及土壤养分的释放。施用颗粒状白酒污泥替代传统施用的普通复合肥后土壤的pH值有明显提升(表3),与CK相比, W_2 , W_3 , W_4 处理组土壤pH值分别提高4.98%~7.37%,与F相比, W_2 , W_3 , W_4 处理

组土壤 pH 值分别提高了 2.54%~9.71%。这说明颗粒状白酒污泥施用量低于 3 000 kg/hm²时土壤的 pH 值反而会降低,而施用复合肥则明显会使土壤酸化。随着颗粒状白酒污泥施用量的增加土壤 pH 值呈上升趋势,原因可能是白酒污泥中的 N 大部分以有机氮形态存在,土壤中的微生物在将部分有机氮转化为 NH₄⁺-N 时呈碱性而使 pH 值逐渐升高^[16]。F 处理土壤 pH 值低于 CK 处理,原因可能是复合肥本身含有一些强酸弱碱性物质或生理酸性物质(硫酸铵等),施入土壤后会直接释放酸性物质或经植物选择性吸收后降低了土壤 pH 值^[17];而 W₁ 组 pH 值下降的原因则可能是白酒污泥养分释放过程中,有机物的分解和微生物的代谢活动会产生一些有机酸和无机盐导致 pH 值有所下降^[18]。

土壤的 EC 值可代表土壤中电解质或水溶性矿物质的多少,也能直接反应土壤的养分状况及盐度。试验结果表明,与不施用任何肥料的 CK 相比,随着颗粒状白酒污泥施用量的增加土壤的 EC 值会显著升高,各处理 EC 大小顺序为:W₄>W₂>W₃>W₁>F>CK,其中 W₄ 处理的 EC 最高(为 546.68±25.17 μS/cm)。F 处理的土壤 EC 增加幅度要显著小于施颗粒状白酒污泥处理(*p*<0.05),当颗粒状白酒污泥施用量为 6 000 kg/hm²时,土壤的 EC 显著高于其他处理。EC 的上升是因为白酒污泥中含有大量水溶性矿物养分或电解质而导致土壤 EC 上升^[19],表明施用颗粒状白酒污泥可显著增加土壤中的水溶性矿物养分,并可通过土壤盐平衡溶液的作用有助于减轻土壤中碱金属导致的盐碱化或单一盐分的盐害风险。

表 3 不同白酒污泥颗粒施用量对土壤 pH 值和电导率的影响
Table 3 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on soil pH value and electrical conductivity

组别	pH 值	电导率(μS·cm ⁻¹)
CK	5.91±0.033 ^c	223.59±6.56 ^e
F	5.76±0.032 ^d	256.86±4.16 ^d
W ₁	5.86±0.061 ^{cd}	286.19±7.81 ^e
W ₂	6.22±0.052 ^b	378.33±4.41 ^b
W ₃	6.25±0.048 ^b	364.67±5.33 ^b
W ₄	6.38±0.043 ^a	546.67±14.53 ^a

注:不同小写字代表各处理间在 0.05 水平上具有显著水平。下同。

2.2 不同处理对土壤有效养分的影响

土壤中的矿物养分的种类和数量及生物有效性是土壤质量的重要指标,试验结果表明施用颗粒状白酒污泥后土壤中 N、P、K 及有机质等各种有效养分

含量会得到显著提升(图 1)。各处理土壤 NH₄⁺-N 含量大小顺序为:W₄>W₂>F>W₃>W₁>CK, W₂ 大于 W₃ 的原因可能是 3 000 kg/hm² 施用量可能会使土壤环境相对稳定,微生物的分解效率可能相对较高,F 处理 NO₃⁻-N 含量最高(为 25.6±1.68 mg/kg)。施用颗粒状白酒污泥处理中 NH₄⁺-N 含量明显大于 NO₃⁻-N 含量,一方面是 NH₄⁺-N 带正电荷比 NO₃⁻-N 带负电荷更容易被固持^[20],另一方面是植物体优先利用土壤中的 NO₃⁻-N^[21],并在养分释放过程中延缓了 NH₄⁺-N 的硝化作用,并且有研究发现在土壤的硝化作用易受到温度、湿度、等多种因素的影响,例如在低温时硝化细菌的活性受到抑制,硝化作用减弱使得 NO₃⁻-N 生成量减少^[22]。

土壤中 F 处理的 AN 含量最高(为 400.67±61.79 mg/kg);与 CK 相比,颗粒状白酒污泥施用后使土壤的 AN 含量升高,但均小于复合肥,原因可能是化学肥料中通常含有较高浓度的氮素,这些氮素释放到土壤中提高了土壤中的 AN 含量^[23];也可能是白酒污泥中的氮素主要以有机氮的形式存在,需通过微生物的矿化作用转化为无机氮,而这一过程相对较慢,因此颗粒状白酒污泥对土壤 AN 的贡献可能不如直接施用复合肥迅速和显著^[24]。

各处理土壤中 W₂ 处理 AP 含量最高(为 62.24±4.8 mg/kg),与 CK 相比提高 47.20%~93.28%,且发现当施用量超过 3 000 kg/hm² 后,土壤 AP 含量开始下降,原因可能是过多的磷会超出土壤的吸附溶解平衡范围,土壤中的铁、铝、钙等元素会与磷发生化学反应,形成难溶性的磷酸盐,如磷酸铁、磷酸铝和磷酸钙等,这些物质不易被植物直接吸收利用,导致土壤有效磷含量下降^[25]。施用颗粒状白酒污泥处理中土壤 AK 的含量与 CK 相比提高 57.92%~62.24%,其中 W₂ 处理 AK 含量最高(为 154.02±3.26 mg/kg),当施用量超过 3 000 kg/hm² 时,土壤 AK 含量出现下降的情况,原因可能是当施用量过大时,土壤中的钾离子浓度过高,超过了黏土矿物的吸附平衡,更多的钾离子被固定在矿物表面,减少了土壤溶液中的有效钾含量。随着施用量的增加,土壤 AP、AK 的含量呈现不断增加趋势且显著大于 F 和 CK,原因是白酒污泥中含有的 N、P、K 等养分,在施用到土壤后,可通过微生物的作用逐渐释放出来供植物吸收利用^[26]。

随着颗粒状白酒污泥施用量的增加,土壤中 OM 含量逐渐增加且大于复合肥的效果,W₄ 处理 OM 含量最高(为 40.59±2.32 mg/kg)。因为白酒污泥本身富含有机物,如残余的酿酒原料颗粒、微生物代谢产

物以及一些未完全降解的有机残渣等,施入土壤后,这些有机物直接增加了土壤中的有机质含量。此外,污泥中的有机组分复杂多样,包括多糖、蛋白质、

脂肪酸等有机化合物,它们进入土壤后可以以不同的形式被土壤吸收和储存,从而提高土壤有机质含量^[27]。

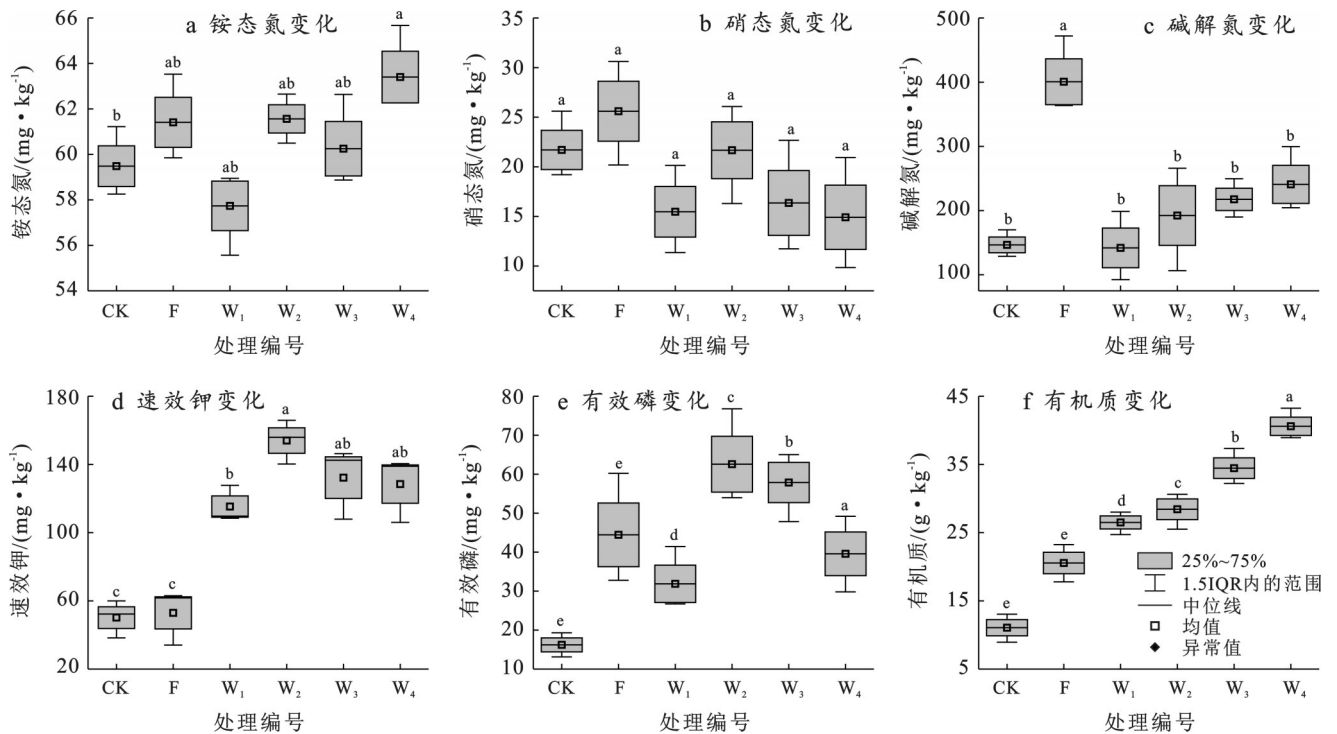


图1 不同白酒污泥颗粒施用量对土壤养分的影响

Fig.1 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on soil nutrients

2.3 不同处理对土壤中矿物元素总量及重金属的影响

施用颗粒状白酒污泥后,土壤中总磷(TP),总碳(TC),总氮(TN)含量显著高于CK(图2),且W₄处理的土壤TC含量最高(为 2.31 ± 0.03 g/kg),与CK相比提高了42.14%~52.17%。W₄的TN及TK含量最高且与其他处理均存在显著差异($p < 0.05$)。进一步分析发现,白酒污泥中OM和N,P的增加对土壤养分有显著影响,而对K的影响较小;TP含量除W₄,W₃外,其他处理无显著差异($p > 0.05$),表明颗粒状白酒污泥的施用量在 $4\ 500$ kg/hm²以下时,施用颗粒状白酒污泥与普通复合肥对土壤TP含量的影响并不明显,当颗粒状白酒污泥施用量超过 $4\ 500$ kg/hm²时,更有利于提高土壤的TP含量。

土壤中的Fe和Al的累积是土壤不断酸化和板结的重要影响因素^[28]。施用颗粒状白酒污泥后,土壤中Fe含量($4.25\sim 6.66$ g/kg)在CK与其他处理组之间无显著差异($p > 0.05$)(表4);土壤中Al含量随各处理随着颗粒状白酒污泥施用量的提高而呈下降趋势,且W₄处理最低(为 1.23 ± 0.14 g/kg),这一现象归因于白酒污泥本身含有一定的碱性物质,施入土壤后可以中和土壤中的酸性成分,提高土壤的pH

值,随着土壤pH值的上升,铝的溶解度降低,部分溶解态的铝会转化为沉淀态或被土壤胶体吸附,从而减少了土壤中可溶性铝的含量。这一试验结果表明颗粒状白酒污泥施用后不会对土壤产生酸化板结的负面作用。

土壤中碱金属(Na,K)和碱土金属(Mg)的累积是土壤是否会盐碱化或盐渍化的重要指标。施用颗粒状白酒污泥后土壤中Mg含量显著低于F处理和CK($p < 0.05$)。W₄处理的Mg含量最低,F处理最高。一方面是颗粒状白酒污泥本身含Mg较低且由于稀释效应降低了土壤中Mg含量,另一方面也与复合肥中含有一定钙镁磷肥后带入Mg有关。对Na而言,除W₂处理外,其余处理与CK中Na存在显著差异($p < 0.05$),其中W₄土壤中Na含量最高(为 707.17 ± 31.55 mg/kg),说明颗粒状白酒污泥施用量如果过高,会因Na的累积而对土壤产生一定的次生盐渍化风险,不过对南方多雨地区因Na易于被大量天然降雨冲洗淋失估计不会严重,但对保护地(大棚)栽培而言会有加重趋势^[29],其具体的累积规律或消长趋势尚需进一步深入对比研究。

土壤重金属的种类和数量是影响土壤安全和食品安全的重要指标,对不同处理下土壤重金属含量

检测结果表明(表 5),Cr,Cu,Zn,Pb 的平均含量分别为 33.78,2.22,19.53,4.51 mg/kg,且 Ni,As,Cd 元素检测含量小于 ICP 的检出限 0.01 mg/kg。对比《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)》中重金属含量的要求可知,各处理的重金属含量均远低于标准限值且达到 I 类标准(土

壤质量基本保持自然背景水平),表明施用颗粒状白酒污泥与普通复合肥均不会对土壤造成重金属污染。研究发现,辣椒根系分泌的多种有机物对土壤中重金属等起到螯合固定和积累作用,同时也限制它们向植物体内输送^[30],这使种植辣椒后的农产品安全得到充分保障。

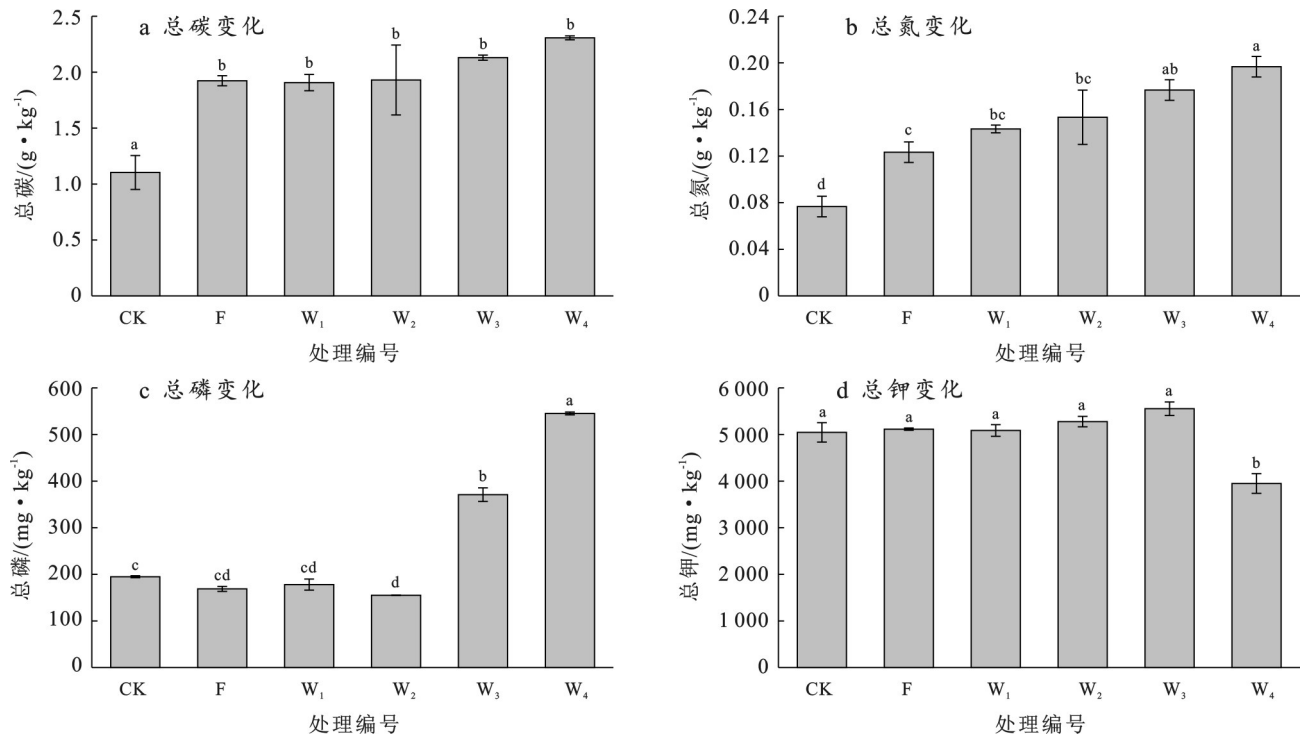


图 2 不同白酒污泥颗粒施用量对土壤环境的影响

Fig.2 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on soil environment

表 4 不同白酒污泥颗粒施用量对土壤中常量金属含量的影响

Table 4 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on conventional metal content in soil

组别	Al 含量/(g·kg ⁻¹)	Fe 含量/(g·kg ⁻¹)	Mg 含量/(mg·kg ⁻¹)	Na 含量/(mg·kg ⁻¹)
CK	2.11±0.10 ^a	5.32±0.15 ^{ab}	128.42±16.40 ^a	325.42±14.01 ^b
F	2.23±0.15 ^a	6.66±0.14 ^a	138.92±9.15 ^a	235.50±10.35 ^d
W ₁	2.11±0.25 ^a	5.19±0.14 ^{ab}	74.42±6.65 ^{bc}	147.00±19.32 ^c
W ₂	1.57±0.07 ^b	5.90±0.15 ^{ab}	60.92±4.35 ^c	304.33±26.98 ^{bc}
W ₃	1.37±0.15 ^b	4.25±0.14 ^b	85.75±5.29 ^b	264.17±22.75 ^{cd}
W ₄	1.23±0.14 ^b	4.52±0.14 ^b	57.58±8.46 ^c	707.17±31.55 ^a

注:不同小写字代表各处理间在 0.05 水平上具有显著水平。下同。

2.4 不同处理对辣椒生长和产量的影响

不同处理对辣椒生长和产量有明显的影响(表 6),各处理中 W₄ 的最高。与 CK 相比,显著提高了 54.05%~68.86% ($p < 0.05$),施用颗粒状白酒污泥对辣椒的生长起到了一定的促进作用,对辣椒产量的提高显著大于 F 处理和 CK,且对辣椒的生长、光合作用、株高产生了有利影响。根据 Pearson 相关性分析,辣椒的产量与土壤中 AK,AP,OM,TN 等养分相关性高 ($p < 0.05$),说明污泥中的这些养分对植物产

量的提高有重要作用。然而考虑到运输及施用成本与经济效益的“费效比”,颗粒状白酒污泥不同施用量对辣椒产量影响并不显著在保证产量提升的前提下以 W₁ 组为最佳。

不同处理对辣椒株高的影响具有明显差异(图 3),各处理辣椒株高在 31.7~52.3 cm,其中以 CK 最低而 W₂ 最高,与 CK 组相比提高了 31.16%~39.49%。从 Pearson 相关性分析的结果发现,AK 含量与 SPAD、株高之间的相关性极高 ($p < 0.01$),说明白酒污泥中

AK 能有效促进辣椒 SPAD 和株高的提升。结果表明施用颗粒状白酒污泥能有效促进辣椒株高的增加,施用量为 3 000 kg/hm²时效果最明显。各处理中 W₁组的叶绿素 SPAD 值最高而 CK 最低,在施用颗粒状白酒污泥处理之间的 SPAD 值差异并不显著($p >$

0.05),与 CK 相比提高了 32.99%~34.52%,且都显著高于 F 处理组,施用颗粒状白酒污泥后可改善植物叶片的生理活性,土壤理化性质的改善、土壤肥力的增强、土壤微生物数量和活性的增加以及土壤持水能力的提高都与之有关。

表 5 不同白酒污泥颗粒施用量对土壤中重金属含量的影响
Table 5 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on heavy metal contents in soil

组别	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
CK	32.50±1.52	2.83±0.33	17.17±2.55	4.25±0.57	—	—	—
F	42.83±2.83	2.50±0.12	18.33±1.96	4.83±0.35	—	—	—
W ₁	32.33±3.05	2.17±0.24	23.42±3.45	4.67±0.61	—	—	—
W ₂	40.75±2.16	3.00±0.36	20.42±3.68	4.67±0.58	—	—	—
W ₃	26.17±1.28	1.42±0.18	17.08±2.67	3.67±0.40	—	—	—
W ₄	28.08±2.36	1.42±0.20	20.75±1.96	5.00±0.69	—	—	—
平均值	33.78±2.20	2.22±0.30	19.53±2.71	4.51±0.53	—	—	—
GB 15618—2018	<90	<35	<100	<35	<40	<15	<0.2

注:“—”表示检测含量低于检出限 0.01 mg/kg。

表 6 不同白酒污泥颗粒施用量对辣椒产量的影响
Table 6 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on pepper yield

组别	产量/(kg·hm ⁻²)
CK	10 333.80±536.7
F	10 815.30±699.45
W ₁	29 380.95±1 960.64
W ₂	22 487.85±1 720.5
W ₃	32 974.35±1 537.2
W ₄	33 185.70±2 648.4

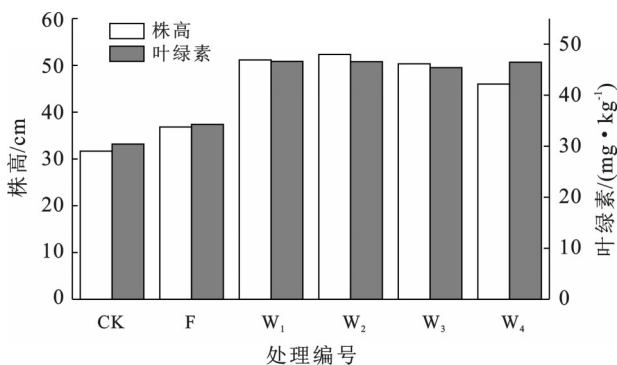


图 3 不同白酒污泥颗粒施用量对辣椒株高的影响
Fig.3 Influence of different application rates of Baijiu sludge granules on pepper plant height

2.5 Pearson 相关性分析

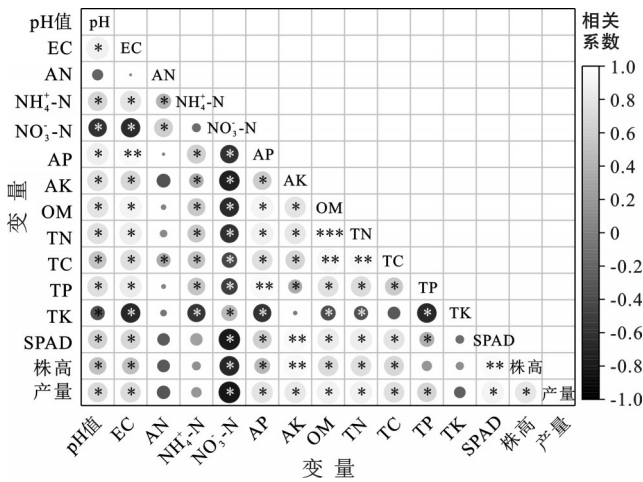
用于衡量两个连续变量(土壤理化性质及辣椒生长情况)之间线性相关程度的 Pearson 相关性分析结果(图 4)表明,从土壤理化性质来看,土壤 pH 值与 NH₄⁺-N, AP, AK, OM 之间呈显著正相关($p <$

说明土壤的 pH 对养分含量产生直接响,在酸性条件下,土壤溶液中的氢离子(H⁺)浓度较高,这种酸性条件有利于 NH₄⁺-N 的稳定存在;土壤 AN 与 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 呈显著正相关($p <$ 0.05),土壤氮素主要来源于土壤中的有机质和添加的有机物料,这些有机物发生矿化作用时分解产生 NH₄⁺-N,随着产生的 NH₄⁺-N 量增多导致土壤中 NH₄⁺-N 和 AN 的含量上升。当土壤条件适宜时,硝化作用增强, NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化增加,但由于土壤中氮素的总量相对稳定,此时土壤中 AN 的含量也会相应增加,从而使 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 以及 AN 之间呈现一定的相关性;从土壤养分与辣椒生长情况来看,AK 对 SPAD、株高的影响极显著($p <$ 0.01),说明 AK 是影响辣椒生长的关键因素;对于辣椒的产量方面,AP, AK, OM 都与其表现出极高的相关性;AN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 对辣椒产量的贡献并未表现出正相关影响。土壤 TN, TC, TP 与 SPAD、株高、产量之间呈显著正相关($p <$ 0.05);

2.6 主成分分析

对土壤养分各指标做主成分分析,提取到主成分特征值大于 1 的共 4 个,并计算各成分的贡献率,成分 1, 2, 3, 4 对方差的贡献率分别为 45.89%, 15.91%, 13.83% 和 9.04%,前 4 个主成分的贡献率累计达到了 84.67%,说明 4 个主成分可以代表所有土壤养分指标的大部分信息。土壤 TN, EC, OM, AP, pH, AK 与 PC₁ 的相关系数较大;土壤 NO₃⁻-N, TK, AN 与 PC₂ 的相关系数较大;土壤 NH₄⁺-N, TC 与 PC₃ 的相关系数较大;土壤 TP 与 PC₄ 的相关系数最大。

由图 5 可知,在 PC₁轴上,施用颗粒状白酒污泥处理 W₂, W₃, W₄ 正向分布,说明施用颗粒状白酒污泥能够有效提高土壤 EC, pH 和 TC, TN, OM, AP, AK 含量, CK, F, W₁ 负向分布且与 NO₃⁻-N, TK, AN 呈正相关。土壤养分对辣椒产量、株高和叶 SPAD 有显著影响,表明施用颗粒状白酒污泥对土壤养分的提高和对辣椒的生长发育非常重要。这个结果与 Pearson 相关性分析结果一致。



注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$ 。

图 4 土壤理化性质及辣椒生长情况 Pearson 相关性分析
Fig.4 Pearson correlation analysis on soil physicochemical properties and pepper yield

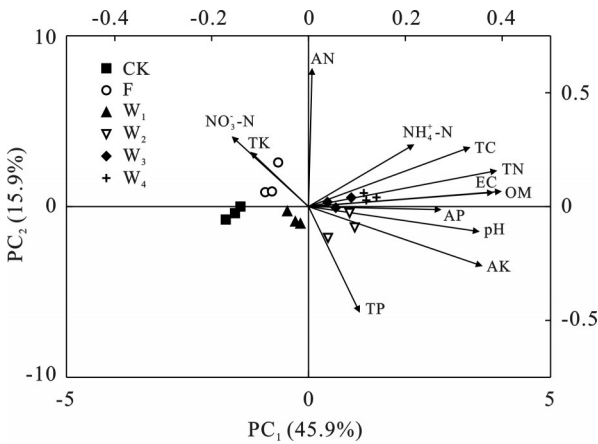


图 5 不同白酒污泥颗粒施用量土壤各指标主成分分析
Fig.5 Principal component analysis of soil affecting indicators under different application rates of Baijiu sludge granules

为了更直观地显示不同颗粒状白酒污泥施用量下土壤各项指标对土壤养分的影响,通过构建综合性评价指标 Y 对各组分进行分析,根据各综合指标的标准化特征向量值及各单项指标的标准化值,将提取的 4 个主成分的土壤各项指标按权重系数进行计算得到综合质量分数,得分值最高即为土壤养分

含量最高(表 7),各组分得分值大小顺序为: $W_4 > W_2 > W_3 > W_1 > F > CK$,其中 W₄ 的得分最高为 3.05, CK 得分最低为 -3.97,说明 W₄ 处理养分含量最佳, CK 处理养分含量最差。

表 7 不同白酒污泥颗粒施用量土壤各指标主成分得分值
Table 7 Scores of principal components of soil affecting indicators under different application rates of Baijiu sludge granules

处理组	指标得分					排序
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y	
CK	-8.04	-0.73	-0.48	-1.07	-3.97	6
F	-4.18	2.74	0.92	0.61	-1.30	5
W ₁	-1.61	-1.5	0.95	1.2	-1.00	4
W ₂	4.05	-2.05	2.09	0.19	1.84	2
W ₃	3.37	0.32	-0.32	0.15	1.46	3
W ₄	6.87	1.08	-1.26	-1.08	3.05	1

注: Y₁₋₄ 为标准化值; Y 为特征向量与标准化值的乘积。

3 结论

(1) 颗粒状白酒污泥的施用提高了土壤 pH 值和 EC。与不施肥和施普通复合肥的处理相比,当施用量超过 3 000 kg/hm² 时土壤 pH 值呈上升趋势,且提高了 4.98%~7.37%, EC 提升了 22.03%~59.21%,表明颗粒状白酒污泥可有效改善土壤的理化性质。

(2) 颗粒状白酒污泥的施用显著增加了土壤中各种矿物养分的含量,其中以 6 000 kg/hm² 的 W₄ 综合得分最高,随着污泥施用量的增加,当施用量超过 3 000 kg/hm² 后,土壤 AP, AK, NO₃⁻-N 含量开始下降, NH₄⁺-N, AN, OM 随着施用量的上升而上升,在 Pearson 相关性分析的结论中, AP, AK, OM 含量对辣椒生长指标的提高尤为显著;土壤的 TC, TN, TP 含量显著增加 ($p < 0.05$),较 CK 分别提升 52.17%, 38.99%, 64.26%。

(3) 颗粒状白酒污泥的施用可明显促进辣椒的生长发育和显著地提高辣椒产量。其中 W₄ 处理的辣椒株高和叶绿素 SPAD 较 CK 分别增加 68.84%, 65.48%, 辣椒产量较 CK 增加 68.86% (最高达 33 180 kg/hm²), 相比传统的复合肥 (F) 处理增加了 66.77%; 并且土壤重金属含量检测结果表明,各处理重金属含量均远低于标准限值并达到土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618—2018) 的 I 类标准,在增加白酒污泥施用量的同时可以发现土壤中的重金属含量并未升高,且处理后的土壤中 Fe 含量未明显增加,而 Al 含量则呈明显下降趋势,表明施颗粒状白酒污泥不会对土壤造成重金属污

染,也不会导致土壤酸化板结,说明该颗粒状白酒污泥可在辣椒生产中得到安全高效资源化利用。

参考文献(References)

- [1] 张焯.数字经济助力贵州省白酒产业高质量发展研究[J].中国商论,2024(7):139-142.
Zhang Ye. Research on digital economy facilitating high-quality development of Baijiu industry in Guizhou Province [J]. China Journal of Commerce, 2024(7):139-142.
- [2] 范奇高,黎露露,骆红波,等.白酒酿造副产物的资源化利用技术研究进展[J].中国酿造,2023,42(9):1-6.
Fan Qigao, Li Lulu, Luo Hongbo, et al. Research progress on resource utilization technology of Baijiu brewing by-products [J]. China Brewing, 2023,42(9):1-6.
- [3] G Viana W, Scharwies J D, Dinneny J R. Deconstructing the root system of grasses through an exploration of development, anatomy and function [J]. Plant, Cell & Environment, 2022,45(3):602-619.
- [4] 苗光健,张敏,张光禄.污水处理厂环境管理现状与污染防治策略[J].中国资源综合利用,2024,42(11):202-204.
Miao Guangjian, Zhang Min, Zhang Guanglu. Environmental management status and pollution prevention strategy of sewage treatment plant [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024,42(11):202-204.
- [5] Liang Fashen, Liu Xiaoping, Yu Xin, et al. Enhancing bioavailable carbon sources and minimizing ammonia emissions in distillery sludge and distiller's grains waste co-composting through deep eutectic solvent addition [J]. Bioresource Technology, 2024,397:130491.
- [6] 王梓琪.白酒酿造污泥污染特性及资源化利用研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2024.
Wang Ziqi. Study on pollution characteristics and resource utilization of liquor brewing sludge [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2024.
- [7] 唐显梅,刘方,朱健,等.白酒厂污泥与生活污泥有机组分的差异性及其淋溶迁移风险评估[J].应用化工,2024,53(3):583-587.
Tang Xianmei, Liu Fang, Zhu Jian, et al. Difference of organic components between Baijiu factory sludge and domestic sludge and risk assessment of leaching and migration [J]. Applied Chemical Industry, 2024,53(3):583-587.
- [8] 王远桃,钟星,张光利,等.酱香型白酒废水污泥的特点及资源化利用的可行性研究[J].酿酒科技,2022(8):79-83.
Wang Yuantao, Zhong Xing, Zhang Guangli, et al. Characteristics of Jiangxiang Baijiu wastewater sludge and feasibility study on its resourceization [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(8):79-83.
- [9] Kaira W M, Kimpiab E, Mpofu A B, et al. Anaerobic digestion of primary winery wastewater sludge and evaluation of the character of the digestate as a potential fertilizer [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023,13(12):11245-11257.
- [10] González-Marcos A, Alba-Eliás F, Martínez-de-Pisón F J, et al. Composting of spent mushroom substrate and winery sludge [J]. Compost Science & Utilization, 2015,23(1):58-65.
- [11] Mishra D, Kumari S, Jaiswal A, et al. Evaluation of distillery sludge as a soil amendment for improving soil quality and sugarcane (CO-265) yield [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021,23:101624.
- [12] 卢雨霞.酱香型白酒废水污泥特征及资源化利用研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2024.
Lu Yuxia. Research on the characteristics and resource utilization of wastewater sludge from sauce-flavored Baijiu [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2024.
- [13] 李哲.酒糟有机肥生产、肥效以及酒糟生物质炭的效应研究[D].重庆:西南大学,2021.
Li Zhe. Production and fertilizer efficiency of organic fertilizer made from distiller's grains, as well as the effects of distiller's grains biochar [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [14] 李文洪.白酒废水污泥特征及资源化利用研究:以五粮液酿酒废水污泥为例[D].四川 雅安:四川农业大学,2013.
Li Wenhong. Study on characteristics and resource utilization of liquor wastewater sludge: Taking Wuliangye liquor wastewater sludge as an example [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [15] 赵居芳,冯丹,尚江伟,等.白酒废水污泥基生物炭对亚甲基蓝的吸附特性研究[J].湖北农业科学,2022,61(10):67-73.
Zhao Jufang, Feng Dan, Shang Jiangwei, et al. Adsorption properties of methylene blue by liquor wastewater sludge-based biochar [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022,61(10):67-73.
- [16] 刘林培,管秀琼,王洪,等.食用菌菌渣和白酒糟共堆肥过程中氮素变化及腐熟进程[J].食品与发酵工业,2020,46(21):188-194.
Liu Linpei, Guan Xiuqiong, Wang Hong, et al. Nitrogen changes and maturity in the co-composting process of edible fungal residues and Baijiu's waste spent grains [J]. Food and Fermentation Industries, 2020,46(21):188-194.
- [17] Jouichat H, Khiari L, Gallichand J, et al. Modeling

- temporal variation of soil acidity after the application of liming materials [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 240:106050.
- [18] 赵洪宝, 蒋冬梅, 李岳, 等. 河曲露天矿排土场不同复垦区土壤质量评价 [J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(3): 419-427.
Zhao Hongbao, Jiang Dongmei, Li Yue, et al. Evaluation of soil quality in different reclamation areas of Hequ open-pit mine dump [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(3):419-427.
- [19] Tesfahun W, Zerfu A, Shumuye M, et al. Effects of brewery sludge on soil chemical properties, trace metal availability in soil and uptake by wheat crop, and bioaccumulation factor [J]. *Heliyon*, 2021, 7(1):e05989.
- [20] Latifah O, Ahmed O H, Abdul Majid N M. Enhancing nitrogen availability, ammonium adsorption-desorption, and soil pH buffering capacity using composted paddy husk [J]. *Eurasian Soil Science*, 2017, 50(12): 1483-1493.
- [21] Dong Xiumei, Zhang Wei, Hu Hong, et al. Physiological and transcriptome analysis reveal the nitrogen preference and regulatory pathways of nitrogen metabolism in an epiphytic orchid, *Cymbidium tracyanum* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 219: 105618.
- [22] 彭强, 李絮花, 王克安, 等. 减量控释氮肥对大棚甜椒产量及土壤硝态氮、铵态氮分布的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6):106-110.
Peng Qiang, Li Xuhua, Wang Kean, et al. Effect of reduced controlled release nitrogen fertilizer on the sweet pepper yield and distribution of soil nitrate, ammonium nitrogen [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):106-110.
- [23] 姚海, 刘晓荣, 李海洋, 等. 长期大量施用污泥堆肥显著提升华北地区粮食作物产量和土壤碳汇效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(5):899-908.
Yao Hai, Liu Xiaorong, Li Haiyang, et al. Long-term application of sewage sludge compost in large amount increases crop yield and soil carbon storage of north China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(5):899-908.
- [24] 董文, 张青, 王焯平, 等. 长期施用污泥对土壤-萝卜系统重金属积累及土壤养分含量的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4):647-654.
Dong Wen, Zhang Qing, Wang Huangping, et al. Effects of the long-term application of sludge on heavy metal accumulation and soil nutrient content in soil-radish system [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4):647-654.
- [25] 王梓琪, 吴永贵, 鲁鸿需, 等. 白酒废水污泥制包膜缓释肥配方筛选及其缓释效果评价 [J]. *环境工程学报*, 2024, 18(9):2522-2531.
Wang Ziqi, Wu Yonggui, Lu Hongpei, et al. Formulation screening and slow release effect evaluation of coated slow release fertilizer made from Baijiu wastewater sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(9):2522-2531.
- [26] 柏彦超, 汪莉, 陶天云, 等. 施用生活污泥改良滩涂土壤理化性状的探讨 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4):1019-1025.
Bai Yanchao, Wang Li, Tao Tianyun, et al. Study on the amendment of physicochemical properties of tidal flat soil by sewage sludge application [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4):1019-1025.
- [27] Arlo L, Beretta A, Szogi A A, et al. Biomass production, metal and nutrient content in sorghum plants grown on soils amended with sewage sludge [J]. *Heliyon*, 2022, 8(1):e08658.
- [28] 李金业, 程昊, 梁晓敏, 等. 酸化土壤改良与固碳研究进展 [J]. *生态学报*, 2024, 44(17):7871-7884.
Li Jinye, Cheng Hao, Liang Xiaomin, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7871-7884.
- [29] 钞锦龙, 郝小梅, 胡磊, 等. 不同灌溉条件下大棚土壤次生盐渍化特征与质量评价 [J]. *节水灌溉*, 2020(12): 17-21.
Chao Jinlong, Hao Xiaomei, Hu Lei, et al. Characteristics and quality evaluation of soil secondary salinization in greenhouse under different irrigation conditions [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(12):17-21.
- [30] 王社平, 程晓波, 姚岚, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和青椒重金属积累的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(9):1829-1836.
Wang Sheping, Cheng Xiaobo, Yao Lan, et al. Effects of sewage sludge compost application on heavy metal accumulation in soil and green pepper [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1829-1836.