

食用菌菌糠在土壤修复和改良方面的应用

王 森^{1, 2}, 李晓宇^{1*}, 鲁新蕊¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着食用菌菌糠产量的增加, 菌糠处理方式也将趋于多样化。食用菌菌糠中含有丰富的有机质和营养元素, 然而传统的处置方式不仅会对菌糠资源造成浪费, 更会对环境造成污染。近年来, 关于食用菌菌糠的资源化利用方式研究逐渐兴起, 通过简述菌糠在修复污染土壤和改良退化土壤方面的研究, 提出未来关于菌糠修复和改良土壤方面研究的建议, 以期为菌糠在环境治理和农业领域的应用提供参考, 为其高效利用提供理论依据。

关键词: 食用菌菌糠; 土壤改良; 修复; 资源化利用

菌糠指食用菌废渣, 是栽培食用菌后剩下的废弃栽培基质, 主要由棉籽壳、锯木屑、稻草、玉米芯、甘蔗渣以及多种秸秆等农副产品组成^[1-2]。食用菌具有较高的营养价值, 中国作为最大的食用菌生产国之一, 伴随而来的是相当可观的菌糠产量^[3]。据统计, 2022 年我国食用菌总产量达 4222.54 万 t, 研究发现, 每生产 1 kg 的食用菌约产生 3.25 ~ 5.47 kg 的菌糠^[1, 4-6], 按这个比例计算, 2022 年我国菌糠的产量可达 1.37 亿 ~ 2.31 亿 t。另有如日本、韩国、法国等其他盛产食用菌的国家, 导致菌糠产量规模庞大^[3], 废弃菌糠处理不容忽视。当前, 我国对于菌糠的资源化利用仍不成熟, 处置方式仍以露天堆置、丢弃、焚烧、填埋等传统方式为主, 但是这些传统的处置方式并不能对菌糠中的成分充分利用, 这不仅是一种资源浪费, 还会增加环境负担^[7-9]。

近些年来, 有相关研究表明, 菌糠可以用于再次栽培食用菌、生产有机肥、制作无土栽培基质、生物修复、挖掘活性物质、制作饲料、制作生物炭和活性炭、制作动物养殖垫料、可再生能源生产等方面^[1, 6, 9-16]。另外, 菌糠被用于土壤修复的思路逐渐兴起后, 研究发现, 菌糠可作为土壤改良剂、复合矿物质肥和微生物肥的原料, 对于土壤

有显著的改良作用^[17]。目前我国正面临着严峻的土壤污染问题, 据《全国土壤污染状况调查公报》(2014 年) 结果显示, 我国土壤监测点位超标率达到 16.1%, 其中重度污染点位比例为 1.1%, 耕地土壤点位超标率为 19.4%^[18]。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因, 例如, 农业生产中过量使用或不当处理含有过量的氮、磷等化学物质的化肥、农药, 工业活动中未得到妥善处置的含有重金属、有机物的废弃物和排放物等^[19]。全国土壤环境状况总体不容乐观, 部分地区土壤污染较重, 耕地土壤环境质量堪忧, 土壤质量问题已成为制约中国农业发展的突出问题。因此, 探索一种有效的方法来改良土壤质量, 提高土壤肥力和作物产量, 是当前农业发展的重要课题之一。菌糠在土壤修复和改良方面的应用对于资源的循环利用、保障农业可持续发展以及提高农作物产量具有重要的意义。本研究将针对菌糠对土壤的修复和改良研究进行阐述, 为菌糠在资源循环利用、土壤治理和农业领域的应用提供参考。

1 菌糠的组成及特征

食用菌培养料主要由棉籽壳、锯木屑、稻草、玉米芯、甘蔗渣以及多种秸秆等农副产品组成, 此外, 培养料中还会根据需要添加一定量的糖类、氮源、pH 值调节剂等。而食用菌对培养料营养成分的利用率约为 15% ~ 25%, 所以已种过食用菌之后的栽培基质仍残留有丰富的营养物质^[20], 如蛋白质、氨基酸、菌类多糖及铁、钙、锌、镁等中微量元素和维生素等^[21-23]。同时, 栽培食用菌后的菌糠里残留大量

收稿日期: 2023-10-07; 录用日期: 2024-01-30

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA28110401); 吉林省生态环境厅-环境保护科研项目 (2022-12); 吉林省重大专项课题 (20230303005SF)。

作者简介: 王森 (2000-), 硕士研究生, 主要从事菌糠改良盐碱土壤方面的研究。E-mail: wangmiao@iga.ac.cn。

通讯作者: 李晓宇, E-mail: lixiaoyu@iga.ac.cn。

的菌丝体^[24], 这些菌丝体中也含有丰富的蛋白质、脂肪、氨基酸、酶类、多种维生素以及微量元素。

菌糠的营养成分取决于栽培菌种、栽培所用原料以及栽培环境等因素^[25-26]。相比于以木屑为原料的菌糠, 以棉籽壳为原料的菌糠的氮、磷、钾、钙等元素含量较高, 而纤维素含量则较低^[26-29]。有相关研究表明, 杏鲍菇菌糠的大部分矿物质元素均高于金针菇菌糠^[27], 综合指标均优于海鲜菇菌糠、姬菇菌糠、香菇菌糠^[28]。这是由于菌糠中各种成分的含量与不同栽培原料中各成分的含量以及栽培的食用菌品种对各成分的转移程度有直接的关系^[29]。

菌糠作为一种含有丰富营养物质的资源, 在修复与改良土壤方面发挥着重要的作用, 主要体现在多个方面, 包括增加土壤有机质含量、改善土壤结构、提高微生物活性以及提供植物生长所需的养分。菌糠中的有机质含量较高, 施入土壤能够提高土壤有机质含量^[30]。菌糠疏松多孔, 具有良好的透气性, 菌糠施入土壤能够进一步分解转化为具有良好通气性能、蓄水能力的腐殖质, 可以有效改良土壤的透气性, 增强土壤保水保肥能力^[31]。此外, 菌糠腐熟物料中的微生物群落可以促进土壤中养分的循环和释放, 提高土壤肥力^[32]。菌糠的这些特点对于修复酸化土壤、重金属和有机物污染土壤、改良盐碱土壤等具有良好的应用价值(表1)。

2 菌糠修复酸化土壤

土壤酸化是土壤中氢离子不断增加的过程, 是土壤形成与发育过程中普遍存在的自然过程^[33]。土壤酸化会导致土壤板结, 加速土壤矿物质养分的淋失^[34], 降低土壤中营养元素的有效性, 使土壤的保肥和供肥能力下降^[35], 影响土壤微生物活性, 影响作物生长。另外, 在土壤酸化的情况下, 土壤有毒金属元素得到释放和活化, 对作物根系产生毒害作用, 影响作物品质^[36]。土壤酸化可造成农作物减产 20% ~ 50%, 甚至更高或绝收^[37]。有研究表明, 我国土壤酸化面积在不断扩大, 强酸性土壤 (pH 值 < 5.5) 的面积已经从 20 世纪 80 年代的约 0.1127 亿 hm^2 增加长到 21 世纪初的 0.1507 亿 hm^2 ^[38]。我国的土壤酸化在亚热带地区已十分突出, 尤其在江西、福建、广东、广西、湖

南、浙江等省 (区、市) 表现较为严重^[36-39]。土壤酸化作为土壤退化的重要表现之一不容忽视。

石灰被广泛应用于酸化土壤的改良^[40], 石灰能够在短时间内改善土壤 pH 值^[41], 但是长期施用石灰会导致土壤的“复酸化”和硬化^[42], 并且会导致 Mg^{2+} 和 NO_3^- 等矿物质营养物质浸出损失增加^[43-44]。生物质炭也可用于酸化土壤的修复, 但是长期施用生物质炭会导致部分无法在土壤中被分解的多环芳烃积累, 造成土壤的次生污染^[34]。近年来, 有相关研究表明, 工业废弃物也可用于酸化土壤的改良, 但工业废弃物中均含有部分有害重金属, 存在造成土壤次生污染的可能性^[34]。

土壤酸化后, 盐基阳离子减少, Al^{3+} 和 H^+ 增加, 而菌糠中有机质含量丰富, 能够通过与 Al^{3+} 形成有机复合物降低交换性铝的含量, 从而减轻酸化土壤的铝毒害作用^[45]。魏岚等^[46]在研究碱渣、蘑菇渣、污泥、泥炭等土壤调理剂对酸化土壤的调节作用和对辣椒生长、产量、品质的影响时, 指出施用菌渣后不仅能提高土壤 pH 值, 降低酸性土壤交换性铝含量, 而且提高了土壤中有机质、速效氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁含量, 同时能降低酸性土壤活性铝对辣椒的毒害作用, 使辣椒品质和产量均得到显著提升, 其中以碱渣 + 菇渣处理的效果最为显著。曹健等^[47]利用草菇渣的发酵产物为主要原料, 和土壤改良剂混合配成有机肥料, 施入种植红葱的土壤中, 结果表明, 这种有机肥可提高土壤中交换性钙和镁含量, 达到中和土壤酸性的目的, 并且降低了土壤的电导率, 达到了平衡土壤养分、改善土壤理化性质的效果; 与此同时, 红葱的品质和产量也得到了提高。陈雯雯等^[48]在江西旱地红壤、海南砖红壤和赤红壤 3 种类型的酸性土壤中施入菌渣、熟牛粪进行试验研究, 发现施用菌渣处理和菌渣 - 熟牛粪处理能有效提高土壤 pH 值、有机质和土壤养分含量、土壤可培养细菌数量、土壤微生物生物量碳含量和花生产量。综上, 菌糠可以有效改良酸化土壤, 且当菌糠与其他土壤改良剂或是其他堆肥发酵物配合使用时效果更好。

3 菌糠修复盐碱土壤

盐碱地是我国重要的后备土地, 根据联合国

教科文组织和粮农组织不完全统计,全世界盐碱地的面积为 9.5438 亿 hm^2 , 其中我国为 0.9913 亿 hm^2 。对比第二、三次全国土地调查数据,总体来看,我国盐碱土壤面积呈现增长的趋势^[49]。我国盐碱地类型多,分布广,从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱区均有分布,主要分布在西北、东北、华北和沿海地区^[50]。盐碱化会抑制土壤中有机的累积,降低土壤肥力,同时土壤的孔隙变小,透水透气性变差,微生物活动也受到限制,从而使土壤的理化性质变差,影响到作物的正常生长^[30, 51]。重度盐碱化土地较难生长作物,导致其大面积闲置和撂荒,土地资源浪费。若对盐碱土壤进行改良和治理,不仅可以增加农业种植面积和作物产量,缓解粮食危机,而且对保障我国耕地和粮食生产安全、严守国家耕地红线以及保障土地资源可持续利用具有重大意义^[30, 52]。

食用菌菌糠中含有丰富的有机质和矿质元素,可以作为有机物料充当改良盐碱地的优质碳源^[53]。菌糠的 pH 值随培养基不同而变化,多为弱酸性、弱碱性或中性,选择 pH 值呈酸性的菌糠施入土壤可以降低土壤 pH 值,并且可能菌糠通过微生物分解产生有机酸以及土壤中的二氧化碳积累中和土壤氢氧根离子所致,使得土壤 pH 值降低,对于 pH 值呈碱性的盐碱土壤具有修复作用^[54-55]。石堃等^[56]在研究猴头菇菌糠作为土壤的改良剂对滩涂盐碱土壤主要理化性质的影响时得出,添加菌糠改良后的盐碱土壤 pH 值、全盐量均比原盐碱土明显降低,有机质含量明显增加,土壤中有效钾、氮、磷含量均增加,并且土壤容重变小,孔隙度增大,微团聚体数量增加。谢修鸿等^[57]在苏打盐碱土上施用黑木耳菌糠后发现,黑木耳菌糠可以促进微团聚体的团聚,增加土壤孔隙度,土壤可溶盐组成中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的含量随菌糠用量增加而减少。这些都说明施用菌糠可以改善盐碱土壤中的盐分含量及组成,调节土壤 pH 值,改善土壤理化性质,使土壤的成分向优化土壤结构的方向转化。

此外,有研究表明,菌糠搭配其他的改良剂或与其他发酵物堆肥后施入盐碱土壤比单一施用菌糠的改良效果更好^[13]。在菌糠还田时,以腐解菌糠物料作为碳源、搭载硫酸铝改良剂对盐碱地稻田养分性状具有明显的改良和优化作用^[58-59]。王玥等^[60]

发现盐碱土壤添加木耳菌糠和鸡粪混合堆肥可以有效提高农作物产量,并且作物生产指标好于仅添加木耳菌糠的盐碱土壤。

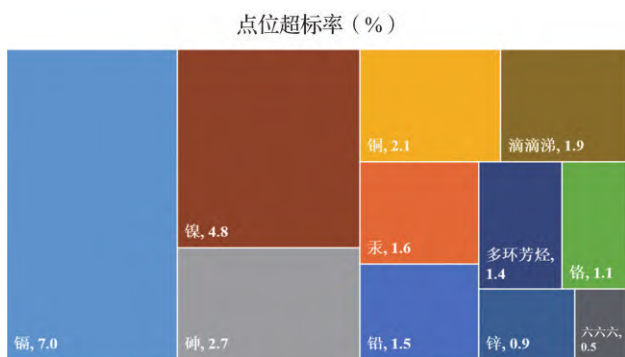
4 菌糠修复重金属污染土壤

随着城市化的发展,重金属污染日益严重,土壤重金属污染也受到了广泛关注^[61-65]。其中,农业用地所受到的重金属污染较为严重^[66],有研究表明我国设施农田土壤重金属含量呈现一定的空间分布规律,南部地区土壤镉、铅和汞含量最高,北部地区土壤砷、铜、锌和铬含量最高,西北部地区土壤镍含量最高,并且镉污染最严重,其次为汞污染^[67]。土壤重金属污染所具有的隐蔽性、滞后性、累积性、不可逆性等特点,不但会对生态系统产生严重和不可逆的影响、危害人体健康并且治理难度较大,治理周期较长^[68-69]。重金属污染不仅会对生态环境造成严重的影响,还会通过口服摄入、口鼻吸入以及皮肤接触而进入人体,最终危害人体健康^[61-62, 70-71]。因此重金属污染土壤的改良和修复至关重要。

菌糠含有丰富的纤维素、半纤维素、菌丝体和有机物,以及相对较大的表面积^[72-73]、发达的微孔结构和一些官能团如羟基、酚基、羧基和巯基,这使得菌糠可以与重金属离子结合,并通过吸附、离子交换、络合和沉淀控制土壤中金属配合物的吸附、形成及活性^[74-75],降低其生物利用度,从而减少进入植物体内的重金属含量,减少对人体健康的危害,并且达到土壤重金属的固化和去除的目的^[72]。Chen 等^[76]应用 3 种菌糠替代 25% 的氮肥,通过短期实地研究,3 种菌糠替代比常规施肥能显著增加土壤的有机质、总磷和总钾含量,而土壤中的总镉、铅和砷含量均有所降低,此外,研究发现,与化肥相比,所有菌糠置换都增加了变形菌的相对丰度。可以看出,菌糠部分替代化肥可以提高土壤养分和减少重金属,从而进一步改善微生物多样性和群落组成。Wei 等^[71]发现添加 4% 菌糠对镉的固定化和土壤改良效果最好,它降低了镉的可交换部分率,增加了其残留部分率,土壤 pH 值、电导率、阳离子交换能力、酶活性均有所提高。使用菌糠改良重金属污染土壤并不仅仅是像传统方法那样将污染物从一个阶段转移到另一个阶段^[74, 77-79],而是成本相对低廉,效果更全面。

表 1 菌糠改良土壤与传统土壤改良方法对比

土壤问题类型	特点	不利影响	污染现状	传统改良方法及存在的问题	菌糠改良方法特征	参考文献
酸化土壤	① Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基阳离子含量低； ② Al^{3+} 、 H^{+} 含量高； ③ pH 值低	①降低土壤肥力和保肥能力； ②导致土壤板结； ③加速土壤矿物质养分的淋失； ④增加重金属元素的活性； ⑤降低微生物活性和作物产量	21 世纪初面积已达 0.1507 亿 hm^2	①添加石灰：亚表层酸度改良不佳，易造成土壤板结，用量大，运输成本高， Mg^{2+} 和 NO_3^- 等矿物质营养物质浸出损失增加； ②添加生物质炭：排放温室气体，养分淋溶流失，有机质含量低，团聚性改善效果不佳，成本高，长期研究不足，可能会导致多环芳烃积累； ③施加工业废弃物：有机质含量低，有导致重金属污染的风险	①提高土壤 pH 值； ②降低土壤交换性铝的含量； ③提高土壤中交换性钙和镁、有机质、养分、微生物含量； ④提升作物品质和产量	[33–48]
盐碱土壤	① pH 值高； ②盐分累积； ③低透水性； ④养分含量低	①抑制土壤中有机质的累积； ②降低土壤肥力； ③土壤的孔隙度变小，透水透气性变差； ④微生物活动受到限制； ⑤影响到作物的正常生长	面积达 0.9913 亿 hm^2	①物理改良法：包括客土改良、水利法等，基本都具有成本高、收效期短、应用受限制等缺点； ②化学改良：包括添加脱硫石膏、硫酸铝、有机肥等，成本投入较高，对施用量要求较高，可能会造成土地二次污染； ③生物改良方法：包括种植耐盐碱植物、施加微生物菌肥等，见效慢，周期长，适用范围有限	①降低土壤 pH 值； ②降低土壤全盐含量； ③提高土壤有机质和有效钾、氮、磷含量； ④土壤容重减小，孔隙度增大，微团聚体数量增加	[30, 51, 54–57]
重金属污染土壤	① 常见 镉、铅、汞、砷、铜、锌、铬、镍污染； ②具有隐蔽性、滞后性、累积性、不可逆性等特点	①重金属元素在土壤中一般不易随水相移动，不能为微生物分解，易在土壤中累积，治理周期长。 ②能在土壤环境中转化成毒性更强的甲基化合物，通过食物链最后进入人体，对人类带来危害（致癌、致病、致突变）	参照图 1 中的点位超标率	①物理修复法：包括客土法、热固定和玻璃化、电动力学法等，成本高，未有效限制土壤重金属离子的迁移转化，有造成大气污染和二次污染的可能性； ②化学修复技术：包括化学冲洗法、固化–稳定化技术等，存在处理时间比较长且并未真正将土壤中的重金属去除、成本高、可能会造成二次土壤污染等问题； ③生物修复技术：包括植物修复、微生物修复等，治理周期长、生长环境选择性强、难处理高污染土壤	①减少重金属，降低其生物利用度； ②显著增加土壤的有机质、总磷和总钾含量，提高土壤养分； ③改善微生物多样性和群落组成； ④提高土壤电导率、阳离子交换能力、酶活性； ⑤成本相对较低，效果更全面	[67–79]
有机污染土壤	长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性	或被土壤颗粒吸附，或渗滤至地下水中、随地表径流迁移至地表水中、挥发进入大气中、被植物吸收进入食物链中富集，对人类健康和环境具有严重的危害	参照图 1 中的点位超标率	①物理修复技术：包括蒸汽抽提法、热脱附技术等，没有彻底消除污染物，不适用于低挥发性污染物，成本高，需要注意挥发产物的收集及处置； ②化学修复技术：包括化学氧化法、光催化降解等，会改变土壤的理化性质，容易造成化学试剂的残留而造成土壤二次污染； ③生物修复技术：包括植物修复、微生物修复等，修复周期长，受到生物类型的限制，不适合高浓度污染环境	①可以降低有机污染物的毒性； ②有助于生物降解土壤中的有机污染物，提高其降解效率和去除率	[80–87]

图1 重金属和有机物污染点位超标率^[18]

5 菌糠修复有机物污染土壤

土壤中的有机污染物主要包括农药、多环芳烃类、多氯联苯、二噁英、石油类污染物以及其它包括增塑剂、阻燃剂、表面活性剂、燃料类以及酚类和亚硝胺物质,其中,有机氯农药、多氯联苯、二噁英、多溴联苯醚、全氟和多氟烷基类化合物等一些有机污染物具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性,能够在大气环境中长距离迁移并能沉积回地面,对人类健康和环境具有严重的危害。

菌糠中含有丰富的营养物质和菌丝体,这有助于生物降解土壤中的有机污染物^[80-83]。菌糠中仍残留有许多酶类,能够通过氧化催化自由基的形成,使有机污染物分子中的键不稳定,进而去除有机污染物^[84]。菌糠中含有大量的有机质,可以通过离子交换和质子化、氢键、范德华力、配位体交换、阳离子桥和水桥等各种不同机制与土壤有机物结合,形成难以进入生物体细胞膜的大分子或极性很强的分子,从而降低有机污染物的毒性^[45]。Jia等^[74]通过香菇菌糠对重金属镉和二氯苯混合污染的土壤修复潜力研究,指出香菇菌糠可以提高土壤生物活性以及木质素分解酶的含量,从而改善二氯苯的去除效果,并且,常规和灭菌的香菇菌糠施入土壤后均可降低土壤中镉的可提取性。Antón-Herrero等^[85]对杏鲍菇、香菇、平菇和双孢蘑菇4种菌糠进行了生物修复石油烃污染土壤的评估,结果表明,相对于对照,菌糠的应用显著改善了石油烃的降解,对C10至C35的脂肪烃和芳烃的去除是有效的,其中最有效的是双孢蘑菇。Zhou等^[86]比较了新鲜和风干的平菇、杏鲍菇和黑木耳菌糠引起的老化污染土壤中多环芳烃的消散率,在用新鲜杏鲍菇菌糠改良土壤时多环芳烃的消散率

最高。Ge等^[87]研究表明,16种多环芳烃在土壤中的降解效率随着杏鲍菇菌糠施用比例和频率的增加而增加,施用菌糠后,土壤中多环芳烃降解菌的生物量和酶活性增加,多环芳烃的降解效率与多环芳烃降解菌的生物量和大多数土壤酶的活性呈正相关,并且观察到由于添加杏鲍菇菌糠,多环芳烃C—C键断裂,多环芳烃被裂解。

6 菌糠修复和改良土壤的方式及优缺点

菌糠修复和改良土壤的方式多种多样,可以直接施入土壤,发酵堆肥后施入土壤,可与作物轮作(米菇轮作),制成生物炭基肥,与石膏或改良剂混施等。相对于农家肥和氮磷钾肥料,菌糠碳氮比值较低,直接施入土壤,可以为植物提供更多的养分及较高的养分利用率,增加土壤在干旱条件下的保水性^[88]。将菌糠堆肥后施入土壤,不仅改善了土壤基本化学性质,而且与单施化肥相比,同时增强了土壤酶活性,提高了土壤微生物数量,并改变了土壤微生物群落组成及其多样性^[89]。此外,米菇轮作(大球盖菇—玉米轮作)的方式比作物轮作(小麦—玉米轮作)更能促进秸秆降解、提高土壤肥力,改善土壤结构和增加经济效益^[90]。而菌糠生物炭化,比腐熟和晾晒处理具有更好的改良效果^[91]。朱彦彦^[92]研究表明,木耳菌糠制备的水热炭对苏打盐碱土进行改良具有良好的应用潜力,且水热炭改良苏打盐碱土种植水稻后土壤的理化性质得到了进一步改善,从而促进了水稻幼苗的生长,降低了苏打盐碱土对水稻幼苗的盐碱胁迫。董宁^[93]以菌糠配施石膏和硫酸铝改良苏打盐碱土,结果显示较单独施用菌糠及单独施加石膏和硫酸铝改良效果显著。相对于其他的土壤改良剂(如农家肥、化肥、农作物秸秆、石膏和硫酸铝等),菌糠不仅可以改善土壤的理化性质,增加土壤的肥力,还可以提高作物的抗逆性和产量^[9],具有抗菌活性^[94],可以降低病害发生率^[95-96],并且成本低,效果也更好。然而菌糠利用的相关技术研究虽然取得一定进展,但尚不足以广泛应用于实际,技术转化及落地仍然需要时间。

7 总结与展望

菌糠具有容重小、质地疏松、颗粒结构丰富、透气性好、保水保肥能力强等特点,这些性质决定了其对于盐碱土壤、酸性土壤、重金属以及有机物

污染土壤具有良好的改良和修复作用。菌糠作为有机成分施加到土壤中,有利于土壤团粒结构的形成^[60, 97],改良土壤容重^[56, 98],增加土壤的田间持水量^[99],提高土壤的保水能力^[45],改良土壤孔隙度^[56-57, 100],增加土壤的透气性^[101],促进植物生长^[47-48],利用菌糠修复和改良土壤,不仅有助于环境保护,而且对农业可持续发展具有潜在价值。然而,栽培的食用菌及其基质种类繁多,导致菌糠的理化性质不同、质量参差不齐,有必要开展菌糠资源化利用的评估,研发适宜的菌糠肥料化技术,多途径加大对技术转化和推广力度。

综上所述,未来在菌糠修复和改良土壤方面的研究建议从以下几个方面着手:

(1) 加强菌糠在土壤修复和改良方面的作用机理研究。目前对于菌糠修复和改良土壤的机理研究还较为浅薄。需要重点研究菌糠施入土壤后物质的迁移转化规律,以及不同作物对于菌糠改良土壤的生长及生理生态响应机制。这将为科学的利用菌糠修复和改良土壤提供依据和方向,并助力最大程度地提高作物的产量和品质。

(2) 研发基于菌糠资源化评估的肥料化技术。随着人们对食药菌需求的增加,菌糠的产量越来越多。未来需要明确不同来源菌糠的性质和差异,评估菌糠的质量和等级,为其资源化利用提供科学分析。针对不同污染或退化类型土壤的修复和改良需求,研发适宜的菌糠肥料化技术,包括菌糠的还田方式、比例和时间,配合的耕作措施和作物种植品种等。

(3) 多途径协同推进菌糠肥料的技术转化和推广。早在 20 多年以前就有菌糠改良土壤的相关研究^[102],但是至今这种方法仍未在实际土壤改良中得到广泛的应用。技术转化及实地应用受多种因素影响,与技术效果、市场需求、经济成本以及政策引导等息息相关。

总之,未来应该从全产业链角度,既要注重应用基础研究,探索如何将研究成果转化为农业实践,又要与相关农业政策相协调,因地制宜研发菌糠资源化利用技术,健全地方规范化和标准化的菌糠利用技术体系,打造以菌糠为纽带的农林草湿多生态系统循环发展模式,促进区域生态系统可持续发展。另外,除了利用土壤改良剂或调节剂来改良和修复退化或污染的土壤之外,应该从源头减少或杜绝土壤退化及污染的发生,加强对于土壤资源的

保护和合理利用,因此需要在土壤施肥施药过程中做到无害化或减害化,菌糠作为生物废弃资源源于生态系统,将菌糠作为有机物料归于土壤,可增加其肥力,改善其结构,对农业生态系统健康以及农作物安全有一定保障作用。

参考文献:

- [1] 郭远,宋爽,高琪,等. 食用菌菌渣资源化利用进展[J]. 食用菌学报, 2022, 29(2): 103-114.
- [2] 孟丽. 食用菌常用培养料配方 200 种[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 156.
- [3] Huang Z D, Guan H C, Zheng H, et al. Novel liquid organic fertilizer: a potential way to effectively recycle spent mushroom substrate[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134368.
- [4] 中国食用菌协会. 2022 年度全国食用菌统计调查结果分析[EB/OL]. (2023-12-29)[2024-01-17]. <https://mp.weixin.qq.com/s/CyZnLJ409LhLdzFvJhJYjA>.
- [5] 董雪梅,王延锋,孙靖轩,等. 食用菌菌渣综合利用研究进展[J]. 中国食用菌, 2013, 32(6): 4-6.
- [6] 张莹,田龙,徐敏慧,等. 食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3658-3670.
- [7] 张康,王英伟,施汉东,等. 食用菌菌糠对水污染的影响与污染防治研究[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(1): 69-75.
- [8] 楼子墨,王卓行,周晓馨,等. 废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 397-402.
- [9] 宫志远,韩建东,杨鹏. 食用菌菌渣循环再利用途径[J]. 食药菌, 2020, 28(1): 9-16.
- [10] 杜金华,张昕瑶,马爽,等. 食用菌糠综合再利用的研究现状[J]. 广东蚕业, 2021, 55(6): 25-26.
- [11] 吴思,孙长龙,张倩楠,等. 食用菌菌糠的综合利用现状[J]. 生物化工, 2020, 6(6): 133-135.
- [12] 陈锡,姜明,李双双,等. 菌糠的综合利用研究进展[J]. 中国园艺文摘, 2017, 33(8): 43-44.
- [13] 许子洁,王晶,曹子健,等. 食用菌菌糠资源化利用的现状与研究进展[J]. 食药菌, 2021, 29(6): 496-500.
- [14] 卢磊,李文玲,吴晓玲,等. 食用菌菌糠综合利用现状[J]. 食用菌, 2022, 44(5): 6-8, 12.
- [15] Mohd Hanafi F H, Rezanla S, Mat Taib S, et al. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, 20: 1383-1396.
- [16] Leong Y K, Ma T W, Chang J S, et al. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review[J]. Bioresource Technology, 2022, 344: 12615.
- [17] Chen Y H, Sun Z X, Su Y J, et al. Hydrochar derived from spent mushroom substrate ameliorates soil properties and

- nutrient levels in saline-sodic soil: an incubation study [J]. Sustainability, 2022, 14 (20): 12958.
- [18] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 (2014年4月17日) [J]. 环境教育, 2014 (6): 8-10.
- [19] 王丹丹. 浅谈土壤污染与我国农业环境保护 [J]. 农业灾害研究, 2023, 13 (4): 166-169.
- [20] Moon Y H, Jeong C S. Feeding value of spent mushroom (*Pleurotus eryngii*) substrate [J]. Journal of Mushroom Science and Production, 2012, 10 (4): 236-243.
- [21] Meng X Y, Dai J L, Zhang Y, et al. Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 62-69.
- [22] Gobbi V, Nicoletto C, Zanin G, et al. Specific humus systems from mushrooms culture [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 123: 709-713.
- [23] Catal S, Peksen A. Physical, chemical and biological properties of spent mushroom substrates of different mushroom species [J]. Acta Horticulturae, 2020, 59 (1): 353-360.
- [24] 赵启光, 王尚堃, 王亮, 等. 利用平菇菌糠栽培鸡腿菇培养料配方试验研究 [J]. 北方园艺, 2007 (2): 167-168.
- [25] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 菌渣对土壤性状和作物的影响及其再利用研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2015, 17 (3): 100-106.
- [26] 翁伯琦, 罗涛, 黄毅斌, 等. 生态强省建设与循环农业发展 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- [27] 乔洁, 陈玉, 侯晓强, 等. 食用菌菌糠中矿质元素含量的测定及品质分析 [J]. 中国酿造, 2017, 36 (2): 171-174.
- [28] 王勤礼, 闫芳, 席亚丽, 等. 有机肥不同基源食用菌菌糠主要营养成分及安全性评价 [J]. 中国沼气, 2019, 37 (5): 69-72.
- [29] 陆娜, 袁卫东, 周祖法, 等. 4种工厂化食用菌菌糠的主要营养成分及重金属分析 [J]. 中国食用菌, 2015, 34 (6): 42-44, 49.
- [30] 王春霞, 许子洁, 王晶, 等. 食用菌菌糠配施化肥改良滨海盐碱耕地的效果研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (4): 99-105.
- [31] 刘学生. 菌糠和堆肥菌糠对铅污染黑土和红壤的修复 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [32] 李维. 食用菌菌糠的腐熟及腐熟物在土壤改良中的应用 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [33] 于天仁, 陈家坊. 土壤发生中的化学过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [34] 杨晶, 易镇邪, 屠乃美. 酸化土壤改良技术研究进展 [J]. 作物研究, 2016, 30 (2): 226-231.
- [35] 麻万诸, 朱康莹, 卓志清. 酸化对茶园土壤矿物转变及供钾能力的影响 [J]. 茶叶科学, 2023, 43 (1): 17-26.
- [36] 周娟, 袁珍贵, 郭莉莉, 等. 土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施 [J]. 作物研究, 2013, 27 (1): 96-102.
- [37] 吴显汀. 土壤酸化对农作物生长的影响及预防改良措施 [J]. 河南农业, 2018 (22): 23.
- [38] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 160-167.
- [39] 刘娇娴, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12 (1): 173-184.
- [40] Wu S W, Zhang Y, Tan Q L, et al. Biochar is superior to lime in improving acidic soil properties and fruit quality of *Satsuma mandarin* [J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136722.
- [41] Zhang K L, Chen L, Li Y, et al. The effects of combinations of biochar, lime, and organic fertilizer on nitrification and nitrifiers [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53 (1): 77-87.
- [42] 王梅, 蒋先军. 施用石灰与钙蒙脱石对酸性土壤硝化动力学过程的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34 (1): 47-53.
- [43] Lundell Y, Johannisson C, Höglberg P. Ion leakage after liming or acidifying fertilization of Swedish forests—a study of lysimeters with and without active tree roots [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 147 (2-3): 151-170.
- [44] Huber C, Baier R, Göttele A, et al. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233: 11-20.
- [45] 王艮梅, 黄松杉, 郑光耀, 等. 菌渣作为土壤调理剂资源化利用的研究进展 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (5): 1273-1280.
- [46] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 等. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2010, 36 (1): 77-81.
- [47] 曹健, 杨秋, 赫新洲, 等. 有机肥对红葱生长和产量及土壤肥力的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (16): 266-272.
- [48] 陈雯雯, 申卫收, 韩成, 等. 施用不同配比菇渣、熟牛粪对酸性土壤质量和花生产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2014 (1): 69-74.
- [49] 胡炎, 杨帆, 杨宁, 等. 盐碱地资源分析及利用研究展望 [J]. 土壤通报, 2023, 54 (2): 489-494.
- [50] 刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2023, 31 (3): 345-353.
- [51] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25 (2): 239-250.
- [52] 王庆蒙, 景宇鹏, 李跃进, 等. 不同培肥措施对河套灌区盐碱地改良效果 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 124-131.
- [53] Udom B E, Nuga B O, Adesodun J K. Water-stable aggregates and aggregate-associated organic carbon and nitrogen after three annual applications of poultry manure and spent mushroom wastes [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 101: 5-10.
- [54] 赵晓丽, 陈智毅, 刘学铭. 菌糠的高效利用研究进展 [J].

- 中国食用菌, 2012, 31 (2): 1-3.
- [55] Mohd Hanafi F H, Rezaia S, Mat Taib S, et al. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, 20: 1383-1396.
- [56] 石堃, 崔大练, 易杨, 等. 菌糠土壤改良剂对滩涂盐碱土壤主要理化性质的影响 [J]. 国土与自然资源研究, 2014 (5): 45-47.
- [57] 谢修鸿, 梁运江, 李玉. 黑木耳菌糠改良苏打盐碱土效果研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 98 (5): 130-133, 152.
- [58] 杨祥波. 改良剂与有机物料结合对新开碱地稻田土壤性状的优化 [J]. 河南农业科学, 2020, 49 (5): 88-96.
- [59] 王帅, 王楠, 陈殿元, 等. 菌糠搭载硫酸铝对盐碱地稻田养分状况的影响研究 [J]. 土壤通报, 2017, 48 (2): 460-466.
- [60] 王玥, 刘中珊, 刘奇, 等. 木耳菌糠和鸡粪混合堆肥改良盐碱土壤效果评价 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (26): 77-82.
- [61] Zhang J, Yang R D, Li Y C, et al. Distribution, accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 195: 110475.
- [62] Zhang Y H, O'connor D, Xu W D, et al. Blood lead levels among Chinese children: the shifting influence of industry, traffic, and e-waste over three decades [J]. Environment International, 2020, 135: 105379.
- [63] Róžański S, Jaworska H, Matuszczak K, et al. Impact of highway traffic and the acoustic screen on the content and spatial distribution of heavy metals in soils [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24 (14): 12778-12786.
- [64] Sun W C, Zhang X. Estimating soil zinc concentrations using reflectance spectroscopy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 58: 126-133.
- [65] Wang G X, Zeng C, Zhang F, et al. Traffic-related trace elements in soils along six highway segments on the Tibetan Plateau: influence factors and spatial variation [J]. Science of the Total Environment, 2017, 581: 811-821.
- [66] 周铭浩, 李彤, 林学明. 重金属污染土壤绿色可持续修复研究进展 [J]. 现代化工, 2023, 43 (12): 51-55.
- [67] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (11): 1019-1026.
- [68] Han Q, Liu Y, Feng X X, et al. Pollution effect assessment of industrial activities on potentially toxic metal distribution in windowsill dust and surface soil in central China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 144023.
- [69] Nagajyoti P C, Lee K D, Sreekanth T V M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2010, 8 (3): 199-216.
- [70] Huang R J, Cheng R, Jing M, et al. Source-specific health risk analysis on particulate trace elements: coal combustion and traffic emission as major contributors in wintertime Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52 (19): 10967-10974.
- [71] Wei Y N, Jin Z H, Zhang M, et al. Impact of spent mushroom substrate on Cd immobilization and soil property [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 3007-3022.
- [72] Liu X S, Bai X, Dong L Y, et al. Composting enhances the removal of lead ions in aqueous solution by spent mushroom substrate: biosorption and precipitation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 1-11.
- [73] Liu X S, Wei Y N, Huang S Q, et al. Interpretation of lead removal by two biomasses at different size via monitoring the solution environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 244: 118756.
- [74] Jia Z L, Deng J, Chen N J, et al. Bioremediation of cadmium-dichlorophen co-contaminated soil by spent *Lentinus edodes* substrate and its effects on microbial activity and biochemical properties of soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17 (2): 315-325.
- [75] Tapia Y, Cala V, Eymar E, et al. Chemical characterization and evaluation of composts as organic amendments for immobilizing cadmium [J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 5437-5443.
- [76] Chen L D, Zhou W, Lou L, et al. Short-term responses of soil nutrients, heavy metals and microbial community to partial substitution of chemical fertilizer with spent mushroom substrates (SMS) [J]. Science of the Total Environment, 2022, 844: 157064.
- [77] Khan F I, Husain T, Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 71 (2): 95-122.
- [78] Gomes H I, Dias-Ferreira C, Ribeiro A B. Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application [J]. Science of the Total Environment, 2013, 445: 237-260.
- [79] Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment [J]. Chemosphere, 2015, 122: 131-136.
- [80] 张军, 王硕. 有机物污染土壤修复技术研究现状 [J]. 山东化工, 2019, 48 (21): 55-56, 59.
- [81] Chang B V, Fan S N, Tsai Y C, et al. Removal of emerging contaminants using spent mushroom compost [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 922-933.
- [82] Sadiq S, Hassanb M M, Rafiqe N, et al. Spent mushroom compost of *pleurotus ostreatus*: a tool to treat soil contaminated with endosulfan [J]. Compost Science & Utilization, 2019, 27: 193-204.
- [83] Cappio M J, Marin-Benito J M, Sánchez-Martín M J, et al.

- Accelerated dissipation of two herbicides after repeated application in field experiments with organically-amended soil [J]. *Agronomy*, 2021, 11: 1125.
- [84] Lau K L, Tsang Y Y, Chiu S W. Use of spent mushroom compost to bioremediate PAH-contaminated samples [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1539-1546.
- [85] Antón-Herrero R, García-Delgado C, Baena N, et al. Assessment of different spent mushroom substrates to bioremediate soils contaminated with petroleum hydrocarbons [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12 (15): 7720.
- [86] Zhou J J, Ge W, Zhang X M, et al. Effects of spent mushroom substrate on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil [J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127462.
- [87] Ge W, Zhou H, Li Y, et al. Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aged agricultural soil using spent *Pleurotus eryngii* mushroom substrate [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23: 1511-1523.
- [88] Kwiatkowski C A, Harasim E, Yakimovich A, et al. Evaluation of spent mushroom substrate, mineral NPK fertilization and manure fertilization on chamomile (*Chamomilla recutita* L. Rausch) yield and raw material quality [J]. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus Ogronictwo*, 2018, 17 (3): 3-16.
- [89] 许红丽, 王树强, 张玉兰, 等. 菌糠源生物堆肥对黄瓜种植土壤微生物活性、数量和多样性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2024, 43 (5): 1279-1290.
- [90] 刘高远, 和爱玲, 杜君, 等. 大球盖菇——玉米轮作对秸秆降解、土壤理化性质、作物产量及经济效益的影响 [J]. *河南农业科学*, 2021, 50 (10): 60-68.
- [91] 申鸿儒. 不同菌糠对污染区土壤铜铬形态及油菜吸收的影响 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- [92] 朱彦谚. 水热炭的筛选及其对苏打盐碱土改良效果的研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [93] 董宁. 菌糠新型苏打盐渍土改良剂组方效果试验研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- [94] Kwak A M, Min K J, Lee S Y, et al. Water extract from spent mushroom substrate of *Hericium erinaceus* suppresses bacterial wilt disease of tomato [J]. *Mycobiology*, 2015, 43 (3): 311-318.
- [95] Kang D S, Min K J, Kwak A M, et al. Defense response and suppression of phytophthora blight disease of pepper by water extract from spent mushroom substrate of *Lentinula edodes* [J]. *The Plant Pathology Journal*, 2017, 33 (3): 264-275.
- [96] 刘斌, 韩亚男, 袁旭峰, 等. 木耳菌糠的 5 种前处理对水稻育苗基质性质及稻苗生长的影响 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (16): 3098-3107.
- [97] 马列, 刘金华, 杨靖民, 等. 新型复合改良剂对苏打盐碱土的改良效果研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (5): 144-149.
- [98] 王栩. 菌糠改良保护地土壤容重退化效果的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38 (15): 8091-8093.
- [99] 郝淑丽. 菌糠改良土壤田间持水量效果的研究 [J]. *杂粮作物*, 2010, 30 (4): 306-307.
- [100] 张华微, 张天翼, 王栩. 菌糠改良土壤孔隙度效果的研究 [J]. *河北农业科学*, 2011, 15 (8): 37-38, 68.
- [101] 周红姿, 祁凯, 赵晓燕, 等. 杏鲍菇菌糠木霉发酵物对大棚土壤的改良效果 [J]. *福建农业学报*, 2017, 32 (12): 1359-1364.
- [102] Stewart D P C, Cameron K C, Cornforth I S, et al. Effects of spent mushroom substrate on soil physical conditions and plant growth in an intensive horticultural system [J]. *Soil Research*, 1998, 36: 899-912.

Application of spent mushroom substrate in soil improvement and remediation

WANG Miao^{1,2}, LI Xiao-yu^{1*}, LU Xin-rui¹ (1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130102; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: With the increase in the yield of spent mushroom substrate (SMS), the treatment methods of the SMS would also tend to be diversified. The SMS contained rich organic matter and nutrient elements. However, the traditional disposal methods not only wasted the SMS resources, but also caused pollution to the environment. In recent years, research on the resource utilization way of SMS had gradually emerged. By briefly describing the research on the remediation of polluted soil and the improvement of degraded soil by SMS, suggestioned for future research on the remediation and improvement of soils by SMS were put forward, to provide a reference for the application of SMS in environmental management and agricultural field, and provide a theoretical basis for its efficient utilization.

Key words: spent mushroom substrate; soil improvement; remediation; resource utilization