

蘑菇废料对农田土壤重金属镉的修复作用和水稻产量的影响

杨涵越¹, 姚雯蕾¹, 张慧萍¹, 杨雨欣¹, 孙雪娇²

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214000; 2. 江南大学机械学院, 江苏无锡 214000)

摘要 利用蘑菇废料作为稳定剂, 通过水稻盆栽试验, 采集不同时期土壤和植株样本, 监测土壤及植株中的镉含量及土壤理化性质, 评估修复效果, 并探析可能的机理。结果发现, 蘑菇废料施用可以使土壤中有效态镉含量下降 64.0% 以上, 植株中镉含量下降 27.9%, 糙米中镉含量下降 17.7%, 表明具有较好的镉修复作用; 同时, 蘑菇废料施用使土壤有机质含量提高了 30.0% 以上, 水稻产量提高 32.9%, 表明具有提高土壤生产力的作用。

关键词 蘑菇废料; 农田土壤; 镉; 修复; 水稻产量

中图分类号 S156.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)20-0057-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Mushroom Waste on the Remediation of Heavy Metal Cadmium in Farmland Soil and Rice Yield

YANG Han-yue, YAO Wen-lei, ZHANG Hui-ping et al (School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000)

Abstract Using mushroom waste as stabilizer, through pot experiment of rice, soil and plant samples were collected, cadmium content and soil physical and chemical properties in soil and plant were monitored, remediation effect was evaluated, and possible mechanism was explored. The results showed that the application of mushroom waste could decrease the content of available cadmium in soil by more than 64.0%, the content of cadmium in plant by 27.9%, and the content of cadmium in brown rice by 17.7%, which indicated that mushroom waste application could increase the content of soil organic matter by more than 30.0% and the yield of rice by 32.9%, indicating that the application of mushroom waste could increase the productivity of soil.

Key words Mushroom waste; Farmland soil; Cadmium; Remediation; Rice yield

近年来土壤重金属污染日益严重, 据不完全统计, 我国遭受重金属污染的耕地面积近 2 000 万 hm^2 , 约占总耕地面积的 20%, 其中约 1 000 万 hm^2 的耕地是由工业三废污染造成的, 被污染灌溉的农田已经达 130 多万 hm^2 [1]。由于土壤重金属污染具有长期性、潜伏性、普遍性和不可逆性, 并且重金属能被农作物吸收但是不能被降解, 这严重影响我国农作物的质量, 对人类健康和食品安全构成巨大威胁。所以重金属污染土壤的修复成为国内外环保研究的热点问题 [2]。其中镉能够对人体造成很严重的伤害且不易治疗, 重金属镉污染也成为了研究的热点问题。

原位钝化修复技术是指向土壤中施入钝化剂, 对土壤重金属的生物有效性进行调控, 降低重金属在土壤中的有效性和迁移性, 进而减少农作物对土壤重金属的吸收 [3], 稳定剂钝化是原位修复镉污染农田土壤的重要手段之一。蘑菇废料是蘑菇种植后残留下来的培养基废料, 其原料来源广泛, 成本较低; 富含有机质, 利于改善土壤肥力; 且含多种矿质元素和有机活性基因, 有利于改良土壤, 降低土壤重金属有效性。有研究表明, 蘑菇废料对废水中重金属有很好的吸附作用, 因而研究其对土壤 Cd 的修复具有重要意义 [4]。该研究选用双孢菇蘑菇废料作为钝化剂, 利用盆栽试验, 研究水稻生长不同时期土壤和植株中的镉含量及土壤理化性质的变化, 以期评估钝化修复效果, 以及提高土壤肥力, 并探析可能的作用机理。

1 材料与与方法

1.1 供试土壤采集及理化性质

作者简介 杨涵越(1997—), 女, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 研究方向: 环境地球化学过程。

收稿日期 2020-03-18; **修回日期** 2020-04-29

省无锡市郊区某村庄的农田水稻土。土样经风干磨碎过 10 目筛, 进行土柱试验; 部分土壤进一步研磨过 100 目筛, 用于理化性质分析。供试土壤基本理化性质: pH 5.58、阳离子交换量(CEC) 11.95 cmol/kg 、有机质含量 29.4 g/kg 、总氮含量 1.2 g/kg 、总磷含量 0.9 g/kg 、总钾含量 10.3 g/kg 。

1.2 室内模拟试验 模拟制备中度 Cd 污染土: 称 50 g 风干土于多个 100 mL 烧杯中, 以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液的形式往其中加入 Cd 溶液(相当土壤 Cd 浓度为 3.3 mg/kg), 搅拌均匀, 模拟中度 Cd 污染土壤, 保持土壤含水率, 室温下平衡 14 d。

为了探析适宜的蘑菇废料添加量, 进行室内模拟试验, 即向模拟污染土中按照 1.0%、2.0%、5.0% 的比例分别添加双孢菇废料, 并以不加蘑菇废料为对照, 总共 24 个处理, 每个处理设 3 个重复。调节含水率为 70% 最大田间持水量, 并定期补水, 保持土壤含水量, 置于干燥通风处钝化。钝化 14 d 后采集土壤, 风干磨碎, 过 100 目筛, 待测分析。

1.3 水稻盆栽试验

1.3.1 添加蘑菇废料。 将模拟好的污染土壤转移到周转箱内, 捏碎成小块以 5% 的比例加入蘑菇废料(双孢菇), 搅拌均匀后装回花盆中, 并保持 70% 的最大田间持水量, 钝化 14 d 后用于水稻移栽。

1.3.2 水稻育秧及移栽。 选取当地水稻品种武运粳 23 号作为试验对象, 水稻种子经晒—消毒—浸种—发芽后播种于育秧盘中 [5], 期间保持 2~3 cm 的含水层, 育秧周期为 30 d。挑选长势接近的水稻秧苗分别移栽于已钝化 14 d 的花盆中, 每盆 1 株。用水灌溉使盆中水位保持 2~3 cm。在分蘖期施厩基肥, 每盆装土 5.0 kg, 加入基肥后拌匀, 基肥用量为 0.2 g/kg N、0.1 g/kg P_2O_5 和 0.2 g/kg K_2O , 肥料品种为尿素、

普钙和氯化钾。分蘖期到抽穗期之间施用农药,成熟期进行排水烤田,管理总体按照田间管理进行。

1.3.3 样品采集 分别于水稻生长的4个主要时期(分蘖、抽穗、灌浆、成熟)采集土壤样品、水稻植株地上、地下部分。

1.4 分析测定 该试验为破坏性采样,将盆栽中的土全部取出进行测定。土样经风干、磨碎,过100目筛,装袋保存,待测分析其理化性质和有效镉含量;土壤pH采用电位法测定^[6],水土比1:2.5;土壤阳离子交换量(CEC)用BaCl₂-MgSO₄强迫交换法测定^[7]。

土壤有效态Cd含量的测定:称取5.0g风干土样于100mL三角瓶中,加入25mL 0.1mol/L的CaCl₂溶液,在25℃下,以150r/min的速率浸提2h,离心过滤,并用AA-7000型火焰原子吸收分光光度计测定Cd含量。植株Cd含量的测定:称取0.2g样品,加入10.0mL HNO₃,经微波消解(Multiwave PRO型,奥地利Anton Paar公司)后,用火焰原子吸收分光光度计测定Cd含量。

土壤相关酶活性的测定根据Guan^[8]的方法。蔗糖酶活性根据蔗糖水解的生成物与某种物质3,5-二硝基水杨酸生成有色化合物进行比色测定,蔗糖酶活性以24h 1kg土壤中葡萄

糖的克数表示。采用靛酚蓝比色法测定土壤脲酶的活性,以24h后1kg土壤中NH₃-N的克数表示土壤脲酶活性(Ure)。

各种镉形态采用Tessier法测定^[9]。检测的形态有5种,分别是可交换态、碳酸盐结合态、铁锰水合氧化物结合态、有机物和硫化物结合态、残余态。

1.5 统计分析 数据采用Microsoft Excel 2010、Origin 8.0进行计算以及相关分析。土壤酶活性以及镉各态的试验数据用平均值来表示,土壤酶活性和镉各态与植株生物量之间的线性相关分析数据采用总平均值。

2 结果与分析

2.1 蘑菇废料对水稻生物量和产量的影响 从水稻各生育期生物量及籽粒产量(表1)可以看出,与对照相比,无论是地上、地下生物量还是籽粒产量,加入蘑菇废料都能提高,蘑菇废料施用使产量提高32.8%。邬石根等^[10]在黑龙江某大田内取用水稻土,向其中添加秸秆进行盆栽试验,结果发现土壤中全氮增加0.06g/kg,速效磷增加1.41mg/kg,速效钾增加3.44mg/kg,从而使水稻产量增加5.0%。与秸秆这类有机质相较,加入蘑菇废料对提高水稻产量有更显著的效果。

表1 水稻各生育期生物量及籽粒产量

Table 1 Biomass and grain yield of rice at various growth stages

处理 Treatment	分蘖期 Stooling stage		抽穗期 Heading period		灌浆期 Pustulation period		成熟期 Maturation period		籽粒产量 Grain yield
	地下	地上	地下	地上	地下	地上	地下	地上	
	Underground	Aboveground	Underground	Aboveground	Underground	Aboveground	Underground	Aboveground	
空白 Control	0.34±0.09	2.05±0.13	0.79±0.10	3.69±0.20	0.64±0.13	6.15±0.86	0.89±0.12	6.43±0.44	3.53±0.13
双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i>	0.33±0.06	2.35±0.16	0.83±0.14	4.72±0.14	1.08±0.14	8.21±0.10	1.23±0.14	8.23±0.14	4.69±0.14

2.2 蘑菇废料对有机质含量的影响 从水稻各生育期土壤有机质含量(图1)可以看出,与对照相比,加入蘑菇废料使土壤有机质含量明显提高。有机质在水稻生长4个时期都呈上升趋势。蘑菇废料含有丰富的腐殖类物质,孙岩等^[11]研究发现腐殖物质易于与金属离子复合。一方面,蘑菇废料在土壤中发生腐殖质变化,以腐殖质的形态存在,作为有机胶体,带负电荷,而且具有巨大的表面积和表面能,可大大增加CEC,吸附土壤溶液中盐基离子^[12];另一方面,腐殖质含有大量的羧基、羟基等含氧官能团,氧化过的有机质比未被

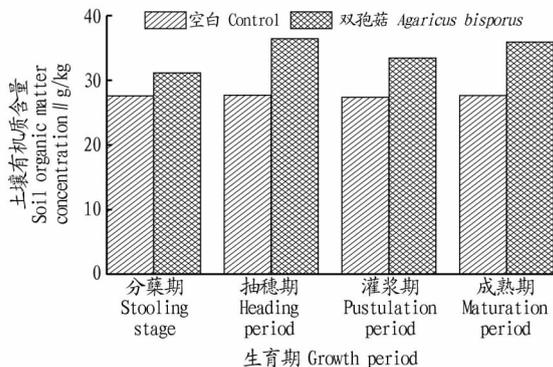


图1 水稻各生育期土壤有机质含量

Fig.1 Soil organic matter concentration in each growth period of rice

氧化的对盐基离子有更好的固定效果^[13]。

2.3 土壤pH的变化 pH在水稻生长过程中一直呈上升趋势,加入蘑菇废料的双孢菇组明显高于空白组,使pH接近于7(图2)。土壤酸碱度是土壤养分的重要特征,不仅影响土壤微生物活性,而且与土壤养分的形成、转化、有效性及水稻生长发育密切相关^[14]。土壤阳离子交换量(CEC)是土壤吸附和交换的阳离子容量,其大小与土壤胶体种类和含量有关,取决于土壤矿物种类、有机质含量等基本性质^[15]。由于镉在土壤中的形态与土壤CEC密切相关,且CEC(图3)与pH联系较为紧密,所以控制土壤pH十分重要^[16]。

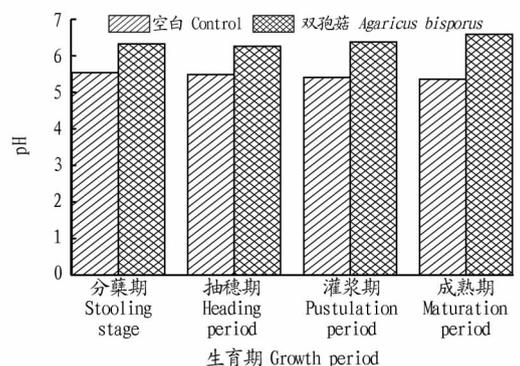


图2 水稻各生育期土壤pH

Fig.2 pH of soil in each growing period of rice

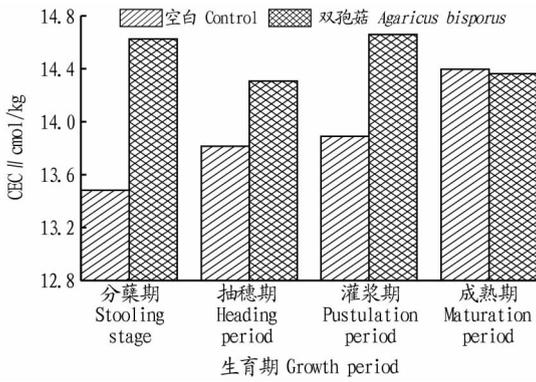


图3 水稻各生育期土壤 CEC

Fig.3 CEC of soil in each growing period of rice

2.4 蘑菇废料对土壤中蔗糖酶和脲酶活性的影响 从表 2 可以看出,加入蘑菇废料的双孢菇组蔗糖酶的活性在 4 个时期都高于空白组,且在分蘖期酶活最强。说明植株不同的生

长时期是影响其活性的一个重要因素。植株不同时期对蔗糖酶活性影响程度不同,这与马晓霞等^[17]研究的结果基本一致。在成熟期时,对比空白组双孢菇组明显提高酶的活性近 20%。脲酶的活性在前 3 个时期时,都是双孢菇组的活性高于空白组,但在成熟期时,空白组的酶活大于双孢菇组,且在抽穗期和灌浆期脲酶活性较高,抽穗期脲酶活性略大于灌浆期。

蔗糖酶活性影响土壤中碳的含量^[18],而碳的含量是衡量土壤肥力的重要指标。从表 3 可以明显看出,双孢菇组的碳含量每个时期相较空白组提高了 13.1%~30.0%。土壤中脲酶活性是影响氮含量的重要指标,也是衡量土壤肥力的重要指标。表 3 显示,未加蘑菇废料的空白组土壤氮含量变化不大,而加入蘑菇废料的双孢菇组氮含量不同时期高于空白组 10.0%~44.4%。说明施加蘑菇废料可以提高土壤中 C、N 含量,从而提高土壤肥力。

表 2 土壤酶活性

Table 2 Soil enzyme activity

处理 Treatment	分蘖期 Stooling stage		抽穗期 Heading period		灌浆期 Pustulation period		成熟期 Maturation period	
	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease
	mg/g		mg/g		mg/g		mg/g	
空白 Control	10.83±0.05	1.61±0.05	4.93±0.05	2.41±0.05	4.58±0.05	1.86±0.05	5.32±0.05	2.12±0.05
双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i>	12.98±0.05	1.77±0.05	6.41±0.05	2.64±0.05	7.17±0.05	2.44±0.05	7.27±0.05	1.30±0.05

表 3 植株不同时期总生物量及土壤 C、N 含量

Table 3 Total biomass and soil C、N content in different periods of plants

处理 Control	分蘖期 Stooling stage			抽穗期 Heading period			灌浆期 Pustulation period			成熟期 Maturation period		
	总生物量 Total biomass	C 含量 Carbon content	N 含量 Nitrogen content	总生物量 Total biomass	C 含量 Carbon content	N 含量 Nitrogen content	总生物量 Total biomass	C 含量 Carbon content	N 含量 Nitrogen content	总生物量 Total biomass	C 含量 Carbon content	N 含量 Nitrogen content
	g	%	%	g	%	%	g	%	%	g	%	%
空白 Control	10.70	1.60	0.01	17.87	1.61	0.06	19.88	1.59	0.12	16.99	1.60	0.09
双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i>	15.03	1.81	0.02	23.03	2.11	0.10	28.59	1.94	0.16	23.16	2.08	0.13

在成熟期双孢菇组表现出脲酶活性低于空白组,主要是由于受到了腐殖质增加的反向抑制作用。空白对照是单一 Cd 污染,而 Cd 单一污染下表现出对脲酶的强烈抑制^[19]。在成熟期时,脲酶主要来自于植株的根系分泌和微生物^[20],施加重金属可以对这些微生物产生抑制,使得微生物体内酶的合成与分泌减少,致使土壤酶活性受到抑制^[21]。而施加蘑菇废料使得土壤中腐殖质含量增高,脲酶和腐殖质结合后导致活性位点减少,二者的底物形成的竞争作用导致酶活性下降^[22]。因此,双孢菇组中脲酶不仅受到 Cd 污染胁迫,还受

到腐殖质增加的反向抑制。

2.5 土壤中各形态镉和植株总镉含量的变化 土壤有效态镉是衡量蘑菇废料钝化作用效果的重要参数。从表 4 可以看出,加入蘑菇废料能显著降低土壤有效态镉浓度,与空白组对比,土壤中有有效态的镉大幅度降低;在黎秋君等^[23]的试验结果中同样证明加入有机质能对 Cd 起到钝化作用,且其对 Cd 钝化效果最高降幅达 59.7%。该研究中所用的蘑菇废料可使镉钝化降幅达 67.0%以上。

表 4 植株内各部位总镉和土壤有效态镉含量

Table 4 Total cadmium content in various parts of plant and soil active cadmium content

处理 Treatment	分蘖期 Stooling stage			抽穗期 Heading period			灌浆期 Pustulation period			成熟期 Maturation period			
	根系 Root	茎叶 Stem	土壤 Soil	根系 Root	茎叶 Stem	土壤 Soil	根系 Root	茎叶 Stem	土壤 Soil	根系 Root	茎叶 Stem	籽粒 Seed	土壤 Soil
	mg/kg												
空白 Control	12.18±0.05	6.25±0.05	1.03±0.03	7.94±0.05	2.89±0.05	0.89±0.03	12.52±0.05	3.03±0.05	0.86±0.03	11.20±0.05	4.63±0.05	2.83±0.05	0.71±0.03
双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i>	7.68±0.05	4.92±0.05	0.34±0.03	5.33±0.05	2.31±0.05	0.30±0.03	8.72±0.05	1.87±0.05	0.19±0.03	8.65±0.05	2.48±0.05	2.33±0.05	0.25±0.03

植株中的总镉含量也是评价蘑菇废料钝化作用的重要指标之一。如表4所示,加入蘑菇废料后,植株体内的镉含量明显低于空白组,植株体内的镉下降了近29.0%。刘运坤^[24]研究表明在铜单一污染土壤中,加入活性炭植株中铜的含量与无改良处理相比降低了27.1%。该试验对重金属离子在土壤中的钝化效果与之相近。

从表5可以看出,可交换态Cd在土壤中总体呈现下降趋势,在灌浆期出现上升的现象,说明已经转化为其他形态的镉再次转化为可交换态Cd。此种现象在汤帆^[25]的研究中也曾出现,而就其作用机理目前还未得到确切的解释。只是可以推断在这一阶段蘑菇废料已基本被分解完全,对镉的钝化作用已经减弱,致使一部分被钝化的镉释放出来;也可能在这个阶段植株自身产生了一系列作用使得钝化的镉被解析,但需要更多的研究加以证明。碳酸盐结合态Cd含量大量下降,在安梅等^[26]的试验中同样出现加入有机质后土壤中碳酸盐结合态Cd含量降低的现象。铁锰水合氧化物结合态Cd含量为负值,表示土壤中不存在这种形态的镉。有机

物和硫化物结合态Cd含量变化很小,表示加入蘑菇废料对这种形态的镉几乎没有影响。残余态Cd在土壤中含有较小的上升。残余态最稳定,即不能被植物利用,迁移性小^[27-28]。在许仙菊等^[29]的研究中也发现同样的现象。在中污染和低污染水平下,土壤有机物和硫化物结合态Cd与残余态Cd在整个生长过程中变化都不大,这可能与这2种形态的镉的活性相对较低有关。由表4可以得出,加入蘑菇废料后植株中镉含量明显低于空白组,成熟期植株内镉下降27.9%,糙米中镉含量下降17.7%,表明蘑菇废料具有较好的镉修复作用。影响镉在植株中迁移转化的主要因素包括土壤理化性质(土壤有机质、氧化还原电位、土壤温度)、外施肥料的种类和数量、其他金属元素(如Zn、Ca、K、Mg等)及陪伴阴离子Cl⁻和SO₄²⁻、栽培植株的种类、栽培方式和耕作制度等。其中pH是土壤所有参数中影响Cd形态和有效性的最重要因素^[30]。同时,蘑菇废料施用使土壤有机质含量提高了30.0%以上,水稻产量提高32.9%,表明具有提高土壤生产力的作用。

表5 不同时期土壤Cd形态
Table 5 Soil Cd morphology in different periods

生育期 Growth period	可交换态 Interchangeable state	碳酸盐结合态 Carbonate-binding	铁锰水合氧化物结合态 Ferromanganese hydrated oxide bound	有机物和硫化物结合态 Organics and sulfides	残余态 Residual	总量 Total
分蘖期 Stooling stage	0.21	0.12	-0.005 0	0.09	3.38	3.80
抽穗期 Heading period	0.16	0.13	-0.003 0	0.08	3.57	3.94
灌浆期 Pustulation period	0.28	0.02	-0.007 3	0.07	3.62	3.98
成熟期 Maturation period	0.16	0.03	-0.001 4	0.07	3.65	3.91

2.6 土壤酶活性与不同形态镉的相关性分析 由表6可知,蔗糖酶活性与Cd可交换态呈正相关,脲酶活性与可交换态呈负相关。Cd可交换态含量越低,则蔗糖酶活性越高,参与土壤中碳水化合物的转化就越活跃。加入双孢菇的土壤中可交换态镉含量显著小于空白对照组,即其蔗糖酶活力大于空白组,有机质含量也显著高于空白组,植株生物量及最终产量同样都高于空白组。这说明加入蘑菇废料能使土壤中镉可交换态含量降低,提高土壤肥力实现增产。

2种酶活性与碳酸盐结合态均呈正相关。在土壤中没

有铁锰水合氧化物结合态存在,所以无法判断2种酶的活性与其相关关系。2种酶与有机物和硫化物结合态也均呈正相关;蔗糖酶与残余态呈显著负相关,而脲酶活性与其呈弱正相关。蔗糖酶活性与脲酶活性对于重金属Cd可交换态呈不同的相关关系,这与已知的相应试验结果相符^[31]。该研究土壤脲酶与重金属Cd可交换态呈负相关关系,对于预测土壤重金属可交换态具有一定的可行性。蔗糖酶与土壤重金属可交换态呈正相关,表明其对蔗糖酶有刺激作用,但机理原因尚且不明确,有待进一步的研究。

表6 土壤酶活性与不同形态镉的相关性分析
Table 6 Correlation analysis of soil enzyme activities and different forms of cadmium

因子 Factor	可交换态 Interchangeable state	碳酸盐结合态 Carbonate-binding	铁锰水合氧化物结合态 Ferromanganese hydrated oxide bound	有机物和硫化物结合态 Organics and sulfides	残余态 Residual	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease
可交换态 Interchangeable state	1.000 00						
碳酸盐结合态 Carbonate-binding	-0.421 22	1.000 00					
铁锰水合氧化物结合态 Ferromanganese hydrated oxide bound	-0.956 60	0.146 77	1.000 00				
有机物和硫化物结合态 Organics and sulfides	-0.461 27	0.987 05	0.205 29	1.000 00			
残余态 Residual	-0.067 60	-0.701 73	0.249 85	-0.762 34	1.000 00		
蔗糖酶 Saccharase	0.156 31	0.396 64	-0.232 95	0.502 52	-0.919 57	1.000 00	
脲酶 Urease	-0.313 86	0.321 14	-0.499 26	0.169 11	0.052 03	-0.378 89	1.000 00

3 结论与讨论

蘑菇废料施用可以使土壤中有效态镉含量下降64.0%

以上,植株中镉含量下降27.9%,糙米中镉含量下降17.7%,表明施加蘑菇废料具有较好的镉修复作用;同时,蘑菇废料

施用使土壤有机质含量提高了 30.0% 以上,水稻产量提高 32.9%,表明其具有提高土壤生产力的作用。蘑菇废料作为一种生物有机质对环境没有二次污染,对生态友好,若用于生产中可预见不错的效果。

由于该研究模拟的是中度镉污染土壤,虽然证实了预期的效果,但在稻米中镉的含量仍然超过国家规定的可食用标准,所以该方法适用于轻度镉污染土壤修复中,而对于镉中度污染土壤单纯地加入蘑菇废料对其进行修复效果还并不能达标,需要联合其他钝化材料进行修复应用,这些均有待进一步研究。

参考文献

- [1] 黄琳,蔡鲁晟,贾莹.我国环境中有害重金属的来源与分布及防治对策[J].科技情报开发与经济,2007,17(7):189-191.
- [2] 孙朋成,黄占斌,唐可,等.土壤重金属污染治理的化学固化研究进展[J].环境工程,2014(1):158-161.
- [3] 王立群,罗磊,马义兵,等.重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J].应用生态学报,2009,20(5):1214-1222.
- [4] 陈桂秋,曾光明,黄国和,等.利用蘑菇培养基废料去除含铅工业废水的方法:CN200510031205.7[P].2005-08-24.
- [5] 聂海强.浅谈水稻育秧及机插育苗移栽技术[J].中国科技投资,2013(19):306.
- [6] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [7] 韩秀山.膨润土(蒙脱石)阳离子交换容量 CEC 的测定[J].矿产保护与利用,2007(3):20.
- [8] GUAN S Y. Soil enzyme and study method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [9] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [10] 邬石根,张洪良,龙光霞,等.秸秆还田对酸性水稻土培肥增产效应分析[J].农业研究与应用,2016(3):20-25.
- [11] 孙岩,吴启堂,许田芬,等.土壤改良剂联合间套种技术修复重金属污染土壤:田间试验[J].中国环境科学,2014,34(8):2049-2056.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:449-450.
- [13] LI H Y, YE X X, GENG Z G, et al. The influence of biochar type on long-term stabilization for Cd and Cu in contaminated paddy soils[J]. Journal of hazardous materials, 2016, 304: 40-48.

- [14] 赵翔.襄阳市农田土壤阳离子交换量的测定及分析[J].环境与发展,2016,28(1):53-55.
- [15] 陈海生,王素娜.豫中烟区植烟田土壤 pH 和阳离子交换量的空间变异性研究[J].西南农业学报,2016,29(2):342-345.
- [16] 魏孝荣,邵明安.黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J].应用生态学报,2009,20(11):2710-2715.
- [17] 马晓霞,王莲蓬,黎青慧,等.长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J].生态学报,2012,32(17):5502-5511.
- [18] 赵仁竹,汤洁,梁爽,等.吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系[J].生态环境学报,2015,24(2):244-249.
- [19] 黄云凤,高扬,毛亮,等.Cd、Pb 单一及复合污染下土壤酶生态抑制效应及生态修复基准研究[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2258-2264.
- [20] CONNOLLY M A, OTAODE P, MORGAN M A. Urease activities and comparative transformation of urea and ammonium nitrate in some Irish soils under laboratory and glasshouse conditions[J]. Journal of life sciences, 1980, 1(2): 157-165.
- [21] 周礼恺,张志明,曹承锦,等.土壤的重金属污染与土壤酶活性[J].环境科学学报,1985,5(2):176-184.
- [22] 许辉.土壤腐殖酸对脲酶活性和稳定性的影响[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [23] 黎秋君,黎大荣,王英辉,等.3 种有机物料对土壤理化性质和重金属有效态的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):182-185.
- [24] 刘运坤.炭改良剂对复合污染土壤 Cu 的钝化效果[D].南昌:南昌航空大学,2016.
- [25] 汤帆.磷钾粉和水稻秸秆对土壤铅污染钝化和作物生长的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [26] 安梅,董丽,张磊,等.不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(5):892-898.
- [27] MELGAR M J, ALONSO J, GARCÍA M A, et al. Mercury in edible mushrooms and underlying soil: Bioconcentration factors and toxicological risk[J]. Science of the total environment, 2009, 407(20): 5328-5334.
- [28] MARKUS J, MCBRATNEY A B. A review of the contamination of soil with lead II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead[J]. Environment international, 2001, 27(5): 399-411.
- [29] 许仙菊,陈丹艳,张永春,等.水稻不同生育期重金属污染土壤中镉铅的形态分布[J].江苏农业科学,2008(6):253-255.
- [30] MCLAUGHLIN M J, LAMBRECHTS R M, SMOLDERS E, et al. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil[J]. Plant and soil, 1998, 202(2): 217-222.
- [31] 许超,陈旭磊,陈倩婷,等.水稻根际酶活性对土壤重金属污染的响应[J].中国农学通报,2014,30(30):28-33.

(上接第 51 页)

同浓度宝丰灵对匍匐苗叶长的影响不显著,与对照基本一致,但高浓度赤霉素匍匐苗叶长小于对照和其他处理,说明高浓度赤霉素对匍匐苗叶长有抑制作用。草莓不同部位对生长激素的感应不同,总体表现出激素对植株茎粗有抑制作用,赤霉素对匍匐苗株高有抑制作用,宝丰灵 1.33 mL/L 对植株的效果最佳。

参考文献

- [1] 任秀丽,姚友.不同浓度激素对草莓生长发育的影响[J].北方园艺,2008(7):81-82.
- [2] 张雯丽.中国草莓产业发展现状与前景思考[J].农业展望,2012,8(2):30-33.
- [3] 张晓艳.呼和浩特市草莓种苗繁育技术[J].内蒙古农业科技,2015,43

- (1): 83, 89.
- [4] 李根儿.赤霉素在草莓上的应用[J].现代园艺,2011(2):55-56.
- [5] 赤霉素对于油橄榄种子的萌发与生长效应的研究[J].湖北林业科技,1975(2):30-33,38.
- [6] 司剑华,雷云丹,段晓明,等.不同生长调节剂对北方枸杞出苗及苗期生长的影响[J].安徽农业科学,2008,36(35):15343-15345.
- [7] 孙昌高,马秋梅,方坚,等.药用植物种子生理的研究 VII.赤霉素对石椒草种子萌发和早期幼苗生长的影响[J].现代应用药学,1988(3):3-5.
- [8] 俞庚戌,张成义,丁峙峰.“红颊”草莓育苗期赤霉素应用试验初报[J].上海农业科技,2009(1):81.
- [9] 孟新法.赤霉素和种皮对桃种子萌发和实生苗生长的影响[J].北京农业大学学报,1987,13(4):463-466.
- [10] 孟新法.不同浓度赤霉素对解除桃种子休眠及实生苗生长的效应[J].北京农业大学学报,1988,14(4):447-451.
- [11] 田轲,刘海生,李建安,等.甘肃省永靖县梯子崖一庙沟锰矿矿床地质特征及成因分析[J].矿产与地质,2018,32(6):1003-1010.