

张娜,张奇,朱阳春,等. 秸秆类材料对土壤 Cd、Pb 的固定效果[J]. 江苏农业科学,2018,46(6):216-220.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.056

# 秸秆类材料对土壤 Cd、Pb 的固定效果

张娜<sup>1,2,3</sup>,张奇<sup>4</sup>,朱阳春<sup>1</sup>,范茹芹<sup>1</sup>,卢信<sup>1</sup>,童非<sup>1</sup>,刘丽珠<sup>1</sup>,陈静<sup>3</sup>,张振华<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏南京 210014; 2. 江苏省农业科学院/江苏省食品质量安全重点实验室,江苏南京 210014; 3. 淮阴工学院江苏省凹土资源利用重点实验室,淮阴 223003; 4. 扬州大学环境科学与工程学院,江苏扬州 225127)

**摘要:**土壤重金属污染及其修复,已成为当今全球共同关注的重大问题。我国秸秆资源丰富,通过秸秆利用降低污染土壤危害,既可以消除污染影响,又能解决秸秆难以无害化处置的普遍难题,符合农业可持续发展的规律。为筛选秸秆利用于土壤重金属污染修复的新材料,探究不同秸秆材料对土壤 Cd、Pb 活性的影响。结果显示,秸秆粉导致土壤 pH 值增加,土壤有效态 Pb 含量显著小于对照,但随着添加剂量增加,土壤有效态 Pb 含量也显著增加,后期秸秆粉促进土壤 Cd 的溶出。秸秆灰、秸秆生物炭、秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥均能显著提高土壤 pH 值,显著降低土壤有效态 Cd、Pb 含量。不同秸秆材料固定土壤 Cd、Pb 效果的大小顺序为:秸秆灰 > 秸秆生物炭 > 秸秆垫料有机肥 > 秸秆猪粪有机肥 > 秸秆粉。说明秸秆直接还田可能会为土壤修复带来一定的风险。秸秆灰、秸秆生物炭、秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥均能有效固定土壤 Cd 和 Pb,改善土壤酸性环境,但秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥属于价格经济的秸秆利用新方式的修复材料。

**关键词:** 秸秆; 有机肥; 镉; 铅; 土壤修复; 金属钝化; 固定效果; 风险; 修复材料

**中图分类号:** X53; X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)06-0216-04

随着工业污染、城市污染的加剧和农用化学品种类、数量的增加,农田重金属污染日益严重。据国家环境保护部(ME)和国土资源部(MLR)最新联合报告显示,我国有约 2 000 万  $\text{hm}^2$  的耕地正遭受 Hg、As、Cd、Pb、Cr 污染,这些金属离子均可能被植物吸收并在可食用部分积累,通过食物链在人体内积累。每年由于重金属污染而导致粮食损失约 0.1 亿  $\text{t}^{[1]}$ 。由此引起的作物产量、粮食安全及人类健康问题令人堪忧,土壤重金属污染问题亟待解决。目前,钝化修复已成为我国农田重金属污染土壤修复的重要方式之一<sup>[2]</sup>。中国作为世界农业大国,作物秸秆资源十分丰富,秸秆的不同利用方式在农田重金属污染修复中也得到应用。但目前有关秸秆直接还田修复土壤重金属的效果还未达到一致意见<sup>[3-6]</sup>,相反研究者一致认为秸秆间接还田如秸秆生物炭、秸秆堆肥等既能培肥地力又能有效固定污染土壤中的重金属,抑制作物对重金属的吸收和积累<sup>[6-9]</sup>。秸秆间接还田在重金属污染土壤中的应用,成为秸秆资源循环利用和农业安全生产与可持续发展的新途径,但秸秆间接还田的方式有待开发。随着近期我国农业和畜牧养殖产业结构的规模化调整,秸秆发酵床养殖技术在集约化或规模化畜禽(如猪)养殖中的应用成

为秸秆综合利用的一种新途径,是规模化养猪发展到一定阶段而形成的一个亮点。然而,随着规模化养殖和发酵床养殖技术的发展和推广,大量发酵床垫料的产生可能造成一定生态风险<sup>[10]</sup>,其综合利用亟待解决。目前发酵床垫料的有效利用方式是综合利用微生物学、生态学、发酵工程学原理将垫料再次发酵制成有机肥或基质应用于农业生产,既降低了垫料中的重金属含量(低于国家允许标准),又提高了其肥性<sup>[11-13]</sup>。大量研究表明,有机肥在提高土壤肥性的基础上,还能有效钝化土壤重金属保障粮食生产安全,如鸡粪、猪粪和牛粪有机肥<sup>[14-15]</sup>,但目前将秸秆发酵床垫料有机肥应用于土壤重金属污染修复的研究鲜见报道。

合理利用农业废弃物是农村可再生资源利用的重要战略之一。将农业废弃物应用于重金属污染农田土壤修复工作,符合废弃物资源化利用的重大策略。既为农业废弃物充分利用提供了新的方式,又能解决土壤重金属污染的环境问题。从农业废弃物中筛选重金属钝化材料,并研究其是如何影响土壤重金属活性的,是实施土壤重金属污染钝化修复的基础和前提。因此,本研究以秸秆垫料有机肥、秸秆猪粪垫料有机肥、秸秆灰、秸秆生物炭和秸秆粉为研究对象,探究其对土壤重金属活性的影响,以筛选出能有效钝化土壤重金属的秸秆利用新方式,以期对农业废弃物合理利用与土壤重金属钝化修复提供理论依据和参考。

## 1 材料与与方法

### 1.1 供试土壤与材料

供试土壤采自江苏省高邮市甘垛镇和平村 Cd、Pb 污染农田修复示范基地,采集 0~20 cm 深度的耕层土壤,并测定土壤最大田间持水量。测定土壤和秸秆系列材料(秸秆垫料有机肥、秸秆猪粪有机肥、秸秆生物炭、秸秆粉和秸秆灰)的

收稿日期:2017-07-25

基金项目:中国博士后科学基金[编号:2017M621670];江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(16)1051];江苏省农业科学院基本科研业务专项[编号:ZX(17)2017];江苏省农业科学院科研基金(编号:6111637)。

作者简介:张娜(1987—),女,山东菏泽人,博士,助理研究员,主要从事土壤污染修复研究。Tel:(025)84391510;E-mail:zhangn323@nenu.edu.cn。

通信作者:张振华,博士,研究员,主要从事污染土壤和水体修复研究。Tel:(025)84391207;E-mail:zhenhua.zhang@uwa.edu.au。

Cd、Pb 含量及其理化性质(表 1)。

表 1 供试土壤与钝化材料理化性质

土壤与材料	速效钾含量 (mg/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)	Pb 含量 (mg/kg)
供试土壤	197	31.79	2.24	3.34	402.55
秸秆粉	11 160	84.88	32.62	0.06	4.92
秸秆生物炭	20 300	6.48	35.68	0.15	7.26
秸秆灰	19 630	6.83	112.87	0.23	9.52
秸秆垫料有机肥	11 300	173.08	349.02	0.15	11.95
秸秆猪粪有机肥	9 320	289.28	376.53	0.13	13.90

## 1.2 试验设计与处理

将各材料风干,过 2 mm 筛子,分别将过筛的各材料按照占污染土壤比例的 0、2%、4%、6%、8% 加入过 2 mm 筛的风干供试污染土壤,并混合均匀,然后装入 250 mL 的塑料杯中培养(内径 × 高 = 8 cm × 5 cm),风干土和材料的质量 200 g/杯,均匀喷施水分至土壤田间持水量的 70%,用保鲜膜封口并留一穿孔,保证空气流通。每个处理 5 次重复,共 45 个处理。恒温恒湿(温度 25 ℃、湿度 70%)连续黑暗培养 35 d,每 3 d 称质量 1 次,保持土壤水分 70%。在培养后 0、7、14、28、35 d 分别测定土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 的含量。整个试验于 2016 年 6—9 月在江苏省农业科学院农业资源与环境研究所现代农艺与土壤修复实验室进行。

## 1.3 指标测定与方法

取 2.5 g 混合土壤(土壤 + 材料)于 50 mL 离心管中,并加入 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液 25 mL,于 25 ℃、200 r/min 振荡 2 h,然后 4 000 转/min 离心 10 min,测定土壤 pH 值;0.45 μm 滤膜过滤后,利用电感耦合等离子质谱仪测定土壤有效态 Cd、Pb 含量。同时,取 1 g 培养的土壤,烘干至恒质量

(105 ℃),测定土壤含水量。

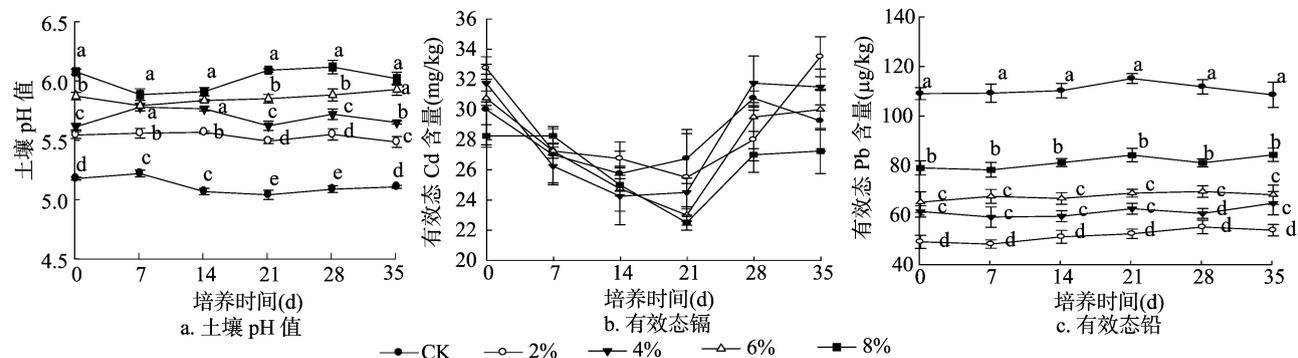
## 1.4 数据分析

所有数据使用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 进行单因素方差分析,时间和剂量分别作为固定因子( $P < 0.05$ )。在进行单因素方差分析时,对于不符合正态分布和方差齐性的数据进行转换。所有图使用 Sigmaplot 10.0 (Systh Software, Inc., San Jose, CA, USA) 制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆粉对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

由图 1 可知,秸秆粉对土壤 pH 值有显著影响。随着秸秆粉添加剂量增加,土壤 pH 值呈增加趋势。培养后 35 d,与对照相比,添加不同剂量秸秆粉的土壤 pH 值分别增加 0.42、0.58、0.74、0.90。秸秆粉对土壤 Cd 钝化效果不明显,后期秸秆粉促进土壤 Cd 的溶出;对土壤 Pb 的固定作用显著,但随着秸秆粉施用剂量增加,土壤有效态 Pb 含量显著增加,不同剂量添加土壤中铅含量的大小顺利为 CK > 8% > 6% > 4% > 2%。



不同字母表示在相同培养时间下不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )。图2~图5同

图 1 秸秆粉对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

### 2.2 秸秆灰对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

培养后 35 d,不同剂量秸秆灰分别使土壤 pH 值显著增加 1.93、2.17、2.34、2.56,土壤有效态 Cd 含量显著降低 33%、62%、81%、93%,土壤有效态 Pb 含量显著降低 84%、85%、86%、91%(图 2)。

### 2.3 秸秆生物炭对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

培养 35 d,不同剂量秸秆生物炭分别使土壤 pH 值显著增加 0.87、1.39、1.57、1.90,土壤有效态 Cd 含量显著降低 37%、63%、66%、70%,土壤有效态 Pb 含量显著降低 88%、91%、95%、96%(图 3)。

### 2.4 秸秆垫料有机肥对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

培养 35 d,不同剂量秸秆垫料有机肥均能显著提高土壤 pH 值,随着添加剂量(2%~8%)增加,土壤 pH 值分别增加 1.0、1.32、1.40、1.57。不同剂量秸秆垫料有机肥均能显著降低土壤有效态 Cd、Pb 含量,Cd 含量分别降低 46%、59%、72%、78%,Pb 含量分别降低 82%、84%、87%、90%(图 4)。

### 2.5 秸秆猪粪有机肥对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

培养后 35 d,不同剂量秸秆猪粪有机肥对土壤 pH 值均有显著影响,分别增加 0.57、1.00、1.17、1.35。与对照相比,

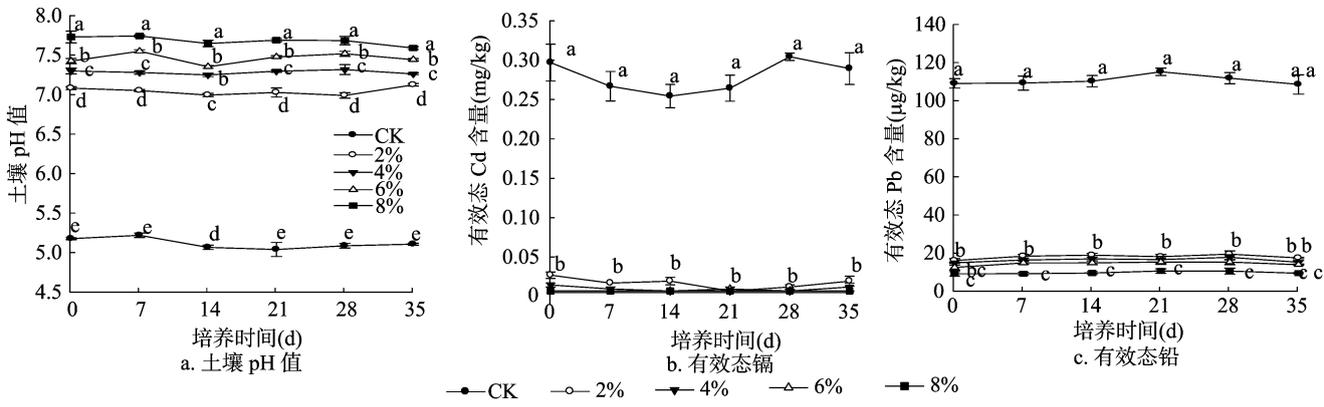


图2 秸秆灰对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

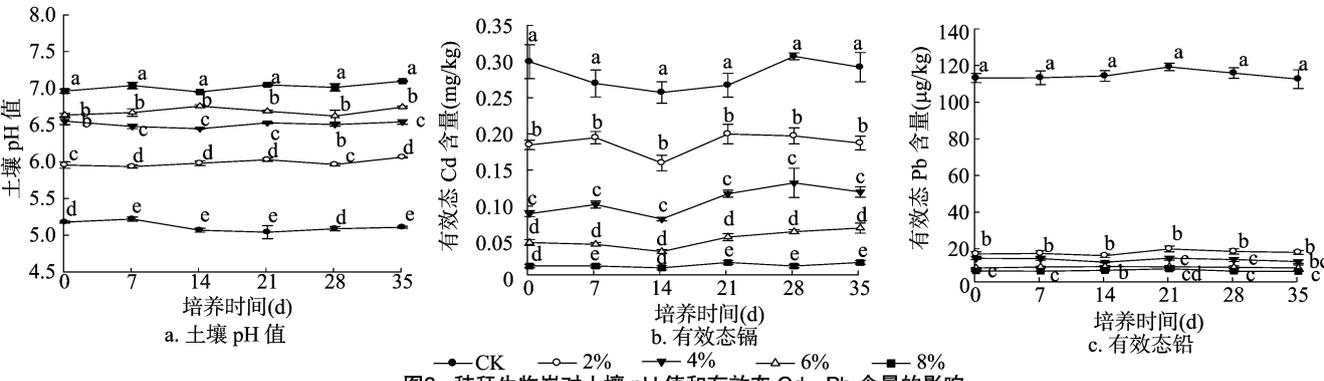


图3 秸秆生物炭对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

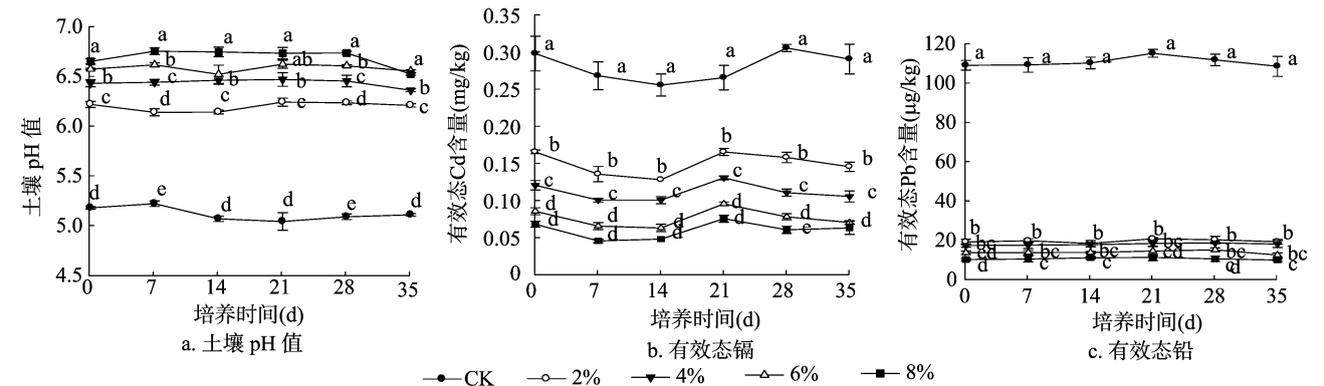


图4 秸秆垫料有机肥对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

培养后 35 d 的不同剂量秸秆垫料猪粪有机肥能显著降低土 有效态 Pb 含量分别下降 77%、78%、85%、91% (图 5)。

壤有效态 Cd 含量, 分别下降 37%、62%、66%、70%, 土壤有

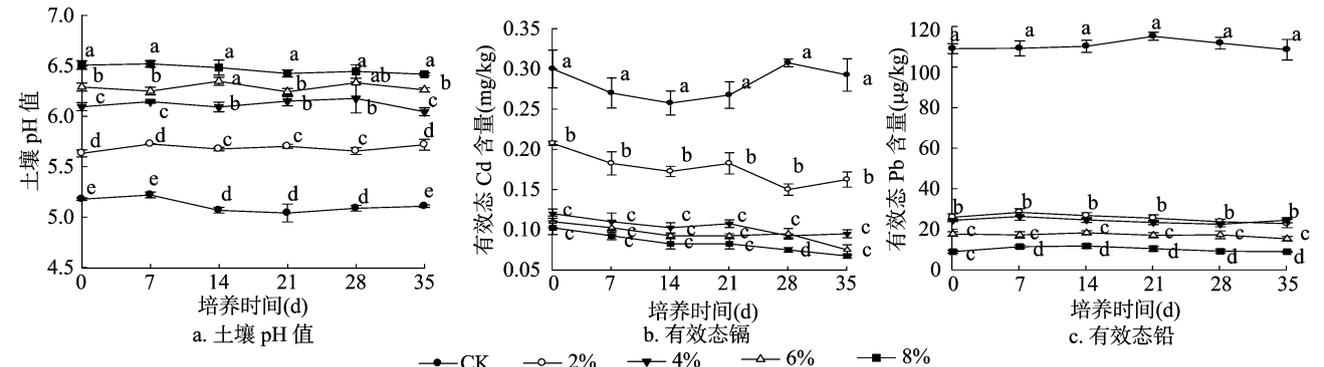


图5 秸秆猪粪有机肥对土壤 pH 值和有效态 Cd、Pb 含量的影响

除秸秆粉外,施用不同秸秆材料的土壤有效态 Cd、Pb 含量均随着添加剂量增加而显著减小,剂量为 2% 即可显著固定土壤 Cd。固定土壤 Cd 效果的大小顺序为:秸秆灰 > 秸秆生物炭 > 秸秆垫料有机肥 > 秸秆猪粪有机肥 > 秸秆粉,固定土壤 Pb 效果的大小顺序为:秸秆灰 > 秸秆生物炭 > 秸秆猪粪有机肥 > 秸秆垫料有机肥 > 秸秆粉。

### 3 讨论

秸秆粉对土壤 Pb 有一定的固定作用,但随着施用剂量增加,土壤有效态 Pb 含量显著增加,而且 Cd 的溶出效果增强(图 1)。因此,秸秆直接还田可能会对土壤修复带来一定的风险,这与前人的观点<sup>[16]</sup>一致。秸秆直接还田将大量的有机酸和可溶性有机碳带入土壤,使土壤中重金属活性和迁移能力提高,促进农作物对重金属的吸收,增加重金属的污染风险<sup>[3,17-18]</sup>。相反也有研究表明,秸秆施用能改变土壤中重金属的化学形态,提高土壤重金属有机结合态、氧化物结合态或残渣态的含量,抑制农作物对重金属的吸收,减小重金属污染风险<sup>[4-6,19]</sup>。此外还有研究表明,随着秸秆还田时间延长,氧化锰结合态和有机质结合态吸附的金属离子会随着有机质分解和活性锰还原被释放出来,向交换态转化,活性增强<sup>[5]</sup>。可见,秸秆直接还田对土壤重金属的影响较为复杂,其修复效果还没得到一致的结果。秸秆灰能显著降低土壤有效态 Cd、Pb 含量(图 2),这可能与土壤 pH 值显著增加有关。秸秆灰可能通过降低土壤中 H<sup>+</sup> 浓度显著提高土壤 pH 值,增加土壤表面负电荷,促进对重金属阳离子的吸附,显著降低土壤 Cd、Pb 金属元素活性<sup>[20-23]</sup>。生物炭施入土壤后能增加土壤肥力、pH 值、负电荷量以及土壤阳离子交换量(CEC),改良土壤环境,土壤表面的吸附、离子交换和官能团络合作用会显著降低土壤 Pb、Cu、Cd、Zn 等重金属的生物有效性<sup>[6-9,24]</sup>。由此可以推断,秸秆生物炭能显著增加土壤 pH 值,本身可能具有较大的比表面积和良好的孔隙结构,表面具有大量含氧基团和矿物质,这些特点均对土壤 Cd、Pb 具有较强的吸附作用(图 3)。

本研究中秸秆灰和秸秆生物炭对土壤 Cd、Pb 的固定率均稍大于秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥(图 1 至图 5)。但秸秆焚烧过程中,不仅会对环境造成二次污染,同时也会导致秸秆中氮、磷营养元素和土壤有机质大量损失,也有研究表明秸秆灰应用于土壤中的重金属污染修复的稳定性较弱<sup>[7]</sup>。生物炭在土壤重金属污染修复中的应用已有大量研究,但生物炭制作成本较高。在土壤重金属污染修复中,最关键的不仅要看修复效果,而且还要考虑经济成本。秸秆垫料有机肥是将养殖发酵床垫料二次发酵制成有机肥,秸秆猪粪有机肥制作过程简单,二者既降低了原料(如垫料和猪粪)中重金属含量(低于国家允许标准),也提高了其肥性,成本较低<sup>[11-13]</sup>。结合本研究结果综合考虑,秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥能有效固定土壤中的重金属 Cd 和 Pb,改善土壤酸性环境,属于价格经济的修复材料。目前,将秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥应用于土壤重金属污染修复的研究还未见报道。因此,这 2 种秸秆材料的应用,既为农业废弃物充分利用提供了新的方式,又能解决土壤重金属污染的环境问题,符合废弃物资源化利用的重大策略。但是,有关二者固定土壤重金属的机理有待进一步研究。

### 4 结论

本研究显示,秸秆粉对土壤 Pb 有一定的固定作用,但随着施用剂量增加,土壤有效态 Pb 含量显著增加,而且 Cd 的溶出增强,所以秸秆直接还田可能会对土壤修复带来一定的风险。秸秆灰、秸秆生物炭、秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥均能显著固定土壤重金属 Cd 和 Pb。秸秆灰和秸秆生物炭对土壤 Cd 和 Pb 的固定率稍大于秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥,但秸秆垫料有机肥和秸秆猪粪有机肥制作过程简单、价格经济。因此,二者既能有效固定土壤重金属 Cd 和 Pb,又能改善土壤酸性环境,属于价格经济、秸秆利用新方式的修复材料。

### 参考文献:

- [1] 王爱玲,高旺盛,洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(1):142-144.
- [2] Tang X, Li Q, Wu M, et al. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 646-662.
- [3] 陈同斌,陈军. 土壤中溶解性有机质及其对污染物吸附和解吸行为的影响植物营养[J]. 肥料学报,1998,4(3):201-210.
- [4] 李恋卿,郑金伟,潘根兴,等. 太湖地区不同土地利用影响下水稻土重金属有效性库的变化[J]. 环境科学,2003,24(3):101-104.
- [5] 章明奎,唐红娟,常跃畅. 不同改良剂降低矿区土壤水溶态重金属的效果及其长效性水[J]. 土壤学报,2012,26(5):144-148.
- [6] Xu P, Sun C X, Ye X Z, et al. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 132: 94-100.
- [7] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, et al. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 229: 145-150.
- [8] Lu K P, Yang X, Gielen G, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 186(2, SI): 285-292.
- [9] Shu R, Dang F, Zhong H. Effects of incorporating differently-treated rice straw on phytoavailability of methylmercury in soil [J]. Chemosphere, 2016, 145: 457-463.
- [10] 朱洪. 基于畜禽废弃物管理的发酵床技术研究[D]. 南京:南京农业大学,2007:7-11.
- [11] 李娟. 发酵床不同垫料筛选及其堆肥化效应的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2012:50-52.
- [12] 郭彤,马建民,赵曾元,等. 不同使用时间和深度的发酵床垫料成分及重金属沉积规律的研究[J]. 中国畜牧杂志,2013,49(10):51-55.
- [13] 罗佳,刘丽珠,王同,等. 养猪发酵床垫料有机肥对辣椒产量及土壤微生物多样性的影响[J]. 土壤,2015,47(6):1101-1106.
- [14] Clemente R, Escolar A, Bernal M P. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(15):1894-1901.

刘振英,江亚斌,冯 焘,等. 表征玉米秸秆厌氧发酵过程稳定性的关键指标探究[J]. 江苏农业科学,2018,46(6):220-223.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.057

# 表征玉米秸秆厌氧发酵过程稳定性的关键指标探究

刘振英,江亚斌,冯 焘,王 雯

(天津理工大学环境科学与安全工程学院,天津 300384)

**摘要:**以玉米秸秆为原料进行中温连续发酵,并利用相关性分析和主成分分析,研究指标间的相关性及其主要影响因素。结果表明,各监测指标之间均呈现一定的相关关系,其中挥发性脂肪酸和总无机碳酸盐的比值(VFA/TIC)与其他指标之间的相关性比较显著,是具有代表性的指标;VFA/TIC与第一主成分(方差贡献率为64.40%)的相关系数(0.96)最大,是最主要的影响因子,可以表征发酵过程的稳定性。通过分析指标之间的相关性,并结合主成分分析证明VFA/TIC是表征厌氧发酵过程稳定性的关键指标。

**关键词:**玉米秸秆;厌氧发酵;挥发性脂肪酸;总无机碳酸盐;关键指标;相关性分析;主成分分析;稳定性

**中图分类号:** X712;O212.4 **文献标志码:** A **文章编号:**1002-1302(2018)06-0220-04

近年来,我国北方地区的雾霾天气明显增加,给人们健康造成极大威胁,秸秆焚烧作为造成雾霾天气的主要原因之一,受到了政府部门的严格控制<sup>[1]</sup>。我国是传统的农业大国,每年产生的农作物秸秆超过7亿t,其中玉米秸秆高达2.16亿t,所以对秸秆的资源化利用成为当前亟须解决的关键问题<sup>[2]</sup>。目前国内对于玉米秸秆的利用途径主要包括秸秆还田、畜牧饲料和工业原料等,但是利用率不高,大部分都被直接焚烧或废弃<sup>[3]</sup>。由于秸秆的有机质含量很高,通过厌氧发酵可以产生一种清洁的可再生能源——沼气,而且秸秆沼气化能量利用效率是直接燃烧的1.2~1.9倍,还可以避免直接焚烧造成的大气环境污染,减少雾霾的发生,因此可以将其作为理想的沼气工程原料<sup>[4]</sup>。

影响玉米秸秆厌氧发酵产沼气过程稳定性的因素很多,如温度、pH值、挥发性脂肪酸及碱度等。其中,pH值是厌氧发酵过程中一个重要控制指标,能够影响微生物的生长代

谢<sup>[5]</sup>。挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)是厌氧发酵过程中重要的中间产物,VFA的累积可能会引发体系的酸化,导致反应器失稳或者运行失败<sup>[6]</sup>。总无机碳酸盐(total inorganic carbonate, TIC)可以对反应体系内的酸性物质起缓冲作用,维持体系内部环境的稳定,是衡量体系缓冲能力的重要指标<sup>[7]</sup>。Jie等研究不同pH值对污泥厌氧发酵过程中VFA质量分数的影响时发现,pH值在10左右最有利于VFA的积累<sup>[8]</sup>;郑福生等分析了TIC对厌氧发酵体系的影响,认为TIC是厌氧反应器稳定运行的重要参数<sup>[9]</sup>;张彤等探究了鸡粪与秸秆混合厌氧发酵过程中pH值、VFA及产气效果的关系,结果表明,pH值与日产气量成正比,VFA与日产气量成反比<sup>[10]</sup>;李雪等研究了不同秸秆厌氧发酵产沼气的效果,获得了不同秸秆的产气潜力<sup>[11]</sup>。但是目前鲜有对不同指标进行综合分析的研究报道,且单个指标分析不能表征各指标间的联系,易受原料、工艺及外部环境因素的影响,进而影响其指导实际工程的能力,削弱其代表性。因此,本研究以玉米秸秆为原料,模拟实际工程连续进料的方式进行厌氧发酵试验,通过对pH值、VFA、TIC、甲烷含量及日产气量等指标的测定及分析,研究指标间的相互关系及对过程稳定性的影响,以期获得发酵过程的关键性指标,从而为发酵工程提供一定的技术参考。

收稿日期:2016-11-07

基金项目:教育部人文社会科学研究项目(编号:11YJAZH025)。

作者简介:刘振英(1978—),女,河北故城人,博士,副教授,主要从事固体废弃物资源化利用技术研究。E-mail:seeseaivy@126.com。

[15] Liu L A, Chen H S, Cai P, et al. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2/3): 563-567.

[16] 单玉华,李昌贵,陈 晨,等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1362-1366.

[17] 陈京都,刘 萌,顾海燕,等. 不同土壤质地条件下麦秸、铅对镉在水稻-土壤系统中迁移的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1295-1299.

[18] 袁雪涛,谷海红,李富平,等. 施用玉米秸秆对铅锌尾矿速效养分和重金属活性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(7): 36-40.

[19] 张 晶,于玲玲,辛术贞,等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 685-691.

[20] Lee S H, Kim E Y, Park H, et al. *In situ* stabilization of Arsenic and metal-contaminated agricultural soil using industrial by-products[J]. *Geoderma*, 2011, 161(1/2): 1-7.

[21] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199/200: 119-127.

[22] 陈 杰,张 晶,宋靖珂,等. 草木灰对单一及复合污染土壤中铜、铅和铬的钝化[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(8): 1947-1951.

[23] 施培俊,王冠华,陈亚华,等. 原位化学钝化技术在重金属污染土壤修复中的研究进展[J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(增刊1): 121-124.

[24] 王丹丹,林静雯,丁海涛,等. 牛粪生物炭对重金属镉污染土壤的钝化修复研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(12): 183-187.