

添加沸石对鸡粪高温堆肥磷钾径流及淋洗损失的影响

魏宗强^{1,2}, 罗一鸣^{2,3}, 吴绍华¹, 孙钦平², 刘本生², 李吉进^{2*}

(1.南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:采用鸡粪与玉米秸秆在露天自然条件下进行好氧堆肥,系统研究了堆肥期间磷钾的径流与淋洗损失及其环境风险,并对分析了添加沸石对堆肥养分损失的影响。结果表明:磷的损失率小于 10%,主要通过径流和淋洗途径损失;钾的损失率在 13%~16%之间,添加沸石可以有效减少堆肥期间钾素损失,提高堆肥产品的钾含量;堆肥期间磷钾流失浓度逐渐降低,随时间变化符合线性方程 $y=a+bt$ 及一级动力学方程 $y=ae^{kt}$;径流水中总磷($3.39\sim 21.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与无机磷($2.05\sim 17.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)浓度均超出了引起水体富营养化的风险阈值;与堆肥前相比,单季堆肥可导致 30 cm 土层土壤速效磷及 60 cm 土层土壤速效钾含量显著提高,添加沸石可降低堆肥期间养分淋洗损失。长期露天堆肥对地表水及地下水存在安全隐患。

关键词:堆肥;磷;钾;沸石;径流损失;淋洗损失

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)12-2486-07

Effects of Zeolite Addition on the Loss of Phosphorus and Potassium Through Runoff and Leaching in Poultry Manure Composting

WEI Zong-qiang^{1,2}, LUO Yi-ming^{2,3}, WU Shao-hua¹, SUN Qin-ping², LIU Ben-sheng², LI Ji-jin^{2*}

(1.School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3.College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: An outdoor pilot scale experiment of high-temperature composting, that used poultry manure and corn straw as composting materials, was carried out to study the effects of zeolite on the loss of phosphorus (P) and potassium (K) through runoff and leaching. Phosphorus loss was relatively low (<10% of the initial P), and mainly lost through runoff. The natural zeolite that was added in the initial mixture decreased K loss during composting, and improved the K content of the composting product in comparison with the control treatment. Concentrations of TP, water soluble P, and TK in runoff decreased as composting proceeded, and fitted for a linear ($y=a+bt$) or first-order kinetics ($y=ae^{kt}$) regression. Concentrations of total P and soluble P of runoff during composting, which were $3.39\sim 21.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $2.05\sim 17.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, exceeded the threshold of eutrophication. Accumulated P loss through leaching were 2.78 g and 3.28 g for control and zeolite treatments, in which 20%~30% was organic P. The composting in an open windrow resulted in Olsen-P and available K leaching to a depth of 30 cm and 60 cm beneath the composting site, respectively. Zeolite addition can reduce the loss of P and K through leaching during composting. Long-term open composting has a great potential risk of surface and shallow groundwater pollution.

Keywords: composting; phosphorus; potassium; zeolite; runoff; leaching

随着我国畜禽养殖规模的不断扩大及集约化程度的不断提高,由畜禽粪便带来的环境污染问题日益

加剧。同时,随着农业生产规模的不断扩大,农业废弃物的治理越发引起人们的关注^[1]。农业废弃物是一个巨大的潜在资源库,含有丰富的氮磷钾等营养元素。以畜禽粪便、农作物秸秆等为主要原料混合堆积、腐熟而成的农家堆肥,既可以处理畜禽粪便和秸秆,提升土壤肥力,又可改善养殖场环境卫生,被广大养殖户广泛采用^[2-3]。但是,农家堆肥往往随时、随地、随料进行,发酵过程中存在大量养分损失,不仅降低了堆

收稿日期:2012-07-08

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103014-3);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B01)

作者简介:魏宗强(1985—),男,山东胶南人,博士研究生,主要从事土壤质量变化方面研究。E-mail:zqwei85@163.com

* 通信作者:李吉进 E-mail:lijijin65@yahoo.com.cn

肥的肥料价值,对周边环境也造成了污染^[4],如果处置不当还可能加剧农村面源污染^[5]。

沸石以其特有的硅酸盐四面体结构对阳离子有较高的吸附性能,常被用作物理性吸附剂降低堆肥养分损失^[6-9]。已有的研究表明,添加一定比例的沸石可以有效减少堆肥过程中的氨挥发损失^[6-7];也有一些研究认为,由于沸石呈碱性,添加天然沸石对减少猪粪、鸡粪堆肥氨挥发效果不明显^[8-9]。Zorpas 等研究发现,沸石添加剂可显著降低污泥堆肥水溶性重金属含量^[10]。但是,沸石添加剂对堆肥磷钾损失的影响目前这方面的研究还比较少,特别是在开放环境中进行接近堆肥工程实践的研究鲜有报道。目前对堆肥养分损失的研究多集中于气体损失(氨挥发和温室气体)等方面^[11-12],但渗出水流失的贡献比例也较高^[13],对水溶性氮磷化合物随有机肥渗出水流失的研究多集中在堆肥施入土壤后^[14],而很少关注到堆肥过程中的溶出养分损失。

本研究在露天自然条件下模拟农户小型堆肥,系统研究了堆肥期间磷钾元素的径流与淋洗损失,以常规堆肥为对照,研究了添加沸石对堆肥期间养分损失的影响及其在农村堆肥实践中的应用潜力,以期为进一步保全农家堆肥养分、控制二次面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验设在北京绿富隆农业示范园,采用鸡粪和玉米秸秆在露天条件下进行好氧堆肥。鸡粪和玉米秸秆均取自附近农村,沸石取自河北省赤城攀宝集团,NH₄⁺交换量为 1.36 mol·kg⁻¹,缓效钾含量为 0.97%,速效钾含量为 0.89%。堆肥前秸秆粉碎成<5 cm 的长段,沸石过 80 目筛。堆肥材料基本性质见表 1。

1.2 试验设计

试验在露天开放条件下进行,设对照和添加沸石两个处理。对照处理采用鸡粪与玉米秸秆堆肥,因鸡粪的碳氮较低,而秸秆碳氮比相对较高并且密度小、体积大,为保证堆肥有充分的高温腐熟时间,且二者

能够充分混匀,鸡粪与秸秆按鲜重 2.5:1 的比例(鸡粪 62.5 kg,秸秆 25 kg)进行混合,所得堆体的 C/N 为 12;沸石处理在对照处理基础上,按玉米秸秆、鸡粪和沸石鲜重比 2.5:1:1 的比例(鸡粪 62.5 kg,秸秆 25 kg,沸石 22 kg)混合均匀,用自来水将对照和添加沸石处理混合物料的含水率调节至 60%~70%。每个处理均设 3 次重复,堆料经压实后体积为 1 m³,堆肥小区面积为 4 m²。堆肥开始后第 11 d 和第 35 d 进行翻堆。堆肥期间每日 9:00 和 15:00 用温度计测定堆体温度。堆体四周铺设 20 cm 深径流槽,设置塑料桶(200 L)收集径流水样(图 1)。堆肥场区设置雨量器,每次降雨结束后,24 h 内测量降雨量及堆体径流量。同时,混匀所收集水样,取 2000 mL 于实验室测定 EC、pH 值、总磷、无机磷以及总钾等指标。在堆肥开始前及结束后,对堆肥小区土壤按 0~30、30~60、60~90、90~120、120~150、150~180 cm 土层取样,每小区均匀取 3 钻(直径 5 cm)混合而成 1 个土样,实验室测定土壤速效磷及速效钾。在堆肥起始、翻堆以及结束时采集堆肥样,样品均匀分成两份,一份在阴凉处自然风干待测,另一份在实验室进行鲜样指标测定。

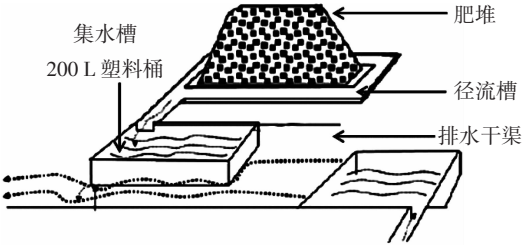


图 1 堆肥实验小区布局
Figure 1 Pattern of poultry manure composting field

1.3 分析测试方法

水样经定性滤纸过滤后,钼蓝比色法测定无机磷含量;总磷采用 K₂S₂O₈ 氧化-钼蓝比色法测定^[15];总钾采用火焰光度法测定。土壤速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定;速效钾采用 1.0 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄ 浸提-火焰光度法测定^[16],pH 值采用玻璃电极法,电导率采用电导率仪测定。

堆肥有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用

表 1 堆肥材料基本性质
Table 1 Properties of composting materials

项目	全氮/%	全磷 P ₂ O ₅ /%	全钾 K ₂ O/%	有机质/%	水分/%	C/N	pH 值
鸡粪	3.64	3.23	3.52	55.30	18.80	8.80	5.30
玉米秸秆	0.87	0.34	2.10	69.80	7.56	46.40	9.29
沸石	—	—	1.85	—	—	—	7.87

H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯氏定氮法;全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼钒黄比色法测定;全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-火焰光度法测定^[17]。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 8.2(SAS Institute, 2001)软件进行统计分析。对照与沸石处理堆肥期间的养分损失差异采用 T 检验进行分析(Proc T Test),径流水样中各元素之间的相关系数采用皮尔逊相关分析法(Proc Corr),采用线性方程以及一级动力学方程对养分径流损失动态进行拟合(Proc Reg)。

2 结果与讨论

2.1 沸石对堆肥温度的影响

如图 2 所示,堆肥共经历高温期、降温期和稳定期三个阶段。沸石处理和对照处理的高温期均能持续 7 d 以上,并且堆体温度>50℃的时间均超过了 5 d。沸石处理堆肥期间堆体平均温度为 42.4℃,略高于对照处理(40.3℃),其中,高温期及降温期沸石处理堆体发酵温度均高于对照处理,特别是在降温期,添加沸石堆肥温度显著高于对照处理($P<0.01$,表 2)。

堆肥高温期是高温堆肥腐熟过程的主要阶段,是生物分解作用和杀灭有害细菌及杂草种子的关键时期^[18],Lung 等发现,堆肥过程杀灭有害菌的能力与其高

温(>55℃)阶段的持续时间存在显著相关关系^[19]。堆肥第 6 d,堆体温度达到最高(65.8℃)。Venglovsky 等的研究表明,按质量比 1%~2%添加沸石可有效提高堆肥升温速率以及堆体发酵温度^[20]。本试验发现沸石与对照处理在高温阶段堆体温度相差不大,但在降温期沸石处理堆体温度要显著高于对照处理($P<0.01$),说明添加沸石不会影响堆肥高温发酵过程,并可能促进堆体升温保温。由于添加沸石的处理沸石的添加量较大,从而影响堆体的大小,而堆体大小对堆体增温保温的影响很大,这也可能是导致对照的温度略低于沸石处理的重要原因。

2.2 沸石对堆肥养分损失的影响

堆肥前对照和沸石处理的干重分别为 68.30、87.50 kg;随着堆肥的进行,微生物对有机物料不断分解,堆肥结束时两处理干重分别降至 44.90、51.01 kg(表 3)。与对照相比,发酵期间沸石处理堆体体积减小迅速,堆肥干物重与有机质的损失率较高($P<0.1$),这可能与发酵过程中沸石处理堆体温度相对较高,堆肥发酵程度比较剧烈有关。

堆肥期间磷的损失率小于 10%,主要通过淋洗和径流过程损失,沸石与对照处理通过径流损失的磷分别为 3.28、2.78 g,两者之间差异不显著($P=0.402$)。堆肥期间钾的损失率在 13%~16%之间。与磷相比,钾更容易通过径流途径损失,沸石处理钾素的损失率为 13.35%,小于对照处理(15.94%)。同时,沸石本身含有矿物钾(表 1),经过高温腐熟以及有机酸的作用这些钾可能会被活化变成有效态,从而在一定程度上提高堆肥产品的有效钾含量。沸石具有特殊的“分子筛”结构以及较高的比表面积,沸石包衣肥料以及与肥料混施能有效增强对铵态氮、磷酸盐以及钾的吸附,提高土壤的保肥性能^[21-22]。本研究结果表明,与对照处理相比,添加沸石能够减少堆肥钾素损失,而磷素损失略有增加,两者均没达到显著性水平($P=0.392$, $P=0.402$),这可能与实验中堆体设置较小,导致处理内误差较大有关。

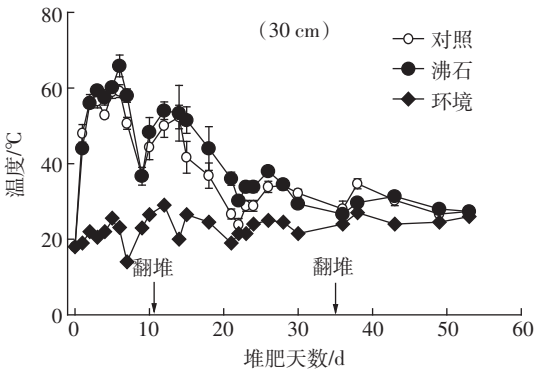


图 2 堆肥期间堆体温度变化
Figure 2 Changes of the temperature during composting

表 2 添加沸石对堆体温度的影响
Table 2 Effect of zeolite addition on the temperature during composting

处理	高温期(1~15 d)		降温期(16~30 d)		稳定期(>30 d)		堆肥期	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
对照/℃	36.7~59.2	51.3	23.8~36.8	30.7	26.7~34.7	29.4	23.8~59.2	40.3
沸石/℃	36.8~65.8	53.1	29.3~38.0	35.0	26.7~31.3	28.6	26.7~65.8	42.4
P	0.691		0.006		0.474		0.434	

注:P 为采用 T 检验对对照与添加沸石处理不同时期堆体温度均值进行差异分析(n=3)。

2.3 堆肥养分径流损失

堆肥期间共经历 16 次降雨,其中有 10 次产生了

表 3 堆肥期间不同处理干物质与养分平衡

Table 3 Mass and nutrient balance(dry weight basis) of poultry manure during composting process

项 目		干物质	有机质	全磷(P)	全钾(K)
对照	堆肥前/kg	68.30	45.32	1.57	1.35
	堆肥后/kg	44.90	17.70	1.47	1.14
	总损失/kg	23.40	27.62	0.10	0.22
	径流/g	—	—	2.78	47.18
	总损失/%	34.26	60.94	6.44	15.94
沸石	堆肥前/kg	87.50	45.32	1.57	1.59
	堆肥后/kg	51.01	13.40	1.45	1.38
	总损失/kg	36.49	31.92	0.12	0.21
	径流/g	—	—	3.28	38.53
	总损失/%	53.43	70.43	7.40	13.35
(总损失)P		0.091	0.089	0.402	0.392

注:P 为对照和沸石总损失显著性检验。

有效径流。堆肥期间沸石处理的径流量约为 480 L,高于对照处理 440 L(表 4),这可能与添加沸石后发酵腐熟强度较大,堆体体积迅速变得小且紧实,从而更容易产生径流有关。堆肥期间径流水样中总磷与无机磷的浓度分别为 3.39~21.64、2.05~17.69 mg·L⁻¹,均有引起水体富营养化的风险^[23-24]。Smith 等研究发现,水体中总磷与无机磷浓度分别超过 0.02、0.01 mg·L⁻¹时就有产生水体富营养化的风险^[25]。与磷素相比,径流水中总钾浓度较高,在 18.46~256.45 mg·L⁻¹之间。因此,露天好氧堆肥要注意避开雨季,尽量避免堆肥养分的径流损失。另外,可以通过棚膜覆盖来控制堆肥期间的养分损失^[3]。

径流水样养分浓度(总磷、无机磷、总钾)随堆肥时间逐渐降低。采用线性方程 $y=a+bt$ 及一级动力学方程 $y=ae^{bt}$ 对堆肥期间磷钾元素流失动态拟合后发现,沸石处理堆肥期间养分径流损失动态变化符合线性方程及一级动力学方程($P<0.05$),而对照处理拟合

表 4 不同处理堆肥期间的降雨量,径流量及径流水样中的养分含量

Table 4 Rainfall, runoff and nutrient concentration of runoff collected from poultry manure composting in open windrows

堆肥天数/d	降雨量/mm		径流量/L	EC/mS·cm ⁻¹	pH	总磷/mg·L ⁻¹	无机磷/mg·L ⁻¹	总钾/mg·L ⁻¹
31	16.6	T	26.30	1.04	7.23	10.09	7.63	116.5
		Z	33.00	2.27	6.89	21.64	17.69	256.45
40	10.2	T	4.77	0.79	7.83	6.39	5.89	55.79
		Z	7.27	0.41	8.08	7.97	4.71	56.54
62	10	T	40.79	1.13	7.68	8.23	8.00	237.99
		Z	46.3	0.92	7.86	8.39	7.85	114.77
63	6	T	41.76	1.24	7.55	8.11	9.19	216.00
		Z	42.91	1.04	7.52	6.69	5.07	111.00
65	9.3	T	43.14	0.73	7.84	4.28	3.16	101.00
		Z	49.52	0.85	7.6	3.39	2.05	86.00
73	23	T	63.02	0.58	7.25	6.59	6.56	86.28
		Z	68.76	0.65	7.2	6.84	6.41	79.78
80	2.3	T	9.30	0.71	7.35	4.69	4.55	120.63
		Z	11.43	0.65	7.25	5.52	4.76	69.54
82	13.1	T	53.83	0.65	7.28	5.69	5.77	104.41
		Z	56.12	0.56	7.28	5.21	5.33	72.39
85	11.2	T	76.52	0.48	7.27	5.01	5.16	88.02
		Z	76.23	0.41	7.29	4.32	4.57	43.65
99	30.6	T	77.38	0.56	7.62	6.22	3.11	24.33
		Z	90.59	0.46	7.54	5.65	2.82	18.46
最大值	30.6		90.59	2.27	8.08	21.64	17.69	256.45
最小值	2.3		4.77	0.41	6.89	3.39	2.05	18.46
均值		T	43.68	0.79	7.49	6.53	5.9	115.03
		Z	48.21	0.82	7.45	7.56	6.13	90.82

注:T 为对照处理,Z 为沸石处理。

效果不显著($P>0.05$)。拟合参数如表 5 所示。沸石处理径流水样中各养分(总磷、无机磷、总钾)的初始浓度均高于对照处理,说明在堆肥前期沸石处理养分径流损失风险较高,这可能与其前期发酵腐熟强度较高有关。但是沸石处理径流水样养分浓度的下降速率高于对照处理,特别是钾素,至堆肥后期已显著低于对照处理。彭莉等研究发现,猪粪与水稻秸秆堆肥径流水中总磷与水溶性磷浓度随时间的变化符合线性方程($R^2>0.9$)^[9]。本研究中沸石处理亦得到相似结果,但对照处理线性拟合效果不显著,两处理线性拟合优势度较低($R^2<0.6$),这可能因为堆肥径流水中养分浓度不仅与堆肥腐熟过程有关,还受到降雨量以及雨强的影响。

堆肥径流量与降雨量极显著正相关($r=0.659,P=0.002$),与水样电导率、总磷、无机磷及总钾含量等负相关,但与养分累积径流损失正相关。堆肥径流水样电导率与养分浓度(总磷、无机磷、总钾)均呈显著相关关系($P<0.05$),说明总磷、无机磷与总钾是径流水中的主要离子成分,并且可以用径流水电导率来指示堆肥养分的径流损失(表 6)。堆肥期间径流水中总磷与总钾浓度极显著相关($P<0.001$),说明堆肥过程中

三者有可能是以“组合”的形式随水流失,堆肥养分径流损失不仅以无机盐离子,还有可能是以微小堆肥物料颗粒(有机)形式损失^[9]。

堆肥累积径流损失中磷主要以无机磷形态流失。沸石处理总磷及有机磷损失均高于对照处理,但钾素的损失小于对照处理(图 3)。养分径流损失主要来自降雨对堆体表面的冲刷。鸡粪是堆肥磷素径流损失的主要来源,堆肥前期发酵活动强烈,同时伴有几次强降雨,是堆肥径流损失的主要阶段,沸石处理前几次径流水中磷的浓度高于对照处理(表 4),这可能是导致其磷素累积损失较高的主要原因;钾较磷更容易移动,秸秆与鸡粪都有可能成为径流水中钾素的来源,沸石处理堆肥中后期径流水中总钾浓度远低于对照处理,是导致其钾素径流损失较低的直接原因。高温期沸石处理发酵较剧烈,在堆肥中后期其堆体体积以及堆体表面积变得相对较小,从而减小了冲刷面积,一定程度上降低了钾素的径流损失。

2.4 堆肥养分淋洗损失

露天堆肥条件下,降雨会导致堆肥的径流损失,但不是所有的降雨都形成了径流,其中有一部分淋入堆体后,会被堆体吸收而在堆体中向下移动,最终引

表 5 堆肥期间磷钾元素流失的动态拟合方程
Table 5 Fit equations of nutrient concentrations in runoff and composting time

处理	总磷				无机磷				总钾			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>
<i>y=a+bt</i>												
对照	10.22	-0.05	0.38	0.06	9.42	-0.05	0.28	0.11	169.76	-0.80	0.06	0.48
沸石	19.89	-0.18	0.52	0.02	15.62	-0.14	0.43	0.04	250.46	-2.35	0.56	0.01
<i>y=ae^{bt}</i>												
对照	10.48	-0.01	0.32	0.09	10.67	-0.01	0.29	0.11	206.25	-0.01	0.12	0.32
沸石	21.27	-0.02	0.51	0.02	15.83	-0.02	0.35	0.07	408.74	-0.03	0.57	0.01

注:*P*表示回归方程显著性检验;*a*表示初始浓度;*b*表示斜率或对数斜率,即变化速率。

表 6 堆肥期间降雨量、径流量及各径流水样养分浓度之间的相关系数
Table 6 Spearman's correlations of rainfall, runoff and nutrient concentration of runoff collected from poultry manure composting in open windrows

	降雨量	径流量	EC	pH	总磷	无机磷	总钾
降雨量	1						
径流量	0.659**	1					
EC	-0.138	-0.291	1				
pH	-0.156	-0.238	-0.312	1			
总磷	0.133	-0.222	0.865***	-0.354	1		
无机磷	-0.029	-0.22	0.871***	-0.439	0.933***	1	
总钾	-0.334	-0.284	0.845***	-0.227	0.655**	0.786***	1

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。

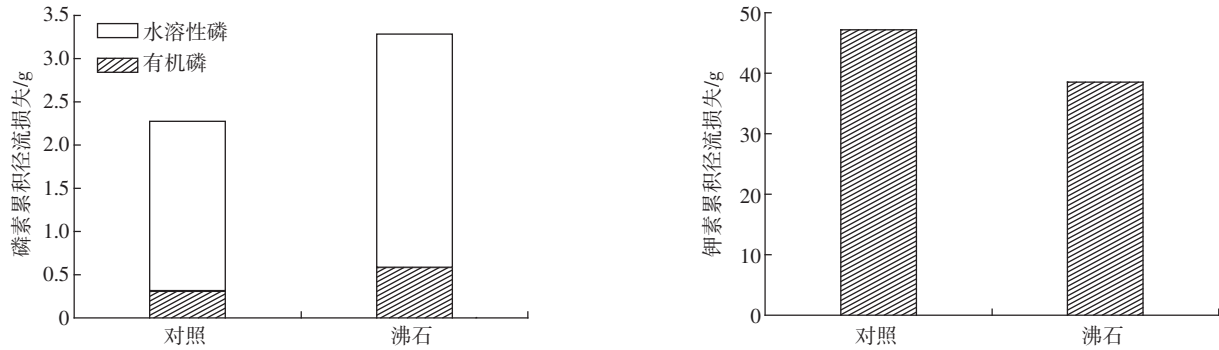


图3 堆肥期间磷钾元素的径流损失

Figure 3 Total loss of phosphorus and potassium from runoff during composting

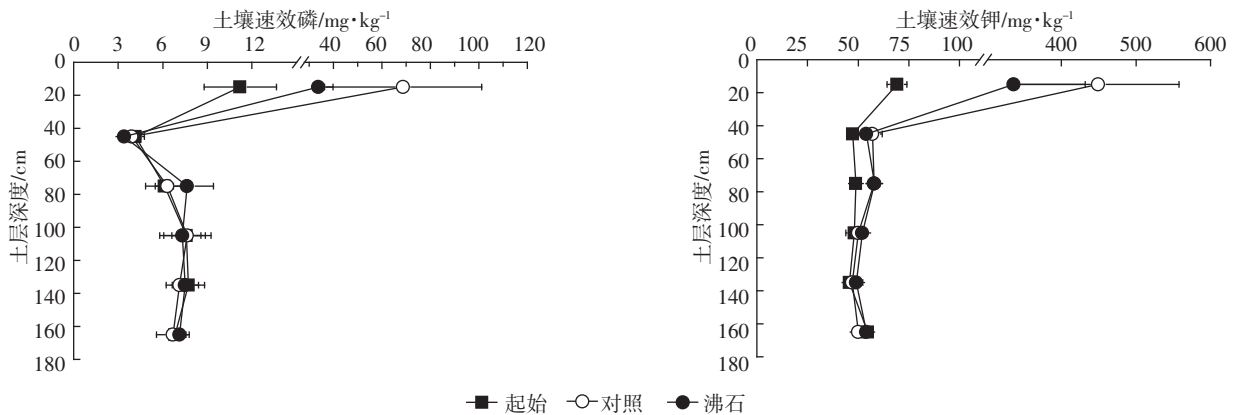


图4 堆肥前后土壤速效磷与速效钾含量的变化(0~180 cm)

Figure 4 Changes of the contents of soil Olsen-P and available potassium of different treatments during composting(0~180 cm)

起堆肥养分的淋洗损失。如图4所示,堆肥期间各处理磷素主要淋洗到0~30 cm土层。堆肥结束时,各处理0~30 cm土层土壤速效磷含量均显著高于其起始浓度($P<0.01$)。沸石处理0~30 cm土层土壤速效磷含量低于对照处理,但差异未达到显著水平(T 检验, $P=0.34$)。与堆肥前土壤速效钾含量相比,各处理堆肥期间钾素主要淋洗到0~30 cm土层,但是,30~60 cm土层土壤速效钾含量与起始浓度相比差异也达到了显著性水平,说明钾素至少能够淋洗到60 cm土层。堆肥收获时沸石处理0~30 cm土层土壤速效钾含量为 $336 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于对照处理($449 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3 结论

(1) 在野外试验条件下进行鸡粪与玉米秸秆混合堆肥,添加一定比例的沸石可以提高堆体(30 cm)发酵温度,延长高温发酵时间并在降温期有效维持堆体温度。

(2) 堆肥处理后,堆料磷钾元素损失率分别在2%~8%,13%~16%之间,沸石处理磷素径流损失高于对

照处理,但钾素径流与淋洗损失低于对照处理。

(3) 堆肥期间径流水中磷钾浓度逐渐降低,其中沸石处理养分流失随时间变化符合线性方程 $y=a+bt$ 及一级动力学方程 $y=ae^{bt}$ 。但是总磷与无机磷浓度均超出了引起水体富营养化的风险阈值,其范围分别为 $3.39\sim21.64$ 、 $2.05\sim17.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169-173.
SUN Yong-ming, LI Guo-xue, ZHANG Fu-dao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 169-173.
- [2] 王俊起,徐桂华,孙凤英,等. 农户小型高温堆肥的实验研究[J]. 环境与健康杂志, 1999, 16(1): 22-23.
WANG Jun-qi, XU Gui-hua, SUN Feng-ying, et al. Experimental study on high-temperature mini-composting households[J]. Journal of Environment and Health, 1999, 16(1): 22-23.
- [3] 彭莉,王莉玮,杨志敏,等. 降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 407-411.
PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, et al. Effects of runoff on ni-

- trogen and phosphorous loss from courtyard compost and its risk of non-point source pollution[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2):407-411.
- [4] Eghball B, Power JF, Gilley JE, et al. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26:189-193.
- [5] 魏宗强, 李吉进, 吴绍华. 露天鸡粪好氧堆肥氮素的径流及淋洗损失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):44-47.
- WEI Zong-qiang, LI Ji-jin, WU Shao-hua. Nitrogen loss in chicken manure compost through runoff and leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):44-47.
- [6] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):243-247.
- LUO Yi-ming, WEI Zong-qiang, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):243-247.
- [7] Lefcourt AM, Meisinger JJ. Effect of adding alum or zeolite to dairy slurry on ammonia volatilization and chemical composition[J]. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84:1814-1821.
- [8] 黄懿梅, 曲东, 李国学. 调理剂在鸡粪锯末堆肥中的保氮效果[J]. 环境科学, 2003, 24(2):156-160.
- HUANG Yi-mei, QU Dong, LI Guo-xue. Effect of adding amendments on preserving nitrogen during chicken manure and saw composting[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(2):156-160.
- [9] 林小凤, 李国学, 贺琪, 等. 堆肥化过程中氮素损失控制材料的添加试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):975-978.
- LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, HE Qi, et al. Materials of controlling nitrogen loss during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):975-978.
- [10] Zorpas AA, Loizidou M. Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:7545-7552.
- [11] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5):930-936.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the composting of different manures[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5):930-936.
- [12] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):247-254.
- HUANG Xiang-dong, HAN Zhi-ying, SHI De-zhi, et al. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):247-254.
- [13] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 42(2):103-111.
- [14] 饶雄飞, 金怡平, 胡红青, 等. 动物粪便堆肥的养分淋溶特征模拟研究[J]. 环境化学, 2007, 26(6):774-778.
- RAO Xiong-fei, JIN Yi-ping, HU Hong-qing, et al. Nutrients leaching from a soil column applied different amount of animal excrement compost[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(6):774-778.
- [15] 中华人民共和国国家环境保护部. GB/T 1893—1989 水质总磷的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 1990.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Standard number GB/T 1893—1989, Water quality—Determination of total phosphorus—Ammonium molybdate spectrophotometric method [S]. Beijing:China Zhijian Publishing House, 1990.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY525—2002 有机肥料[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Standard number NY525—2002. Standard of agriculture industry in China—organic fertilizer[S]. Beijing:China Zhijian Publishing House, 2002.
- [18] Eghball B, Lessing GW. Viability of weed seeds following manure windrow composting[J]. *Compost Science and Utilization*, 2000, 8:46-53.
- [19] Lung AJ, Lin CM, Kim JM, et al. Destruction of escherichia coli O157: H7 and Salmonella Enteritidis in cow manure composting[J]. *Journal of Food Protection*, 2001, 64:1309-1314.
- [20] Venglovsky J, Sasakova N, Vargova M, et al. Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96:181-189.
- [21] 刘广余, 李吉进. 沸石在复混肥中的作用与应用[J]. 华北农学报, 1998, 13(2):93-97.
- LIU Guang-yu, LI Ji-jin. Role and application of zeolite in compound fertilizers[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1998, 13(2):93-97.
- [22] 李华兴, 李长洪, 张新明, 等. 天然沸石对土壤保肥性能的影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2):237-240.
- LI Hua-xing, LI Chang-hong, ZHANG Xin-ming, et al. Effect of natural zeolite on nutrient preserving capability of degraded slope soil in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2):237-240.
- [23] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5):47-49.
- WANG Ming-cui, LIU Xue-qin, ZHANG Jian-hui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5):47-49.
- [24] 杨龙, 王晓燕, 王子健, 等. 富营养化水体磷阈值的动态 AGP 模拟研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1625-1630.
- YANG Long, WANG Xiao-yan, WANG Zi-jian, et al. Simulation on phosphorus threshold for lake eutrophication by a dynamic algae growth potential (AGP) experimentation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1625-1630.
- [25] Smith SJ, Sharpley AN, Berg WA, et al. Water quality characteristics associated with southern plains grassland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21:595-601.