

添加剂对猪粪好氧堆肥过程锌和铜形态的影响*

毛 晖 李荣华 黄懿梅 王朝辉

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:以猪粪和秸秆为原料,分别添加干物质质量分数10%的果渣、过磷酸钙和生物炭进行46 d好氧堆肥。研究了添加剂对堆肥过程重金属Zn和Cu形态的影响。结果表明:3种添加剂中果渣和生物炭较快进入高温期,结束时电导率(EC)分别为4.2、5.4和2.8 mS/cm。相比对照,添加剂处理降低了氮素质量分数损失分别为55.3%、54.4%和58.6%,均具有显著的保氮效果。添加剂处理的DTPA-Zn在总质量中所占比例下降幅度分别为3.9%、5.8%和5.7%,DTPA-Cu的下降幅度分别为11.0%、12.0%和12.3%,差异不显著。堆肥前、后,Sposito形态分析表明,各处理的Zn形态均以SP3和SP4为主,达到74.5%~87.4%;Cu形态以SP2和SP4为主,达到69.0%~80.9%。过磷酸钙和生物炭处理SP1形态Zn下降幅度大于果渣。3种添加剂处理SP1形态Cu比例均有所下降,其中过磷酸钙下降最显著。

关键词:猪粪 添加剂 好氧堆肥 锌 铜 形态

中图分类号:S141.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2013)10-0164-08

Effect of Additives on Forms of Zn and Cu during Aerobic Composting of Pig Manure

Mao Hui Li Ronghua Huang Yimei Wang Zhaohui

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Pig manure was mixed with wheat straw as bulking agent, the mixtures were amended with 0 or 10% additives including apple pomace, calcium superphosphate and biochar of total dry weight and composted for 46 d. Effect of three additives on composting process were studied. Additives of apple pomace and biochar could shorter the time to reach the high temperature period, electricity conductivity were 4.2, 5.4 and 2.8 mS/cm with three additives in the end, respectively. Three additives showed the ability of nitrogen conservation. The decrease rate of N loss compared with control were 55.3%, 54.4% and 58.6%, respectively. Rate of DTPA form in total amount decreased with 3.9%, 5.8% and 5.7% for Zn, 11.0%, 12.0% and 12.3% for Cu in three additives, respectively. The differences were not significant. Analysis of Sposito forms showed that Zn was mainly in the forms of SP3 and SP4, reached to 74.5%~87.4%, while Cu in the forms of SP2 and SP4, reached to 69.0%~80.9% of the total amount. SP1 form of Zn with treatments of calcium superphosphate and biochar decreased more than apple pomace, while SP1 form of Cu with treatment of calcium superphosphate decreased the most.

Key words: Pig manure Additives Aerobic composting Zinc Copper Form

引言

我国畜禽养殖业发展迅速,其区域化和集约化

养殖方式的特点越来越显著,结果导致养殖废弃物局部大量集中,大大加重了畜禽粪便的土地承载力^[1];同时,由于养殖户为了追求效益,预防畜禽疾

收稿日期:2013-05-21 修回日期:2013-07-08

* 国家自然科学基金资助项目(41201280)

作者简介:毛晖,博士生,主要从事农业环境保护研究,E-mail: maohui@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:王朝辉,教授,博士生导师,主要从事植物营养与农业环境保护研究,E-mail: w-zhaohui@263.net

病,大量使用含铜、锌、铬、硒和砷等元素的饲料添加剂,致使畜禽粪便中存在大量的重金属^[2]。虽然利用畜禽粪便生产有机肥是目前有效的畜禽粪便处理方式,但畜禽粪便中存在的大量重金属因具有一定的环境风险,而限制了其资源化利用的前景。众多研究报道指出,向堆肥物料中添加重金属钝化剂,如石灰^[3]、粉煤灰^[4]、磷矿粉^[5]、膨润土^[6]、海泡石^[7]、沸石^[8]、生物炭^[9]等,均能有效地降低堆肥中的 Cu、Zn、Mn 等元素的生物有效性。在这些重金属钝化剂中,磷矿粉和生物炭因具有优良的重金属钝化和保氮功能而备受关注^[9~10]。

然而,堆肥过程中添加剂的选择,只有结合当地资源,才能最大限度的达到变废为宝和促进其资源化利用的目的^[6]。我国苹果产量居世界第一,仅 2008 年已经达到 2 985 万 t,其中 20% 左右被用于生产果汁^[11],而果渣排泄量约为原料量的 30% 以上^[12]。因此,果渣多元化利用成为促进果汁企业可持续发展的必由之路。果渣富含有机质且蓬松多孔,理论上讲,若能将其作为添加剂和畜禽粪便的堆肥过程相结合,不失为一种废弃物资源化利用的优

良方式。同时,由于果渣中富含有机酸,较低的 pH 值有可能会缓解堆肥初期氨气的挥发^[13]。但这一点尚没有得到充分的科学证明,而且以果渣作为添加剂对于堆肥过程中重金属形态以及营养成分的影响还鲜有报道。

为此,本研究拟以猪粪为堆肥原料,以添加过磷酸钙和生物炭为对比,通过混合好氧堆肥过程来研究添加苹果渣对猪粪堆肥过程及重金属 Zn、Cu 形态的影响,以期为实现果渣和畜禽粪便的资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆制材料与装置

新鲜猪粪采自西北农林科技大学生态养殖场;秸秆采自杨凌区附近农田的小麦秸秆,并粉碎为 3 ~ 5 cm 左右的片段,苹果渣获赠于陕西省咸阳市礼泉县通达果汁厂,生物炭购自浙江省丽水市遂昌县神龙谷炭业有限公司,过磷酸钙($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)为国药集团化学试剂有限公司生产(化学纯)。堆肥物料的基本性状如表 1 所示。

表 1 堆肥物料的初始性质
Tab.1 Initial properties of composting materials

物料	含水率 /%	有机质质量 分数/%	pH 值	粒径 /mm	总氮质量比 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总磷质量比 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 Zn 质量比 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 Cu 质量比 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
猪粪	70.9	62.0	8.4	—	27.9	15.1	1 123.6	690.2
小麦秸秆	14.5	98.5	7.3	30 ~ 50	5.0	1.1	6.5	9.5
苹果渣	8.0	97.9	3.9	< 0.30	9.9	0.6	15.2	11.5
过磷酸钙	—	—	3.0	< 0.10	—	157.0	89.3	16.6
生物炭	10.5	94.5	7.7	2.0 ~ 3.0	2.5	0.2	0.4	0.3

注:“—”表示未检出。

堆肥装置为自制的高温好氧堆肥器,由密闭反应箱、保温层、筛板、支架、空气泵、通气管、缓冲瓶和温度测定仪等组成(图 1),有效容积约为 90 L,反应箱外紧贴 8 cm 厚的塑料泡沫保温层,夜间温度低时,将低温电热毯(30 ~ 40℃)包在保温层外侧,以防止堆体热量散失。

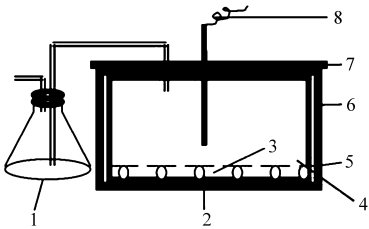


图 1 堆肥试验反应箱示意图

Fig.1 Schematic diagrams of composting reactor

1.缓冲瓶 2.支架 3.空气泵 4.缓冲层 5.筛板 6.保温层
7.盖子 8.温度检测仪

1.2 堆制方案与采样方法

堆肥过程共设 4 个处理:对照,将猪粪与秸秆按质量比 10.5:1(以鲜重计),含水率调节为 65% 左右,总质量约为 25 kg;其余 3 个处理分别添加堆料干质量分数 10% 的果渣、过磷酸钙和生物炭,分别命名为果渣、过磷酸钙、生物炭。充分混匀后,逐层堆放在反应箱的筛板上(未压实),堆制初期以 60 L/min 的流量从底部筛板向堆体均匀鼓风通气(每天上、下午各 30 min),直至堆肥进入稳定期(约 28 d)停止通风,共堆制 46 d。堆制期间,于每日 9:00 和 15:00 用智能 XMT616 型温度测定仪于堆体中部测定温度,取平均值作为堆体温度,并测定环境温度。同时,根据温度变化分别于堆肥 0、7、12、19、25、36、46 d 采集样品。取样前,先称取反应箱总质量,然后将堆肥物料充分混匀后多点取样 500 g 左右,并分为两份。其中,一份于 4℃ 冷藏;另一份于

40℃低温干燥后,在陶瓷研钵中研磨并过 1 mm 尼龙筛后备用。

1.3 测定指标及方法

含水率测定采用 105℃干燥失重法,电导率(EC)和 pH 值测定采用电极法(去离子水与鲜样的质量比5:1,雷磁 pH S-3C 型酸度计),有机质测定采用干样 550℃灼烧失重法。总凯氏氮用硫酸-H₂O₂消解,采用 FOSS TECATOR2300 型定氮仪测定^[6]。

Cu、Zn 有效态的提取参见文献[6],Cu 和 Zn 总量采用浓 HNO₃ + HClO₄ 消解法,Cu、Zn 的形态分级采用 Sposito 法进行^[14-15],其操作要点如表 2 所示。

表 2 重金属形态分级中 Sposito 浸提法操作条件

Tab.2 Experimental conditions of Sposito's procedure

步骤	试剂	提取条件	形态	标记
1	0.5 mol/L KNO ₃ H ₂ O	16 h	交换态和吸附态	SP1
		2 h,3 次		
2	0.5 mol/L NaOH	16 h	有机结合态	SP2
3	0.05 mol/L EDTA	6 h	碳酸盐结合态	SP3
4	4 mol/L HNO ₃	16 h,85℃ 水浴	硫化物结合态	SP4
5	浓 HNO ₃ + 浓 HClO ₄ (体积比 4:1)	消解	残渣态	SP5

为了表示堆肥过程中重金属的形态,采用形态的百分含量表示,即

$$S = \frac{X_i}{T} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5)$$

式中 S——形态百分含量,%

X₁ ~ X₅——交换态和吸附态、有机结合态、碳

酸盐结合态、硫化物结合态和残渣态提取质量比,mg/kg

T——总提取质量比,为各形态质量比之和,mg/kg

Cu、Zn 的测定采用日立 Z-3000 型石墨炉-火焰原子吸收分光光度计。试验中所有指标测定均设置 3 次重复,并取平均值。种子发芽指数 R_{GI}采用雪里蕻种子 25℃培养法测定^[6]。

2 结果与分析

2.1 堆肥中基本理化性质变化

堆肥中理化性质变化如图 2 所示。由图 2a 可见,堆体温度变化幅度在 24~66℃之间,有 7 d 以上温度大于等于 50℃,满足了杀死病原菌、寄生虫(卵)和杂草种子的基本要求^[16]。但不同处理的堆体温度达到高温期(≥50℃)所需的时间存在一定差异。其中,对照和生物炭处理约需 3.5 d,果渣处理需要 4 d,而过磷酸钙处理则需要 6.5 d 左右。造成这一现象的原因可能与添加剂本身的颗粒粒径大小密切相关。Belyaeva 等^[17]发现,添加粉煤灰抑制堆体高温过程的温度上升,是由于细小的粉煤灰颗粒阻碍了堆肥物料水分蒸发所致。这一点也在本研究中得到了部分证明,如过磷酸钙颗粒粒径小于 0.10 mm,果渣粒径小于 0.30 mm,而生物炭颗粒粒径为 2.0~3.0 mm。Gabhane 等^[18]报道了向杂草和树叶中添加颗粒较大的磷石膏和石灰、Villaseñor 等^[8]向污泥中添加颗粒较大的沸石进行好氧堆肥时均发现,添加颗粒较大的磷石膏、石灰或沸石等物质均对堆体温度的变化没有显著影响。

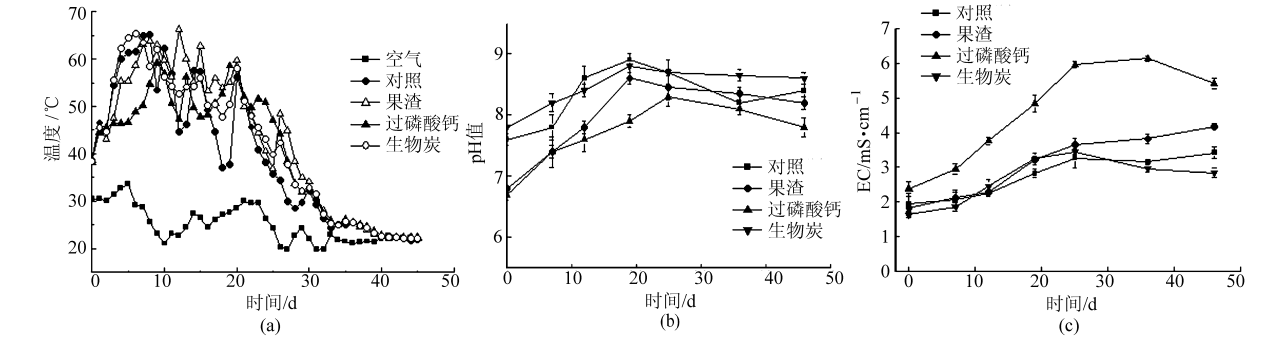


图 2 堆肥过程的温度、pH 值和 EC 变化
Fig.2 Changes of compost temperature, pH value and EC values during composting

由图 2b 可以看出,所有处理中 pH 值的变化基本呈现出先逐渐升高然后又逐渐降低的趋势。在堆肥初期 pH 值的升高,与堆肥初期氨气的挥发损失和有机酸逐渐被降解有关^[19];随着堆肥过程的进行,氨挥发的减弱和易分解有机质的耗竭以及堆肥过程中形成的碳酸氢盐缓冲体系等,使得堆肥后期

pH 值基本稳定在 8 左右^[20]。不同处理对堆体 pH 值的影响不同,如在堆肥初期果渣处理和过磷酸钙处理 pH 值也显著低于其他两个处理,而在 46 d 堆肥结束时,对照、果渣、过磷酸钙和生物炭处理堆肥在最终 pH 值分别达到 8.4、8.2、7.8 和 8.6,造成这一差异的原因可能是由于相比于秸秆和生物炭,果

渣和过磷酸钙本身具有很低的 pH 值(3.0 和 3.9),致使堆肥物料最初的 pH 值相对较低;另外,随着堆肥过程的进行,果渣的有机酸性成分分解较完全,而过磷酸钙带入的无机酸成分可能仍有一定保留,导致添加过磷酸钙处理中最终 pH 值相对较低,这一结果与顾文杰等^[10]的牛粪堆肥 28 d 结束时,添加过磷酸钙处理 pH 值为 7.0 左右,低于对照的 7.9 左右相一致。

EC 表明了堆肥的水溶性盐分含量程度,也能够提示农业利用中存在的盐渍化风险。由图 2c 可以看出,随着堆肥过程的进行,有机大分子的逐渐分解,各个处理堆体中 EC 均有所增加。相比较而言,生物炭处理增加幅度最小,为 2.8 mS/cm,而过磷酸钙处理增加幅度最大,超过了 García^[21]推荐的腐熟堆肥的 EC(小于 4.0 mS/cm),达到 5.4 mS/cm。对照处理小于推荐 EC 值,为 3.4 mS/cm,果渣处理与

推荐值相近,为 4.2 mS/cm。造成过磷酸钙处理增加幅度最大的原因与其本身含有的水溶性盐分较多有关。到堆肥后期,由于堆肥反应过程中产生伴随的络合和沉淀反应降低了堆肥的 EC^[22]。结果表明,长期施用以过磷酸钙作为添加剂的腐熟堆肥,可使堆肥产品 EC 增大,具有潜在的作物生理盐害,而添加生物炭处理较为安全。

堆肥过程的本质是有机物料的分解矿化和腐殖稳定化过程。各处理堆体有机质和总氮含量变化如图 3 所示。随着堆肥时间的延长,有机质的含量逐渐降低,相比小麦秸秆和果渣而言,过磷酸钙本身不含有机质,生物炭中所含的有机质也很有限,因而造成在堆肥初期对照处理和果渣处理有机质含量较高,添加生物炭和过磷酸钙处理中有机质含量较低,但在整个堆肥期间,各处理间有机质含量下降的幅度差异并不显著。

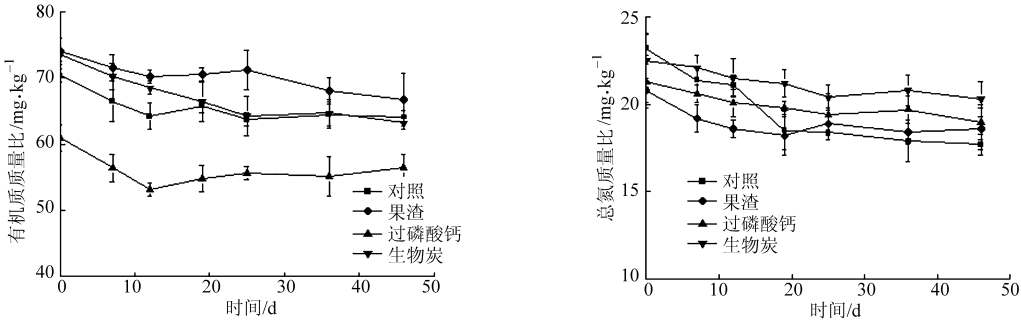


图 3 各处理堆体有机质和总氮含量变化

Fig. 3 Organic matter and total nitrogen changes in treatments during composting

本试验中各处理的氮素质量损失分别为:对照 23.7%、果渣处理 10.6%、过磷酸钙 10.8%、生物炭 9.8%,3 种添加剂都具有显著的保氮效果。这一研究结果与前人的研究结果部分吻合。例如,林小凤等^[23]报道了在鸡粪中添加 8.26% 的过磷酸钙进行堆肥时发现,添加过磷酸钙具有显著保氮能力,相比对照降低总氮损失达到 88.6%;Chen 等^[24]报道的添加质量分数 9% 竹炭与对照相比降低氮损失为 65%。分析其原因可能是由于过磷酸钙具有较强的酸度和较大酸容量,而竹炭具有的大表面积和良好的 NH₃ 吸附能力,均能显著抑制堆肥中 NH₃ 的挥发,减少氮素损失。本研究中,添加果渣具有的保氮能力可能与果渣本身的酸性较低相关。虽然 pH 值不是堆肥过程中的决定性因子,但堆体 pH 值与氮素的保持有密切关系,因为 pH 值大于 7.5 将会使氮素以 NH₃ 的形式挥发损失^[13]。

2.2 种子发芽指数的变化

雪里蕻种子发芽指数(R_{GI})的变化如图 4 所示。可见,各处理在从开始到 20 d 左右的高温期末段,发芽指数升高缓慢。在 20 d 之后,发芽指数快速升

高至稳定。这一结果与李荣华^[25]的研究一致。各处理中,添加生物炭能够促进种子根系的生长,而过磷酸钙处理对根系生长有所抑制,果渣处理与对照差异不显著。至堆肥结束,发芽指数由大到小依次为:生物炭、对照、果渣、过磷酸钙,且均超过了 0.6。Zucconi 等^[26]指出发芽指数大于 0.5 即表明堆肥基本没有毒性,腐熟达到可接受程度。由此可以判断,本研究中经过 46 d 的堆肥后,各处理堆肥均达到了腐熟。

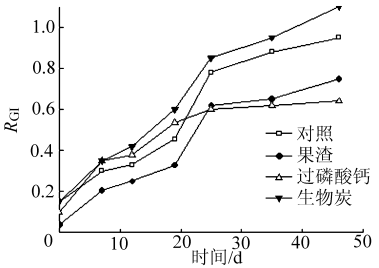


图 4 雪里蕻种子发芽指数的变化

Fig. 4 Change of R_{GI} of potherb mustard

2.3 Zn、Cu 全量和 DTPA 提取态含量的变化

由图 5 可见,由于堆料中添加剂的 Zn、Cu 含量

大大低于原料猪粪,因而对照处理的 Zn 和 Cu 的总量均高于其他处理。随着堆肥过程的进行,Zn、Cu 总量逐渐增加,这是由于大分子有机物质的分解和损失,导致的“浓缩作用”所致^[6]。至堆肥结束时,对照、果渣、过磷酸钙和生物炭处理总 Zn 质量比增幅分别为 12.3%、16.4%、17.5% 和 17.3%,而总 Cu 质量比增幅分别为 29.0%、34.6%、28.8% 和 32.9%。Zn、Cu 总量增幅与 Tiquia 等^[27]进行猪粪堆肥报道的 25%~40%、Inbar 等^[28]进行牛粪堆肥报道的 15%~36% 比较接近,而 Ihnat 等^[29]报道的家禽粪便堆肥没有显著增加,Hsu 等^[30]报道的猪粪堆肥 25 d 左右,增幅达到 170% 左右。这些研究结果表明,Zn、Cu 总量变化与堆肥方式和堆肥原料的

选择有密切的关系。试验中,DTPA-Zn、DTPA-Cu 在总量中所占比例持续下降(图 6),各处理 DTPA-Zn 质量分数的下降幅度分别为 2.7%、3.9%、5.8% 和 5.7%,DTPA-Cu 质量分数的下降幅度分别为 9.6%、11.0%、12.0% 和 12.3%。黄国峰等^[31]在猪粪添加木糠和树叶堆肥中发现 DTPA-Zn、DTPA-Cu 在总量中所占比例下降幅度分别在 2.7%~8.6% 和 2.2%~3.4% 之间。Chen 等^[24]也指出,在猪粪堆肥中添加生物炭对堆肥中 DTPA-Zn、DTPA-Cu 在总量中所占比例下降幅度别为 13% 和 37%。造成不同钝化剂对 DTPA-Zn 和 DTPA-Cu 含量的降幅贡献存在差异的原因可能与钝化剂本身的种类、来源和理化性质有关^[7]。

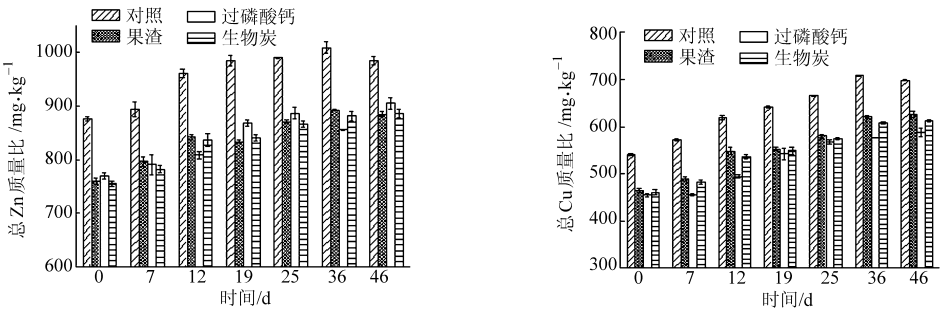


图 5 各处理堆肥过程中总 Zn 和总 Cu 质量比变化
Fig. 5 Change of total Zn and Cu with treatments during composting

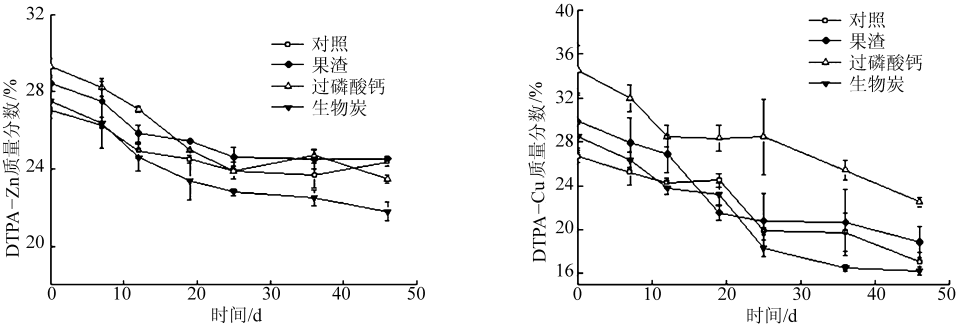


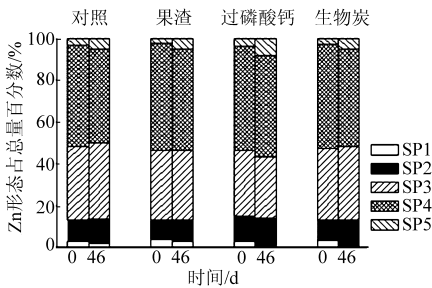
图 6 各处理堆肥过程中 DTPA-Zn 和 DTPA-Cu 质量分数变化
Fig. 6 Percentages of DTPA-Zn and DTPA-Cu in total Zn and Cu in composts during composting

2.4 Zn 形态和 Cu 形态的变化

由图 7 可知,堆肥中 Zn 的各种形态所占比例由大到小依次为:SP4、SP3、SP2、SP5、SP1,SP1 所占比例小于 5%。随堆肥的进行,交换态及吸附态(SP1) Zn 均出现降低。各处理中,过磷酸钙处理和生物炭处理下降幅度大于对照和果渣处理。分析原因可能为过磷酸盐形成难溶沉淀,降低离子活度。而生物炭具有的较大比表面积对于离子的较强吸附能力也降低了离子活度。SP5 表达了残渣态的比例,随堆肥的进行,各处理残渣态比例都在升高,其中过磷酸钙增加幅度最大,原因也是过磷酸根离子沉淀作用的结果。不同处理间 SP2、SP3 和 SP4 变化差异不大,变幅分别为 9.5%~13.2%、29.5%~36.2% 和

45.0%~51.2%。可见,堆肥中 Zn 各形态中以碳酸盐结合态(SP3)和硫化物结合态(SP4)为主,两者之和达到 74.5%~87.4%。这一结果与李荣华^[4]在猪粪中添加不同比例的粉煤灰进行堆肥的研究结果基本一致。堆肥中 Cu 的各形态比例由大到小依次为:SP2、SP4、SP3、SP5、SP1,SP1 所占比例在 3.1%~10.4%。各处理在初始阶段交换态和吸附态(SP1) Cu 没有显著差异,随着堆肥进行,果渣、过磷酸钙和生物炭处理 SP1 比例下降幅度均超过对照,其中,过磷酸钙处理最显著。各处理残渣态(SP5)随堆肥进行均增加,其中过磷酸钙处理堆肥结束时 SP5 比例最大,达到 14.9%,显著高于对照。分析是因为过磷酸根离子的沉淀作用促使 Cu 从有效性高的形态

向有效性低形态转化,研究结果与 Zn 类似。不同处理 SP2、SP3 和 SP4 差异不大,堆肥前、后变幅在 46.4%~51.4%、7.6%~10.4 和 22.6%~29.5%,与 Zn 的结果不同,Cu 各形态中以有机结合态 (SP2)和硫化物结合态 (SP4)为主,两个形态之和所占比例达到 69.0%~80.9%。而 Hsu^[30]报道了猪



粪堆肥结束时交换态和吸附态 Cu 达到总量的 9%,而 Zn 低于 4%;有机结合态 Cu 和 Zn 都占到了总量的 70%左右,与本研究结果不同可能是由于不同堆肥原料中重金属形态存在较大差异^[32],也可能与金属分级提取的方法选择有关^[14]。

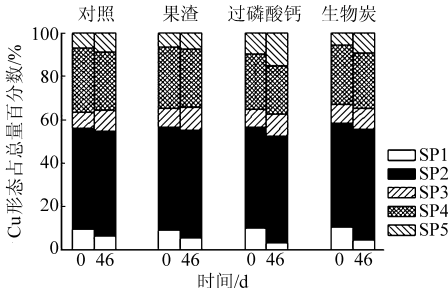


图 7 各处理堆肥前、后不同 Zn 和 Cu 形态变化
Fig. 7 Change of Zn and Cu fractional proportion with treatments during composting

各处理 Cu 和 Zn 形态与种子发芽指数的 Pearson 相关系数如表 3 所示。总体上,总量(Total)以及 SP2、SP3 形态 Cu、Zn 与各处理种子 R_{GI} 都达到了显著或极显著正相关,而 DTPA 提取态以及 SP1 形态 Cu、Zn 都与 R_{GI} 达到显著或极显著负相关。表明,各处理的 Cu、Zn 总量以及有效性较低的形态 SP2、SP3 含量对种子生长没有影响,甚至于可以促进种子生长。而有效性较高的 DTPA 态以及 SP1 分级形态的提高能够显著抑制种子生长。因此,DTPA 提取态和 SP1 形态的 Cu、Zn 含量能够有效表明堆肥施用对植物生长的影响。各处理间,生物炭处理的负相关系数最高,表明其堆肥中有效态 Cu、Zn 含量对植物生长影响最显著。

(升温时间、pH 值、EC、总氮、 R_{GI} 、Zn 钝化效应、Cu 钝化效应以及添加剂费用)的权重,应用层次分析法(AHP)求权数。得到判断矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 4 & 4 & 5 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1 & 5 & 4 & 4 & 3 & 2 & 6 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 2 & 1 & 4 & 2 & 1 & 6 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 & 1/6 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 4 & 1/2 & 5 & 1 & 1/2 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 5 & 1 & 6 & 2 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/6 & 1 & 1/6 & 3 & 1/4 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

求判断矩阵 P 的特征向量 W (权数)并将其归一化^[33],得到 $W = [0.341\ 8, 0.199\ 9, 0.036\ 5, 0.113\ 0, 0.030\ 6, 0.093\ 6, 0.147\ 3, 0.037\ 2]$ 。

2.5.2 权数合理性检验

计算最大特征值 $\lambda_{\max} = 8.894\ 6$ 。判断矩阵的一般一致性指标 CI 为 0.127 8。判断矩阵的随机一致性比率 CR 为 0.091。CR 小于 0.10,认为判断矩阵具有满意一致性,因子权数分配合理。

2.5.3 综合评价

各处理指标值归一化后进行加权求和,得到各处理的 AHP 得分指数分别为:对照,0.518 9;果渣处理,0.618 3;过磷酸钙处理,0.488 1;生物炭处理,0.582 6。

各处理的堆肥综合效应评价比较如表 4 所示。果渣添加剂在升温时间、pH 值、EC、总氮、 R_{GI} 等指标均符合要求,而且相比较有更好的 Zn、Cu 钝化效应,并且价格上的巨大优势,使其在生产合格猪粪堆肥产品的同时,能够为果渣资源化处置提供广阔应用前景。过磷酸钙添加剂,使堆肥升温期增长,堆肥后 EC 过高,具有潜在的作物生理盐害,同时在价格

表 3 Zn 和 Cu 各形态与种子发芽指数的 Pearson 相关系数				
Tab.3 Pearson's correlation coefficient between Zn, Cu forms and germination index				
Cu、Zn 形态	对照	果渣	过磷酸钙	生物炭
Total - Cu	0.88 **	0.89 **	0.85 **	0.85 **
DTPA - Cu	-0.82 **	-0.77 **	-0.70 **	-0.83 **
SP1 - Cu	-0.92 **	-0.95 **	-0.89 **	-0.96 **
SP2 - Cu	0.61 **	0.67 **	0.70 **	0.84 **
SP3 - Cu	0.80 **	0.92 **	0.90 **	0.83 **
Total - Zn	0.75 **	0.85 **	0.87 **	0.90 **
DTPA - Zn	-0.41	-0.44 *	-0.68 **	-0.58 **
SP1 - Zn	-0.73 **	-0.55 **	-0.90 **	-0.94 **
SP2 - Zn	0.69 **	0.84 **	0.69 **	0.96 **
SP3 - Zn	0.35	-0.27	-0.67 **	0.78 **

注: * 表示在 0.05 水平显著差异, ** 表示在 0.01 水平显著差异。

2.5 各处理堆肥效果评价

2.5.1 权数确定

从最终获得堆肥的质量角度考虑重要影响因子

上也不具备优势。生物炭作为新型的添加剂,从各项指标来看,都具备一定优势。但其制备程序复杂,相应费用较高,限制了其在堆肥资源化利用中的应用。

由 AHP 法计算得分指数并进行综合排名,得到各处理由优至劣为:果渣、生物炭、对照、过磷酸钙。总体上比较,果渣可以作为优良的堆肥添加剂进行使用。

表 4 各处理的堆肥效果综合评价
Tab.4 Comprehensive evaluation of compost with treatments

处理	升温 时间/d	pH 值	EC /mS·cm ⁻¹	总氮质量比 /mg·kg ⁻¹	R _{GI}	钝化 Zn 效应/%	钝化 Cu 效应/%	添加剂费用 /万元·t ⁻¹	AHP 法 得分指数	评价 排名
对照	3.5	8.4	3.2	16.2	0.9	1.5	8.0	—	0.518 9	3
果渣	4.0	8.2	4.2	18.6	0.8	3.9	11.0	—	0.618 3	1
过磷酸钙	6.5	7.8	5.4	19.0	0.6	5.8	12.0	0.25	0.488 1	4
生物炭	3.5	8.6	2.8	20.3	1.1	5.7	12.3	0.55	0.582 6	2

注:“—”为没有成本的废弃物或没有添加;Zn、Cu 钝化效应以堆肥前、后 DTPA 提取态占总量比的减少量来计。

3 结论

(1)所有处理的堆肥均能到达高温期并维持一定时间,但添加过磷酸钙会显著延长达到高温期的时间;3 种添加剂均具有较好的保氮效果,且不存在显著差异;添加过磷酸钙会导致堆肥具有较高的 EC,具有潜在的作物生理盐害。

(2)堆肥后总 Zn、Cu 含量由于相对浓缩效应逐渐升高,而 DTPA 提取态 Zn 和 Cu 比例均有一定幅度降低,其中 DTPA - Cu 的降低幅度大于 DTPA - Zn。添加生物炭处理的 DTPA - Zn 和 DTPA - Cu 均为最低,而添加过磷酸钙处理的 DTPA - Cu 最高。

表明过磷酸钙处理的堆肥产品长期施用能够增加 Cu 毒害的风险。

(3)堆肥前、后 Zn 形态以 SP3 和 SP4 为主,而 Cu 以 SP2 和 SP4 为主。添加剂中过磷酸钙和生物炭均能显著降低 SP1 形态的 Zn 和 Cu,同时增加 SP5 形态的 Zn 和 Cu。过磷酸钙和生物炭的添加均起到钝化 Zn、Cu 的作用,但添加过磷酸钙会抑制雪里蕻种子的生长。

(4)果渣、过磷酸钙和生物炭作为添加剂进行猪粪堆肥,均能达到质量要求。但从堆肥的品质及市场经济效益等角度综合评价,认为果渣是一种优良的堆肥添加剂。

参 考 文 献

1 张绪美,董元华,王辉,等. 中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析 [J]. 环境科学, 2007, 28(6):1 311 ~ 1 318.
Zhang Xumei, Dong Yuanhua, Wang Hui, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China [J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1 311 ~ 1 318. (in Chinese)

2 Li Y X, Li W, Wu J, et al. Contribution of additives Cu to its accumulation in pig feces: study in Beijing and Fuxin of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(5): 610 ~ 615.

3 Samaras P, Papadimitriou C, Haritou I, et al. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154 (1): 1 052 ~ 1 059.

4 李荣华,张萌,秦睿,等. 粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中铜锌化学形态的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 186 ~ 193.
Li Ronghua, Zhang Meng, Qin Rui, et al. Change of Cu and Zn chemical speciation and fractions during the swine manure co-composting with fly ash under aerobic conditions [J]. Agriculture Research in the Arid Area, 2012, 30(6): 186 ~ 193. (in Chinese)

5 李国学,李玉春,李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252 ~ 256.
Li Guoxue, Li Yuchun, Li Yanfu. Advance on composting of solid waste and utilization of additives [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(2): 252 ~ 256. (in Chinese)

6 Li R, Wang J J, Zhang Z, et al. Nutrient transformations during composting of swine manure with bentonite [J]. Bioresource Technology, 2012, 121:362 ~ 368.

7 荣湘民,宋海星,何增明,等. 几种重金属钝化剂及其不同添加比例对猪粪堆肥重金属 (As, Cu, Zn) 形态转化的影响 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 136 ~ 140.
Rong Xiangmin, Song Haixing, He Zengming, et al. Effect of some heavy mental passivation and its appending proportion on form transformation of heavy mental (As, Cu and Zn) in pig manure composting [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 136 ~ 140. (in Chinese)

8 Villaseñor J, Rodríguez L, Fernández F. Composting domestic sewage sludge with natural zeolites in a rotary drum reactor [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (2): 1 447 ~ 1 454.

9 Hua L, Chen Y, Wu W. Impacts upon soil quality and plant growth of bamboo charcoal addition to composted sludge [J]. *Environmental Technology*, 2012, 33(1): 61 ~ 68.

10 顾文杰,张发宝,徐培智,等. 添加无机磷肥对农业固体废弃物好氧堆肥的影响 [J]. *广东农业科学*, 2010, 37(4): 101 ~ 105.
Gu Wenjie, Zhang Fabao, Xu Peizhi, et al. Effect on addition of inorganic phosphate fertilizer in agricultural waste aerobic composting [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2010, 37(4): 101 ~ 105. (in Chinese)

11 陈学森,韩明玉,苏桂林,等. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见 [J]. *果树学报*, 2010, 27(4): 598 ~ 604.
Chen Xuesen, Han Mingyu, Su Guilin, et al. Discussion and today's world apple industry trends and suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China [J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(4): 598 ~ 604. (in Chinese)

12 李志西. 苹果渣综合利用研究 [J]. *黄牛杂志*, 2002, 28(4): 58 ~ 62.
Li Zhixi. A review on multipurpose use of apple pomace [J]. *Journal of Yellow Cattle Science*, 2002, 28(4): 58 ~ 62. (in Chinese)

13 Bernal M, Albuquerque J, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5 444 ~ 5 453.

14 Sposito G, Lund L, Chang A. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(2): 260 ~ 264.

15 康军,张增强,孙西宁,等. 污泥堆肥合理施用量确定方法 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 98 ~ 102.
Kang Jun, Zhang Zengqiang, Sun Xining, et al. Rational application rate of sewage sludge compost [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 98 ~ 102. (in Chinese)

16 卢秉林,王文丽,李娟,等. 添加小麦秸秆对猪粪高温堆肥腐熟进程的影响 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(4): 926 ~ 930.
Lu Binglin, Wang Wenli, Li Juan, et al. Effect of wheat straw on maturing of pig manure high-temperature composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(4): 926 ~ 930. (in Chinese)

17 Belyaeva O, Haynes R. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5 203 ~ 5 209.

18 Gabhane J, William S, Bidyadhar R, et al. Additives aided composting of green waste: effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 382 ~ 388.

19 Gigliotti G, Proietti P, Said-Pullicino D, et al. Co-composting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2012, 67: 8 ~ 14.

20 邵淼,杨淑英,张增强,等. 不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆肥的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 982 ~ 989.
Shao Miao, Yang Shuying, Zhang Zengqiang, et al. Effect of different treatments on composting of high water content dairy manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 982 ~ 989. (in Chinese)

21 García C, Hernández T, Costa F. Study on water extract of sewage sludge composts [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37(3): 399 ~ 408.

22 陈广银,王德汉,吴艳,等. 石灰预处理对树叶堆肥过程中养分转化的影响 [J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 77 ~ 82.
Chen Guangyin, Wang Dehan, Wu Yan, et al. Effect of lime-pretreatment on nutrient transformation of leaves compost [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 77 ~ 82. (in Chinese)

23 林小凤,李国学,任丽梅,等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1 662 ~ 1 666.
Lin Xiaofeng, Li Guoxue, Ren Limei, et al. Effect of FeCl₃ and Ca(H₂PO₄)₂ as amendments on reducing nitrogen loss during composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1 662 ~ 1 666. (in Chinese)

24 Chen Y X, Huang X D, Han Z Y, et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1 177 ~ 1 181.

25 李荣华,张广杰,秦睿,等. 粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中养分转化研究 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 100 ~ 105.
Li Ronghua, Zhang Guangjie, Qin Rui, et al. Nutrient transformation during swine manure co-composting with flyash under aerobic conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 100 ~ 105. (in Chinese)

26 Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost [J]. *Biocycle*, 1981, 22(1): 54 ~ 57.

27 Tiquia S, Tam N, Hodgkiss I. Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter [J]. *Bioresource Technology*, 1997, 62(1): 37 ~ 42.

28 Inbar Y, Hadar Y, Chen Y. Recycling of cattle manure: the composting process and characterization of maturity [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(4): 857 ~ 863.

29 Ihnat M, Fernandes L. Trace elemental characterization of composted poultry manure [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 57(2): 143 ~ 156.

30 Hsu J H, Lo S L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(1): 119 ~ 127.

参 考 文 献

1 马春燕,赵欣. 干、鲜胡萝卜营养成分的比较分析及对脱水蔬菜的利用[J]. 畜牧与饲料科学,2008,29(5):30~36.
Ma Chunyan, Zhao Xin. Comparison between fresh carrot and dehydrated carrot and enlightenment for using dehydrated vegetables [J]. Animal Husbandry and Feed Science,2008,29(5):30~36. (in Chinese)

2 李远志,胡晓静,叶盛英,等. 胡萝卜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 食品与发酵工业,1999,25(6):1~4.
Li Yuanzhi, Hu Xiaojing, Ye Shengying, et al. Studies on the heat pump drying characteristics and mathematical model of carrot [J]. Food and Fermentation Industries,1999,25(6):1~4. (in Chinese)

3 遇龙. 双孢蘑菇远红外辐射干燥的试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2012.
Yu Long. The experimental study of the fir drying of *Agaricus bisporus* [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012. (in Chinese)

4 关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报,2012,43(2):151~158.
Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):151~158. (in Chinese)

5 Hasan T. Suitable drying model for infrared drying of carrot[J]. Journal of Food Engineering, 2006,77(3):610~619.

6 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立及评价[J]. 农业机械学报,2010,41(6):128~132.
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):128~132. (in Chinese)

7 张亚晶,杨薇. 康乃馨热风干燥特性研究[J]. 食品与机械,2012,28(1):50~54.
Zhang Yajing, Yang Wei. Research on hot-air drying characteristics of carnation[J]. Food and Machinery,2012,28(1):50~54. (in Chinese)

8 刘伟,黄立新,张彩虹,等. 栀子黄色素低温真空干燥模型建立与评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(5):95~98.
Liu Wei, Huang Lixin, Zhang Caihong, et al. Modeling and evaluation of low-temperature racuum drying of Gardenia yellow pigment[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011,35(5):95~98. (in Chinese)

9 Sokhansanj J W, Singh D, Wasserman J D. Drying characteristics of wheat, barley and canola subjected to repetitive wetting and drying cycles [J]. Transactions of the ASAE,1984,27(3):903~914.

10 Stamatiou J B, Elias P, Nikolas K, et al. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*) [J]. Journal of Food Engineering, 2006,75(2):205~214.

11 孙逢龙,杜焱,纪建伟. 五味子热风干燥特性及数学模型[J]. 农机化研究,2012,34(8):93~97.
Sun Fenglong, Du Yan, Ji Jianwei. Characteristics and mathematical model for hot air drying of schisandra chinensis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(8):93~97. (in Chinese)

12 赵海波,杨昭. 白菜种子热泵干燥过程动态模型研究[J]. 农业机械学报,2011,42(11):118~123.
Zhao Haibo, Yang Zhao. Dynamic model of heat pump drying for cabbage seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):118~123. (in Chinese)

13 Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005,71(3):282~286.

14 Sutar P P, Prasads S. Modeling microwave vacuum drying kinetics and moisture diffusivity of carrot slices[J]. Drying Technology, 2007,25(10):1695~1702.

15 王宁,刘文秀,李凤城,等. 杏低温薄层干燥试验与建模[J]. 农业机械学报,2011,42(1):140~143.
Wang Ning, Liu Wenxiu, Li Fengcheng, et al. Thin layer drying model of apricot at low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):140~143. (in Chinese)

16 李辉,林河通,袁芳,等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报,2012,43(6):107~112.
Li Hui, Lin Hetong, Yuan Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):107~112. (in Chinese)

(上接第 171 页)

31 黄国锋,张振铎,钟流举,等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化 [J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 94~99.
Huang Guofeng, Zhang Zhentian, Zhong Liuju, et al. Chemical changes of heavy metals in the process of pig manure composting [J]. China Environmental Science, 2004, 24(1): 94~99. (in Chinese)

32 董占荣,陈一定,林咸永,等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态 [J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 35~39.

33 王敦球,潘盛. 模糊综合评价法在评价堆肥腐熟度中的应用 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 212~215.