

鸡粪施入农田土壤的氨挥发研究

李剑睿, 苏芳, 黄彬香, 胡小康, 巨晓棠, 张福锁

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:在北京海淀区东北旺乡利用风洞法氨挥发测定系统,研究了不同施肥方式、施肥量和添加剂对鸡粪在农田施用过程中氨挥发的影响。结果表明,施肥方式显著影响鸡粪氨挥发,试验期间在田间裸地 $24\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施肥量下,表施的累积氨挥发氮损失为 19.8%,而表施后立即深翻 5~9 cm,氨挥发损失为 3.3%;不同施肥量下, $24\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 比 $12\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氨挥发损失分别减少 2.1%和 4.9%,但统计差异不显著;锯末对鸡粪氨挥发没有起到抑制作用,未添加锯末处理的氨挥发损失为 19.5%,而添加锯末处理的氨挥发损失为 21.1%;过磷酸钙对鸡粪氨挥发抑制效果显著,未添加过磷酸钙处理的氨挥发损失为 31.8%,而添加过磷酸钙处理的氨挥发损失为 21.9%,比未添加降低了 31.1%。

关键词:氨挥发;鸡粪;施肥方式;施肥量;添加剂

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)09-1959-06

Ammonia Volatilization from Field-applied Chicken Manure in Beijing

LI Jian-rui, SU Fang, HUANG Bin-xiang, HU Xiao-kang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo

(College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Ammonia volatilization was measured using a wind tunnel system after applying chicken manure to land soil in the suburb of Beijing. Continuous sampling for ammonia volatilizations was done over 16 days after chicken manure application. The influences of application methods, application rates, and additives were evaluated based on N loss through ammonia volatilization over measurement period. It was found that application methods remarkably affected ammonia volatilization. With an application rate of $24\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N loss rate of top application was 19.8%, while it reduced to 3.3% if chicken manure was buried 5~9 cm below the surface. The N loss rate through ammonia volatilization did not change much with different application rates. Compared to the application levels at $12\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $8\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, ammonia N loss rate in chicken manure treatment of $24\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ was slightly reduced by 2.1% and 4.9%, respectively. Addition of sawdust had no restrain effect on ammonia volatilization: the N loss rate was 19.5% with sawdust (3% additive rate) and 21.1% without sawdust. Calcium superphosphate can significantly reduce ammonia volatilization. When chicken manure was top-dressed with an application rate of $24\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and calcium superphosphate was added at 3%, N loss rate was 21.9%, which is significantly lower than that without calcium superphosphate (N loss rate 31.8%).

Keywords: ammonia volatilization; chicken manure; application method; application rate; additive

氮肥施入农田后因氨挥发造成的氮素损失多年来一直受到关注,科研工作者对无机肥在不同土壤环境条件、肥料类型、氮肥用量、施肥方法以及环境因素对氨挥发影响等方面作了系统研究^[1-5],相比之下,畜禽粪肥的氨挥发氮损失国内关注和研究的较少。我国畜牧养殖业发达,2003 年我国畜禽养殖业共产生

31.90 亿 t 粪便,是当年工业产生固体废物的 3.2 倍^[6];同时,畜禽粪便中含有大量的氮、磷、钾等营养物质,是一种优良的有机肥,在作物肥料需求结构中占有重要的地位,若不经合理利用,就会造成养分流失。近年来,关于畜禽粪便氨挥发的研究工作主要集中在堆肥过程中不同添加材料对粪肥氨挥发的影响^[7-9],而对施肥过程中不同有机肥氨挥发损失的研究较为缺乏。含氮量较高的鸡粪的氨挥发在所有畜禽粪中最强^[10],因此,我们选择湿鸡粪研究其在田间不同施肥方式、施肥量以及添加剂情况下的氨挥发,探讨鸡粪氨挥发的影响因素,进而找出降低鸡粪氨挥发的措施,以期在

收稿日期:2008-12-22

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD17B01)

作者简介:李剑睿(1981—),男,山西山阴人,硕士研究生,研究方向为农田生态系统痕量气体排放及减排措施。

通讯作者:苏芳 E-mail:sufang@cau.edu.cn

农业生产实践中为鸡粪的资源化利用提供一些施肥操作、添加剂选用方面的科学数据和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料鸡粪均采自中国农业大学实验养鸡场,每次分层多点采集湿鸡粪样,然后送样品室混匀处理。

1.2 试验地点和处理

试验布置在北京海淀区东北旺乡(39.5°N,116.3°E),供试土壤为石灰性潮土,肥力较高,试验耕层(0~30 cm)土壤理化性质为:土壤容重 1.33 g·cm⁻³,土壤 pH8.0,有机质含量 21.4 g·kg⁻¹,土壤全氮 1.18 g·kg⁻¹,速效磷 34.4 mg·kg⁻¹,速效钾 145 mg·kg⁻¹。

试验一研究鸡粪不同施肥方式下的氨挥发,设置了两个处理,处理一表施,处理二翻耕(表施后立即耕翻 5~9 cm);试验二研究鸡粪添加锯末前后的氨挥发,设置了两个处理,处理一未添加,处理二添加(添加质量百分比为 3%);试验三研究鸡粪添加过磷酸钙前后的氨挥发,设置了两个处理,处理一未添加,处理二添加(添加质量百分比为 3%)。以上 3 个试验的鸡粪用量均为 24 000 kg·hm⁻²。试验四研究鸡粪不

同施肥量下的氨挥发,分别设置了 24 000 和 12 000 kg·hm⁻² 处理,后又增加 24 000 和 8 000 kg·hm⁻² 处理的试验。鸡粪及添加剂混匀后人工施入风洞的试验区(面积 1.5 m×0.35 m),每个处理设置 3 个重复。

1.3 测定方法

在实验室测定鸡粪全氮、铵态氮和水分,全氮采用高锰酸钾-铁粉-混合催化剂消煮,凯氏定氮蒸馏;铵态氮采取 1 mol·L⁻¹ 氯化钠浸提,凯氏定氮蒸馏;水分采取恒温烘干法。田间土表温度和土表下 5 cm 温度数据均来自气象站,土壤 0~10 cm 湿度利用 ECH₂O 土壤水分测定系统测定。风洞法氨挥发测定系统、氨排放速率的计算参见参考文献[11],每次施肥后连续采样 16 d,以 16 d 的氨挥发累积量作为总排放量。

1.4 数据处理

试验数据均采用 Excel 进行处理,使用软件 SAS (6.0)对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

表 1 列出了各个试验的具体时间段,试验设计方案,每次试验所用鸡粪样品的全氮、铵氮、水分含量,湿鸡粪不同施肥方式、施肥量及添加添加剂下的氨挥发氮损失情况。

表 1 不同施肥方式、施肥量及添加剂对鸡粪氨挥发的影响

Table 1 Effect of different application methods, application rate and additive on ammonia volatilization of chicken manure

试验时间	处理 1	处理 2	粪便氮损失	处理 1	处理 2
2006-11-20 至 2006-12-06	田间裸地 表施 湿鸡粪	表施后 立即耕翻 5~9 cm	施肥量/kg·hm ⁻²	24 000	24 000
			湿基全 N、铵 N、水分	1.00%、0.08%	58.9%
			氨挥发/kgN·hm ⁻²	47.74	7.81
			占施氮的比例	19.8%	3.3%
2006-12-12 至 2006-12-28	田间裸地 表施下 未添加锯末	田间裸地 表施下 添加锯末	施肥量/kg·hm ⁻²	24 000	24 000
			湿基全 N、铵 N、水分	0.79%、0.06%	68.5%
			氨挥发/kgN·hm ⁻²	37.16	40.23
			占施氮的比例	19.5%	21.1%
2007-03-23 至 2007-04-08	田间裸地 表施下 未添加普钙	田间裸地 表施下 添加普钙	施肥量/kg·hm ⁻²	24 000	24 000
			湿基全 N、铵 N、水分	1.38%、0.10%	53.8%
			氨挥发/kgN·hm ⁻²	104.95	72.33
			占施氮的比例	31.8%	21.9%
2007-03-02 至 2007-03-18	田间裸地 表施下 12 000 kg·hm ⁻²	田间裸地 表施下 24 000 kg·hm ⁻²	施肥量/kg·hm ⁻²	12 000	24 000
			湿基全 N、铵 N、水分	1.96%、0.15%	41.2%
			氨挥发/kgN·hm ⁻²	85.47	160.96
			占施氮的比例	36.3%	34.2%
2007-04-09 至 2007-04-24	田间裸地 表施下 8 000 kg·hm ⁻²	田间裸地 表施下 24 000 kg·hm ⁻²	施肥量/kg·hm ⁻²	8 000	24 000
			湿基全 N、铵 N、水分	0.68%、0.05%	70.6%
			氨挥发/kgN·hm ⁻²	17.43	44.32
			占施氮的比例	32.3%	27.4%

2.1 不同施肥方式下湿鸡粪的氨挥发

湿鸡粪田间裸地表施和翻耕的氨挥发状况如图1所示。表施后当天的氨挥发速率最高,前6 d内,87.5%的氨挥发完毕,15 d过后,氨挥发速率基本为零;表施后立即深翻5~9 cm,氨挥发一直很微弱,累积氨挥发总量为 $7.81 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验期间表施的累积氨挥发氮损失为19.8%,表施后立即翻耕的累积氨挥发氮损失仅为3.3%,差异显著($P < 0.05$)。翻耕与表施相比,氨挥发氮损失降低了83.6%。试验期间的土壤温度在前3 d较高,对应表施前期较高的氨挥发;翻耕处理下,氨挥发趋势和土壤温度变化相关性不大,可能是翻耕的氨挥发较低所致。土壤水分变化很小(11.4%~12.8%),对氨挥发影响不明显。

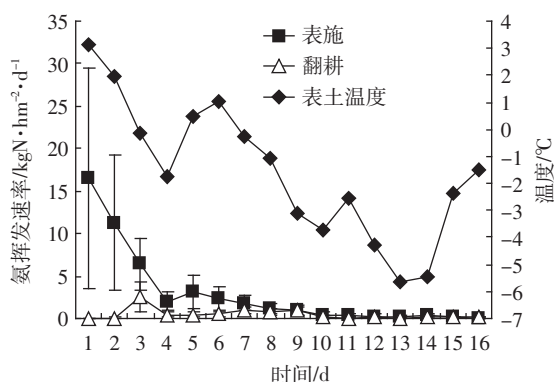


图1 不同施肥方式下鸡粪氨挥发速率的动态变化

Figure 1 Ammonia volatilization rate of chicken manure with different application methods

Webb 等^[12]的研究表明,猪粪表施后立即深翻,若能与土壤充分混匀,氨挥发降低幅度可达90%。当牛粪泥浆深施到土表8 cm以下时,几乎监测不到氨气的挥发^[13]。可见深施是一种降低畜禽粪便氨挥发的有效方法。在中等偏重的土壤质地,低的渗透性,较高的CEC和pH,深施比表施具有更大优越性,在一定程度上可避免有利于氨挥发环境因素造成的大量氨挥发。究其原因,一是铵离子被土壤胶体吸附固定,抑制了向土表迁移;二是和表施相比,粪便体通风供氧不良,好氧微生物活性下降,粪便中有机氮的矿化降低。

2.2 不同施肥量下湿鸡粪的氨挥发

田间裸地表施下,12 000和24 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的鸡粪施肥量,试验期间累积氨挥发氮损失分别为36.3%和34.2%(图2a)。8 000和24 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施肥量,累积氨挥发氮损失分别为32.3%和27.4%(图2b),氨挥发氮损失比例随着施肥量增加略有下

降,但统计分析差异不显著。从氨挥发趋势看,处理1(24 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和处理2(12 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)一周内的氨挥发氮损失分别为88.6%和89.2%,一周后的氨挥发很微弱,15 d过后,氨挥发量基本为零;第二个试验的处理24 000和8 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的变化趋势与第一个试验相同。试验前期,氨挥发趋势与土壤温度变化基本一致,后期随着氨挥发的降低,二者的相关性不大。

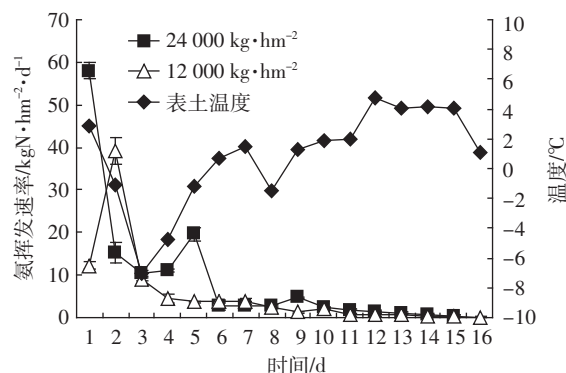


图2a 不同施肥量下鸡粪的氨挥发动态变化

Figure 2a Ammonia volatilization rate of chicken manure with different application rate

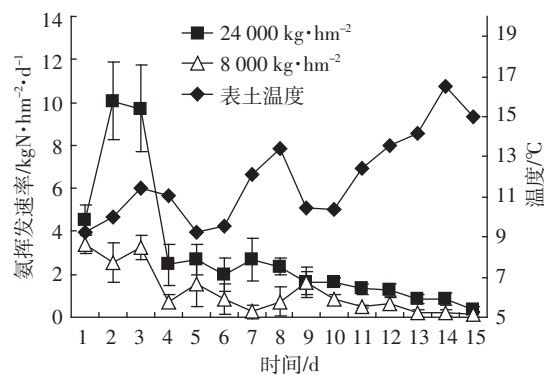


图2b 不同施肥量下鸡粪的氨挥发动态变化

Figure 2b Ammonia volatilization rate of chicken manure with different application rate

相同土壤施肥表面积在施肥量减小的情况下,理论上粪便能更充分地与土壤接触反应从而促进粪便中有机态氮的矿化和氨挥发。Thompson 等^[14]的研究表明,牛粪泥浆每公顷施肥量20、40、60、80、100 m^3 下,6 d内的氨挥发氮损失分别为60%、56%、49%、40%、44%和44%,存在反比关系。本研究没有得出明显的反相关关系,下列具体的试验条件差异是可能的原因:Thompson的试验是在草地上进行的,本研究是在田间裸地上开展的;Thompson选用的粪便是牛粪泥

浆,而且有配套的施肥专用工具,施肥操作上较为科学,更能实现小施肥量下粪便和土壤充分接触这个意图;Thompson 指出,二者的反比关系在施肥后的 24 h 内最明显,而本研究所用的风洞系统 1 d 取样 1 次,采样时间分辨率不够可能会掩盖这种反比关系。

2.3 添加锯末对湿鸡粪氨挥发的影响

湿鸡粪在田间裸地表施下,未添加锯末的累积氨挥发氮损失为 19.5%,第 2 d 氨挥发速率最高,前 9 d 内的氨挥发量占总量的 90.7%,9 d 后的氨挥发很微弱;添加锯末后,累积氨挥发氮损失为 21.1%(图 3)。试验期内土壤温度较低,氨挥发趋势整体上与土壤温度变化相关性不大。

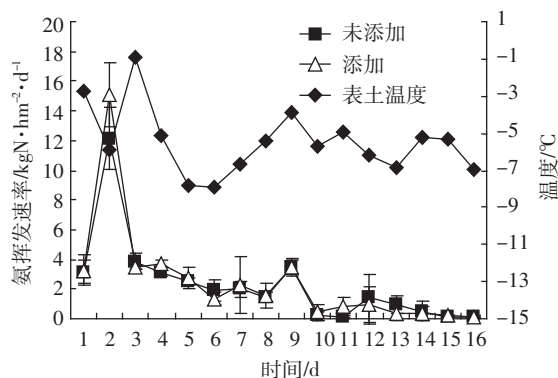


图 3 鸡粪添加锯末与否的氨挥发动态变化

Figure 3 Ammonia volatilization rate of chicken manure with and without sawdust

在农业生产实践中,往畜禽粪便中添加添加剂,不仅可以通过调节畜禽粪便的水分、通气状况、C/N 比来促进腐熟的进程和提高堆肥产品质量,而且可以有效降低畜禽粪便在堆制过程中的氮素损失,对氨挥发有一定的抑制效果。不同添加剂的效果不一样,不同的添加比例所得到的效果也有差别。牛粪在利用通风式堆肥发酵方式堆制过程中,分别向其中添加蛭石(对照)、锯末、稻壳和稻草,对氨挥发吸附抑制效果最好的是锯末(17.0%),几乎比对照(49.1%)降低了 32 个百分点;其次是稻壳、稻草;蛭石的抑制效果最差,几乎和纯牛粪的氨释放量一样^[10]。鸡粪在室外好氧堆制中,往其中添加 1% 的稻草,与不添加相比,氮素损失可以下降 2.52 个百分点^[7]。猪粪在堆肥过程中,5% 膨润土处理、1.5% 普钙处理、5% 玉米秸秆处理,与未添加处理相比,氨累积释放量分别减少了 36%、74% 和 50%^[8]。

本研究中添加锯末后,氨挥发差异不显著,锯末在一定程度上反而促进了鸡粪氨挥发。可能的原因是

具有疏松多孔结构的锯末,使得粪便体的通气供氧状况通畅,好氧微生物活性增强,使粪便中更多的有机氮矿化、分解转化成无机氮,氨挥发随之增加;其次锯末对氨的吸附是暂时的,很快就会把原来吸附的氨释放出来,最终起不到抑制氨挥发的作用。另外,本研究试验期间,土壤环境温度比较低,对鸡粪氨挥发测定可能有一定影响。因此锯末能否对鸡粪氨挥发起到抑制作用,还有待进一步试验验证。

2.4 添加过磷酸钙对湿鸡粪氨挥发的影响

添加过磷酸钙对鸡粪氨挥发有一定抑制作用。在田间裸地表施下,鸡粪添加过磷酸钙后的累积氨挥发氮损失为 21.9%,比未添加过磷酸钙处理的累积氨挥发氮损失(31.8%)降低了 31.1%,两处理前 8 d 差异极显著($P < 0.01$),整体 16 d 差异显著($P < 0.05$)。未添加处理和添加处理在一周内的氨挥发氮损失分别为 80.4% 和 70.0%,一周后的氨挥发较微弱,15 d 过后,氨挥发量基本为零(图 4)。未添加处理在第 2 d 氨挥发最高,排氨量占总排量的 17.1%,添加处理在第 2、3 d 的氨挥发量相当。试验前期,土壤温度变化与氨挥发趋势基本一致,后期随着氨排放的下降,二者的相关性不大。土壤水分约在 12%~16% 同一湿度水平范围内变化,对氨挥发影响不明显。

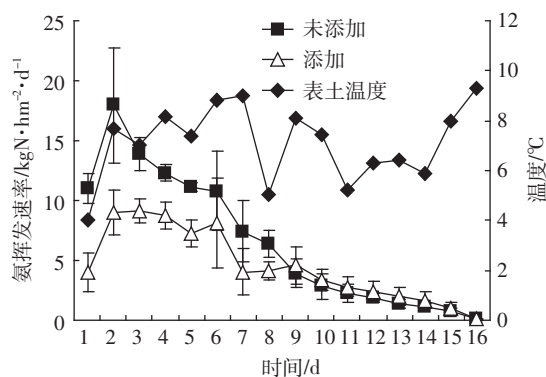


图 4 鸡粪添加过磷酸钙与否的氨挥发动态变化

Figure 4 Ammonia volatilization rate of chicken manure with and without calcium superphosphate

国外资料表明,一些钙、镁无机盐可以作为畜禽粪便腐熟分解过程中抑制氨气释放的添加剂,也可以称为氨保持剂。在粪便 48 d 的分解过程中,在前 2~3 周内,与不添加相比,氨抑制下降的百分比可达 85%~100%;到试验结束时,可达 23%~52%,尤其是钙镁的氯化物,效果明显^[15]。酸性添加剂可以通过抑制二氧化碳的释放来延缓粪便体 pH 的升高,从而达到抑制粪便氨挥发的目的^[16]。李吉进^[9]实验室发酵罐内猪

粪添加过磷酸钙的研究表明,和未添加过磷酸钙处理相比,氨释放降低了74%。本研究与文献在氨挥发降低幅度具体数值上有一定距离,但过磷酸钙可以抑制氨挥发这个总结论是相同的。李吉进^[9]的过磷酸钙添加比例为1.5%,本研究的添加比例是3%,可能是较多量的过磷酸钙使粪便体的酸性增强,在一定程度上抑制了粪便体中微生物的活性,使粪便中的有机氮矿化降低,缩小了氨挥发降低幅度。

2.5 土壤温度对鸡粪氨挥发的影响

试验二(添加锯末与否)和试验三(添加过磷酸钙与否)相同处理(表施、24 000 kg·hm⁻²施肥量、未添加添加剂)的氨挥发氮损失相差很大,试验二为19.5%,试验三为31.8%,氨挥发氮损失升高幅度达38.7%。可见,土壤日平均温度的整体升高(图3和图4),对鸡粪的氨挥发影响很大。可能是由于试验期内土壤日平均温度整体升高后,粪便内的微生物活性增强,使粪便中更多的有机氮矿化、分解转化成无机氮,氨挥发随之增加。

3 结论

(1)施肥方式显著影响鸡粪的氨挥发,深施是一种能有效控制氨挥发损失的措施。和表施相比,湿鸡粪田间裸地表施后立即深翻5~9 cm,氨挥发氮损失由19.8%变为3.3%,深施的氨挥发比表施下降了83.6%,差异显著($P<0.05$)。今后要进一步探讨合适的深施方式及深度。

(2)湿鸡粪的氨挥发氮损失大小和施肥量多少的关系不明显,12 000和24 000 kg·hm⁻²施肥量的氨挥发氮损失分别为36.3%和34.2%,8 000和24 000 kg·hm⁻²施肥量的氨挥发氮损失分别为32.3%和27.4%,差异不显著。除了不同施肥量与氨挥发的关系,更要研究在一定地块环境条件下,具体多少施肥量才能既满足粪便资源化培肥土地,又达到降低氨挥发的目的。

(3)不同的畜禽粪便添加剂由于作用机理不同,对氨挥发的抑制效果有差异。锯末对鸡粪的氨挥发没起到吸附抑制作用,添加前后,氨挥发氮损失由19.5%变为21.1%,差异不显著。过磷酸钙通过改变pH对鸡粪的氨挥发有显著抑制效果,氨挥发氮损失由31.8%变为21.9%,和未添加过磷酸钙相比,氨挥发降低了31.1%,差异显著($P<0.05$)。今后应选取不同类型、更有效的更多添加剂来达到抑制粪便氨挥发的目的,当然也要考虑添加剂对作物各方面的影响和

环境污染问题。

(4)除了鸡粪外,猪粪和牛粪的氨挥发及对环境的影响也不容忽视,今后要拓展供试粪便的种类,以便更全面地了解畜禽粪的氨挥发状况。

参考文献:

- [1] 蔡贵信, 朱兆良. 稻田中化肥氮的气态损失[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 128-135.
CAI Gui-xin, ZHU Zhao-liang. Evaluation of gaseous nitrogen losses from fertilizers applied to flooded rice fields in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(Suppl.): 128-135.
- [2] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 265-269.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 265-269.
- [3] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 253-259.
HE Fa-yun, YIN Bin, JIN Xue-xia, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 253-259.
- [4] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 409-413.
SU Fang, DING Xin-quan, GAO Zhi-ling, et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China plain[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 409-413.
- [5] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. 土壤, 2006, 38(6): 682-686.
SU Fang, HUANG Bin-xiang, DING Xin-quan, et al. Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizer types[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 682-686.
- [6] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [7] 王岩, 娄新乾, 王文亮, 等. 水分调节材料对牛粪堆肥氨气挥发的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(4): 56-58.
WANG Yan, LOU Xin-qian, WANG Wen-liang, et al. Effects of moisture regulators on emission of ammonia during composting of dairy cattle waste[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(4): 56-58.
- [8] 曹喜涛, 黄为一, 常志州, 等. 鸡粪堆制过程中氮素损失及减少氮素损失的机理[J]. 江苏农业学报, 2004, 20(2): 106-110.
CAO Xi-tao, HUANG Wei-yi, CHANG Zhi-zhou, et al. Mechanism of nitrogen loss and reduction in nitrogen loss during the compost of chicken manure[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2004, 20(2): 106-110.
- [9] 李吉进, 郝晋珉, 邹国元, 等. 添加剂在猪粪堆肥过程中的作用研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 483-486.

- LI Ji-jin, HAO Jin-min, ZOU Guo-yuan, et al. Role and application of additive during composting pig manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4):483-486.
- [10] 钱承梁, 鲁如坤. 农田养分再循环研究Ⅲ: 粪肥的氨挥发[J]. 土壤, 1994(4):169-174.
- QIAN Cheng-liang, LU Ru-kun. Research of nutrient cycling in agricultural field Ⅲ: ammonia volatilization from manure[J]. *Soils*, 1994(4):169-174.
- [11] 黄彬香, 苏芳, 丁新泉, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定-风洞法[J]. 土壤, 2006, 38(6):712-716.
- HUANG Bin-xiang, SU Fang, DING Xin-quan, et al. Wind-tunnel system for measurement of ammonia volatilization from agricultural soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6):712-716.
- [12] Webb J, Chadwick D, Ellis S. Emissions of ammonia and nitrous oxide following incorporation into the soil of farmyard manures stored at different densities [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70: 67-76.
- [13] Mattila P K, Joki-Tokola E. Effect of treatment and application technique of cattle slurry on its utilization by ley:I. Slurry properties and ammonia volatilization[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65:221-230.
- [14] Thompson R B, Pain B F, Lockyer D R, et al. Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland[J]. *Plant and Soil*, 1990, 125:109-117.
- [15] Kirchmann H, Witter E. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition[J]. *Plant and Soil*, 1989, 115:35-41.
- [16] Robert V, Joachim C. Studies on the relationship between slurry pH, volatilization processes and the influence of acidifying additives[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 47:157-165.