

# 污泥及其混合堆肥对番茄土壤性质和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

何闪英, 李阿南, 王 雷

(浙江工商大学环境科学与工程学院; 浙江省固体废物处理与资源化重点实验室, 杭州 310012)

**摘 要:** 目前关于污泥及其生物堆肥的土地利用过程中土壤性质变化和温室气体排放数据十分缺乏, 难以满足农田土壤氮素保存和温室气体减排的需求。该研究通过在番茄种植过程中添加  $800 \text{ kg}/\text{hm}^2$  新鲜污泥 (S-H)、 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$  新鲜污泥 (S-L)、 $800 \text{ kg}/\text{hm}^2$  秸秆堆肥 (VM-S) 和  $800 \text{ kg}/\text{hm}^2$  猪粪堆肥 (VM-M), 开展土壤性质、无机氮形态、作物生长以及  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征的研究。结果表明: 堆肥处理显著增加了土壤电导率 (electric conductivity, EC) ( $P < 0.05$ ), 其中猪粪堆肥时土壤 EC 值最大。添加污泥和堆肥都使土壤 pH 值显著上升 ( $P < 0.05$ ), 最终趋于中性, 且 VM-M 对土壤酸化的抑制效果略优于 VM-S。污泥和堆肥处理时土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度显著高于对照, 且各处理组  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度均随时间逐渐下降,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  主要被番茄吸收, 部分  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  从土壤上层淋溶至下层;  $\text{NH}_4^+$  大多数被氧化为  $\text{NO}_3^-$ , 部分  $\text{NH}_4^+$  被植物吸收。在施入的无机氮量相等情况下, VM-M、VM-S、S-H 处理组中番茄地上部分生物量分别为  $1\ 515$ 、 $1\ 383$ 、 $1\ 103 \text{ g}/\text{株}$ , 株高分别为  $56.8$ 、 $54.5$ 、 $51.3 \text{ cm}$ , 对番茄生长的促进效果为  $\text{VM-M} > \text{VM-S} > \text{S-H}$ , 而 S-H 比 S-L 多施入的氮肥对番茄生长并未起到明显促进作用 ( $P > 0.05$ )。与对照相比, 污泥或生物堆肥都显著提高了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 ( $P < 0.05$ ), 各处理组  $\text{N}_2\text{O}$  的排放均集中于施肥后的前 20 天, 且土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量大小顺序为  $\text{S-L} (0.76 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})) < \text{VM-M} (0.95 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})) < \text{VM-S} (1.19 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})) < \text{S-H} (1.71 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}))$ 。因此, 在进行污泥及其生物堆肥的土地利用时, 应考虑有机肥的种类及其施用量, 以提高作物产量的同时改善土壤并减少温室气体排放, 在进行污泥的农田利用时可先将污泥与畜禽粪堆肥。

**关键词:** 污泥; 土壤; 排放控制; 混合堆肥;  $\text{N}_2\text{O}$

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.033

中图分类号: S19; S365; X511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0239-08

何闪英, 李阿南, 王 雷. 污泥及其混合堆肥对番茄土壤性质和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 239—246. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.033 <http://www.tcsae.org>

He Shanying, Li A'nan, Wang Lei. Effect of sewage sludge and its mixed compost on soil properties and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from tomato soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 239—246. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.033 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

全球气候变化已成为 21 世纪人类面临的主要环境问题之一<sup>[1]</sup>。二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 和二氧化氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 是最为重要的 3 种温室气体, 其中,  $\text{N}_2\text{O}$  在大气中的滞留时间长达 140 a, 增温潜势是等质量  $\text{CH}_4$  的 23 倍,  $\text{CO}_2$  的 296 倍<sup>[2]</sup>。 $\text{N}_2\text{O}$  也是臭氧层破坏的最重要因子, 会导致人类皮肤癌和其他疾病的发病率迅速上升<sup>[3]</sup>。大气  $\text{N}_2\text{O}$  含量正以每年 0.2%~0.3% 的速度增加<sup>[4]</sup>, 因此,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放问题已引起各国政府普遍关注。农田土壤是  $\text{N}_2\text{O}$  的主要人为排放源, 对全球  $\text{N}_2\text{O}$  人为排放的贡献率高达 70%<sup>[5]</sup>。从 1980 年到 2007 年, 中国农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放年均增长高达 7.6%, 其中, 化学氮肥投入、有机物质投入、作物秸秆投入对农田  $\text{N}_2\text{O}$  直接排放的贡献份额分别为 77.64%、15.57% 和 6.46%<sup>[6]</sup>。因此, 如何减少农业生产利用中的  $\text{N}_2\text{O}$  排放已成为当前的研究热点之一。

大麦 (*Hordeum vulgare* L.)、豌豆 (*Pisum sativum* L.)、

小麦 (*Triticum aestivum* L.)、油菜 (*Brassica napus* L.) 等作物种植过程中, 施加 N 肥时田间排放的  $\text{N}_2\text{O}$  量明显高于无 N 肥施加时<sup>[7]</sup>。施入的氮肥会通过土壤微生物的硝化和反硝化作用引起  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。污泥富含有机质、N、P 等营养元素, 是一种高营养的有机肥, 因而常被用于改良土壤和促进植物生长<sup>[8]</sup>。据估计, 全球 37% 的污水污泥被施用于农田<sup>[9]</sup>, 而中国面临污泥产量不断增加和处理能力提标的双重压力, 污水污泥的农田利用率已达 44.83%<sup>[10]</sup>。污泥堆肥及其土地利用也将是今后较长一段时期内中国污泥无害化处理与资源化利用的主要发展方向之一。但污泥中同时含有较多的重金属、病原体和有机污染物质<sup>[11]</sup>。将污泥堆肥后则可以大大减少病菌<sup>[12]</sup>。目前已有较多文献报道了秸秆或畜禽粪便堆肥产物施用于农田, 可有效改善土壤质量<sup>[13]</sup>、降低土壤 EC 值<sup>[14]</sup>、提高土壤 pH 值<sup>[14-15]</sup>、有机质和养分含量<sup>[14-16]</sup>以及土壤酶的活性<sup>[16]</sup>, 也有较多关于其施用后引起土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的报道<sup>[17-20]</sup>。但关于污泥及其混合堆肥施用后引起的土壤性质变化和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的研究仍十分缺乏, 仅见钟佳等<sup>[21]</sup>关于污泥与蘑菇渣堆肥、以及 Fernández-Luqueño 等<sup>[22]</sup>关于污泥与蚯蚓堆肥在土地利用过程中  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征的研究, 而对秸秆和畜禽粪便这两大农村新污染源与污泥混合堆肥后是否会引起土壤性质改变和  $\text{N}_2\text{O}$  排放尚不清

收稿日期: 2015-04-15 修订日期: 2015-07-17

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY13C030001)

作者简介: 何闪英, 女, 浙江东阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤环境科学研究。杭州 浙江工商大学环境科学与工程学院, 310012。

Email: heshanying@zjgsu.edu.cn

楚。因此，本文拟以国内外普遍种植的番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 为种植对象，研究污水污泥与秸秆、猪粪混合堆肥产物施入作物种植地后土壤性质改变、作物生长和氮肥的  $\text{N}_2\text{O}$  损失状况，以期为农田氮素的保存和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为黏土，采自杭州市郊某农田，土壤采集后去除动植物残体和石块，自然风干，过 2 mm 筛后充分混匀，土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physiochemical properties of soils		
指标 Parameters	测定方法 Assay methods	测定值 Values
pH 值	电位测定法 <sup>[23]</sup>	6.2
电导率 Electric conductivity (EC)/(dS·m <sup>-1</sup> )	土壤浸出液法 <sup>[24]</sup>	1.2
有机质质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	重铬酸钾容量法 <sup>[23]</sup>	2061.5
总有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	外加热重铬酸钾氧化法 <sup>[23]</sup>	8.7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	双波长紫外分光光度法 <sup>[25]</sup>	30.4
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮含量 (重铬酸钾-硫酸消 化法 <sup>[26]</sup> ) -NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量 <sup>[25]</sup>	2.7
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	纳氏试剂分光光度法 <sup>[27]</sup>	7.5

1.2 污水污泥及其混合堆肥处理方法

将取自浙江杭州七格污水处理产排放的污水 (5 日生化需氧量 (five-day biochemical oxygen demand) 为 983.5 mg/L) 在反应器中进行好氧消化、絮凝沉淀后经过带式压滤机以减少污泥含水量，泥中重金属、有毒有机污染物和病菌含量较低。猪粪采自杭州市余杭区某规模化养猪场，其有机碳质量分数 (以烘干基计) 35.1%、全 N 3.7%、全 P 4.1%、全 K 1.4%、EC 3.04 dS/m；玉米秸秆粉末有机碳质量分数 (以烘干基计) 48.4%、全 N 0.74%、全 P 0.32%、全 K 1.1%、EC 0.52 dS/m。将新鲜脱水污泥、玉米秸秆粉末 (粒径 < 5 mm) 或猪粪混合进行堆肥，污泥与秸秆 (或猪粪) 以 60% 和 40% (干质量百分比计) 混合，混合物料含水率控制在约 65%。堆垛上用塑料膜盖严，人工翻堆为堆肥开始后的 2 周内每 2 天翻 1 次，之后每 5 天翻 1 次。经过 1 个月的堆置，获得稳定成熟的堆肥产物。混合堆肥产物的物理性质 (粒度、pH 值、含水率)、营养物质 (总有机碳、全 N、全 P、全 K) 质量百分数、以及大肠杆菌、蛔虫卵数量和 Hg、Cd、Pb、Cr、As 等重金属含量均符合《堆肥质量要求》国家标准 (2008 年意见征求意见稿) 中关于农作物用堆肥的标准。

PVC 培养装置 (16 cm (直径) × 50 cm (高)) 底部 7 cm (高) 用碎石填充，然后用沙子填充 3 cm (高)，再装入 15 cm (高) 土壤 (约 3.25 kg (干质量))，最后装入 15 cm (高) 添加有污泥或堆肥产物的土壤。添加污泥或堆肥产物的土壤设 5 个处理 (见表 2)，各处理均设 12 个重复。污泥高投加处理组 (S-H)、和堆肥产物添加剂量按照《中国主要作物施肥指南》<sup>[28]</sup> 和农业部主要作物科学施肥指导意

见中番茄的氮素推荐量 800 kg/hm<sup>2</sup> 计算 (土壤密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>)，且考虑污泥中约 40% 的有机氮会发生矿化；污泥低投加处理组 (S-L) 中污泥的添加量以较低氮素施加量 400 kg/hm<sup>2</sup> 计算。

表 2 试验处理设置  
Table 2 Treatment design

处理 Treatment	处理代号 Code for treatment	土量 Amount of soil	添加物量 Amount of addition
对照 Control	C	不加污泥和堆肥 产物	0
污泥-高量 Sludge-high amount	S-H	1 kg	220 g 新鲜污泥
污泥-低量 Sludge-low amount	S-L	1 kg	110 g 新鲜污泥
污泥-秸秆堆肥 Sludge-straw compost	VM-S	1 kg	530 g 污泥与 秸秆堆肥产物
污泥-猪粪堆肥 Sludge-pig manure compost	VM-M	1 kg	475 g 污泥与 猪粪堆肥产物

1.3 番茄种植与样品采集

将番茄种子用清水洗净，在温度为 20℃、无光照条件下用蒸馏水浸泡 4 h，然后在 28℃ 恒温培养箱中催芽 10 h 后于温室中播种，每管种 2 颗。温室白天夜晚温度控制在 15℃/5℃，每 3 天浇水 1 次，以保持土壤含水率为最大持水量的 70%。于播种的第 0、30、60 和 90 天采集土样。每个取样时间点每个处理均取 3 管，将 0~15 cm 和 >15~30 cm 土壤分别整体采集并测定 EC、pH 值、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量。每 2 天测定  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。第 90 天时收获番茄地上部分，蒸馏水冲净后吸水纸吸干表面，称取植株质量，并测定地上部分植株高度。

1.4  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量测定及总量计算

测定  $\text{N}_2\text{O}$  时将 16 cm (直径) × 50 cm (高) PVC 箱 (图 1) 置于番茄培养装置上以隔绝空气，PVC 箱上部接有塑料管，用医用塑料注射器从塑料管抽取气体样品以测定箱内  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度。样品测定时在 PVC 箱关闭后的 0、5、15、30 min 分别采样，假设时间为 0 时箱内外气体浓度相等，以 5、10、30 min 时的浓度减去 0 min 时测得的浓度进行校正。 $\text{N}_2\text{O}$  用气相色谱仪 (Agilent 7890A，2013 年购置) 测定， $\text{N}_2\text{O}$  标准气质量浓度为 9.6 mg/L (北京海谱气体有限公司)，用瑞典产体积分数为 328.2 mL/L 的标准气体进行校正，样品稀释用 99.999% 的高纯氮气。检测器温度、柱温、进样口温度分别为 350、60、100℃。测定  $\text{N}_2\text{O}$  浓度每次抽取气体样品后打开塑料薄膜和暗室的门窗，开风扇通风 2 h，以保证直筒瓶内的气体与外界完全交换。 $\text{N}_2\text{O}$  排放通量计算公式<sup>[29]</sup>如下：

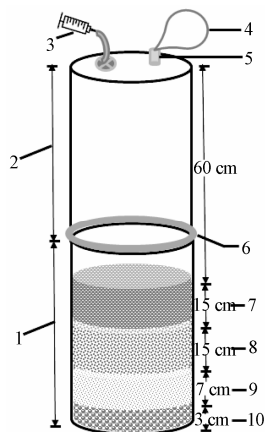
$$F = \rho \cdot h \cdot (dc/dt) \times (273/T) \tag{1}$$

式中： $F$  为  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量， $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ， $\rho$  为标准状况下  $\text{N}_2\text{O}$  气体的密度， $1.26 \times 10^9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $h$  为采样箱气室有效高度 (m)， $dc/dt$  为箱内  $\text{N}_2\text{O}$  气体浓度随时间的变化率， $dc/dt$  由 4 个时间点的气样浓度值经线性回归分析得出， $T$  为土壤绝对温度，K。

测定期间 (本研究中为 90 d) 每平方米土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的累积排放量 ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) 的计算公式<sup>[30]</sup>如下：

$$C = \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times 24 \cdot D \right) \quad (2)$$

式中： $F_i$ 、 $F_{i+1}$  分别为第  $i$  次和第  $i+1$  次采样时 N<sub>2</sub>O 的排放通量， $D$  为 2 次采样间隔天数（本研究中为  $D=2$ ）， $n$  为采样次数（本研究中  $n=45$ ）；由此可推算出每年每公顷的 N<sub>2</sub>O 的累积排放量（kg/(hm<sup>2</sup>·a)）。



1.培养装置 2.PVC箱 3.取样针筒 4.压力调节袋 5.压力平衡管 6.橡胶密封圈 7.添加污泥或堆肥产物的土壤 8.土壤 9.沙子 10.碎石  
1.Culture apparatus 2.PVC cylindrical chamber 3.Sampling needle cylinder 4.Pressure adjustment bag 5.Pressure equalizing pipe 6.Rubber seal 7.Soil mixed by sludge or compost product 8.Soil 9.Sand 10.Gallet

图 1 N<sub>2</sub>O 气体采样箱装置示意图

Fig.1 Diagram of N<sub>2</sub>O sampling device

## 1.5 数据处理

所有数据均采用 SPSS19.0 软件进行分析。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 多重比较方法分析组间差异 ( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 EC 与 pH 值

EC 值可反映有机物质中的可溶性盐含量及其施加于土壤时对植物的潜在毒性。当 EC 高于 4 dS/m 时，会对植物生长产生负面影响，如发芽率低、萎蔫等<sup>[31]</sup>。如表 3 所示，本研究 0~15 cm 土层和 >15~30 cm 土层类似，堆肥处理组的 EC 值显著大于其他组 ( $P<0.05$ )，其中猪粪堆肥 EC 值最大，其初始 EC 值为 S-H 处理时的 4 倍，这是因为猪粪中盐含量较高（猪粪、秸秆、污泥 EC 值分别为 3.04、0.52、0.47 dS/m，EC 值是衡量水溶性盐含量的指标，EC 值越高，则带电离子和分子的浓度就越大），当施加入土壤时使 EC 值增大，但仍远小于对作物引起负面效应的临界值。类似地，Perez-Murcia 等<sup>[32]</sup>发现污泥堆肥施入泥炭基质时使 EC 值增加了 4 倍。蘑菇渣堆肥施入农田时由于含有高浓度的 Na 也导致土壤 EC 值显著增加<sup>[33]</sup>。

在 0~15 cm 土层中，pH 值随时间变化较小，与对照相比，添加污泥或堆肥产物使土壤 pH 值显著上升，这与 >15~30 cm 土层的 pH 值情况类似，但 >15~30 cm 土层的 pH 值略低于 0~15 cm 土层（表 3）。污泥和堆肥产物中高含量的可溶性盐可使土壤 pH 值上升<sup>[34]</sup>，但有机物降解会产生 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和腐殖酸<sup>[35]</sup>，在这两类相反电荷的离子

相互作用下，使堆肥产物 pH 值趋于中性<sup>[36]</sup>。且从本研究结果可以看出，猪粪堆肥对土壤酸化的抑制效果略优于秸秆堆肥。李小磊<sup>[37]</sup>也报道了有机肥能有效改良土壤酸化，且猪粪的效果要优于马粪、鸡粪和秸秆，随着有机肥的施用量增加，对土壤酸化的缓冲能力也增强。

表 3 不同处理条件下 0~15 cm 和 >15~30 cm 土层中土壤 EC 和 pH 值随时间的变化

Table 3 Varieties of soil EC and pH value in 0-15 cm and >15-30 cm depths with time under different treatments

指标 Index	土层 Soil layer /cm	处理 Treatments	时间 Time /d			
			0	30	60	90
EC/ (dS·m <sup>-1</sup> )	0~15	CK	0.1±0.02da	0.11±0.01da	0.09±0da	0.11±0.01da
		S-H	0.16±0cc	0.19±0.03ca	0.2±0.01ca	0.17±0.01cb
		S-L	0.12±0.01da	0.13±0.01da	0.1±0.02db	0.12±0.01da
		VM-S	0.31±0.02ba	0.26±0.01bc	0.29±0.02ba	0.27±0.01bb
		VM-M	0.64±0.02aa	0.35±0.01ac	0.39±0ab	0.4±0ab
pH 值	>15~30	CK	0.1±0.02db	0.14±0.01ca	0.12±0.02ca	0.13±0.01da
		S-H	0.16±0cb	0.17±0.03bb	0.19±0.03ba	0.15±0cb
		S-L	0.12±0.01da	0.11±0.02da	0.13±0.01ca	0.12±0.01da
		VM-S	0.31±0.02ba	0.2±0.04bb	0.17±0bb	0.21±0.01bb
		VM-M	0.64±0.02aa	0.32±0.01ac	0.37±0.01ab	0.35±0.01ab
pH 值	0~15	CK	6.2±0.1ea	6.4±0.1ca	6.3±0ca	6.2±0.2da
		S-H	7.6±0ab	7.5±0.1ac	7.8±0.2aa	7.7±0aa
		S-L	7.4±0.1ba	7.4±0aa	7.5±0ba	7.5±0.1ba
		VM-S	7.2±0cc	7.3±0bb	7.5±0.1ba	7.4±0.1ca
		VM-M	7.0±0.1dc	7.4±0.1ab	7.5±0.1ba	7.6±0aa
pH 值	>15~30	CK	6.2±0.1ea	6.3±0da	6.2±0.1ca	6.2±0ba
		S-H	7.6±0aa	7.5±0ab	7.6±0.1aa	7.4±0ac
		S-L	7.4±0.1ba	7.5±0.1aa	7.2±0bb	7.4±0.1aa
		VM-S	7.2±0ca	7.0±0ca	7.3±0ba	7.3±0aa
		VM-M	7.0±0.1dc	7.2±0bb	7.2±0bb	7.4±0.1aa

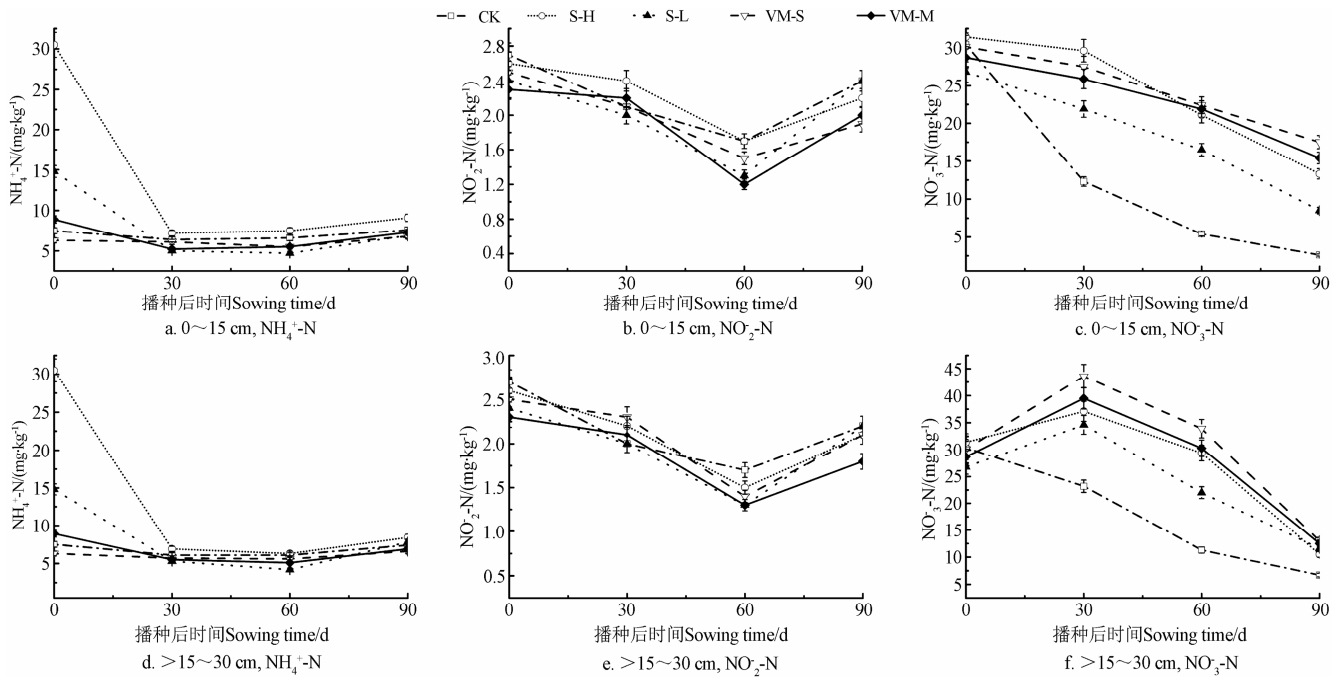
注：数据后第一个字母表示同一时间不同处理组之间的差异显著性 ( $P<0.05$ )，第二个字母表示同一处理组不同时间的差异显著性 ( $P<0.05$ )。

Note: The first letter meant the significant difference among treatments at the same time, and the second letter meant the significant difference between different time under the same treatment ( $P<0.05$ ).

### 2.2 土层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的动态变化

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度在培养初始时为污泥施加组中最大 (S-L 中为 14 mg/kg，S-H 中为 31 mg/kg)，但 30 d 后所有处理组的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度相似（图 2）。从第 0~30 天，各处理组的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度下降，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>被氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>并被作物吸收或者以 NH<sub>3</sub> 形式挥发。但 Cordovil 等<sup>[38]</sup>研究表明在 pH 值约 7.6 时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以 NH<sub>3</sub> 形式挥发的量很少。因此，大多数的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>被氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，这也导致了 >15~30 cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度在第 30 天时有所增加（图 2）。此外，部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>可能被作物吸收<sup>[39]</sup>。

两个土层中的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 质量分数均 <3 mg/kg，且各个处理组间无显著差异。0~15 cm 和 >15~30 cm 土层 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度都为先下降再略上升的趋势（图 2）。在培养条件下，土壤中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的累积主要来源于土壤硝化过程<sup>[40]</sup>。本研究结果表明，作为硝化过程的中间产物，NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在 0~30 cm 土层中累积很少，且 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的累积与土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度直接相关。



注: S-H、S-L 分别表示添加新鲜污泥 800 和 400 kg·hm<sup>-2</sup>; VM-S、VM-M 分别表示 800 kg·hm<sup>-2</sup> 秸秆堆肥和猪粪堆肥。

Note: S-H, S-L were treatments with 800 and 400 kg·hm<sup>-2</sup> fresh sludge, respectively; VM-S, VM-M were treatments with 800 kg·hm<sup>-2</sup> straw composting and swine manure composting, respectively.

图 2 各处理中 0~15 cm 和 >15~30 cm 土层  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度的变化

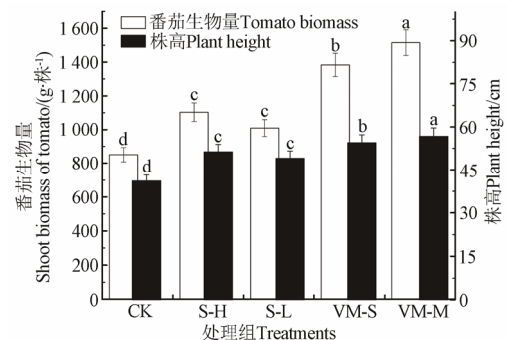
Fig.2 Changes of concentrations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in 0-15 cm and >15-30 cm soil layers in different treatments

如图 2 所示, 各处理组 0~15 cm 土层中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均随时间逐渐下降, 其中堆肥组下降最不显著, 处理组的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度显著高于对照 ( $P<0.05$ ), 第 90 天时, S-H、S-L、VM-S、VM-M 处理组  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在 0~15 cm 土层分别比对照增加 4.12、2.27、0.57、0.73、0.94、0.87 倍。除对照组外, 各处理组 >15~30 cm 土层中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在第 30 天时增加随后下降, 其中堆肥组增加最显著, 各处理组  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均显著高于对照 ( $P<0.05$ )。土壤中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  缺乏时  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可被微生物利用而固定, 在厌氧条件下  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可被还原为  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{N}_2$ ; 另一方面,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  也可随土壤水淋移至土壤深层。由图 2 可见, 0~15 cm 土层和 >15~30 cm 土层中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均为对照组下降最显著, 由于没有发生淋移至深层, 且  $\text{N}_2\text{O}$  排放量很少(平均为 1.85 ng/(m<sup>2</sup>·h)), 因此,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度的下降主要是由于被植物吸收所致。Santibanez 等<sup>[41]</sup>报道了当土壤用污泥堆肥时, 尤其是土壤中高量施用污泥时,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  较易发生淋溶。本研究中, 虽然土壤含水量都未超过田间持水量, 但依然存在水分的向下迁移, 因为所有处理组中 0~15 cm 土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度持续下降, 而第 30 天时 >15~30 cm 土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度有所上升(图 2)。第 30 天以后, 由于植物的吸收导致 >15~30 cm 土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度继续下降。

### 2.3 番茄生物量

第 90 天时, VM-M、VM-S、S-H、S-L、C 处理组中番茄地上部分生物量分别为 1515、1383、1103、1009、851 g/株, 株高分别为 56.8、54.5、51.3、49.1、41.2 cm

(图 3)。本研究中 VM-M、VM-S、S-H 处理组中作用于植物的无机氮量在初始接近一致。因此 VM-S 和 VM-M 处理组相较于污泥堆肥组和对照组番茄生物量和株高都显著增加 ( $P<0.05$ ), 且 VM-M 对番茄生长的促进效果最好。类似地, Fernández-Luqueño 等<sup>[22]</sup>也报道了蚓粪堆肥对大豆生物量的促进效果比污泥好。这可能是由于动物粪中所含的 N、P、K 含量更高所致。但番茄生物量和株高在 S-H 和 S-L 中无显著差异 ( $P>0.05$ ), 表明 S-H 中多施入的氮肥对番茄生长并未起到明显促进作用。



注: 不同字母表示不同处理组间的差异显著性 ( $P<0.05$ )

Note: Different letters meant the significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

图 3 各处理组中番茄生物量及株高

Fig.3 Biomass and plant height of tomato in different treatments

### 2.4 土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放

土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放受多个土壤过程和土壤因子控制,

其中硝化和反硝化最为重要。Harrison 与 Webb<sup>[42]</sup>认为硝化作用是土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放最主要的过程, 但 Beck-Friis 等<sup>[43]</sup>认为  $\text{N}_2\text{O}$  既可能是  $\text{NH}_4^+$ 氧化的产物, 也可能是  $\text{NO}_3^-$ 不完全还原的产物。本研究中, S-H、S-L、VM-S、VM-M 中  $\text{N}_2\text{O}$  排放为 1.71、0.76、1.19、0.95  $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ , 与对照相比, 污泥或混合堆肥都显著提高了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 ( $P<0.05$ ), 而猪粪堆肥比污泥和秸秆堆肥更能减少土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 (图 4)。研究表明: 用秸秆、畜禽粪便、沼渣替代化肥均能减少农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[17,44-45]</sup>, 但也有施用有机肥或秸秆还田后  $\text{N}_2\text{O}$  排放量没有变化或增加的报道<sup>[46-48]</sup>, 这可能与有机物料的 C/N、C、N 组分活性、土壤条件、甚至作物品种等有关<sup>[49-51]</sup>, 其中涉及的氮素转化过程还有待进一步研究。

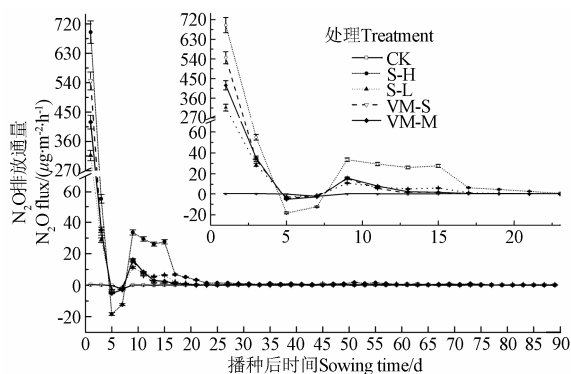


图 4 各处理组中土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量  
Fig.4 Soil  $\text{N}_2\text{O}$  emission in different treatments

如图 4 所示, 在施肥初始阶段 (第 1 天)  $\text{N}_2\text{O}$  迅速排放, 而后排放量下降。这与 Eicher<sup>[52]</sup>分析的 1990 年前发表的在 104 块田间直接测定的肥料引起的  $\text{N}_2\text{O}$  排放情况一致。第 9 天开始土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量再次增加, 第 21 天开始土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量很少。类似地, 杨帆等<sup>[31]</sup>研究表明堆肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在前 22 天。钟佳等<sup>[21]</sup>报道了污泥蘑菇渣堆肥对萝卜种植过程中  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响, 结果表明  $\text{N}_2\text{O}$  在第 2、10 和 14 天出现峰值,  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要也集中在试验的前 20 天。在第 3~7 天  $\text{N}_2\text{O}$  排放量迅速下降甚至出现负值 (图 4), 可能是因为  $\text{N}_2\text{O}$  还原为  $\text{N}_2$  的量远大于  $\text{N}_2\text{O}$  产生量。当  $\text{N}_2\text{O}$  产生量小于  $\text{N}_2\text{O}$  还原时, 土壤有吸收大气中  $\text{N}_2\text{O}$  的潜力, 这种吸收似乎是由于对无机氮的可利用性所致<sup>[53]</sup>。土壤因素如温度、pH 值和含氧量等都会影响这个过程, 但这些因子的作用结果并不总与预期一致, 这可能取决于土壤  $\text{N}_2\text{O}$  还原过程的主要形式以及与之相关的其他因素。除了反硝化, 硝化菌反硝化作用和好氧反硝化作用都可能参与  $\text{N}_2\text{O}$  的还原过程<sup>[53]</sup>。此外, 其他过程如土壤矿物的非生物反应, 也可能参与导致净  $\text{N}_2\text{O}$  的减少。

### 3 结 论

污泥及其堆肥产物尤其是污泥与猪粪的堆肥对土壤酸化有较好抑制作用。污泥及其堆肥处理时会增加土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, 第 90 天时, 添加 800  $\text{kg}/\text{hm}^2$  新鲜污泥 (S-H)、

添加 400  $\text{kg}/\text{hm}^2$  新鲜污泥 (S-L)、添加 800  $\text{kg}/\text{hm}^2$  秸秆堆肥 (VM-S)、添加 800  $\text{kg}/\text{hm}^2$  猪粪堆肥 (VM-M) 处理组  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在 0~15 cm 土层分别比对照增加 4.12、2.27、5.73、4.92 倍, 在 >15~30 cm 土层分别比对照增加 0.57、0.73、0.94、0.87 倍。  $\text{NO}_3^-$ -N 主要被番茄吸收, 部分  $\text{NO}_3^-$ -N 从土壤上层淋溶至下层; 土壤  $\text{NH}_4^+$ 大多被氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 部分被植物吸收。对番茄生长的促进效果为 VM-M>VM-S>S-H, 且 S-H 比 S-L 多施入的氮肥对番茄生长无显著促进作用。污泥及其生物质堆肥都会显著提高土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 且土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放为 S-L (0.76  $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ) < VM-M (0.95  $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ) < VM-S (1.19  $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ) < S-H (1.71  $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ )。因此, 对污泥进行农田利用时先将其与猪粪堆肥, 这对抑制土壤酸化、促进作物生长和农田温室气体减排都更有利。

### [参 考 文 献]

- [1] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years[J]. Science, 2000, 289(5477): 270—277.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2007 synthesis report: Intergovernmental panel on climate change[R]. Valencia, 2007.
- [3] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123—125.
- [4] Tallec G, Garnier J, Billen G, et al. Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(7): 2200—2209.
- [5] Bouwman A F. Exchange of Greenhouse Gases Between Terrestrial Ecosystem and the Atmosphere[M]// Bouwman A F. Soils and the Greenhouse Effect. Wiley, New York, 1990, 61—127.
- [6] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC 2006 方法对中国农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7—13.  
Zhang Qiang, Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC 2006 guideline method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 7—13. (in Chinese with English abstract)
- [7] Malhi S S, Lemke R, Wang Z H, et al. Tillage nitrogen and crop residue effects on crop yield nutrient uptake soil quality and greenhouse gas emissions[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1/2): 171—183.
- [8] Adviento-Borbe M A A, Haddix M L, Binder D L, et al. Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems[J]. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1972—1988.
- [9] Togay N, Togay Y, Dogan Y. Effects of municipal sewage sludge doses on the yield, some yield components and heavy metal concentration of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. African Journal Biotechnology, 2008, 7(17): 3026—3030.
- [10] 彭琦, 孙志坚. 国内污泥处理与综合利用现状及发展[J]. 能源工程, 2008(5): 47—50.

- Peng Qi, Sun Zhijian. Present status and development of sewage sludge's treatment and utilization in China[J]. Energy Engineering, 2008(5): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [11] Fyttili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1): 116—140.
- [12] Harrison E Z, Oakes S R, Hysell M, et al. Organic chemicals in sewage sludge[J]. Science of the Total Environment, 2006, 367(2/3): 481—497.
- [13] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures: A review[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22): 5444—5453.
- [14] 孙婧, 田永强, 高丽红, 等. 秸秆生物反应堆与菌肥对温室番茄土壤微环境的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 153—164.
- Sun Jing, Tian Yongqiang, Gao Lihong, et al. Effects of straw biological reactor and microbial agents on physicochemical properties and microbial diversity of tomato soil in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 153—164. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈雯雯, 申卫收, 韩成, 等. 施用不同配比菇渣、熟牛粪对酸性土壤质量和花生产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1): 69—74.
- Chen Wenwen, Shen Weishou, Han Cheng, et al. Effects of different proportions of spent mushroom compost and cow manure compost on acidic soil quality and the peanut yield[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2014(1): 69—74. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李继蕊, 史庆华, 王秀峰, 等. 不同配比蚯蚓堆肥和牛粪堆肥对根际微环境及黄瓜产量、品质的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(6): 66—70.
- Li Jirui, Shi Qinghua, Wang Xiufeng, et al. Effects of vermicompost and cow dung compost at different volume ratios on rhizosphere environment, quality and yield of cucumber[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(6): 66—70. (in Chinese with English abstract)
- [17] 何飞飞, 梁运珊, 易珍玉, 等. 有机无机肥配施对酸性菜地土壤硝化作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 534—540.
- He Feifei, Liang Yunshan, Yi Zhenyu, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizer on the nitrification in acid vegetable soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(3): 534—540. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李波, 荣湘民, 谢桂先, 等. 有机无机肥配施条件下稻田系统温室气体交换及综合温室效应分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 298—304.
- Li Bo, Rong Xiangmin, Xie Guixian, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gases exchange and comprehensive global warming potential in paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 298—304. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhong Jia, Wei Yuansong, Wan Hefeng, et al. Greenhouse gas emission from the full process of swine manure composting and land application of compost[J]. Atmospheric Environment, 2013, 81: 348—355.
- [20] 罗良国, 近藤始彦, 伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田  $N_2O$  和  $CH_4$  排放特征及其环境影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3200—3206.
- Luo Liangguo, Kondo Motohiko, Itoh Sumio.  $N_2O$  and  $CH_4$  emission from Japan rice fields under different long-term fertilization patterns and its environmental impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3200—3206. (in Chinese with English abstract)
- [21] 钟佳, 魏源送, 赵振凤, 等. 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 2186—2194.
- Zhong Jia, Wei Yuansong, Zhao Zhenfeng, et al. Emission of greenhouse gas and ammonia from the full process of sewage sludge composting and land application of compost[J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 2186—2194 (in Chinese with English abstract)
- [22] Fernández-Luqueño F, Reyes-Varela V, Martínez-Suárez C, et al. Emission of  $CO_2$  and  $N_2O$  from soil cultivated with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilized with different N sources[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(14): 4289—4296.
- [23] 杨业凤, 徐阳春, 姚政, 等. 上海市浦东新区设施菜地土壤盐分变化规律研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 1009—1013.
- Yang Yefeng, Xu Yangchun, Yao Zheng, et al. Salinity characteristics of greenhouse vegetable soils in shanghai pudong new area[J]. Soils, 2009, 41(6): 1009—1013. (in Chinese with English abstract)
- [24] Rhoades J D, Mantghi N A, Shause P J, et al. Estimating soil salinity from saturated soil paste electrical conductivity[J]. Soil Science Society America Journal, 1989, 53(2): 428—433.
- [25] Gao Xiaofei, Yang Yang, Han Jiaqiang, et al. A comparison of two analytical methods for measuring nitrate in five types of soils in china[J]. Advanced Materials Research, 2011(233): 809—812.
- [26] Kempers A J. Determination of the C/N ratio in a chromic acid soil digest[J]. Plant and soil, 1977, 46(3): 699—703.
- [27] Chen Liqiong, Hu Yong. Influencing factors on determination of ammonia nitrogen in water by nessler's reagent spectrophotometry[C]// International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), Xi'an, 2011, 2: 1173—1176.
- [28] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 161—162.
- [29] 邱炜红. 菜地土壤温室气体氧化亚氮排放及其控制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- Qiu Weihong. Studies on Greenhouse Gas Nitrous Oxide Emission and Its Mitigation From Vegetable Field[D].



- Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张旦麒. 长期不同施肥对稻—麦轮作紫色土麦季 N<sub>2</sub>O 排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- Zhang Danqi. Effect of Long-term Differentiated Fertilization on N<sub>2</sub>O Emission From a Rice-wheat Rotated Purple Soil During Wheat Growing Seasons[D]. Chongqing: Southwest University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [31] 杨帆, 李国学, 江滔, 等. 蚯蚓辅助堆肥处理蔬菜废弃物及其温室气体减排效[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 190—196.
- Yang Fan, Li Guoxue, Jiang Tao, et al. Vermi composting treatment of vegetable waste and its greenhouse gas emissions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 190—196. (in Chinese with English abstract)
- [32] Perez-Murcia M D, Moral R, Moreno-Caselles J, et al. Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(1): 123—230.
- [33] Courtney R G, Mullen G J. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 2913—2918.
- [34] Cheng Hefa, Xu Weipu, Liu Junliang, et al. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turf grass growth[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(1): 96—104.
- [35] Komilis D P, Ham R K. Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper yard waste and food waste[J]. Waste Manage, 2006, 26(1): 62—70.
- [36] Pramanik P, Ghosh G K, Ghosal P K, et al. Changes in organic-C, N, P and K and enzyme activities in vermin compost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(13): 2485—2494.
- [37] 李小磊. 绿色食品黄瓜生产肥料运筹效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2004.
- Li Xiaolei. The Effect of Organic Manures on The Safe Food Planting of Green House Cucumber[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [38] Cordovil C M D S, Cabral F, Coutinho J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3265—3268.
- [39] Volk R, Chaillous S, Mariotti A, et al. Beneficial-effects of concurrent ammonium and nitrate nutrition on the growth of *Phaseolus vulgaris*-a N<sup>15</sup> study[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1992, 30(4): 4887—4893.
- [40] 鲍俊丹. 土壤氮素硝化过程中亚硝态氮的累积及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- Bao Jundan. Nitrite Accumulation and Influential Factors of in Soil Nitrogen During Nitrification Process[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [41] Santibanez C, Ginocchio R, Varnero M T. Evaluation of nitrate leaching from mine tailings amended with biosolids under Mediterranean type climate conditions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(6): 1333—1340.
- [42] Harrison R, Webb J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions[J]. Advances in Agronomy, 2001, 73: 65—108.
- [43] Beck-Friis B, Pell M, Sonesson U, et al. Formation and emission of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from compost heaps of organic household waste[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 62(3): 317—331.
- [44] Ding weixin, Yagi Kazuyuki, Cai Zucong, et al. Impact of long-term application of fertilizers on N<sub>2</sub>O and NO production potential in an intensively cultivated sandy loam soil[J]. Water Air Soil Pollution, 2010, 212(1/2/34): 141—153.
- [45] 张静, 李虎, 王立刚, 等. 冬小麦/大葱轮作体系 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1639—1646.
- Zhang Jing, Li Hu, Wang Ligang, et al. Analysis of the characteristics of nitrous oxide emission from a winter wheat-green onion rotation system and the influencing factors[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(8): 1639—1646. (in Chinese with English abstract)
- [46] Zheng Xunhua, Mei Baoling, Wang Yinghong, et al. Quantification of N<sub>2</sub>O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology[J]. Plant and Soil, 2008, 311(1): 211—234.
- [47] 张仲新, 李玉娥, 华路, 等. 不同施肥量对设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269—275.
- Zhang Zhongxin, Li Yue, Hua Luo, et al. Effects of different fertilizer levels on N<sub>2</sub>O flux from protected vegetable land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 269—275. (in Chinese with English abstract)
- [48] 姜宁宁, 李玉娥, 华路, 等. 不同氮源及秸秆添加对菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 219—223.
- Jiang Ningning, Li Yu'e, Hua Luo, et al. Effect of different nitrogen sources and straw adding on n<sub>2</sub>o emission from vegetable soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 219—223. (in Chinese with English abstract)
- [49] Jäger N, Stange C F, Ludwig B, et al. Emission rates of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from soils with different organic matter content from three long-term fertilization experiments-a laboratory study[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(5): 483—494.
- [50] Rizhiya E Y, Boitsov L V, Buchkina N P, et al. The influence of crop residues with different C: N ratios on the N<sub>2</sub>O emission from a loamy sand Soddy Podzolic soil[J]. Eurasian Soil Science, 2011, 44(10): 1144—1151.
- [51] Riya S, Zhou S, Watanabe Y, et al. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from different varieties of forage rice (*Oryza sativa* L.) treating liquid cattle waste[J]. Science of the Total Environment, 2012, 419(1): 178—186.
- [52] Eicher M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data[J]. Environmental Quality, 1990, 19(2): 272—280.
- [53] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N<sub>2</sub>O? A review[J]. Global Change Biology, 2007, 13(1): 1—17.

## Effect of sewage sludge and its mixed compost on soil properties and N<sub>2</sub>O emission from tomato soil

He Shanying, Li A'nan, Wang Lei

(College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University; Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** There is still a great uncertainty of nitrogen conservation and greenhouse gas reduction from farmland soil due to lack of data of the soil properties change and greenhouse gas emissions from the land application of compost and sewage sludge. In this study, tomato plants were cultivated in the greenhouse in treatments of 1) 800 kg/hm<sup>2</sup> fresh sludge (S-H), 2) 400 kg/hm<sup>2</sup> fresh sludge (S-L), 3) 800 kg/hm<sup>2</sup> straw composting product (VM-S), 4) 800 kg/hm<sup>2</sup> swine manure composting product (VM-M), and 5) no fertilization (CK). The soil properties, inorganic nitrogen forms and N<sub>2</sub>O emission characteristics were investigated. The results showed that, compost treatments significantly increased the soil EC value ( $P < 0.05$ ), and the VM-M treatment exhibited the largest soil EC value. With the addition of sludge and compost products, soil pH value increased significantly ( $P < 0.05$ ) and soil pH tended to be neutral. The inhibitory effect of VM-M on soil acidification was better than VM-S. Under the treatments of sludge and compost, concentration of soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N was significantly higher ( $P < 0.05$ ) than the CK, and the NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration of each treatment decreased gradually with time. Most of the NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N was absorbed by tomato plants, and part of the nitrate was leached from the upper to the lower soil layers. Most of the NH<sub>4</sub><sup>+</sup> was oxidized to NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, but some were absorbed by plants. With the application of organic nitrogen, the shoot biomass in the VM-M, VM-S and S-H treatment was 1 515, 1 383 and 1 103 g/plant, respectively, each corresponded with the plant height of 56.8, 54.5 and 51.3 cm, respectively. The positive effect of the treatment on the tomato growth was VM-M > VM-S > S-H. In addition, the excess application of organic nitrogen fertilizer from S-H compared to S-L did not promoted growth of tomato markedly ( $P > 0.05$ ). Compared with the CK, N<sub>2</sub>O emission from soil was significantly improved by sludge ( $P < 0.05$ ). The N<sub>2</sub>O emission from the all treatments were focused on the first 20 days after fertilization, and the amount of emission of soil N<sub>2</sub>O was S-L (0.76 kg/(hm<sup>2</sup>·a)) < VM-M (0.95 kg/(hm<sup>2</sup>·a)) < VM-S (1.19 kg/(hm<sup>2</sup>·a)) < S-H (1.71 kg/(hm<sup>2</sup>·a)). Therefore, the types and the amount of manure should be considered when the sludge or compost was applied in farmland, so that, the yield of crops can be improved and the emission of greenhouse gases could be reduced at the same time, and it's better to compost using sludge and animal manure.

**Key words:** sewage sludge; soils; emission control; mixed compost; N<sub>2</sub>O