

尿素硝酸铵调节碳氮比促进小麦秸秆堆肥腐熟

李帆^{1,2}, 王静¹, 武际^{1,2}, 叶寅¹, 刘泽³, 朱宏斌^{1*}

(1 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031;
3 安徽省农业科学院作物研究所, 合肥 230031)

摘要:【目的】高温堆肥可以加快秸秆腐解并浓缩其养分含量, 是秸秆综合利用的有效措施之一。通常采用畜禽粪便来调节秸秆堆肥的 C/N 比, 但由于重金属和抗生素问题限制了其在高价值经济作物上的应用。为此选择绿色无污染的尿素硝酸铵溶液 (UAN) 作为氮素调理剂开展堆肥试验, 为生产高品质秸秆有机肥提供科学依据。

【方法】设置 4 个处理, 按照 UAN 添加量由多到少分别将堆肥 C/N 调节为 15、20、25 和 30, 进行 50 d 堆肥, 监测堆肥过程中温度、pH、EC、有机碳、铵态氮、硝态氮、纤维素组成、种子发芽率指数等指标的动态变化, 并综合判定堆肥腐熟效果。【结果】C/N25 和 C/N30 的处理最高温度分别达到 63.4℃ 和 65.9℃, 50℃ 以上高温持续时间分别为 7 d 和 8 d, 而 C/N15、C/N20 处理高温持续仅 1~2 d, 未达到无害化处理要求。堆肥初始 pH 值随着 UAN 添加量的增大而升高, 范围在 6.79~7.94, 堆肥后 pH 值范围在 7.63~7.89, 各处理间没有明显差异。堆肥后各处理有机碳含量下降了 8.29%~13.5%, 且 C/N25、C/N30 的处理有机碳降解率显著高于 C/N15 和 C/N20 的处理。全氮含量较堆肥初增加 53.3%~83.7%。秸秆中有机物组成表现为纤维素 > 半纤维素 > 木质素, 堆肥后半纤维素、纤维素和木质素含量分别较堆肥初下降了 30.5%~50.9%、42.1%~55.8% 和 15.3%~29.4%。堆肥过程中由氨气挥发造成的氮素损失率随着 C/N 比升高而降低, 分别为 34.9%、29.0%、22.1% 和 7.37%; 堆肥过程中无机氮占总氮的比例逐渐降低, 由初始的 52.4%~75.8% 下降到结束时的 25.4%~63.1%, 而对应有机氮的比例则较堆肥初提高了 52.4%~66.0%, 表明小麦秸秆堆肥中氮素的稳定性增强。经过 50 d 的堆肥处理, C/N25 和 C/N30 的处理种子发芽率指数均达到彻底腐熟 ($GI \geq 80\%$), C/N20 的处理达到基本腐熟 ($GI \geq 50\%$), 而 C/N15 的处理未腐熟。【结论】采用尿素硝酸铵溶液作为氮素调理剂可有效降低小麦秸秆堆肥 C/N 比, 促进小麦秸秆腐解, 以 C/N30 处理腐熟效果最好。

关键词: 堆肥; 小麦秸秆; 尿素硝酸铵溶液; 碳氮比; 氮损失

Fast production of wheat straw aerobic compost through regulating C/N ratio with urea ammonium nitrate solution

LI Fan^{1,2}, WANG Jing¹, WU Ji^{1,2}, YE Yin¹, LIU Ze³, ZHU Hong-bin^{1*}

(1 Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

2 Anhui Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment, Hefei 230031, China;

3 Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: 【Objectives】Composting is one of the most effective methods in plant straw recycling attributing to the accelerated degradation and concentrated available nutrients. In this study, urea ammonium nitrate solution (UAN) was attempted as a pollution-free nitrogen conditioner to regulating the C/N ratio for rapid production of wheat straw compost. 【Methods】Four C/N ratio levels of 15, 20, 25 and 30 were designed in wheat straw composting mixture by supplementing UAN. The temperature, pH value, electrical conductivity (EC), total organic carbon (TOC), ammonium-N, nitrate-N and germination index (GI) were continuously measured during the 50 days' composting process. 【Results】The maximum temperature in treatments of C/N25 and C/N30 were

收稿日期: 2018-05-16 接受日期: 2018-12-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301302); 安徽省科技重大专项 (17030701052); 安徽省农科院人才发展专项资金 (17F1007) 资助。

联系方式: 李帆 E-mail: lifan4318@163.com; * 通信作者 朱宏斌 E-mail: zhuhongbin2016@163.com

63.4℃ and 65.9℃, and the thermophilic period ($\geq 50^\circ\text{C}$) lasted for 7 d and 8 d, respectively. While the treatments of C/N15 and C/N20 generated temperature not high enough for the hygienic requirements for harmless disposal of plant straw. At the initial, the pH value of compost mixture increased with the increase of C/N, ranging from 6.79 to 7.94, and became close after 50 days composting, ranging from 7.63 to 7.89. Among all treatments, there was 8.29%–13.5% of decrease in TOC and 53.3%–83.7% of increase in the total N content after composting. C/N25 and C/N30 treatments showed significantly higher organic matter degradation rate than the other two ($P < 0.05$). Polymer components of lignocellulose in wheat straw showed the tendency of cellulose > hemicellulose > lignin in concentration. After composting, concentration of hemicelluloses, cellulose and lignin decreased by 30.5%–50.9%, 42.4%–55.8% and 15.3%–29.4%. The nitrogen volatile losses after composting process were 34.9% (in C/N15), 29.0% (in C/N20), 22.1% (in C/N25) and 7.37% (in C/N30), respectively. Transformation of inorganic nitrogen to organic nitrogen was promoted during the process. Content of inorganic nitrogen decreased from 52.4%–75.8% (before composting) to 25.4%–63.1% (after composting). The germination indexes of C/N15, C/N20, C/N25 and C/N30 treatments were 3.55%, 51.6%, 81.5% and 109%, respectively. **【Conclusions】** UAN is an effective nitrogen regulator to adjust the C/N ratio in wheat straw composting. The C/N ratio of 30 produces the most rapid composting process.

Key words: compost; wheat straw; urea ammonium nitrate solution; C/N ratio; nitrogen loss

秸秆是农业生产中主要的产物之一,也是主要的农业废弃物,2015 年我国主要农作物秸秆资源量约 7.19 亿 t,其中氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)养分总资源分别为 625.6 万 t、197.9 万 t 和 1159.5 万 t^[1],秸秆通过高温堆肥发酵生产有机肥是秸秆养分资源高效利用的有效途径之一,可有效避免因秸秆长期高强度直接还田所引起的病虫害加重的风险^[2]。秸秆好氧堆肥过程中必须添加氮源以降低秸秆原料过高的 C/N 比,从而促进微生物对堆肥中有机物的分解和腐殖化,国内外研究多采用畜禽粪便作为氮素调理剂^[3-4],然而不同来源畜禽粪便中氮含量的差异性导致秸秆堆肥工艺中各种原料间的配比差异性极大^[5],不利于秸秆堆肥规模化生产和秸秆有机肥产品质量的标准化控制。同时以畜禽粪便作为氮素调理剂还潜在着重金属、抗生素等环境风险因素^[6-7],在当前国家大力推进的果菜茶有机肥替代行动中,农户在茶树等经济效益较高的作物施肥上拒绝使用含有畜禽粪便的商品有机肥,而更倾向于采用纯植物源的有机肥,因此选择能够替代畜禽粪便的氮素调理剂是生产高品质秸秆有机肥的关键。

研究表明,利用化肥作为补充氮源加快秸秆堆肥^[8]可满足绿色食品生产的要求,一般采用尿素将秸秆原料 C/N 比调节为 25~35 左右^[9],而不同氮肥品种之间氮素形态的差异对秸秆堆肥过程中氮素形态变化和有机碳分解过程的影响尚缺乏系统研究。尿素硝酸铵溶液(urea ammonium nitrate solution, UAN)是以硝酸铵溶液、尿素溶液为原料按比例加工而成

的新型液态氮肥,我国自 2013 年农业部正式将 UAN 列入肥料登记目录后,发展尚在起步阶段,相关的研究也仅限于水肥一体化应用和肥效方面^[10],将其作为秸秆高温堆肥的氮素调理剂用于生产植物源有机肥具有较好的应用前景。堆肥适宜 C/N 比的确定与原料中有机碳被微生物降解的难易程度有关^[11],小麦秸秆中纤维素、木质素等难降解有机物的含量高达 60% 以上,其易降解有机碳的含量显著低于畜禽粪便堆肥,因此探索小麦秸秆堆肥过程中 UAN 的适宜用量对加快堆肥进程十分重要。为此本研究以 UAN 作为氮素调理剂,研究不同 UAN 添加量对小麦秸秆堆肥腐熟进程及氮素形态变化的影响,探索适宜于规模化、标准化生产的秸秆堆肥技术,为植物源有机肥生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验在合肥科友生物科技有限公司有机肥发酵车间进行,供试小麦秸秆取自周边农田,风干后经粉碎机粉碎至粒径 $\leq 2.0\text{ cm}$,尿素硝酸铵溶液采购自安徽淮化股份有限公司。堆肥原料基本性状见表 1。

堆肥试验装置为自制加工的塑料桶^[12],桶底部和桶壁上开有直径 2.5 cm 的通气孔若干,有效填充容积 50 L,塑料桶中填充物料后随机均匀摆放在长×宽×高为 1.2 m×1.2 m×1.2 m 的堆肥池内,桶四周和底部填充小麦秸秆进行保温。堆肥周期 50 d,在

表 1 堆肥原料基本性状(干基)
Table 1 Properties of composting materials (Dry matter)

供试材料 Material	含水率 (%) Moisture	总有机碳 (g/kg) Total organic C	全氮 (g/kg) Total N	C/N	pH	半纤维素 (%) Hemicelluloses	纤维素 (%) Cellulose	木质素 (%) Lignin
小麦秸秆 Wheat straw	12.2	482	7.30	66.0	6.32	22.9	42.2	9.57
尿素硝酸铵溶液 UAN			320		7.85			

堆肥第 0、3、6、10、20、30、40、50 d 采用人工对塑料桶内堆肥进行充分的搅拌混合, 同时分上中下三层进行多点采样混合均匀, 用于指标测定分析。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理, 称取小麦秸秆 20 kg, 分别添加尿素硝酸铵溶液 1.36、0.92、0.66、0.48 kg, 调节秸秆堆肥的起始 C/N 依次为 15、20、25、30, 同时补充水分调节含水率为 65% 左右, 每个处理混合均匀后分装到 3 个塑料桶中作为 3 次重复。

1.3 测定指标及方法

于每天 08:00 和 15:00, 用水银温度计测量堆肥内温度和环境温度, 多点测定取平均值代表当天的温度; 每次翻堆取样后的样品一部分鲜样测定 pH 值、电导率、种子发芽率指数、铵态氮、硝态氮等指标, 另一部分置于阴凉处风干粉碎后过 0.15 mm 孔径 (100 目) 尼龙筛, 用于测定全氮、总有机碳、纤维素、木质素、灰分等指标。

其中 pH 值和电导率 EC 测定采用样液比 1:10 (m/V) 浸提电极法; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用靛酚蓝比色法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定采用紫外分光光度法; 总氮测定采用硫酸-水杨酸-催化剂消化法; 总有机碳测定采用重铬酸钾容量法; 灰分测定采用马弗炉 550℃ 灼烧法; 纤维素、半纤维素、木质素的测定采用范氏 (Van Soest) 洗涤纤维分析法^[13], 利用 VELP FIWE-6 型纤维分析仪进行测定分析。

堆肥有效积温的计算^[14]:

$$T = \sum (T_i - 15) \times \Delta t$$

式中, T 为堆肥有效积温 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$); T_i 为 i 时间的堆肥温度 ($^{\circ}\text{C}$); 15 为堆肥反应的生物学零度 ($^{\circ}\text{C}$); Δt 为 T_i 持续的时间 (h)。

氮素损失率的计算参照 Paredes 等^[15]的方法, 即假定堆肥过程中灰分总量无损失, 推导出氮素损失率的计算公式:

$$N_{\text{损失率}}(\%) = \frac{N_0 - (H_0/H_{50}) \times N_{50}}{N_0} \times 100$$

式中, N_0 为堆肥初始样品全氮含量 (%); H_0 为堆肥

初始样品灰分含量 (%); N_{50} 为堆肥第 50 d 时全氮含量 (%); H_{50} 为堆肥第 50 d 时灰分含量 (%)。

种子发芽率指数 (GI)^[16]测定: 新鲜堆肥样品与蒸馏水按照 1:10 (m/V) 混合振荡 1 h, 过滤取滤液。在 9 cm 培养皿中垫一张滤纸, 均匀摆放 20 粒雪里蕻种子, 加入 10 mL 浸提液, 在 25℃ 黑暗条件下养 48 h 后测量发芽率和根长, 每个样品 3 次重复, 同时以蒸馏水作对照。计算公式:

$$\text{GI}(\%) = \frac{\text{堆肥样品的种子发芽率} \times \text{种子根长}}{\text{对照的种子发芽率} \times \text{种子根长}} \times 100$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007、SPSS20 进行数据统计分析, 统计分析方法采用 ANOVA 法进行方差分析、Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度、pH 值及电导率变化

由图 1 可知, C/N 比为 15、20、25、30 的处理温度都经历了快速升温、高温持续和降温三个阶段。各处理均在 2 d 内迅速升温到 50℃ 以上, 由表 2 可见, 堆肥能达到的最高温度随着 C/N 比的升高而增加, 各处理间达显著性差异 ($P < 0.05$); C/N25 和 C/N30 的处理 50℃ 以上的高温持续时间为 7~8 d, 满足无害化处理的要求^[17], 而 UAN 用量较大的 C/N15

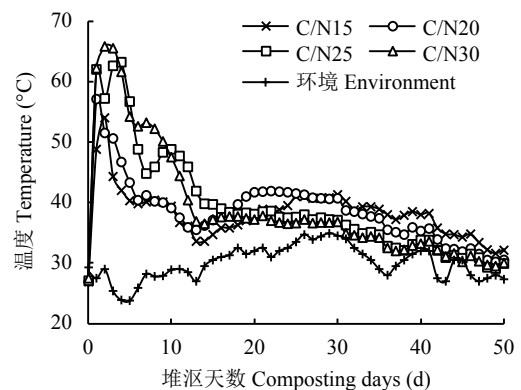


图 1 堆肥过程中温度变化

Fig. 1 Temperature variation during composting

表 2 不同 C/N 比处理堆肥过程有效积温
Table 2 Effective accumulated temperature during composting under different C/N ratio

处理 Treatment	最高堆温 (°C) Highest temp.	≥ 50°C 天数 Days of temp. ≥ 50°C	堆肥积温 (°C·h) Cumulative temp.	10000°C·h 积温用时 (d) Days for accumulating 10000°C·h
C/N15	54.0 ± 1.55 d	1 ± 0.0 b	28252 ± 418 a	16.7 ± 1.2 a
C/N20	57.1 ± 0.86 c	2 ± 1.0 b	28651 ± 976 a	15.3 ± 1.2 a
C/N25	63.4 ± 0.78 b	7 ± 1.7 a	29625 ± 83 a	11.0 ± 1.0 b
C/N30	65.9 ± 0.21 a	8 ± 1.2 a	29355 ± 1116 a	10.0 ± 0.0 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at $P < 0.05$ level (Duncan test).

和 C/N20 处理仅 1~2 d, 高温持续时间短, 未达到无害化标准。以堆肥有效积温超过 10000°C·h 作为判定堆肥基本腐熟的条件, 高 C/N 比的处理 (25、30) 和低 C/N 的处理 (15、20) 之间差异显著 ($P < 0.05$), 其中 C/N30 处理仅用 10 d, 较 C/N15 处理缩短 6 d; 经过 50 d 的堆肥后 C/N25 处理有效积温最高, 其余各处理间未达显著性差异 ($P > 0.05$)。

图 2 表明, 整个堆肥过程中各处理的 pH 值变化趋势基本一致, 都经过一个先上升后下降再缓慢回升的过程。初始堆肥 pH 值受 UAN 添加量影响明显, 随着 UAN 用量增加而升高, pH 值范围在 6.79~7.94 之间, 堆肥开始后的 0~3 d 各处理的 pH 值快速升高到 8.29~8.78, 随后开始不同程度的下降, 其中 C/N30、C/N25 的处理 pH 值分别于第 10、20 d 下降至最低值 5.77、5.69 后即开始缓慢回升, 而 C/N20 和 C/N15 的处理 pH 值下降过程持续到了第 30 和 40 d, 分别达到 6.61 和 6.68。整个过程中高 C/N 比 (25、30) 条件下堆体的 pH 值下降速度和幅度均大于低 C/N 比 (15、20) 的处理。至堆肥结束, C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 的处理 pH 值分别为 7.71、

7.63、7.89、7.66, 各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

EC 代表了堆肥中可溶性盐分的含量, 4 个处理 EC 值总体表现为前期不断升高, 于 30~40 d 达到最大值后缓慢下降。整个堆肥过程中 EC 值随着 UAN 用量的增加而升高, 至堆肥结束 C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 的处理 EC 值分别为 9.12、7.42、6.25、4.59 mS/cm。

2.2 堆肥过程中总有机碳、总氮及 C/N 比变化

图 3 表明, 随着堆肥中有机物的降解总有机碳含量持续下降, 至堆肥结束, C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 的处理总有机碳含量分别较堆肥初下降了 8.29、9.18、12.48、13.49%, 高 C/N 比 (25、30) 的处理与低 C/N 比 (15、20) 的处理之间其差异性显著 ($P < 0.05$), 表明 UAN 用量的过大反而不利于秸秆中有机质的降解。

堆肥中的氮主要来源于 UAN, 因此堆肥初期全氮含量随着 UAN 用量减少而降低, $C/N15 > C/N20 > C/N25 > C/N30$, 随着堆肥过程的进行, 堆体中全氮含量不断升高, 至第 50 d, 各处理全氮含量分别较堆肥初增加了 76.1%、72.0%、83.7%、53.3%, 以

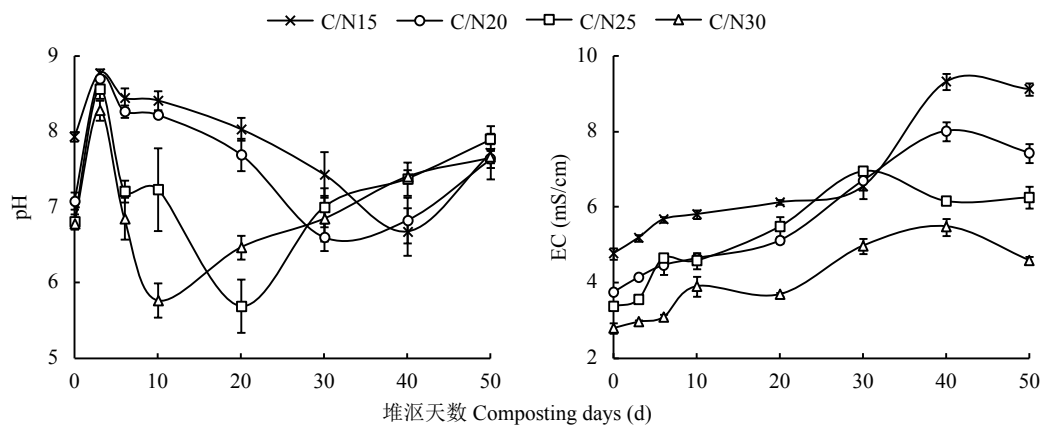


图 2 堆肥过程中 pH 值和电导率的变化
Fig. 2 Dynamics of pH and EC values during composting

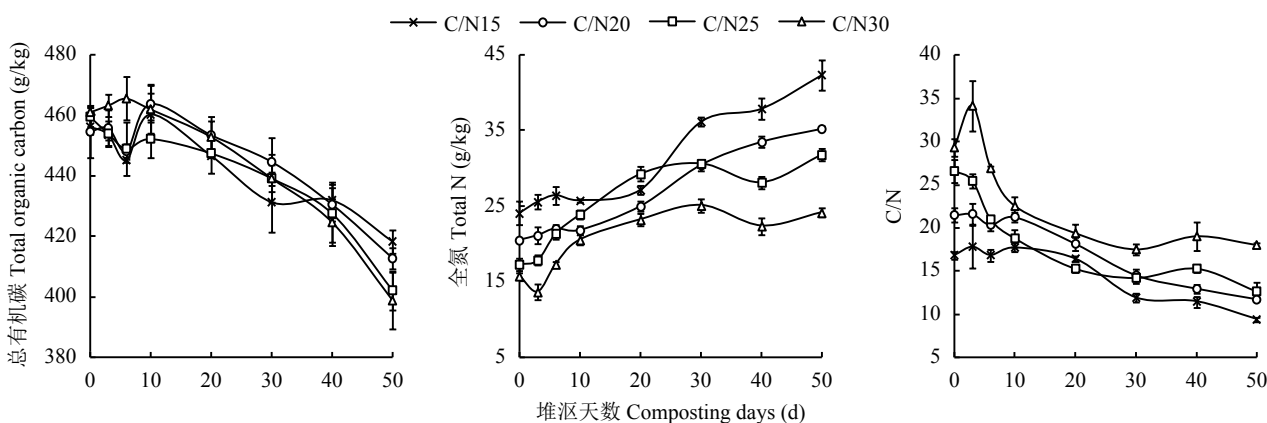


图3 堆肥过程中有机碳、全氮及 C/N 变化

Fig. 3 Dynamics of total organic carbon, total N and C/N ratio during composting

C/N25 的处理增幅最大。

堆肥初始 C/N 比差别较大, 范围在 16.9~29.3, 随着堆肥中有机质含量减少和总氮含量的升高, C/N 呈现出逐渐降低的趋势, 而且各处理间的差距逐渐减小, 至堆肥结束 C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 的处理的 C/N 分别降低至 9.42、11.72、12.68、18.04。

2.3 堆肥过程中半纤维素、纤维素及木质素变化

堆肥物料中的有机物主要来源于秸秆, 主要成分包括半纤维素、纤维素和木质素, 其组成和含量变化反映了堆肥腐熟的效果。表 3 显示, 经过 50 天的堆肥 C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 的处理半纤维素含量较堆肥初下降了 30.50%~50.91%, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$); 纤维素含量较堆肥初下降了 42.36%~55.85%, 差异显著 ($P < 0.05$); 木质素含量较堆肥初下降了 15.28%~29.38%, 除 C/N25 和 C/N30 两个高 C/N 的处理间差异不显著外, 其余均达显著差异 ($P < 0.05$)。可见, 秸秆堆肥中有机物组成以纤维素的含量最高, 其次是半纤维素和木质素。从降解效果来看 C/N25 和 C/N30 的处理半纤维

素、纤维素和木质素的降解率均显著高于 C/N15 和 C/N20 的处理。

2.4 堆肥过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化及氮素损失率

图 4 表明, 物料中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随着 UAN 用量的增加而升高, 堆肥初期的 0~3 d, C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量快速升高到最大值, 分别为 15.77、11.70、8.79、5.23 g/kg, 从第 3 d 开始, 各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速回落并趋于稳定, 至堆肥第 50 d, C/N15 和 C/N20 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别较堆肥初增加 8.52% 和 2.29%, C/N25 和 C/N30 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量则分别较堆肥初减少 4.14% 和 53.02%。

随着 UAN 用量的增加堆体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量相应升高。整个堆肥过程中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现出不断升高的趋势, 其中 0~10 d $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度升高缓慢, 10 d 后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度快速增加, 其中 C/N25 和 C/N30 的处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量到 30 d 基本稳定, 而 C/N15 和 C/N20 的处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量上升过程一直持续到 50 d。至堆肥结束, C/N15、C/N20、C/N25 和 C/N30 处理

表 3 堆肥开始 (0 d) 和结束时 (50 d) 物料中的有机物含量及降解率 (%)

Table 3 Contents and decomposing rate of organic matter fractions at the beginning (0 d) and end (50 d) of compost									
处理 Treatment	半纤维素 Hemicellulose		降解率 Decompose rate	纤维素 Cellulose		降解率 Decompose rate	木质素 Lignin		降解率 Decompose rate
	0 d	50 d		0 d	50 d		0 d	50 d	
C/N15	21.1 ± 0.6 b	14.7 ± 0.8 a	30.5 ± 1.6 d	40.2 ± 0.7 a	23.2 ± 0.5 a	42.4 ± 1.0 d	9.43 ± 0.4 a	7.99 ± 0.4 a	15.3 ± 1.1 c
C/N20	21.4 ± 0.2 b	14.0 ± 0.4 a	34.4 ± 1.0 c	40.9 ± 0.7 a	21.7 ± 0.3 b	47.0 ± 0.8 c	9.06 ± 0.2 ab	7.21 ± 0.3 b	20.5 ± 1.7 b
C/N25	21.4 ± 0.6 b	10.5 ± 0.3 c	50.9 ± 2.3 a	41.1 ± 0.5 a	18.2 ± 0.7 d	55.8 ± 1.2 a	9.10 ± 0.2 ab	6.49 ± 0.2 c	28.7 ± 2.7 a
C/N30	22.7 ± 0.4 a	13.0 ± 0.5 b	43.0 ± 2.1 b	41.2 ± 0.5 a	19.2 ± 0.7 c	53.4 ± 1.2 b	8.58 ± 0.4 b	6.06 ± 0.3 c	29.4 ± 0.5 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at $P < 0.05$ level (Duncan test).

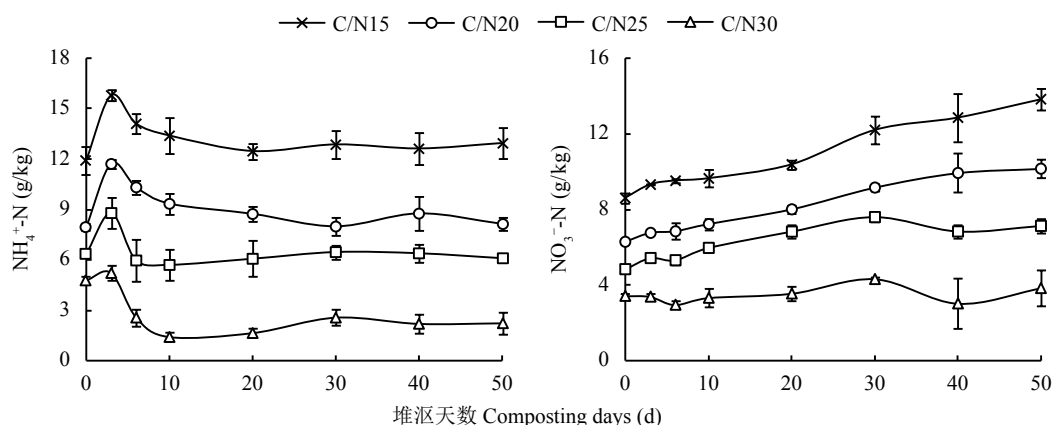
图4 堆肥过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化

Fig. 4 Dynamics of ammonium and nitrate contents during composting

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别较堆肥初增加 60.56%、61.24%、47.07% 和 11.91%。

通过第 0 d 和 50 d 时堆体中全氮和灰分数据计算得到堆肥过程中的氮素损失率, C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 处理分别为 34.89%、28.99%、22.08%、7.37%, 随着 UAN 用量的增加, 氮素损失率升高。

2.5 种子发芽率指数 (GI) 变化

图 5 表明, C/N15 处理的种子发芽率指数于第 20 d 升高到 24.2% 后即开始持续下降, 而 C/N20、C/N25、C/N30 处理整体上随堆肥时间增加不断升高, 分别在 50 d 时达到 51.6%、81.5%、109%, 一般认为当 $\text{GI} \geq 50\%$ 时, 堆肥达到基本腐熟, 当 $\text{GI} \geq 80\%$ 时^[18], 堆肥达彻底腐熟, 由此判断 C/N15 的处理至堆肥结束仍未达到腐熟, C/N20、C/N25、C/N30 处理分别于 50、30、20 d 时 GI 超过 50%, 基本达到腐熟, 至 50 d 时 C/N25、C/N30 处理 GI 均超

过 80%, 达到彻底腐熟。

3 讨论

3.1 添加尿素硝酸铵对秸秆堆肥腐熟度的影响

秸秆堆肥中添加 UAN 可以有效降低秸秆物料的 C/N 比, 为微生物提供所必须的氮素营养, 但 UAN 用量不宜过大, 当 C/N 低于 20 时会对堆肥腐熟过程产生不利影响。C/N15、C/N20 的处理 50℃ 以上仅维持 1~2 d, 无法满足无害化要求, 可能是由于低 C/N 条件下有效碳源不足对微生物的活性产生了抑制作用造成的。有研究表明, 随着堆肥体积的增大高温持续时间延长^[19-20], 堆肥效果与工厂规模化生产的实际情况越接近, 本研究各处理高温持续时间与同类研究^[21]相比较短, 主要是由于试验装置规模较小和秸秆原料松散不利于保温造成的^[22]。随着 C/N 升高, 堆肥高温期延长和有效积温增加的规律与张强等^[23]的研究结果相一致。

堆肥初始 pH 值随 UAN 用量的增大而升高, 堆肥初期温度迅速上升的过程中, 物料中易降解有机质的分解产生大量的铵态氮累积使得堆体 pH 值在 0~3 d 快速升高到 8.29~8.78; 随后秸秆中半纤维素、纤维素等大分子有机物逐步分解为小分子有机酸从而导致 pH 值的降低, 随着堆肥时间的进一步延长, 小分子有机酸被逐步矿化分解, 堆肥的 pH 值缓慢回升并趋于稳定。堆肥过程会产生大量小分子有机物及盐离子, 会导致电导率偏高等问题, 有可能在植物根系形成反渗透压将根系中的水分置换出来, 使根尖受到损伤进而丧失吸收水分和营养的能力。堆肥前期有机物降解过程使得 EC 值不断升高, 第 30~50 d 随着堆肥腐殖化进程和芳构化程度提高^[24],

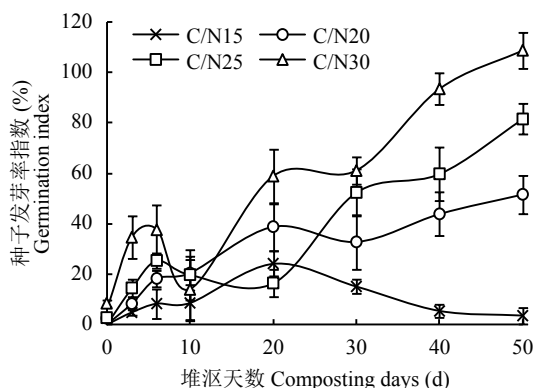


图5 堆肥过程中各处理的种子发芽率

Fig. 5 Germination indices under different treatments during composting

各处理的 EC 值开始缓慢降低。UAN 用量过大同样会对堆肥 EC 值产生不利的影响, 因为 UAN 中含有大量 NH_4^+ 、 NO_3^- 离子形成可溶性铵盐、硝酸盐, 导致各处理的 EC 值整体上随着 UAN 用量的增大而升高, 本研究中物料 C/N 越低, 堆肥 EC 值越高的规律与 Li 等^[25]利用猪粪 + 膨润土堆肥的结果相类似。目前我国尚没有关于有机肥中 EC 值的限量标准, 黄绍文等^[26]对全国 18 个省(市) 畜禽粪便类商品有机肥的调查显示 EC 平均值为 23.5 mS/cm, 远高于本试验堆肥结束时 4.59~9.12 mS/cm 的结果, 说明采用秸秆为主要原料的植物源有机肥盐分含量要显著低于畜禽粪便有机肥。因此秸秆 UAN 堆肥产品若作为有机肥和土壤调理剂使用, 其产生土壤盐渍化的风险相对较低。

种子发芽率指数是用来判定堆肥腐熟度最敏感、最可靠的指标, 至堆肥结束时 C/N15 和 C/N20 的处理均未达到彻底腐熟 ($\text{GI} < 80\%$), 有可能是 UAN 添加量过大, 给堆体中带来高浓度的 NH_4^+ 和 NO_3^- , 使得盐分含量过高对种子萌发产生了毒害造成的影响。期间, C/N25 处理第 20 d 和 C/N30 处理第 10 d 的下降可能是受到堆体 pH 值降低 (< 6.0) 的影响。

3.2 添加尿素硝酸铵对堆肥中氮素形态变化和氮素损失率的影响

堆肥初期的 0~10 d, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量波动剧烈, 而此时堆肥正处于高温持续阶段, 也是堆肥过程中以氨挥发的形式产生氮素损失的主要阶段^[27]。堆肥中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量 0~10 d 增速缓慢而后期加快同样是受到堆肥温度的影响, 硝化细菌活性在 40℃ 以上时受到抑制^[28], 随着堆体温度下降, 硝化反应增强, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量迅速升高。堆肥过程中有机氮经矿化作用转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 同时部分氮素经过微生物代谢合成转化为腐殖质态的有机氮。秸秆 UAN 堆肥原料中的氮主要来自 UAN, 其成分包含 7.5% 的铵态氮, 7.5% 的硝态氮和 17% 的酰胺态氮, 堆肥起始物料中无机氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别高达 4.79~11.9 g/kg 和 3.45~8.60 g/kg, 远高于采用畜禽粪便作为补充氮源的秸秆堆肥中起始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。随着 UAN 用量的增加堆肥中无机氮的比例对应升高, C/N15、C/N20、C/N25、C/N30 处理中初始无机氮占总氮的比例分别为 75.8%、69.0%、64.9% 和 52.4%, 经过 50 d 的堆肥发酵, 各处理中无机氮占总氮的比例分别下降到 63.1%、51.9%、41.7% 和

25.4%, 对应各处理中有机氮的比例则较堆肥初提高了 52.4%~66.0%, 而且以 C/N25 的处理有机氮增幅最高, 其次是 C/N30 的处理。堆肥过程的中后期有机氮比例持续稳定增加, 说明堆肥腐殖化作用加强, 在微生物的作用下形成复杂的腐殖质态有机氮, 从而提高了氮素的稳定性。该结果与徐路魏和王旭东等^[29]利用蔬菜废弃物 + 生物质炭堆肥中非酸水解有机氮含量持续升高的结果类似。

有机废弃物堆肥过程中氮素损失的途径包括高温碱性条件下的氨气挥发、局部厌氧条件下的反硝化脱氮和降水造成的氮素淋溶, 其中以氨挥发造成的损失占氮素总损失量的 44%~99%, 是堆肥过程中氮素损失的主要途径^[30]。畜禽粪便堆肥过程中通过添加秸秆等物质提高 C/N 比可以有效减少氨挥发从而降低氮素损失率, 贺琪等^[31]利用鸡粪 + 小麦秸秆堆肥的结果表明, C/N 比越低, 氮素损失率越高, 本研究结果与其一致, 随着 UAN 用量加大 C/N 降低, 氮素损失率升高。因此, 适宜的 UAN 用量不仅可以促进秸秆腐熟, 同时还能减少氮素损失和降低堆肥成本。

3.3 添加尿素硝酸铵对堆肥中有机物降解的影响

堆肥过程实质上是微生物对不稳定有机物进行分解并将其转化为无机物或稳定的腐殖质的过程。小麦秸秆 + UAN 堆肥前 20 d, 有机碳的分解缓慢仅占整个堆肥过程有机碳分解总量的 13.2%~25.4%, 而中后期有机碳的降解速率明显增加, 与鲍艳宇等^[32]的研究结果略有不同, 这主要是堆肥原料的差异造成的。畜禽粪便堆肥原料中含有大量的易降解有机物包括淀粉、脂类化合物和蛋白质等在高温期降解剧烈, 而小麦秸秆 + UAN 堆肥中有机物的主要成分为纤维素、半纤维素和木质素等高分子聚合物, 难以被微生物降解, 是限制堆肥中有机碳降解的关键因素^[33]。堆肥过程中真菌对纤维素、半纤维素和木质素的降解起重要作用, 而大多数的真菌属于嗜温真菌, 在 5~37℃ 下生长良好, 最佳温度范围在 25~30℃^[34], 在没有外源添加高效菌株的条件下, 小麦秸秆 UAN 堆肥在 20 d 后温度下降至 30~40℃ 范围内, 半纤维素、纤维素、木质素的降解加速使得有机碳分解速率大于高温期。

4 结论

1) 以尿素硝酸铵作为氮素调理剂进行小麦秸秆高温堆肥, 可有效降低物料 C/N 比, 当 C/N 比低于 20

时会造成堆体升温困难和高温持续时间过短, C/N25、C/N30 的处理温度均可达到无害化要求。

2) 添加尿素硝酸铵的小麦秸秆堆肥过程中, 氮素形态受尿素硝酸铵用量影响显著, 铵态氮、硝态氮等无机氮比例随尿素硝酸铵用量增大而升高, 氮素损失率随着 C/N 比降低而升高, 堆肥过程中有机态氮比例升高。

3) C/N30 处理发芽指数达到 109%, 对植物完全无毒害, 发酵腐熟效果最好。

参 考 文 献:

- [1] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1–21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1–21.
- [2] 董印丽, 李振峰, 王若伦, 等. 华北地区小麦、玉米两季秸秆还田存在的问题及对策研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 159–163.
Dong Y L, Li Z F, Wang R L, *et al.* Study on the problems and countermeasures of returning wheat and corn stalks into the soil in north China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (1): 159–163.
- [3] 赵建荣, 高德才, 汪建飞, 等. 不同 C/N 下鸡粪麦秸高温堆肥腐熟过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1014–1020.
Zhao J R, Gao D C, Wang J F, *et al.* The high-rate composting of chicken manure and wheat straw in different C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 1014–1020.
- [4] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, *et al.* Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 530–535.
- [5] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179–184.
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179–184.
- [6] Xun Q, Jie G, Wei S, *et al.* Diversity, abundance, and persistence of antibiotic resistance genes in various types of animal manure following industrial composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 344(2): 716–722.
- [7] Quan W, Zhen W, Mukesh K A, *et al.* Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220(11): 297–304.
- [8] 张亚宁, 李国学. 化肥作为补充 N 源对堆肥碳素转化和污染物去除的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 154–157.
Zhang Y N, Li G X. Effect of supplementary nitrogen chemical fertilizer on carbon change and degradation of organic pollutants during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1): 154–157.
- [9] 徐智, 汤利. 尿素作为补充氮源对西番莲果渣高温堆肥进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1399–1402.
Xu Z, Tang L. Effects of adding urea supplementary nitrogen on high-temperature composting process of passion fruit marc[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1399–1402.
- [10] 王寅, 徐卓, 李博凝, 等. 尿素硝酸铵溶液对黑土区春玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(4): 718–727.
Wang Y, Xu Z, Li B N, *et al.* Effects of urea ammonium nitrate solution on grain yield and nitrogen uptake of spring maize in black soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(4): 718–727.
- [11] 李波, 叶菁, 刘岑薇, 等. 生物炭添加对猪粪堆肥过程碳素转化与损失的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3511–3518.
Li B, Ye Q, Liu C W, *et al.* Effects of biochar addition on carbon transformation during composting of pig manure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(9): 3511–3518.
- [12] 李帆, 钱坤, 武际, 等. 过磷酸钙用量对猪粪堆肥过程及磷形态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1037–1044.
Li F, Qian K, Wu J, *et al.* Influence of applying calcium superphosphate on swine manure composting and phosphorus transformation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1037–1044.
- [13] Soest P J V, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583–3597.
- [14] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 911–915.
Chen T B, Huang Q F, Gao D, *et al.* Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 911–915.
- [15] Paredes C, Roig A, Bernal M P, *et al.* Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 32(3): 222–227.
- [16] 李荣华, 张广杰, 秦睿, 等. 添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2591–2599.
Li R H, Zhang G J, Qin R, *et al.* Influence of heavy metal passive agents on the compost physicochemical properties during the swine manure composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10): 2591–2599.
- [17] NY/T1168-2006. 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006.
NY/T 1168-2006. Technical requirement for non-hazardous treatment of animal manure[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006.
- [18] Zucconi F, Pera A, Forte M, *et al.* Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981, 22(2): 54–57.
- [19] Guardia A D. Composting in a laboratory reactor: a review[J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(1): 69–79.
- [20] 徐智, 张隽利, 梁丽娜, 等. 不同体积堆肥装置下的鸡粪堆肥效果研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 205–208.
Xu Z, Zhang L L, Liang L N, *et al.* Impacts of different sized lab-based reactors on the aerobic composting of chicken manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*

- (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 205–208.
- [21] Zhao X L, Li B Q, Ni J P, *et al.* Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 232–240.
- [22] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 122–126.
- Wang Y J, Huang G Q, Han L J. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 122–126.
- [23] 张强, 孙向阳, 任忠秀, 等. 调节C/N及添加菌剂与木酢液对园林绿化废弃物堆肥效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 990–998.
- Zhang Q, Sun X Y, Ren Z X, *et al.* Effect of regulating of C/N ratio and adding different concentrations of microbe fungus and wood vinegar on composting of landscaping waste[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 990–998.
- [24] 王亚, 李子富, 冯瑞, 等. 沉水植物与2种不同辅料混合好氧堆肥[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3759–3766.
- Wang Y, Li Z F, Feng R, *et al.* Aerobic co-composting of submerged plants with two different auxiliary materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6): 3759–3766.
- [25] Li R H, Wang J J, Zhang Z Q, *et al.* Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 362–368.
- [26] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 162–173.
- Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 162–173.
- [27] 胡雨彤, 时连辉, 刘登民, 等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 718–725.
- Hu Y T, Shi L H, Liu D M, *et al.* Effects of adding sulphuric acid on composting process of cattle manure and changes of main nutrients[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 718–725.
- [28] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444–53.
- [29] 徐路魏, 王旭东. 生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6): 1160–1166.
- Xu L W, Wang X D. Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1160–1166.
- [30] 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 X D, Han Z Y, Shi D Z, *et al.* Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 247–254.
- [31] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1): 169–173.
- He Q, Li G X, Zhang Y N, *et al.* N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1): 169–173.
- [32] 鲍艳宇, 周启星, 娄翼来, 等. 奶牛粪好氧堆肥过程中不同含碳有机物的变化特征以及腐熟评价[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2111–2116.
- Bao Y Y, Zhou Q X, Lou Y L, *et al.* Change patterns of different carbon containing compounds in dairy manure during its aerobic composting and assessment of composting maturity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2111–2116.
- [33] 徐杰, 许修宏, 门梦琪, 等. 木质纤维素降解菌剂DN-1促进堆肥腐熟度的评估[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (6): 146–151.
- Xu J, Xu X H, Men M Q, *et al.* Evaluation on the maturity of the compost promoted by lignocellulose degradation inoculum DN-1[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (6): 146–151.
- [34] 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(3): 19–23.
- Xi B D, Liu H L, Bai Q Z, *et al.* Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(3): 19–23.