



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202211149 中图分类号 X705 文献标识码 A

薛旭, 谭军利, 麦旭东, 等. 辅料及翻抛工艺对干旱地区污泥堆肥 C、N 动态变化的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(3): 948-957. [XUE Xu, TAN Junli, MAI Xudong, et al. Effects of auxiliary materials and turning over technique on dynamic changes of C and N of sludge compost in northwest arid areas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 948-957.]

辅料及翻抛工艺对干旱地区污泥堆肥 C、N 动态变化的影响

薛旭^{1,2}, 谭军利^{1,3,4,✉}, 麦旭东^{1,5}, 王西娜², 田军仓^{1,3,4}

1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 4. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 5. 黄河水土保持绥德治理监督局(黄河水利委员会 绥德水土保持科学实验站), 榆林 719000

摘要 针对我国西北干旱地区污泥堆肥过程中存在养分损失较大和腐熟度差的问题。采用正交实验的方法开展大型条垛堆肥, 研究辅料参数及翻抛工艺对堆肥过程中 C 和 N 养分动态变化的影响, 并利用 Topsis 分析筛选最优处理, 达到当地污泥堆肥过程中减少养分损失和提高腐熟度的目的。结果表明, 当玉米秸秆配比为 15% 时, 全氮损失量最小, 为 3.67%。硝态氮的质量分数在堆肥阶段呈持续上升的趋势, 铵态氮的质量分数在堆肥过程中先增加后减小, 在堆肥结束时, 堆体硝态氮和铵态氮的质量分数均随着秸秆配比的增加而减小, 质量分数分别为 $0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。堆体有机质的质量分数随着秸秆配比增加而增加, 15% 秸秆的有机质的质量分数比 10% 和 5% 秸秆的分别增加了 10.08% 和 6.61%; 堆肥过程中堆体 C/N 比整体呈现 W 型变化趋势, 结束时堆体 C/N 比随秸秆配比增加而减小。种子发芽指数 (GI) 随着秸秆配比增大而增加, 当玉米秸秆配比为 15% 时, 种子发芽指数均超过 100%。Topsis 分析表明, 最优条垛式堆肥处理为 T7 (15% 秸秆配比+5 cm 秸秆粒径+常规翻抛), 是一种适合西北干旱地区的条垛式污泥堆肥方法。本研究结果可为该地区的生活污泥条垛式堆肥提供参考。

关键词 生活污水; 条垛式堆肥; 有机质; 全氮; 参数优化

近年来, 城市生活污水处理厂的污泥产生量逐年增加^[1]。城市生活污水的处理方法包括卫生填埋法、污泥焚烧法、海洋倾倒法和污泥堆肥法。其中, 填埋法、焚烧法、倾倒法不仅会造成环境的二次污染, 也会造成资源的浪费^[2]。城市生活污水中富含植物生长所必需的各种养分及有机质, 是一种极其有效的生物资源^[3]。因此, 好氧高温堆肥是实现污泥资源化、减量化、无害化利用的有效途径之一^[4], 其主要是利用好氧微生物对有机废弃物中的可降解物质进行转化、分解^[5-6]。郭广慧等^[7]通过总结和分析国内外大量的研究, 发现污泥堆肥产物含有丰富的有机质和氮、磷等营养元素, 具有潜在的肥力, 其产品是一种良好的有机肥料, 可施用于农田能够有效提高氮、磷、钾等养分, 为农作物生长提供养分并减少化学肥料的施用量^[8]。

我国西北干旱地区降水少, 水资源紧缺, 生活污水处理后的中水是重要的可利用水资源。但

收稿日期: 2022-11-26; 录用日期: 2023-02-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC0408104); 宁夏高等学校一流学科建设 (水利工程) 资助项目 (NXYLXK2021A03); 宁夏大学研究生创新资助项目 (CXXM2022-23)

第一作者: 薛旭 (1997—), 男, 硕士研究生, 1124946361@qq.com; ✉通信作者: 谭军利 (1979—), 男, 博士, 教授, tanjl@nxu.edu.cn

污水处理过程中产生的生活污水通常采用填埋法处理，亟需污泥资源化利用技术。该地区通常采用离心技术进行污泥脱水，其含水率高达90%，即使采用压滤板技术脱水，含水率仍为70%左右。高含水率生活污水堆肥存在堆体升温慢、腐熟不彻底、养分损失大，且容易产生有毒有害气体等问题。因此，污泥堆肥过程中快速提高堆体温度、降低含水率和减少养分损失是西北干旱地区污泥堆肥亟需解决的关键问题。优化污泥堆肥技术参数是提高污泥堆肥效率和堆肥养分，减少有害气体排放的重要措施。

提高污泥堆肥的养分的质量分数是污泥资源化利用的研究热点。研究表明，生物强化可以提高堆肥氮素的质量分数^[9]，而添加花生壳炭则提高了堆体养分的吸附固持作用^[3]。辅料种类对污泥好氧堆肥过程养分和升温速度有显著影响^[10-13]，稻草和秸秆升温快，而锯末处理的氮素损失小。辅料的粒径及比例对污泥堆肥产品的养分也有显著影响，小粒径秸秆生产的污泥有机肥养分高于大粒径；秸秆与污泥体积比为2:1时，堆体升温速度和腐熟度较好，堆肥产品养分的质量分数与污泥和秸秆的配比呈正相关，但随着污泥和秸秆配比的增加污泥堆肥处理的成本也显著增加^[14-16]。

现有的污泥资源化利用实验主要集中在辅料种类或辅料比例等单因素对污泥堆肥养分及腐熟度的影响，但综合多因素对污泥堆肥过程中C、N动态变化的研究鲜见报道。麦旭东等^[17]通过正交实验研究了玉米掺混配比、秸秆粒径以及翻抛工艺3因素对污泥堆肥过程中堆体温度、含水率等的影响，并从降低堆体含水率和提高温度的角度提出了干旱区污泥堆肥的关键技术参数。但这些因素对堆体中有关C和N养分的质量分数动态变化过程却并不清楚。

本研究拟通过3因素3水平的正交实验，研究辅料玉米秸秆比例、秸秆粒径大小和翻抛工艺3个因素对污泥堆肥堆体有关C、N养分的质量分数和种子发芽指数的动态变化过程；并运用Topsis分析方法从堆体温度、含水率以及养分的质量分数的角度出发筛选出条垛式堆肥技术参数，以期为西北干旱地区生活污水资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验原料

供试材料为城市生活污水、玉米秸秆和微生物菌剂。生活污水由银川某公司污泥脱水车间提供，该污泥有机质质量分数较高，5种重金属质量分数均低于国家标准限值。微生物菌剂为商用菌剂微生物活菌量 $>2 \times 10^{10}$ 个 $\cdot g^{-1}$ ，其成分组成为芽孢杆菌、解磷真菌、酵母菌、木霉菌等复合微生物及载体。供试污泥和玉米秸秆基本初始成分如表1所示。

表1 原材料初始基本性状
Table 1 The initial basic properties of raw materials

| 供试原料 | 含水率/% | 有机质/% | 全氮/% | 全碳/% | 磷/(mg $\cdot kg^{-1}$) | 镉/(mg $\cdot kg^{-1}$) | 汞/(mg $\cdot kg^{-1}$) | 铅/(mg $\cdot kg^{-1}$) | 铬/(mg $\cdot kg^{-1}$) |
|------|-------|-------|------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 污泥 | 74.18 | 62.25 | 4.85 | 31.05 | 10.70 | 0.28 | 7.58 | 33.00 | 79.50 |
| 秸秆 | 11.61 | 81.72 | 1.08 | 42.14 | — | — | — | — | — |

1.2 实验设计

采取3因素3水平正交条垛堆肥实验，共9个处理(见表2)。3因素分别为玉米秸秆配比、玉米秸秆粒径、翻抛流程，3水平为玉米秸秆配比(质量)A1、A2、A3为5%、10%、15%；玉米秸秆粒径B1、B2、B3为5cm粒径、3cm粒径、15-20cm粒径；翻抛工艺C1、C2、C3为静置6d翻抛、常规翻抛、曝气常规翻抛。

实验地点位于中卫市林峰科技有限公司，实验时间2020年8-10月，每个处理堆垛固定污泥的量为3t，按不同处理添加不同比例及不同粒径玉米秸秆，添加的有机肥发酵菌剂质量为堆肥总质

量的 0.2%，在污泥堆肥过程中实施不同翻抛处理。具体操作参考文献 [17]。

1.3 实验方法

取样方法。分别在堆肥后第 1、3、5、7、10、14、18、23、28、32、35、45 d 采集样品，分别采集堆体垂直截面的上、中、下 3 层样品进行混合作为 1 个样品。去除杂质后，立即分析堆肥的 pH 值、电导率、含水率、硝态氮、铵态氮和种子发芽指数。测定完成后将样品置于阴凉通风处自然风干，用研钵研磨过 35 目尼龙筛，测定风干样品的有机质和全氮的质量分数。

1.4 分析方法

有机质。参考《土壤检测第 6 部分》(NY/T 1121.6-2006) 中土壤有机质的测定方法^[18]；硝态氮：参照 NY/T 1116-2006 中的“紫外分光光度法”^[19]；铵态氮：采用靛酚蓝比色法测定。全氮：参考《土壤质量 土壤全氮测定 凯氏法》(HJ717-2014) 中全氮 (HJ717-2014) 测定方法。

种子发芽指数 (GI)。污泥有机肥与蒸馏水以 1:10 (质量比) 进行混合，振荡 30 min 后过滤，用移液枪将 10 mL 过滤好的滤液移至直径 9 cm 培养皿中，将直径为 9 cm 定性滤纸放入培养皿中，将 30 粒饱满的油菜籽均匀放入培养皿中，盖好盖子。油菜种子在 25 °C 恒温培养箱中无光培养，48 小时后测定油菜种子的发芽率和根长。每个样品重复 3 次，蒸馏水用作空白对照。

种子发芽指数 GI 计算如式 (1) 所示。

$$GI = \frac{A_1 \times A_2}{B_1 \times B_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中：GI 为种子发芽指数， A_1 为堆肥浸提液中种子的发芽率； A_2 堆肥浸提液培养的种子的平均根长，mm； B_1 为蒸馏水中种子的发芽率； B_2 为蒸馏水培养的种子的平均根长，mm。

1.5 数据处理

采用极差分析方法分析影响实验结果的主次因素；采用皮尔逊相关分析法分析各指标之间的相关性；采用 Topsis 对处理进行优化排序。Topsis 具体方法如下：选取堆肥的 8 个指标 (有效积温、EC、有机质 (OM)、全氮 (TN)、 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、GI、C/N 比、含水率) 作为项，使用确权法对其赋权 (16%、10%、10%、12%、11%、16%、10%、15%)。其主要用于对污泥有机肥的腐熟度和养分状况进行评价测算，其相对接近度越高，则表明其腐熟度越好污泥有机肥养分越高，具体计算步骤参考文献 [20]。

2 结果与讨论

2.1 堆体硝态氮质量分数动态变化

堆体中的硝态氮主要来源于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的硝化和有机氮的矿化，硝化作用是将 NH_3 或 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化成 NO_3^- 的过程，此过程与温度、pH、氧浓度和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度有关^[20]。从图 1 可以看出，堆肥起始时，堆体硝态氮的质量分数为 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，随着堆肥时间延长，硝态氮持续增加，堆肥结束时不同处理除了 15% 秸秆处理外硝态氮的质量分数达到 $1.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从秸秆配比来看 (图 1(a))，自堆肥开始到堆肥 20 d 不同处理之间差异不明显；堆肥 20 d 后堆体硝态氮的质量分数与秸秆配比呈负相

表 2 正交实验设计

Table 2 The design of orthogonal experiment

| 处理编号 | A (玉米秸秆 配比/%) | B (玉米秸秆 粒径/cm) | C (翻抛 工艺) |
|------|---------------|----------------|-------------|
| T1 | A1 (5) | B1 (5) | C1 (静置6d翻抛) |
| T2 | A1 (5) | B2 (3) | C2 (常规翻抛) |
| T3 | A1 (5) | B3 (15-20) | C3 (曝气常规翻抛) |
| T4 | A2 (10) | B1 (5) | C3 (曝气常规翻抛) |
| T5 | A2 (10) | B2 (3) | C1 (静置6d翻抛) |
| T6 | A2 (10) | B3 (15-20) | C2 (常规翻抛) |
| T7 | A3 (15) | B1 (5) | C2 (常规翻抛) |
| T8 | A3 (15) | B2 (3) | C3 (曝气常规翻抛) |
| T9 | A3 (15) | B3 (15-20) | C1 (静置6d翻抛) |

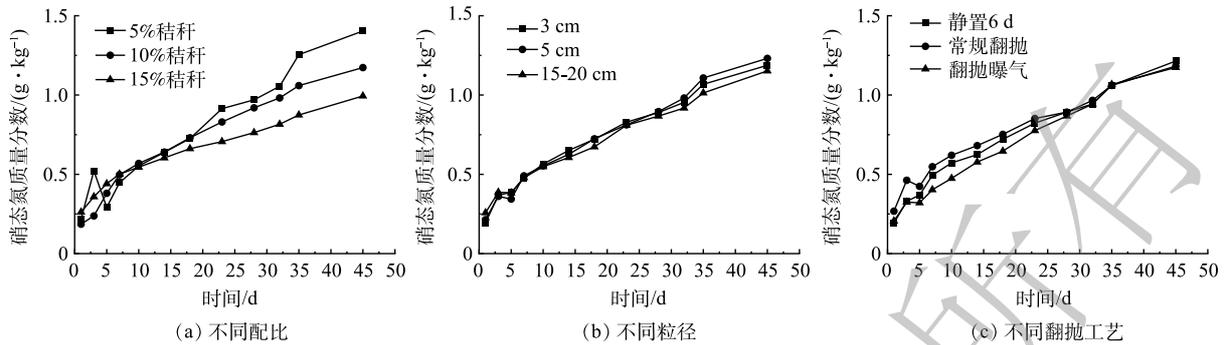


图1 不同因素下硝态氮质量分数动态变化

Fig. 1 Dynamic change of nitrate nitrogen mass fraction under different factors

关; 堆肥陈化后, 与15% 秸秆配比相比, 5% 秸秆配比硝态氮质量分数增加了50%。这是因为, 生活污水较玉米秸秆含氮量高, 5% 秸秆配比处理堆体全氮的质量分数高, 全氮通过微生物的矿化作用转化为硝态氮提高了硝态氮的质量分数。从秸秆粒径来看(图1(b)), 各处理在生活污水堆肥过程中硝态氮的质量分数变化无明显差异。但进入陈化阶段, $5\text{ cm} > 3\text{ cm} > 15\sim 20\text{ cm}$ 。这是因为, 未粉碎的玉米秸秆微生物分解速度慢, 不能及时为微生物矿化氮素提供能源。从翻抛工艺看(图1(c)), 堆肥前期处理之间硝态氮的质量分数存在明显差异, 常规翻抛>曝气翻抛>静置6 d后翻抛。这可能是因为, 曝气翻抛增加了堆体氧气的体积分数, 加快了全氮的矿化速度和硝态氮的反硝化过程, 增加了氮素的损失; 而静置6 d翻抛处理前期处于厌氧环境使得氮素转化为铵态氮并挥发损失。但堆肥后期, 翻抛工艺之间无明显差异。因此, 从提高硝态氮的质量分数的角度出发, 常规翻抛可能更适宜。

2.2 堆体铵态氮质量分数动态变化

由图2可知, 堆体铵态氮质量分数整体呈先上升后降低的趋势。在堆肥初期, 持续高温和充足的有机物, 使氨化细菌活性增强并生成大量氨气, 氨气溶于水以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 离子的形式存在。因此, 铵态氮的质量分数不断增加, 在堆肥中期达到了最高。之后由于堆体中有机物满足不了氨化细菌正常代谢需求, 导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 生成减少, 加上弱碱性环境和堆体升温高温增加了 NH_3 挥发^[21]。从图2(a)看, 不同秸秆配比之间堆体铵态氮质量分数存在明显差异, 且随着秸秆配比增加而降低。这是因为, 堆体孔隙度随着秸秆配比增加而增大, 堆体氧气体积分数增加提升了硝化细菌的活性, 促进了铵态氮向硝态氮的转化; 不同粒径秸秆处理铵态氮变化曲线趋于一致, 无明显差异。但5 cm粒径的铵态氮质量分数在高温期较高, 且整个堆肥期内其铵态氮损失量最大, 达 $4.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与最高值相比降低了81.46%。不同翻抛工艺之间铵态氮质量分数变化曲线无明显差

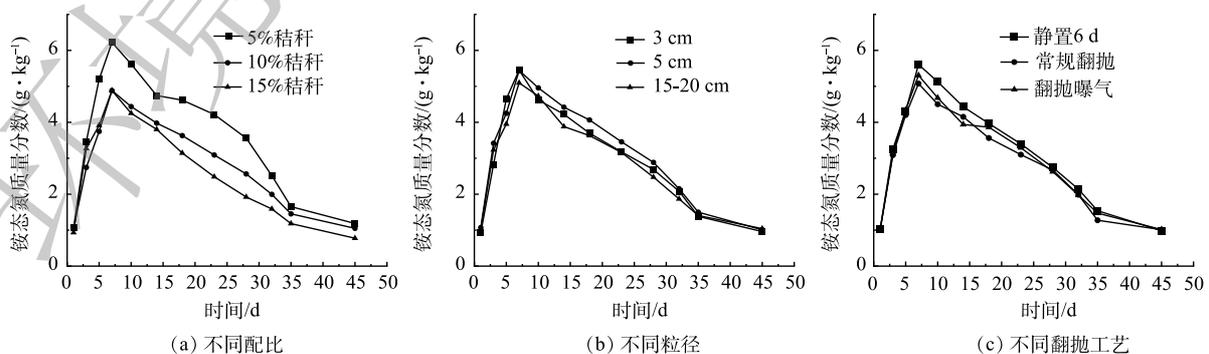


图2 不同因素下铵态氮质量分数动态变化

Fig. 2 Dynamic change of ammonium nitrogen mass fraction under different factors

异,说明翻抛工艺对堆体铵态氮向硝态氮的转化的影响较小。

由表3可知,影响堆体铵态氮质量分数的因素主次顺序为A>B>C,即玉米秸秆配比对堆体铵态氮影响最大,其次是秸秆粒径,最后是翻抛工艺。

2.3 堆体全氮质量分数动态变化

从图3总体来看,在污泥堆肥过程中氮素损失可以分为3个阶段,氮素急剧降低阶段、氮素变化平缓阶段和氮素缓慢下降阶段分别对应堆肥0~20 d、堆肥20~30 d和堆肥陈化阶段。氮素急剧降低阶段发生在堆肥升温 and 保温阶段,全氮质量分数从 $26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降了约 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。引起这一现象的原因是,堆肥前期有机氮剧烈分解生成大量氨气,氨气挥发引起了堆体全氮质量分数的下降。氮素变化平缓阶段对应堆体温度下降阶段,由于温度降低微生物活动缓慢,氮素质量分数变化不大^[22]。堆肥陈化阶段全氮质量分数缓慢下降,陈化15 d后,氮素质量分数下降了 $1\sim 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

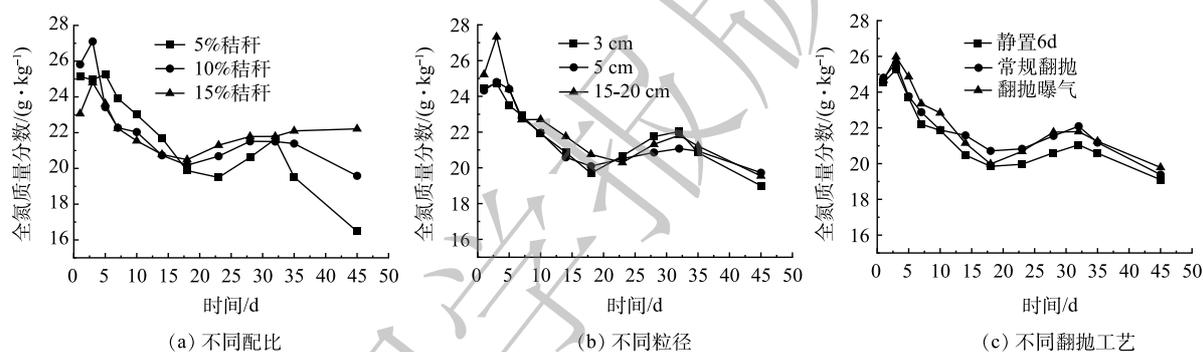


图3 不同因素下全氮质量分数动态变化

Fig. 3 Dynamic change of total nitrogen mass fraction under different factors

秸秆配比处理之间堆体全氮质量分数差异明显(图3(a))。堆体全氮损失率随秸秆配比增大而减小,15%秸秆配比全氮损失量最小仅为3.67%。这是因为,一方面,堆体体积随着秸秆配比增加而增大,为微生物提供了更多的氧气,减少了厌氧环境下氮素转化为 NH_3 、 N_2O 等气体释放^[23];另一方面,玉米秸秆通过自身孔隙结构有效地对氨气气体进行物理吸附^[24]。从秸秆粒径来看,不粉碎(15~20 cm)处理全氮质量分数在整个堆肥过程中高于3和5 cm粒径处理的。这是因为,秸秆不粉碎处理增加了堆体体积,为堆肥过程提供更多的氧气,减少了厌氧状态下氮素的损失。而3 cm秸秆粒径处理的全氮质量分数最低。从翻抛工艺来看,与常规翻抛和曝气翻抛处理相比,静置6 d后再翻抛处理全氮质量分数最低。这是因为,堆肥后静置6 d没有进行翻抛,堆体中氧气体积分数低,处于厌氧状态,部分氮素通过转化为 NH_3 、 N_2O 等气体而损失。翻抛+曝气处理则提高了前期堆体全氮质量分数。这主要是因为,翻抛及曝气处理增加了堆体的氧气体积分数,减少了氮素损失。这说明,通过改进翻抛工艺增加堆体氧气体积分数可以提高堆肥全氮的质量分数,减少氮素的损失。

由表4极差分析表明,影响堆体全氮损失量的因素顺序为:A>C>B。即,玉米秸秆比对堆体全氮的质量分数影响最大,其次是翻抛工艺,最后是秸秆粒径。从利于保氮

表3 铵态氮的质量分数极差分析

Table 3 Analysis of mass fraction range of ammonium nitrogen

| 因素 | 平均 K_{1j} | 平均 K_{2j} | 平均 K_{3j} | R_j |
|----|-------------|-------------|-------------|-------|
| A | 1.19 | 1.05 | 0.78 | 1.23 |
| B | 1.01 | 0.96 | 1.04 | 0.24 |
| C | 0.98 | 1.01 | 1.02 | 0.1 |

表4 全氮损失量极差分析

Table 4 Range analysis of total nitrogen reduction

| 因素 | 平均 K_{1j} | 平均 K_{2j} | 平均 K_{3j} | R_j |
|----|-------------|-------------|-------------|-------|
| A | 16.47 | 19.59 | 21.55 | 17.22 |
| B | 19.00 | 19.00 | 20.00 | 2.00 |
| C | 19.10 | 18.72 | 19.79 | 3.21 |

角度来说，最优处理为 T7，即 15% 秸秆配比+5 cm 秸秆粒径+常规翻抛。

2.4 堆体有机质质量分数动态变化

好氧高温堆肥就是好氧微生物对有机物进行吸收、氧化以及分解的过程，微生物的营养基质就是有机质^[25]。有机质质量分数高低是评价堆肥效果的重要指标。由图4可知，秸秆配比处理之间堆体有机质质量分数变化趋势均呈现下降趋势，5%、10%和15%处理分别下降了15.67%、14.98%和18.47%。堆体有机质初始质量分数随着秸秆配比增加而增加，随着堆肥进程推进，不同秸秆配比有机质的质量分数差异逐渐增大，与5%秸秆配比处理相比，10%和15%配比有机质分别增加了4%和11%；不同秸秆粒径处理由于堆肥中加入的玉米秸秆的质量分数相同，所以参与堆肥的有机质的质量分数相同，堆体有机质变化曲线趋于一致，但3 cm粒径的有机质质量分数在后期保持较高。这是因为，秸秆粒径越小越容易降解，有利于堆体的减量化。由于浓缩效应使得堆体有机质的质量分数增加。不同翻抛工艺对堆体有机质质量分数无显著影响(图4(c))，但常规翻抛+曝气处理的有机质的质量分数在堆肥期间低于静置6 d和常规翻抛工艺。这是因为，增加堆体

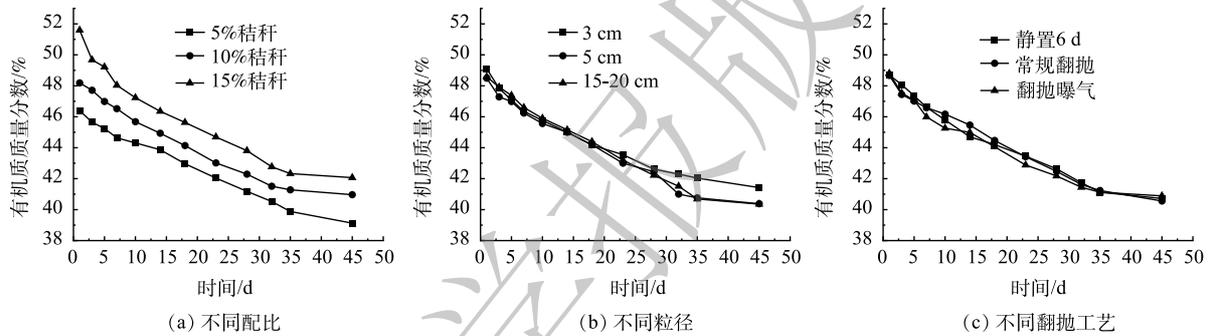


图4 不同因素下堆体有机质质量分数动态变化

Fig. 4 Dynamic change of organic matter content in the heap under different factors

氧气体积分数加快了有机质的分解而到陈化阶段，分解速度变慢，与其他翻抛工艺无显著差异。

由表5可知，影响堆体有机质质量分数减少的因素主次顺序为A>B>C，这与堆体硝态氮影响因素一致。最有利于堆肥产品有机质质量分数的是处理9(15%配比+15~20 cm秸秆粒径+静置6 d翻抛)。

2.5 堆体 C/N 的动态变化

碳氮比(C/N)是最常用于评价腐熟度的参数，如何利用不同原料调配合适C/N加快堆肥腐熟，对促进污泥有机肥的资源化利用具有重要意义^[26]。从图5中可以看出，堆体C/N比在整个堆肥过程中呈W型的变化趋势，堆肥过程中C/N比的变化说明了堆肥不同时期有机质及全氮质量分数的变化速率。第一阶段，由于前期堆体处于低温阶段不利于微生物活动，堆体C/N比较高；随着堆体温度升高，微生物代谢活动旺盛，有机质质量分数下降速率快，而全氮质量分数下降速率慢，从而降低了C/N比。第二阶段，随着微生物代谢活动趋于稳定，堆体中的氮以氨气挥发损失增加，导致C/N比大幅度增加。第三阶段，随着堆肥时间延长，堆体温度下降，微生物代谢活动下降，堆体硝态氮质量分数增加，C/N比又呈下降趋势。第四阶段，堆肥后期有机质的质量分数趋

表5 有机质减少量极差分析

Table 5 Range analysis of organic matter reduction

| 因素 | 平均 K_{1j} | 平均 K_{2j} | 平均 K_{3j} | R_j |
|----|-------------|-------------|-------------|-------|
| A | 39.13% | 40.97% | 42.07% | 8.82% |
| B | 40.38% | 41.42% | 40.35% | 3.21% |
| C | 40.72% | 40.56% | 40.89% | 0.99% |

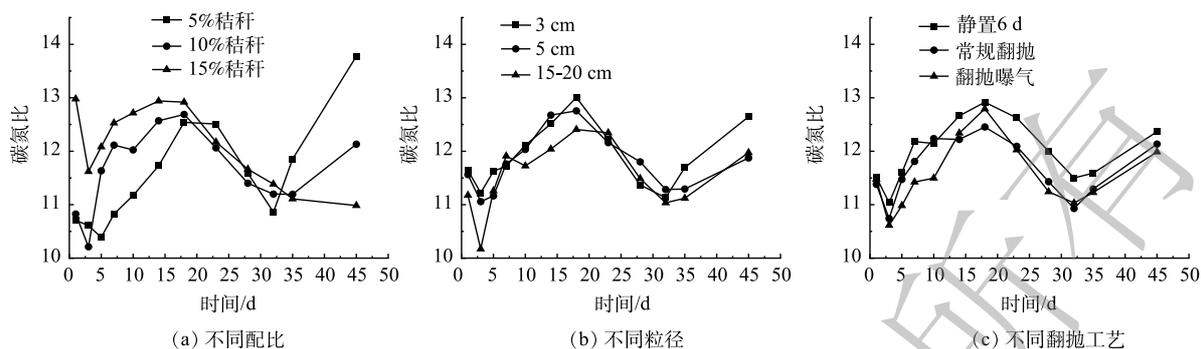


图5 堆体 C/N 在不同因素下的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of C/N ratio under different factors

于稳定,但全氮的质量分数由于氮挥发损失等原因不断下降,提高了堆体 C/N 比。

不同秸秆配比之间(图 5(a))堆体的 C/N 比有明显差异,堆肥结束时 C/N 比随着秸秆配比减小而增大,5% 秸秆配比 C/N 比最高达 13.78。不同秸秆粒径之间(图 5(b)) C/N 比变化曲线基本相同,其中随着堆肥的进行,3 cm 粒径的 C/N 比高于 5 cm 和 15~20 cm 的。不同翻抛工艺之间变化曲线趋势一致,但静置 6 d 翻抛>常规翻抛>曝气翻抛。

2.6 堆体种子发芽指数 (GI) 的动态变化

种子发芽指数 (GI) 是反映堆肥腐熟度评价指标^[27]。由图 6 知,堆体 GI 变化曲线呈前期短暂下降,随后升高的变化趋势。这是因为高温期微生物降解有机物产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和有机酸等物质对种子发芽产生了一定的抑制作用,使 GI 在高温阶段降低,之后随着堆肥时间延长,GI 随着堆体逐渐腐熟而升高。陈化后除 5% 秸秆处理的种子发芽指数<80% 外,其他处理的均超过 80%,达到完全腐熟标准。从图 6(a)可以看出,GI 随着秸秆配比增加而升高,5% 秸秆、10% 秸秆和 15% 秸秆处理陈化后 GI 分别为 64%、81% 和 107%,15% 秸秆处理的 GI 较 5% 秸秆处理的提高了 66.8%。从图 6(b)可以看出,不同秸秆粒径处理下堆体 GI 曲线变化差异不明显,但陈化后 GI 随着秸秆粒径增加有增大的趋势。图 6(c)显示翻抛工艺对堆肥 GI 无明显影响。

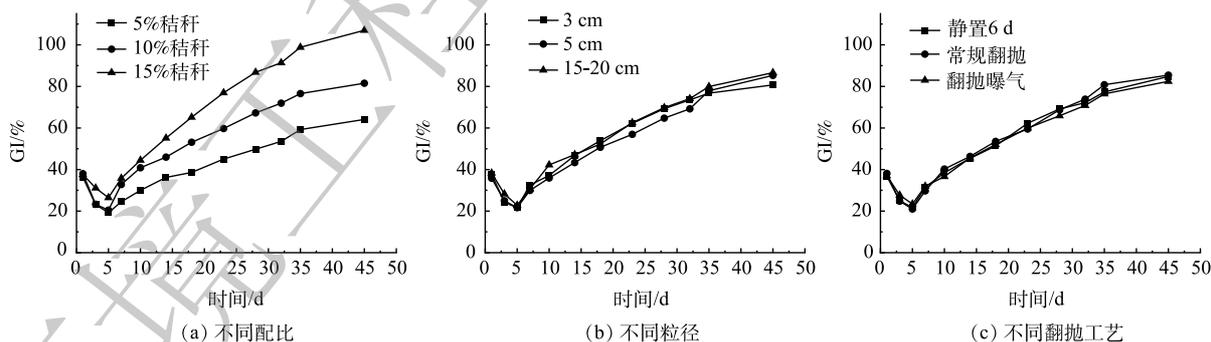


图6 不同因素下堆体种子发芽指数的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of seed germination index under different factors

2.7 污泥堆肥过程中各指标之间的相关性分析

由图 7 可知,堆体 C/N 值和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 的质量分数与升温时间(堆体从堆肥开始到堆体达到最高温的时间)之间呈极显著正相关 ($P<0.01$),相关系数分别达到 0.83 和 0.94。这说明,一方面,堆体的 C/N 比和硝态氮质量分数随着升温时间而增加;而另一方面,高 C/N 比会延长堆体升温时间。升温时间与含水率减少量、有机质质量分数及全氮质量分数呈极显著负相关,这说明升温时间延长会降低堆体有机质和全氮质量分数。因此,加快堆体升温速度可以减少堆体 C 和 N 的

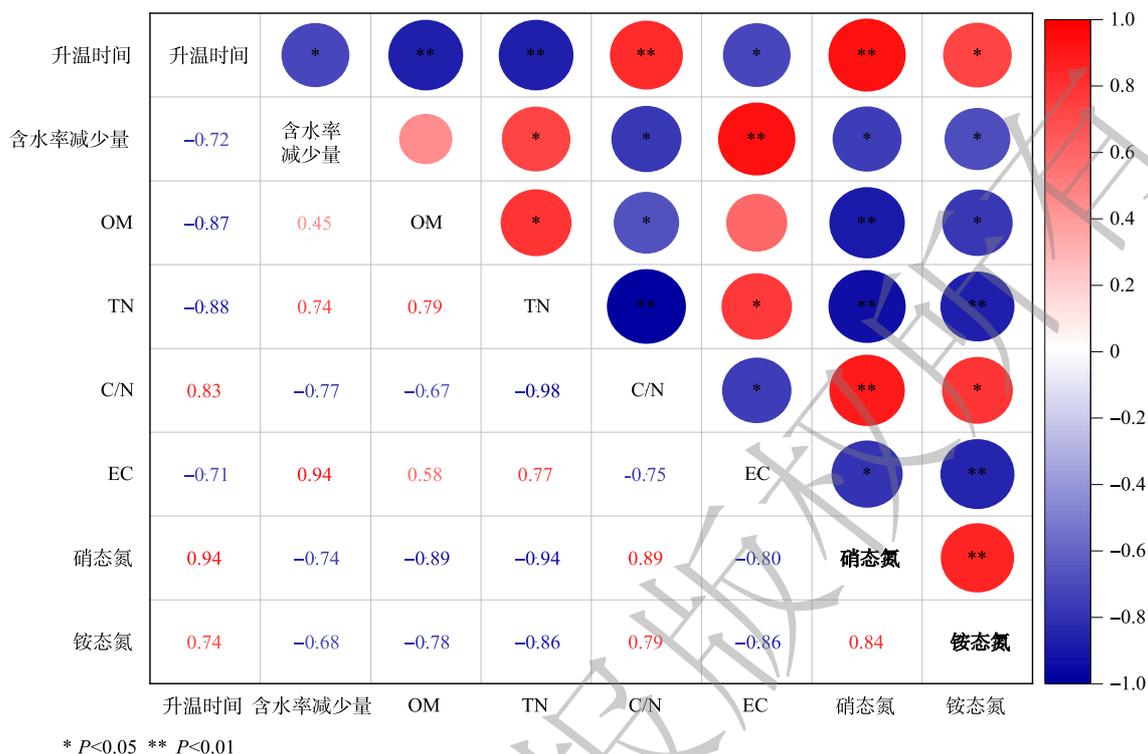


图 7 堆肥各指标之间的相关性热图

Fig. 7 Correlation heat diagram of different indexes of the compost

损失，提高堆体养分质量分数。加快堆体失水速度可以提高堆体升温速度。堆体含水率减少量与堆体 EC 和全氮的质量分数呈显著正相关而与堆体的 C/N 比、硝态氮和铵态氮的质量分数呈显著相关 ($P < 0.05$) 关系。这说明，加快堆体脱水速度可以提高堆体全氮质量分数而减少有机氮矿化为硝态氮和铵态氮。

2.8 Topsis 评价分析

Topsis 分析选取了影响堆肥质量的 8 个指标分别反映了堆肥后堆体的养分、水分以及腐熟度等状况，并根据各指标之间的相关性进行确定权值，对 9 个堆肥处理进行优劣排序。计算结果见表 6， D^+ 越小、 D^- 越大、 C_i 越大，则被评价处理越优。评价结果显示： $T7 > T9 > T8 > T4 > T5 > T2 > T6 > T3 > T1$ ，处理 T7 最优。这说明，经过 T7 (15% 秸秆配比+5 cm 秸秆粒径+常规翻抛) 处理后的堆肥产品的养分损失率最低同时腐熟度最好。因此，干旱地区污泥最优的条垛式堆肥技术参数为 15% 秸秆，秸秆粒径为 5 cm，并按照堆肥前 2 周每周翻抛 2 次，之后每周翻抛 1 次，并陈化 15 d。

表 6 不同处理的综合评价排名

Table 6 Comprehensive evaluation ranking of different treatments

| 处理编号 | D^+ | D^- | C_i | 排序 |
|------|-------|-------|-------|----|
| T1 | 0.572 | 0.132 | 0.187 | 9 |
| T2 | 0.536 | 0.288 | 0.350 | 6 |
| T3 | 0.527 | 0.133 | 0.201 | 8 |
| T4 | 0.386 | 0.302 | 0.439 | 4 |
| T5 | 0.396 | 0.260 | 0.396 | 5 |
| T6 | 0.442 | 0.236 | 0.348 | 7 |
| T7 | 0.234 | 0.460 | 0.663 | 1 |
| T8 | 0.268 | 0.429 | 0.615 | 3 |
| T9 | 0.277 | 0.520 | 0.652 | 2 |

3 结论

1) 增加玉米秸秆比例减少了堆体全氮质量分数的损失，与初始值相比，15% 秸秆配比全氮损

失量最小仅为 3.67%，全氮质量分数达到 22.21 g·kg⁻¹，同时增加了 NO₃-N 质量分数，5 cm 玉米秸秆和常规翻抛增加了堆体氮素质量分数。

2) 堆肥有机质质量分数随秸秆添加比例增加而增加，15% 秸秆比例有机质质量分数达 42.07%，小粒径秸秆配合常规翻抛工艺提高了堆体有机质质量分数。

3) Topsis 分析表明，T7 处理最优即 15% 秸秆比例，5 cm 的秸秆粒径以及堆肥前 2 周每周翻抛 2 次，之后每周翻抛 1 次，并陈化 15 d，是一种适合干旱地区的生活污泥条垛式堆肥方法。

参 考 文 献

- [1] 季俊杰, 葛丽英, 陈娟, 等. 氧化塘底泥与稻草堆肥过程中养分变化研究[J]. 环境科学导刊, 2007(1): 11-13.
- [2] 张桥, 吴启堂, 黄焕忠, 等. 未消化城市污泥与稻草堆肥过程中的养分变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2002(6): 489-492.
- [3] 岳建芝, 常兴涛, 李辉, 等. 花生壳炭对污泥堆肥营养元素和重金属动态变化的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(6): 950-958.
- [4] 焦常锋, 常会庆, 朱晓辉, 等. 脱水污泥堆肥过程中养分、有机质与重金属的变化特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 255-260.
- [5] 任省涛, 郭夏丽, 芦阿虔, 等. 林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4817-4824.
- [6] 韦忠, 高华军, 范东升, 等. 生物质颗粒燃料烘烤烟叶的效果分析[J]. 南方农业学报, 2017, 48(12): 2228-2233.
- [7] 郭广慧, 陈同斌, 雷梅, 等. 污泥堆肥产物在农业利用中的潜力和问题[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 34-38.
- [8] 牛明杰, 郑国砥, 朱彦莉, 等. 城市污泥与调理剂混合堆肥过程中有机质组分的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1016-1023.
- [9] 成庆利, 王大伟, 牛渤超, 等. 酶解预处理联合生物强化优化城市污泥好氧堆肥[J]. 生态环境学报, 2021, 30(12): 2395-2401.
- [10] 贺亮, 赵秀兰, 李承碑. 不同填料对城市污泥堆肥堆体温度动态变化影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2016(3): 389-392.
- [11] GAO W X, LIANG J F, LETICIA Pizzul, et al. Evaluation of spent mushroom substrate as substitute of peat in Chinese biobeds[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 98: 107-112.
- [12] MAHNAZ N, AMIR H N, BIJAN B, et al. Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting[J]. Waste Management, 2015, 39: 104-110.
- [13] FEI C, SIGRID P, AHMED M E, et al. Kinetics of natural organic matter (NOM) removal during drinking water biofiltration using different NOM characterization approaches[J]. Water Research, 2016, 104: 361-370.
- [14] 贾程. 污泥与秸秆堆肥过程中氮、磷形态变化研究[D]. 西北农林科技大学, 2008.
- [15] 康军, 张增强, 张维, 等. 玉米秸秆添加比例对污泥好氧堆肥质量的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(2): 172-176.
- [16] 李清秀, 张雁秋, 李向东. 污泥与稻草混合堆肥研究[J]. 江苏农业科学, 2008(6): 260-261+300.
- [17] 麦旭东, 谭军利, 王西娜, 等. 干旱地区辅料及工艺对污泥堆肥物理指标动态变化的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2682-2690.
- [18] 全国农业技术服务推广中心. 土壤检测第6部分土壤有机质的测定: NY/T 1121.6-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] 宋守法, 董俊才. 紫外分光光度法测定肥料中硝态氮含量的试验研究[J]. 化肥工业, 1984(3): 25-28.
- [20] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 鸡粪堆肥过程中各种氮化合物的变化及腐熟度评价指标[J]. 农业环境科学学报, 2007(4): 1532-1537.
- [21] 牛明芬, 于海娇, 武肖媛, 等. 猪粪秸秆高温堆肥过程中物质变化的研究[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9): 291-293.
- [22] 王欢, 郑华伟, 刘友兆. 基于DPSIR-TOPSIS模型的安徽省耕地资源利用系统健康诊断[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 147-153.
- [23] 闫实, 郭宁, 韩贵成, 等. 牛粪与蔬菜秸秆堆肥氮转化及温室气体排放研究[J]. 中国农技推广, 2019, 35(11): 63-67+54.
- [24] 耿立威, 高尚, 田沛东, 等. 城市污水处理污泥堆肥过程中氮元素形态变化研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 114-117.
- [25] 张琳, 刘新平, 常会庆, 等. 脱水污泥和小麦秸秆共堆肥过程中有机质转化研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 243-247.
- [26] 韩相龙, 吴薇, 赵鹏博, 等. 不同碳氮比对烟梗与牛粪堆肥过程的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 303-307.
- [27] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 177-182.

(责任编辑: 金曙光)

Effects of auxiliary materials and turning over technique on dynamic changes of C and N of sludge compost in northwest arid areas

XUE Xu^{1,2}, TAN Junli^{1,3,4,*}, MAI Xudong^{1,5}, WANG Xina², TIAN Juncang^{1,3,4}

1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center of Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Engineering Research Center of Water-Saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan 750021, China; 5. Suidde Soil and Water Conservation Experimental Station of Yellow River Conservancy Commission, Yulin 719000, China

*Corresponding author, E-mail: tanjl@nxu.edu.cn

Abstract In order to solve the problems of high nutrient loss and poor maturity in sludge composting in arid area of northwest China, a large-scale sludge composting experiment was carried out to study the effects of auxiliary material parameters and turning-over technology on the dynamic changes of C and N nutrients of compost during the composting period, and then Topsis analysis was used to screen the optimal treatment. Results showed that when the ratio of corn straw was 15%, the total nitrogen loss was the smallest, which was 3.67%. The nitrate nitrogen content of compost increased continuously during the composting period, while the ammonium nitrogen content increased first and then decreased. At the end of composting, the content of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen decreased with the increase of straw ratio, which were 0.99 g.kg⁻¹ and 0.78 g.kg⁻¹, respectively. The organic matter content of compost increased with the increase of straw ratio, and the organic matter content of 15% straw increased by 10.08% and 6.61% compared with that of 10% and 5% straw respectively. The C/N ratio of compost showed a W-shaped change trend during the composting process and it decreased with the increase of straw ratio at the end. The seed germination index (GI) increased with the increase of straw ratio. When the ratio of corn straw was 15%, the seed germination index exceeded 100%. Topsis analysis showed that the optimum compost treatment was T7 (15% straw ratio+5 cm straw particle size+conventional turning over), which might be a suitable strip-stack composting method for arid areas in northwest China. The results of this study can provide theoretical basis and technical support for sludge window composting in this area.

Keywords domestic sludge; window composting; organic matter; total nitrogen; parameters optimization