



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202111085 中图分类号 X705 文献标识码 A

麦旭东, 谭军利, 王西娜, 等. 辅料及工艺参数对干旱地区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.
[MAI Xudong, TAN Junli, WANG Xina, et al. Effects of auxiliary materials and pile-turning technique on the dynamical changes of some physical index of sludge composite in northwest arid region[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2682-2690.]

辅料及工艺参数对干旱地区污泥堆肥物理指标动态变化的影响

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

1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 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. 宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要 针对我国西北干旱地区污泥堆肥过程中存在升温速度慢和缺少适宜堆肥技术参数的问题, 通过大型条垛式污泥堆肥正交实验, 研究堆肥过程中堆体的温度、pH、电导率、含水率的动态变化过程, 以期明确适宜该地区的污泥堆肥技术参数。结果表明, 当玉米秸秆配比为 15% 时, 堆体的升温速度达 $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$, 最高温度可达 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; 当秸秆粒径为 5 cm 时, 高温持续时间最长, 达 22 d; 堆体的电导率随着秸秆配比的增加呈增加的趋势, 堆肥结束后以秸秆配比 15% 的电导率值最大。从水分变化来看, 堆肥 10 d 后, 污泥先静置 6 d 后翻抛的堆体上层含水率高, 而常规翻抛的堆体各层含水率在 15 d 后呈现下层>上层>中层的垂直空间分布。总体而言, 玉米秸秆粒径对堆体温度影响最大, 而玉米秸秆对比对堆体含水率影响最大。西北干旱区污泥条垛式堆肥最优技术参数为添加 5 cm 粒径的玉米秸秆 15%, 完全混合先静置 6 d 后进行翻抛。本研究结果可为我国西北干旱地区生活污水高效堆肥提供参考。

关键词 西北干旱地区; 生活污水; 好氧堆肥; 辅料配比; 翻抛工艺

我国西北干旱地区水资源短缺, 生活污水再生回用农业技术应用广泛, 但污水处理厂的生活污泥缺乏合理的处置方式。目前, 污泥处置方法主要有物理填埋、焚烧和污泥堆肥, 填埋和焚烧均对生态环境有一定的污染, 而污泥堆肥可以在高温发酵过程中杀死病原菌, 其最终产品可以作为有机肥料或土壤改良剂^[1]。这既解决了城市污泥处置难的问题, 又可为农业生产、城市绿化、苗圃育苗等提供肥料^[2]。因此, 污泥堆肥处置是有机物循环再利用的有效途径。我国西北干旱地区生活污水利用离心技术脱水后的含水率在 90% 左右, 而经过压滤板压滤后的含水率仍高达 65%~75%, 高含水率导致污泥在堆肥过程中存在升温 and 腐熟慢, 养分损失多, 而且还容易产生有毒有害气体的问题。因此, 西北干旱地区污泥堆肥过程中亟需解决高含水率污泥升温速度慢的问题。

污泥好氧堆肥的升温速度和成品质量受添加辅料因素的影响。研究表明, 污泥好氧堆肥辅料为稻草和秸秆时升温快, 为锯末时氮素损失小^[3-6]。秸秆小粒径比大粒径更有利于保存堆肥产品的养分; 污泥与秸秆体积比 1:2 时升温速度和腐熟度较好, 堆肥产品中养分含量随着污泥和秸秆比例升高而增大, 污泥堆肥处理成本也随之升高^[7-9]。MAZDAK 等^[10]和 ZHANG 等^[11]发现, 适宜的翻

收稿日期: 2021-11-15; 录用日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0408104); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)资助项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 麦旭东(1994—), 男, 硕士研究生, 1090642718@qq.com; ✉通信作者: 谭军利(1979—), 男, 博士, 教授, tanjl@nxu.edu.cn

抛工艺可以解决堆肥升温慢、效率低、成品质量差的问题。可见, 污泥与辅料的配比、粒径及翻抛工艺是影响污泥堆肥升温速率和堆肥产品质量的重要因素。在我国, 已有研究多集中于不同辅料的选择、配比和粒径等单因素对污泥堆肥升温速率和堆肥产品质量的影响方面, 而综合这些因素对西北干旱地区污泥好氧堆肥过程中各项指标动态变化规律影响的研究相对较少。

本研究在我国西北干旱区通过开展3因素3水平的正交实验, 研究玉米秸秆比例、粒径及翻抛工艺对污泥堆肥堆体内部温度、pH、电导率及水分的影响, 筛选适宜该地区污泥堆肥的玉米秸秆添加比例、粒径及翻抛工艺, 以期为我国西北干旱地区生活污水污泥高效堆肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验原料

供试材料为生活污水、玉米秸秆和微生物菌剂。生活污水取自银川某公司污泥脱水车间, 该污泥有机质含量高, 5种重金属含量均小于国家标准限值, 可以作为污泥堆肥原料。微生物菌剂为商用试剂, 成分有芽孢杆菌、乳酸菌、解磷真菌、酵母菌、木霉菌、嗜热球菌等复合微生物及载体, 复合微生物活菌量 $>2 \times 10^{10}$ 个 $\cdot g^{-1}$ 。污泥和玉米秸秆初始基本成分如表1所示。

1.2 实验装置

表1 原材料初始理化参数

Table 1 Initial physicochemical parameters and mass fraction of raw materials

供试原料	含水率/%	有机质/%	全氮/%	全碳/%	砷/(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	—	—	—	—	—

采用3因素3水平正交实验, 3因素分别为玉米秸秆配比、秸秆粒径、翻抛工艺。每因素设置3水平, 秸秆配比(质量)分别为5%(A1)、10%(A2)、15%(A3); 秸秆粒径分别为5 cm(B1)、3 cm(B2)、(15~20) cm(B3); 翻抛工艺分别为静置6 d后翻抛(C1, 堆肥后前2周先静置1周厌氧发酵, 第2周的翻堆频率为2次 $\cdot 周^{-1}$, 后3周翻堆频率为1次 $\cdot 周^{-1}$)、常规翻抛(C2, 堆肥后前2周翻堆频率为2次 $\cdot 周^{-1}$, 后3周翻堆频率为1次 $\cdot 周^{-1}$)、常规翻抛曝气处理(C3, 在常规翻抛的基础上通过在堆体内埋设打孔的PVC管道进行间歇式通气, 每天分别在9:00和15:00进行通气, 通气时间为30 min, 通风量为10 m³ $\cdot min^{-1}$)。

实验时间为2020年8—10月, 堆肥实验设置9个处理(见表2), 堆垛污泥的重量固定为3 t, 添加不同比例、不同粒径的玉米秸秆, 按堆肥总质量添加0.2%的有机肥发酵菌剂。

1.3 实验方法

如图1所示, 将物料充分混合后堆成长6 m、宽1.5 m、高1.2 m的条垛, 横截面积为梯形, 以机械翻堆的方式进行翻堆。堆肥期间采用不同翻抛方式处理, 堆肥周期为35 d, 堆肥完成后进一步陈化10 d, 总周期45 d。在堆肥后第1、3、5、7、10、14、18、23、28、32、35、45 d进行分层采样, 如图1(b)所示, 取堆体垂直剖面的上、中、下层, 3个部位采样。每次

表2 正交实验设计

Table 2 Design of orthogonal tests

处理编号	玉米秸秆配比/%	玉米秸秆粒径/cm	翻抛流程
T1	5	5	静置6 d翻抛
T2	5	3	常规翻抛
T3	5	15~20	曝气常规翻抛
T4	10	5	曝气常规翻抛
T5	10	3	静置6 d翻抛
T6	10	15~20	常规翻抛
T7	15	5	常规翻抛
T8	15	3	曝气常规翻抛
T9	15	15~20	静置6 d翻抛

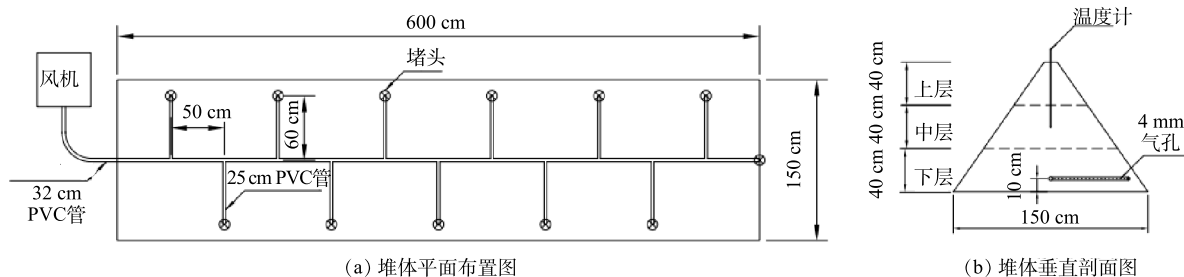


图1 曝气装置及取样分层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aeration device and sampling stratification

采集不少于 200 g 的多点混合样。剔除大小碎石块等杂质后作为新鲜样品放入密封容器中带回实验室，并尽快分析测定堆肥中的含水率、pH、电导率。在堆体的中心深度放置 60 cm 酒精温度计记录温度，每天 9:00 和 15:00 人工读取温度计读数，取其算术平均值作为当天的堆体温度，同时读取悬挂式温湿度计记录环境温度。

1.4 分析方法

有机质含量的测定参考《土壤检测 第 6 部分》(NY/T1121.6-2006) 中土壤有机质的测定方法^[12]；全氮的测定参考《土壤质量 土壤全氮测定 凯氏法》(HJ717-2014) 中全氮 (HJ717-2014) 测定方法^[13]；总汞、总砷、总铅的测定参考《土壤质量 原子荧光法》(GB/T22105-2008)^[14]；总铬的测定参考《土壤和沉积物 火焰原子吸收分光光度法》(HJ491-2019)^[15]；总镉的测定参考《土壤质量 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T17141-1997)^[16]；pH 和电导率的测定方法分别用酸度计 (哈纳 HI2221pH/ORP 测定仪) 和电导率仪 (雷磁 DDS-307A 电导率仪) 测定；堆肥含水率采用烘干法测定。

2 结果与讨论

2.1 温度动态变化

堆体温度直接反映了堆肥效率和微生物活性，进而影响堆肥产品质量高低，故堆体温度的变化是衡量污泥好氧堆肥是否正常的指标^[17]。由图 2 可以看出，各处理堆体温度均经历了升温、高温和降温 3 个阶段。由图 2(a) 可看出，不同玉米秸秆配比之间在升温期温度变化曲线存在明显差异。15% 秸秆配比处理的堆体温度在第 3 d 即达到最高温度 70 °C，升温速率最快，为 17.3 °C·d⁻¹。10% 秸秆配比的堆体温度在第 5 d 达到最高温度 70 °C，升温速率次之，为 10.4 °C·d⁻¹。5% 秸秆配比堆体温度在第 14 d 才达到最高温度 70 °C，升温速率最慢，仅 4 °C·d⁻¹。这说明，玉米秸秆配比显著影响堆体的升温速率。秸秆添加量越高，堆体孔隙率越大，可以给好氧微生物提供较多的空气，促进微生物繁殖和堆体升温发酵。玉米秸秆配比不同各处理的最高温度均能达到 70 °C，高温持续时间均超过 10 d，满足《粪便无害化卫生标准》(GB 7959-2012)^[18] 中要求的高温持续时间。但秸秆配比显著影响高温持续时间。其中，15% 秸秆配比堆体温度大于 55 °C 的时间持续了 15 d，10% 秸秆配比的持续 18 d，而 5% 秸秆配比的只有 10 d。由图 2(b) 可看出，不同粒径的升温速率相同，降温期曲线基本一致。但 5 cm 粒径秸秆处理的堆体最高温度相比其他处理更高且高温持续时间更长，有利于堆肥发酵反应的顺利进行。秸秆粒径为 5、3 和 (15~20) cm 的高温持续时间分别为 22、20 和 19 d，粉碎的玉米秸秆处理的堆体温度更高，高温持续时间更长。但 3 cm 粒径处理的堆体最高温和高温持续时间小于 5 cm 粒径的。这是因为，玉米秸秆粒径小、堆体空间结构致密，影响堆体内部氧气输送，造成微生物因氧气不足，故导致堆肥温度低和高温持续时间短。由图 2(c) 可看出，先静置 6 d 常规翻抛堆体温度升温速率快于其他 2 种翻抛工艺；曝气翻抛由于曝气会带走堆体温度，在前期堆体升温速率较慢。3 种翻抛工艺之间在最高温度和高温持续时间方面无明显差异。

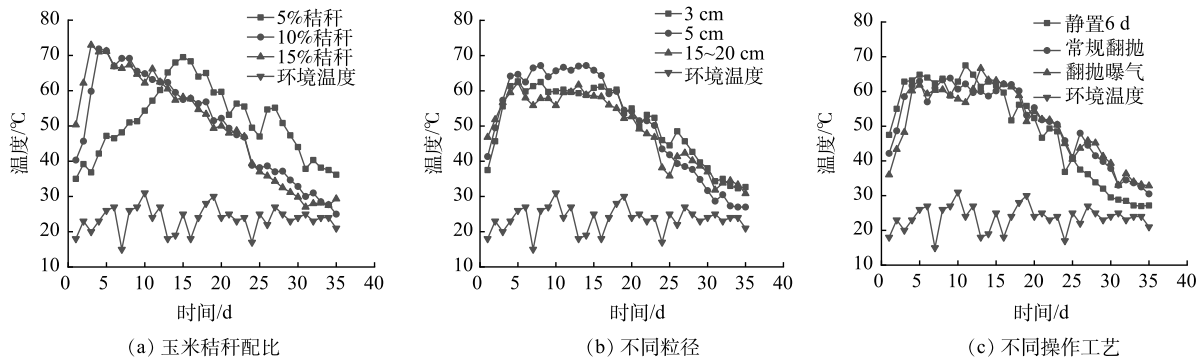


图 2 不同因素对堆体温度动态变化的影响

Fig. 2 Effects of different factors on dynamical change of temperature of compost

堆肥降温期表现为静置 6 d 翻抛的降温速率大于常规翻抛和曝气翻抛，而常规翻抛和曝气翻抛无明显差异。不同操作工艺会影响堆肥周期，常规翻抛和翻抛曝气处理堆肥周期长，不利于污泥堆肥生产实际运行。静置 6 d 翻抛堆体降温快，可以缩短堆肥周期和提高生产效率。

2.2 有效积温

引用有效积温来分析条垛污泥堆肥反应的温度效应，用式 (1) 计算污泥好氧堆肥堆体有效积温。

$$T = (T_i - T_0) \times \Delta t \tag{1}$$

式中： T_i 为堆肥 i 时刻的堆体温度，取当天平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_0 为堆肥中微生物大量繁殖时的起始温度 (生物学零度)。本研究中参考了陈同斌等 [19] 建议的生物学零度将 T_0 取 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； Δt 为 T_i 持续的时间，h。

各处理堆肥期间的有效积温结果见图 3。各处理堆肥过程中的有效积温均值为 $2.97 \times 10^4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 。其中，T7 堆体积温高于有效积温平均值，且最接近有效积温平均值。

极差分析 (表 3) 表明，影响好氧堆肥堆体有效积温因素的大小顺序为，玉米秸秆粒径 > 翻抛工艺 > 玉米秸秆配比，即玉米秸秆的粒径大小对堆体的有效积温影响最大，其次是翻抛工艺，最小的是污泥与玉米秸秆的比例。

2.3 pH 动态变化

堆体 pH 是评估堆肥过程中微生物生存环境变化的重要参数，适宜的 pH 是微生物良好生存环境的保障 [20]，还可以有效减少氨气的挥发，从而降低铵态氮损失 [21]。由图 4 可看出，各处理堆体堆肥过程中 pH 变化过程总体趋势一致，均呈现先升高后减低的趋势，与温度变化趋势相似。这是因为，堆体在升温阶段，微生物菌群快速分解堆体中的有机质，铵态氮含量增高，氨气在堆体中不断积累使 pH 升高，

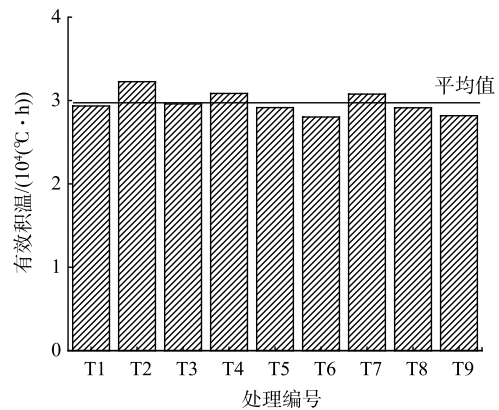


图 3 不同处理堆体有效积温

Fig. 3 Effective accumulated temperature of compost with different treatments

表 3 堆体有效积温极差分析
Table 3 Analysis of effective accumulated temperature range of reactor $^{\circ}\text{C}$

因素	玉米秸秆配比	玉米秸秆粒径	翻抛工艺
\bar{K}_1	30 400	30 320	28 888
\bar{K}_2	29 340	30 182	30 352
\bar{K}_3	29 358	28 596	29 858
\bar{R}_j	3 180	5 172	4 392

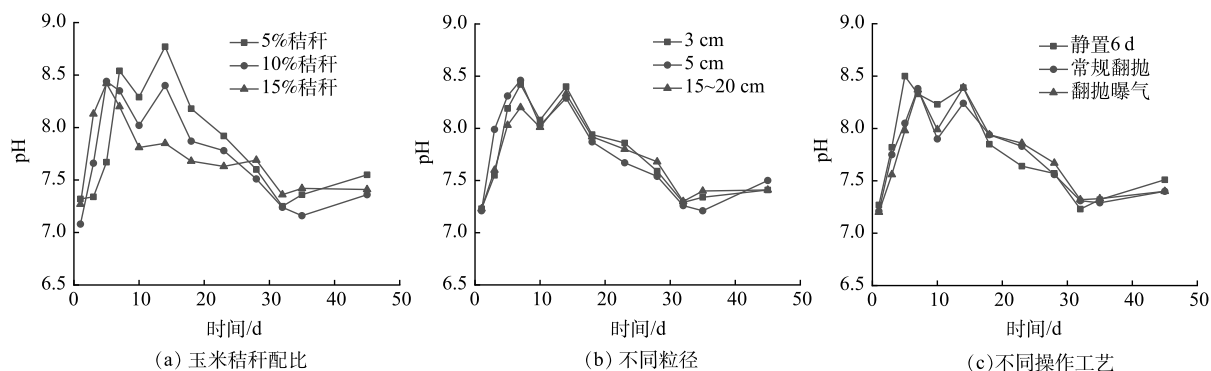


图4 不同因素对堆体pH动态变化的影响

Fig. 4 Effects of different factors on dynamical change of pH value of compost

之后由于氨气的挥发和硝化作用以及有机物分解产生的低分子有机酸使pH下降^[22]。各处理最终pH稳定在7~8,符合《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》(CJ/T 309-2009)^[23]标准要求。有研究表明^[24],堆肥结束时pH稳定在中性或偏碱性的范围内,说明堆体达到腐熟。

由图4(a)可看出,不同玉米秸秆配比之间堆体pH有明显差异。其中,5%玉米秸秆配比处理的pH达到最大值8.8,且达到最高值的时间相对其他配比的时间延后。堆肥15d后pH随着玉米秸秆比例增加而降低,这是因为,玉米秸秆比例增大,升温速度快,好氧微生物数量多,氨气产生少,低分子脂肪酸少,所以造成pH降低^[25]。达到最高值后pH变化随着堆肥时间延长而降低,但最终pH无明显差异,均在7.36~7.51。由图4(b)可看出,不同粒径处理的pH变化过程基本一致,且后期pH无明显差异,前期粒径为15~20cm的堆体pH低于粒径为3和5cm的堆体pH。这是因为,15~20cm秸秆块状物大,不利于微生物分解。由图4(c)可看出,不同翻抛工艺下pH变化曲线趋于一致,各处理之间无明显差异。但静置6d翻抛的pH先达到最大值。这是因为,静置6d时堆体内部缺少空气,一直处于厌氧发酵的状态,大量产生氨气使得堆体的pH提升较快。

2.4 电导率动态变化

由图5可看出,各处理堆体的电导率(EC)在堆肥过程中均随时间变化呈升高的趋势。这是因为,在堆肥发酵过程中,微生物将有机物分解为无机小分子物质,小分子物质溶于水从而提高了堆体的电导率。后期部分无机离子在弱碱性条件下形成沉淀而使离子浓度降低^[26],堆肥结束时,电导率稳定在2.27~2.86 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。一般认为,当 $\text{EC} < 4 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 不会对植物产生毒害作用^[27-28]。整个时期各处理的电导率EC值均低于 $4 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

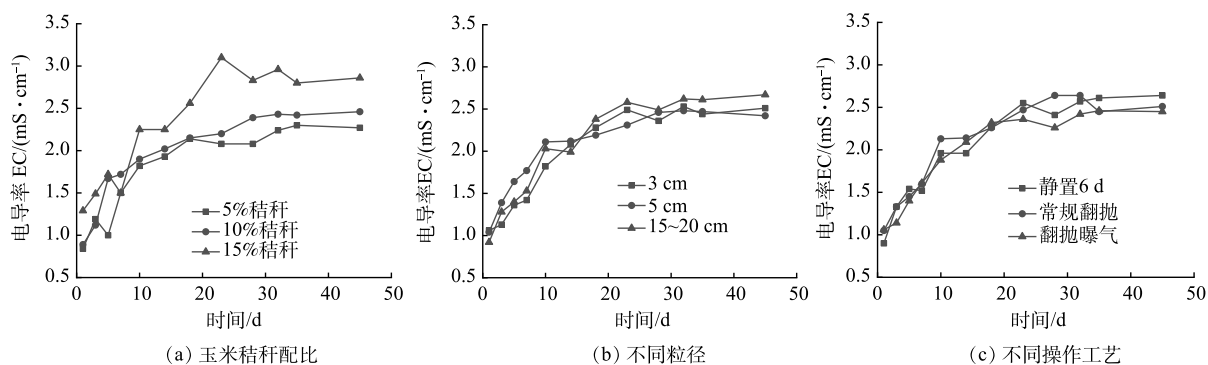


图5 不同因素对堆体电导率动态变化的影响

Fig. 5 Effects of different factors on dynamical changes of electrical conductivity of compost

由图5(a)可看出,不同玉米秸秆配比之间堆体电导率有明显差异。随着玉米秸秆配比的增加,堆体电导率呈增加的趋势;堆肥结束后堆体电导率的大小顺序为:15%秸秆配比>10%秸秆配比>5%秸秆配比。由图5(b)可知,不同玉米秸秆粒径堆体电导率变化过程趋于一致。不粉碎处理的电导率在后期高于3和5cm粒径的。由图5(c)可知,不同翻抛工艺之间堆体电导率变化过程无明显差异,静置6d翻抛处理的后期堆体电导率较常规翻抛和翻抛曝气的稍高。

2.5 含水率动态变化

堆肥含水率是影响堆肥周期长短和堆肥质量的关键性因素^[29]。堆肥含水率过高会妨碍气体输送,严重影响微生物有氧代谢,堆肥含水率过低则会抑制堆体中微生物的活动和代谢^[30]。由图6可看出,不同处理堆体含水率随堆肥时间延长均呈现下降趋势,但堆体含水率减少量上存在较大差异。由图6(a)可看出,不同玉米秸秆配比之间堆体含水率变化过程存在明显差异。堆体含水率随着玉米秸秆配比增加而降低;15%玉米秸秆配比处理孔隙度大,堆体升温速度快,加速了堆体水分散发,堆体含水率下降快,从刚开始70%到堆肥结束时的40%左右,减少了30%。5%玉米秸秆配比的堆体初始含水率高,孔隙度小,堆体升温慢,从开始到堆肥结束堆体含水率减少了18%;由图6(b)可看出,不同粒径之间堆体含水率变化曲线差异不大。在堆肥中后期,15~20cm的含水率低于3和5cm粒径的。这是因为,15~20cm的玉米芯具吸水性强、含水率下降快。中后期3cm粒径含水率下降较快。这是因为,玉米秸秆粒径小,增加了玉米秸秆与污泥接触的面积,为微生物菌群提供了更多的生存环境。由图6(c)可看出,不同操作工艺之间堆体含水率变化过程线差异也不大。从堆肥开始到结束,堆体含水率减少了20%。后期静置6d翻抛的堆体含水率值先达到最小值。这是因为,堆体翻堆次数少,堆体热量散失少,增加了水分的损失量。

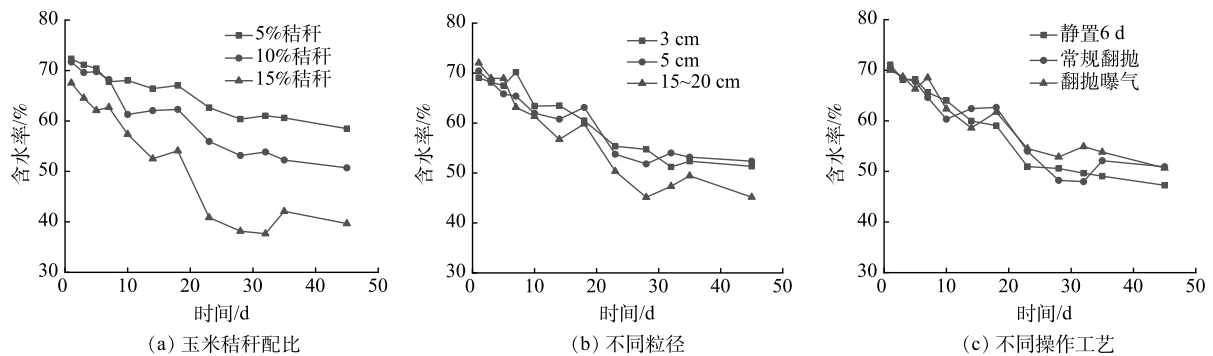


图6 不同因素对堆体含水率动态变化的影响

Fig. 6 Effects of different factors on dynamical change of water content of compost with different factors

从图7可看出,不同操作工艺对堆体上中下层含水率有明显差异。由图7(a)可看出,静置6d翻抛的堆体前期未翻堆,温度散失少,而高于其他2种操作工艺。这是因为,堆体内部气体温度、湿度高,堆体外部空气温度、湿度低,高温和低温气体产生密度差形成向上的浮力,使得堆体中的水汽被输送到堆体的上部,从而形成独特堆体含水率的垂直空间分布。10d后,上层含水率高出中层6%,下层由于氧气含量少,且接触地面,温度较低,含水率下降速度慢。堆肥30d后,由于后期的翻抛操作各层含水率逐渐趋于一致。堆肥结束时,堆体下层含水率高于上、中层的。由图7(b)可看出,常规翻抛的堆体前期各层含水率无明显差异,随着堆肥时间延长,在堆肥15d后各层含水率呈现下层>上层>中层的空间分布。由图7(c)可看出,翻堆曝气堆体各层含水率分层效果明显,表现为下层>中层>上层。这是因为,曝气会给上层提供充足氧气,堆体微生物分解剧烈,故

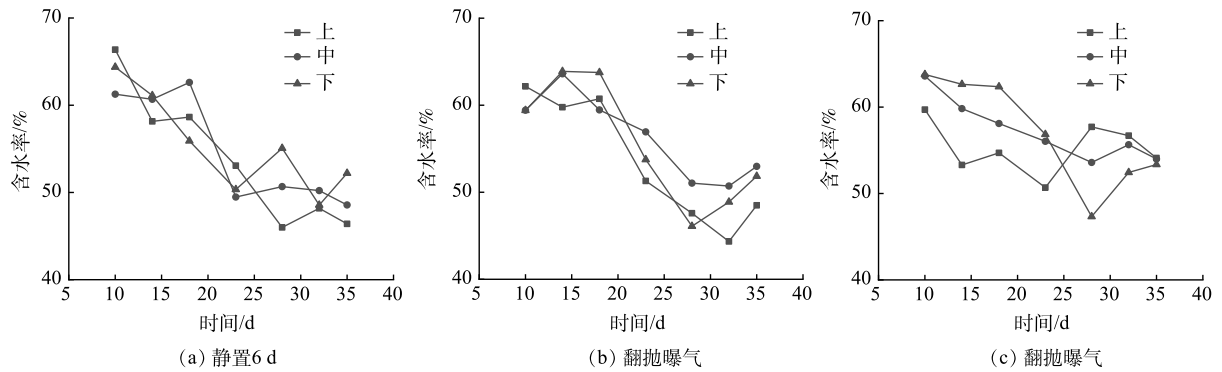


图7 不同工艺对堆体不同层次含水率动态变化的影响

Fig. 7 Effects of different processes on dynamical changes of water content in different layers of compost

上层含水率下降较快。

极差分析(表4)表明,各技术参数对堆体含水率减量的影响大小顺序为:玉米秸秆配比>玉米秸秆粒径>操作工艺。这与堆体温度变化规律一致。其原因是,堆体温度的高低决定堆体含水率的高低,温度高的堆体水分蒸发快,微生物分解剧烈,对水分消耗较大。

3 结论

1) 玉米秸秆配比对堆体升温速率影响最大。其中,15%配比升温速率快。秸秆粒径为5 cm的高温持续时间最长,粒径对堆体的有效积温影响最大,静置6 d翻抛的堆体温度前期升温速率更快。

2) 5%玉米秸秆配比处理的pH最高,15~20 cm玉米秸秆的pH在前期低于3和5 cm粒径的;堆体电导率随着秸秆配比的增加有增加的趋势,堆肥结束后15%秸秆配比电导率值最大。

3) 堆体含水率降低程度随着玉米秸秆配比的增加而增大;不同操作工艺对堆肥过程中堆体各层含水率垂直分布有显著影响。玉米秸秆比例15%、秸秆粒径5 cm、先静置6 d翻抛是适合我国西北干旱地区污泥条垛式堆肥系统的技术参数。

表4 含水率减量化极差分析
Table 4 Range analysis of water content reduction of compost

因素	玉米秸秆配比	玉米秸秆粒径	翻抛流程	%
\bar{K}_{1j}	13.84	18.07	23.82	
\bar{K}_{2j}	20.96	17.74	19.53	
\bar{K}_{3j}	27.86	26.87	19.32	
R_j	42.06	27.40%	13.50	

参 考 文 献

- [1] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 2014, 34(10): 2455-2461.
- [2] 麦旭东, 谭军利, 王西娜, 等. 中国城市生活污水堆肥技术标准及政策分析[J]. 宁夏工程技术, 2020, 19(3): 274-277.
- [3] 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.
- [4] GAO W X, LIANG J F, PIZZUL L, et al. Evaluation of spent mushroom substrate as substitute of peat in Chinese biobeds[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 98: 107-112.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 贾程. 污泥与秸秆堆肥过程中氮、磷形态变化研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2008.
- [8] 鲍博, 唐琦, 刘梅, 等. 水稻秸秆添加对污水处理厂污泥好氧堆肥效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(23): 88-90.
- [9] 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.
- [10] MAZDAK R, MEHRDAD A, BABAK P. Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 528-534.
- [11] ZHANG J Y, CAI X, QI L, et al. Effects of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2015, 99(17): 7321-7331.
- [12] 吕中秀. 土壤环境监测过程中有机质测定方法对比分析[J]. 山东化工, 2021, 50(18): 291-292.
- [13] 汪欣, 向兆, 李策, 等. 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量方法的优化探索[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 438-440.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法: GB/T 22105.2-2008[S]. 质检出版社, 2008.
- [15] 谢银凤. 石墨炉原子吸收法测定固废和土壤中的总铬[J]. 广州化工, 2020, 48(18): 80-81.
- [16] 耿纯梅, 张瑞, 刘建国, 等. 2013年-2017年巴彦淖尔市农田土壤中铅、镉、铬监测结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2019, 29(1): 112-113.
- [17] 杨立敏. 污泥堆肥过程温度与酶活性动态变化规律研究[J]. 广东化工, 2020, 47(16): 134-136.
- [18] 中华人民共和国卫生部、中国国家标准化管理委员会. 粪便无害化卫生要求: GB 7959-2012[S]. 质检出版社, 2012.
- [19] 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(6): 911-915.
- [20] 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.
- [21] 曾光明, 黄国和, 袁兴中. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 117-119
- [22] MENG L Q, LI W G, ZHANG S M, et al. Feasibility of co-composting of sewage sludge, spent mushroom substrate and wheat straw[J]. Bioresource Technology, 2017, 226: 39-45.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质: CJ/T 309-2009[S]. 质检出版社, 2009.
- [24] HACHICHA R, HACHICHA S, TRABELSI I, et al. Evolution of the fatty fraction during co-composting of olive oil industry wastes with animal manure: maturity assessment of the end product[J]. Chemosphere, 2009, 75(10): 1382-1386.
- [25] 李思敏, 赵阳悦, 唐锋兵. 辅料配比对市政污泥堆肥效果的影响[J]. 当代化工, 2020, 49(4): 564-567.
- [26] 孟云姣, 唐锋兵, 张娟, 等. 不同调理剂协同市政污泥好氧堆肥试验研究[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(1): 82-87.
- [27] 程永高. 邢台市污水处理厂污泥好氧堆肥的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
- [28] 李欢, 金宜英, 聂永丰, 等. 污泥超声处理及其在好氧消化中的应用[J]. 环境科学, 2017, 35(8): 22-23.
- [29] 徐灵, 王成端, 姚岚. 污泥堆肥过程中主要性质及氮素转变[J]. 生态环境, 2008(2): 602-605.
- [30] 周海滨, 高定, 陈同斌, 等. 调理剂配比对污泥好氧发酵脱水和处理成本的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 103-105.

(责任编辑: 金曙光)

Effects of auxiliary materials and pile-turning technique on the dynamical changes of some physical index of sludge composite in northwest arid region

MAI Xudong¹, TAN Junli^{1,2,3,*}, WANG Xina⁴, TIAN Juncang^{1,2,3}

1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

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

Abstract The objectives of this research were to clarify the influence of auxiliary materials and pile-turning technique on the dynamic change of physical index of sludge composting in northwest arid region, and to provide suitable technical parameters for organic fertilizer production with domestic sludge. The temperature, pH value, electrical conductivity, moisture content and its dynamic change in the upper, middle and lower layers of the windrow were studied by a large windrow composting system with an orthogonal experiment of 9 strips including 3 factors (ratio of auxiliary materials, particle size of auxiliary materials and turning-over process) and 3 levels. Results showed that the rate of temperature increase of compost was as fast as $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ and the highest temperature reached over $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ with 15% straw ratio. The duration of high temperature period got 22 days with the straw particle size of 5 cm. The electrical conductivity (EC) of the compost increased with the increase of the straw ratio, and the maximum value of EC at the end of experiment was achieved with 15% straw ratio. The moisture content at upper layer was higher with the treatment of conventional turning-over after standing for 6 d within composting 10 days and then gradually tended to be consistent among different layers after composting 30 days. However, the moisture content of each layer showed a vertical gradient of lower layer > upper layer > middle layer with conventional turning-over after composting 15 days. The maximum affecting factor on sludge composting temperature was corn straw particle size, while the maximum affecting factor on sludge composting moisture content was corn straw ratio during sludge composting. In a word, the optimal composting parameters for the sludge composting system in the northwest arid region are 15% corn stalks, 5 cm particle size of the stalks, and conventional turning-over after standing for 6 days. The results of this study can provide a reference for sludge window composting in the arid region of northwest China.

Keywords northwest drought district; domestic sludge; aerobic composting; ratio of auxiliary materials; double cast process