



# 基于污泥堆肥产物与余泥渣土制备的人工土壤的理化性质分析与评价

王敏<sup>1,2,✉</sup>, 陈昭乐<sup>2</sup>, 王敏慧<sup>2</sup>, 刘佳伟<sup>2</sup>, 韩娜<sup>2</sup>, 程文<sup>1,2</sup>

1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048

**摘要** 为实现污水厂污泥及余泥渣土的协同处理和资源化利用, 以“两步法”制备人工土壤, 考察不同配比条件对人工土壤理化性质的影响。结果表明: 污水污泥与 3 种不同辅料(玉米秸秆、菌菇渣、木屑)配比后进行好氧堆肥, 堆肥结束后腐熟度符合国家相关标准要求, 将污泥堆肥产物和余泥渣土制备得到人工土壤, 其理化性质与天然土壤类似。堆肥添加量能显著影响人工土壤水稳性团聚体、pH 值、EC、有机质、总氮及有效磷含量, 在人工土壤种植应用时, 污泥+玉米秸秆的堆肥种植效果最好, 采用改进的内罗梅综合指数法进行综合评价, 综合考虑, 污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 30%、余泥渣土添加量为 70% 和污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 50%、余泥渣土添加量为 50% 是最优质的人工土壤, 污泥+木屑堆肥次之, 污泥+菌菇渣堆肥效果最差。

**关键词** 污泥; 堆肥; 辅料配比; 人工土壤; 理化性质

市政污泥是指在城市生活污水与工业废水处理当中产生的固体废料<sup>[1]</sup>, 如果没有经过十分妥善的处理便随意排放, 将会对公共安全和环境健康产生严重危害<sup>[2]</sup>。数据显示, 至 2020 年初, 污水处理能力达  $2.31 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 年产含水率 80% 的污泥超  $6.6 \times 10^7 \text{ t}$ <sup>[3]</sup>, 预计 2025 年我国城镇污泥年产量将突破  $9 \times 10^7 \text{ t}$ <sup>[4]</sup>。国内外对污泥一般包含浓缩、稳定、调理、脱水等处理过程, 最终处置一般由填埋、土地利用、建材利用、能源回收等方式。近年来更偏向于将市政污泥进行堆肥处理, 或者制成污泥复合肥后添加到土地中<sup>[5]</sup>。堆肥是通过一定的人工条件, 利用自然界的微生物, 有控制地将可被微生物降解的有机废物转化为稳定的腐殖质<sup>[6]</sup>。好氧堆肥一定程度上可以使污泥稳定化和无害化<sup>[7]</sup>, 经好氧堆肥处理的市政污泥施于土壤中, 利用污泥含有丰富的腐殖质、有机物以及植物生长所需的养分, 在一定程度上改善土壤的质量, 实现污泥减量化、稳定化、无害化、资源化。

大量的余泥渣土已成为城市固废的主要来源, 不但占用大量土地、破坏城市环境, 甚至还易产生安全隐患<sup>[8]</sup>, 余泥渣土的处理途径主要有建设回填、建材利用及堆山造景等。周谷城<sup>[9]</sup>在研究中指出泥渣中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量占比最高, 为 74.5%, 与土壤具有极为相似的化学组成。余泥渣土中主要成分为砂石与黏土颗粒, 有机质及其他营养物质含量极低。因此可以考虑将含有营养物质的污水污泥与余泥渣土进行联合处理, 配置人工土壤。

“人工土壤”即利用有机或无机固废结合各自性质仿照自然土壤制造而成的一种人造土, 用于修复土壤或者补充土壤资源, 会被用于草坪、苗圃、绿化等的建设<sup>[10]</sup>。ZOCHE 等<sup>[11]</sup>将粉煤灰、米糠、污泥、合成石膏、表土等原料配制不同人工土壤来对矿区生态进行修复, 经指标监测以及经济性分析后, 得出用人工土壤对矿区进行修复是十分可行的。改变土壤 pH、提高矿区土壤有机质和营养元素含量、降低重金属含量、恢复植被覆盖等都可以通过人工土壤来改善。

目前, 好氧堆肥研究中, 在污泥与不同辅料之间调节配比, 并分析讨论堆肥效果和堆肥质量的研究较

收稿日期: 2023-09-26; 录用日期: 2023-12-18

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划(2019JQ-745); 陕西省教育厅科研计划项目(协同创新中心项目)(20JY045); 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-081)

第一作者: 王敏(1984—), 男, 博士, 副教授, wangmin@xaut.edu.cn; ✉通信作者

多,而保持污泥与辅料配比不变,并经过好氧堆肥后与余泥渣土配置成人工土壤的研究较少。因此,本研究将污水污泥与玉米秸秆、菌菇渣、木屑按照一定配比进行好氧堆肥,然后将污泥堆肥产物与余泥渣土按不同比例配置人工土壤,分析对人工土壤的影响,并对其进行综合评价,确定最优人工土壤组合,为缓解土壤资源和实现污泥及余泥渣土的资源化利用提供参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥好氧堆肥

本研究所使用的污泥取自西安第五污水处理厂第一期脱水车间,为污水处理过程中产生的产物,初始含水率 80% 左右;玉米秸秆:取自眉县玉米种植农户,在风干后粉碎后使用;菌菇渣:取自宁强县菌菇养殖户,由废弃菌棒粉碎得来;木屑:取自连云港市某家具厂,为家具制作时产生的杨木锯末,粉碎后的玉米秸秆、菌菇渣及木屑颗粒直径均 $\leq 20$  mm,其理化性质如表 1。

堆肥装置为圆柱形好氧堆肥反应器,见图 1,有效容积为 10 L (高为 60 cm,底部直径为 15 cm)。在桶体上部和下部分别设置 1 个直径为 2 cm 的取样口,以便于均匀采样。桶体底部设有渗滤液孔,与透明软管相连,便于桶体内渗滤液的排出。底部设置 1 层穿孔板并覆盖 1 层筛网,利用空气泵将空气输送到堆体底部进行供氧,并通过空气流量计控制通风流量。由于桶体体积较小,在每个桶体外围缠绕 1 圈加热带并通过温控器进行控制,每日调节使加热带温度始终低于桶体内最低温度 3~5 °C,来模拟自然堆肥的过程。

好氧堆肥共设置 3 个实验组,分别为 A (污泥:玉米秸秆=5:2)、B (污泥:菌菇渣=5:2)、C (污泥:木屑=5:2)。根据污泥处置技术指南中含水率 55%~60%、碳氮比在 20:1~30:1 的要求确定配比<sup>[12]</sup>。

堆肥期间采用强制通风+人工翻堆的方式进行处理,在高温期结束后进行第 1 次翻堆,之后每周翻堆 1 次。通气方式采用间歇式供氧,每天在上午 8:00~9:00、下午 16:00~17:00、夜晚 0:00~1:00 进行通气,通风量为 0.3 L·min<sup>-1</sup>,持续时间为 1 h。桶内温度达 70 °C 以上时,增加通风量,以防微生物死亡,堆肥时间为 30 d。

### 1.2 人工土壤配制

人工土壤的原料为 3 种污泥堆肥产物及余泥渣土,余泥渣土取自西安市外环高速公路施工单位。各原料的基本性质如表 2 所示。

表 1 原料基本理化性质

Table 1 Raw material basic physical and chemical properties

原料	含水率/%	pH	EC/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	总氮/ ( $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	C/N
污泥	79.82	6.74	212	461.51	43.09	10.71
玉米秸秆	6.84	7.38	2540	712.14	13.00	54.78
菌菇渣	9.56	5.93	2700	615.87	9.38	65.60
木屑	9.76	7.63	264	694.67	2.85	243.39

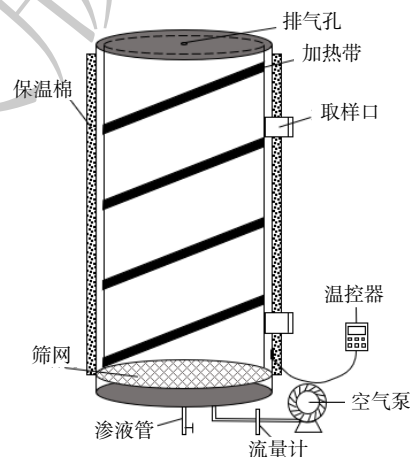


图 1 反应器示意图

Fig. 1 Compost reactor setup

表 2 人工土壤原料基本性质

Table 2 Artificial soil basic properties of raw materials

材料	pH	EC/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	总氮/ ( $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	水解性氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	有效磷/ ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )	速效钾/ ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ )
余泥渣土	8.57	106	3.88	0.26	11.33	33	109
污泥+玉米秸秆堆肥	7.34	1028	494.19	25.74	2502.07	1424	4400
污泥+菌菇渣堆肥	7.02	1652	478.13	23.58	3213.30	2264	1952
污泥+木屑堆肥	7.34	916	496.87	19.97	2907.27	1144	1280

将上述原料风干后进行粉碎处理，并过 2 mm 筛，按照比例充分混合均匀，单组制备的人工土壤质量为 0.2 kg，共设 15 个处理组，如表 3 所示，每个处理组做 3 个重复。将污泥堆肥产物和余泥渣土按照配比倒入烧杯后，加入 60% 的水，用机械搅拌机进行搅拌，保证 2 种原料混合均匀同时促使人工土壤中团聚体的形成，置于人工气候室 25 ℃ 恒温培养，每天通过称重法补充因蒸发而损失的水分，培养期间，每 10 d 搅拌 1 次，共培养 90 d 制得人工土壤。

### 1.3 分析方法

pH 按土水比 1:2.5 振荡、静置后，使用 pH 计测定<sup>[13]</sup>；EC 采用电极法测定<sup>[14]</sup>；有机质采用重铬酸钾外加热容量法测定<sup>[15]</sup>；总氮采用 AA3 型连续流动分析仪测定<sup>[16]</sup>；有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定<sup>[17]</sup>。

种子发芽指数 (GI)<sup>[18]</sup>：将样品与水 1:10 混合，振荡浸提 1 h，静置后取 5 mL 滤液于 9 cm 培养皿中，放入一张滤纸，均匀撒上 20 颗大小均匀的小白菜种子，以去离子水为对照，25 ℃ 下恒温避光培养 48 h，测量根长和发芽数。计算公式如 (1) 所示。

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

式中： $A_1$  是样品滤液种子发芽率； $A_2$  是样品滤液种子根长，cm； $B_1$  是对照组种子发芽率； $B_2$  是对照组种子根长，cm。

根据方海兰等<sup>[19]</sup>的研究方法对选取参数进行标准化处理，后利用修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力系数 (P)，计算公式如 (2) 所示。

$$P = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{\min})^2}{2}} \times \frac{(n-1)}{n} \quad (2)$$

式中： $P_i$  是土壤各属性分肥力系数； $P_{\min}$  是各分肥力系数中的最小值； $n$  是参评指标数量。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 25 软件进行 Pearson 相关性分析和显著性检验 ( $p < 0.05$ )，Origin 2022 Pro 软件制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 辅料对污泥堆肥效果的影响

1) 污泥堆肥过程中种子发芽指数变化。种子发芽指数是国内外研究中评价堆肥是否腐熟的常用生物学指标。在我国污泥应用的相关规定中，应用于园林绿化的污泥堆肥其种子发芽指数应  $\geq 70\%$ 。图 2 为 3 组污泥堆肥种子发芽指数的变化。3 组种子发芽指数在堆肥过程中总体均呈现逐渐上升的趋

表 3 不同人工土壤的原料及配比

Table 3 Raw materials and ratios for different artificial soils

污泥堆肥种类	处理组	污泥堆肥 (占干重) /%	余泥渣土 (占干重) /%
A	T1	10	90
	T2	30	70
	T3	50	50
	T4	70	30
	T5	90	10
B	T6	10	90
	T7	30	70
	T8	50	50
	T9	70	30
	T10	90	10
C	T11	10	90
	T12	30	70
	T13	50	50
	T14	70	30
	T15	90	10

注：A：污泥和玉米秸秆堆肥；B：污泥和菌菇渣堆肥；C：污泥和木屑堆肥。

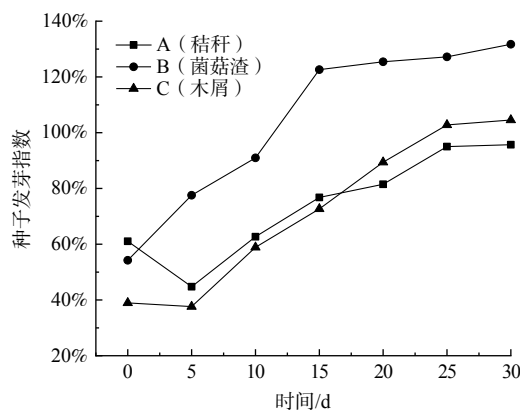


图 2 堆肥过程中种子发芽指数 (GI) 的变化

Fig. 2 Changes in germination Index (GI) during composting

势, B 组和 C 组在堆肥前 3 d 种子发芽指数出现了略微下降, 考虑是由于高温期微生物降解有机物产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和有机酸等物质未能被及时利用而累积, 对种子萌发造成胁迫, 这与张陇利等<sup>[20]</sup>、李承强等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。在堆肥结束时, 3 组的种子发芽指数分别为 115.6%、136.4%、106.8%,  $\text{GI}>80\%$  堆肥已完全腐熟<sup>[22]</sup>。

2) 污泥堆肥过程中重金属分析。表 4 所示为污泥堆肥结束后不同污泥堆肥的重金属含量以及国家标准要求, 由表 4 知, C 组污泥+木屑堆肥产品总砷含量均不满足相关标准, A 组污泥+玉米秸秆堆肥产品和 B 组污泥+菌菇渣堆肥产品不满足《农用污泥污染物控制标准》中 A 级污泥的要求, 除此之外所有污泥堆肥产物均符合《城镇污水厂污泥处置园林绿化用泥质》(GB/T23486-2009) 和《农用污泥污染物控制标准》中 A 级、B 级的重金属含量规定。C 组总砷不满足相关标准要求的原因可能是因为污泥中含有重金属, 且在堆肥过程中有机质的降解导致堆体相对浓缩<sup>[23]</sup>, 从而使总砷超标, 污泥中的重金属毒性成为限制污泥使用的主要因素之一, 还要关注的是长期施用污泥可能会引起土壤重金属的污染<sup>[24]</sup>, 因此关于污泥堆肥的利用, 还需要更广泛、更系统地探索和研究<sup>[25]</sup>。

## 2.2 堆肥及配比对人工土壤理化指标的影响

1) 对水稳性团聚体的影响。图 3 所示为不同人工土壤中不同粒径水稳性团聚体的分布, 可以看出随着堆肥产品添加量的增加, 250  $\mu\text{m}$  及以下的团聚体比例逐渐减小, 而 250  $\mu\text{m}$  以上的水稳性团聚体比例逐渐增大。由于余泥渣土粒径较小, 均在 250  $\mu\text{m}$  以下, 因此当人工土壤中余泥渣土所占比例较大时, 小粒径的团聚体所占比例较大; 当人工土壤中堆肥产物比例增加时, 好氧堆肥过程中产生腐殖质类物质起到胶结作用, 促进水稳性大团聚体结构的生成。但水稳性大团聚体含量也不是越高越好, 对于旱地来说, 以 50~250  $\mu\text{m}$  的团聚体作为肥力特征, 即该粒径范围内的团聚体所占比例越高, 象征着土壤肥力越好。

2) 对 pH 值的影响。如图 4 所示为 3 种污泥堆肥在不同添加量下对人工土壤 pH 值的影响, pH 值范围在 6.59~8.08 之间, 随着污泥堆肥添加量的增加, 人工土壤的 pH 值逐渐下降; 在相同添加量的情况下, C 组最高, pH 值的变化一方面是由于堆肥产物本身 pH 决定, 另一方面可能是由于堆肥过程中由于微生物代谢活动和物料组成不断变化导致 pH 始终处于变化之中<sup>[26]</sup>, 当 3 种污泥堆肥产品添加量越大时, 堆肥时易降解的有机质被微生物利用时产生的有机酸越多<sup>[27]</sup>, 从而导致 pH 值呈现下降趋势。参考土壤的 pH 值为 7.6, 在《绿化种植土壤》中 pH 的范围定在 5.5~8.3 之间, 各组

表 4 不同污泥堆肥中的重金属含量以及国家标准要求  
Table 4 Heavy metal content in different sludge composts and national standard requirements  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$

重金属种类	A	B	C	城镇污水厂 污泥处置园林 绿化用泥质	农用污泥污染物 控制标准	
					A	B
总镉	1.36	1.19	1.18	20	3	15
总汞	1.28	1.38	1.66	15	5	15
总铅	17.84	10.6	16.89	1 000	300	1 000
总铬	108.14	117.13	89.11	1 000	500	1 000
总砷	63.24	63.85	77.87	75	30	75
总铜	86.89	76.98	71.87	1 500	500	3 000
总锌	1 080.50	999.93	1 025.29	4 000	1 200	3 000
总镍	26.6	24.82	24.12	200	100	200

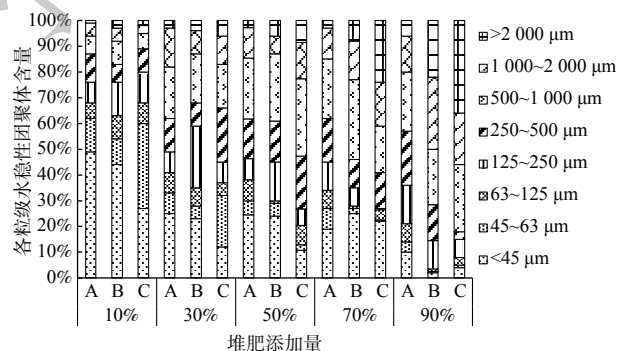


图 3 不同人工土壤中水稳性团聚体的变化

Fig. 3 Changes in water-stable agglomerates in different artificial soils

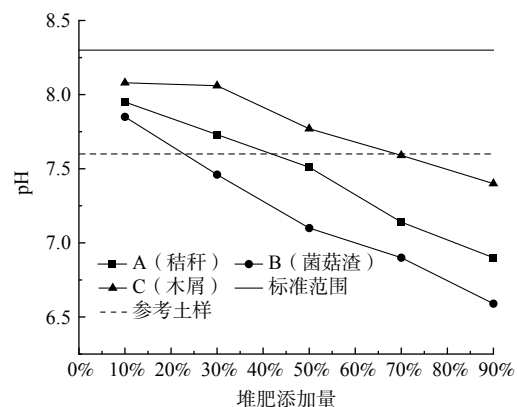


图 4 不同人工土壤中 pH 值的变化

Fig. 4 Changes in pH in different artificial soils

人工土壤均符合要求；《绿化用有机基质中》对 pH 的要求是 5~8 之间，除了 C 组堆肥产品添加量为 10% 外，其余人工土壤均在此范围内。

3) 对电导率 EC 的影响。土壤电导率一般用于评价土壤盐分含量。电导率过低会导致基质中的养分含量不足，影响植物生长，相反过高会使植物收到盐害<sup>[28]</sup>，图 5 为 3 种辅料堆肥产物在不同添加量下对人工土壤 EC 的影响，电导率随着堆肥产品添加量的增加也相应增加，这可能是因为当污泥+玉米秸秆、污泥+菌菇渣、污泥+木屑添加量占比越大时，其堆肥过程中易降解有机物的矿化作用生成的铵盐和磷酸盐跟多，再加之堆体体积的减少<sup>[29]</sup>。在相同添加量下，B 组人工土壤的电导率高于其他两组。《绿化种植土壤》中对人工土壤电导率的要求是 150~900  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，参考土样的 EC 值为 943  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，C 组除了添加量为 90% 的人工土壤不符合，其余均满足，而 A 组和 B 组仅在堆肥产物添加量小于 50% 时在此范围内；《绿化用有机基质》中要求电导率在 350~1 500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  之间，堆肥产物添加量为 30%~70% 的人工土壤符合要求。

4) 对有机质的影响。有机质不仅是各种营养元素的主要来源，同时也是微生物生命活动所必需的碳源。图 6 所示为 3 种辅料堆肥产物在不同添加量下人工土壤中有机质含量的变化。有机质随着堆肥产物添加量的增加而增加，其可能原因是堆肥产物中的有机质含量远高于余泥渣土，因此当其添加量增加时，人工土壤中有机质含量增加幅度也较大。参考土壤中有有机质含量为 47.6  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，在《绿化人工土壤》对人工土壤中有机质含量的要求为 15  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$  以上，本研究配制的人工土壤均高于其要求。

5) 对总氮的影响。如图 7 所示为 3 种辅料堆肥产物在不同添加量下人工土壤中总氮含量的变化，可以看出当人工土壤中堆肥产品的添加量增加时，其总氮含量也随之增加。这可能是由于堆肥过程中大量有机物的矿化分解引起干物质的减少，可以说总氮是  $\text{NH}_3$  挥发和有机质降解引起的浓缩效应共同作用的结果<sup>[30]</sup>。3 种堆肥产品的总氮含量均在余泥渣土的 20 倍以上，因此在堆肥添加量较小，余泥渣土所占比例较大的人工土壤中，不同堆肥产物之间总氮含量对人工土壤的影响较小。参考土样的总氮含量为 2.15  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，人工土壤在堆肥产品添加量为 10% 时，与该参考土壤最接近，当堆肥添加量增加到 90% 后，人工土壤中的总氮含量远高于参考土壤；而在相关标准中并未对总氮含量进行具体要求。

6) 对有效磷的影响。有效磷含量来评价土壤磷素肥力的供应情况。图 8 所示为 3 种辅料堆肥产物在不同

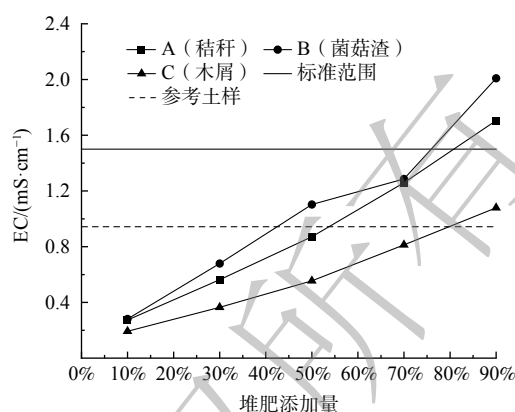


图 5 不同人工土壤中 EC 的变化

Fig. 5 Changes in electrical conductivity in different artificial soils

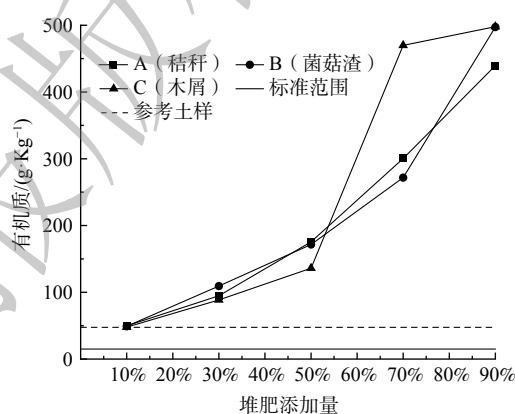


图 6 不同人工土壤中有机质的变化

Fig. 6 Changes in organic matter in different artificial soils

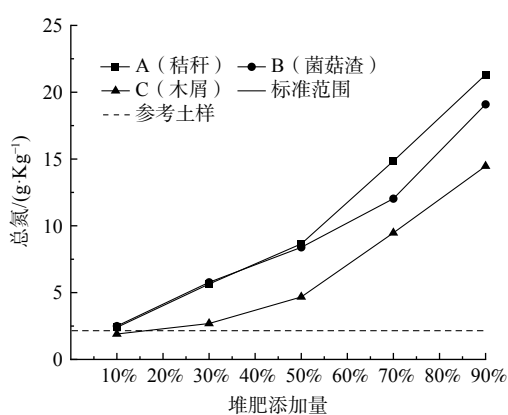


图 7 不同人工土壤中总氮的变化

Fig. 7 Changes in total nitrogen in different artificial soils

添加量下对人工土壤有效磷含量的影响,有效磷随着堆肥产物添加量的增加而增加,当堆肥产物添加量相同时,B组含量最高,A组次之,C组有效磷含量最低,一方面可能是由于B组堆肥产物中有效磷含量均比其余两组高,另一方面有效磷被浓缩,微生物代谢可以产生有机酸,有助于无机磷溶解,增加有效磷含量<sup>[31]</sup>,因此堆肥产物添加量越高,有效磷的含量越高,这与邱家洲<sup>[32]</sup>的研究结果一致。《绿化种植土壤》中对有效磷含量要求为  $8 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  以上,参考土样的有效磷含量为  $87 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ,本研究配制的人工土壤均满足该要求,均高于参考土壤。

### 2.3 人工土壤种植应用与评价

1) 人工土壤对小白菜种植的影响。实验土壤为污泥堆肥添加量分别为 30%、50%、70% 的人工土壤,选择市购营养土 (CK1) 以及参考土壤 (CK2) 作为对照组,供试作物为小白菜,图 9 为小白菜在不同人工土壤中发芽率的变化,看出随着堆肥产物添加量的增加,小白菜发芽率变低,考虑是由于堆肥产物添加量大的人工土壤中盐分含量较高,导致作物失水,成活率降低,对种子发生胁迫抑制其萌发。当堆肥添加量为 30% 时,3 种堆肥产品的人工土壤发芽率均为 100%。

表 5 为不同人工土壤小白菜株高和根长变化,各组小白菜最终株高为:  $A30\% > CK2 > A70\% > A50\% > C30\% > C70\% > B70\% > C50\% > B50\% > B30\% > CK2$ 。即,所有配制的人工土壤均比 CK1 高, A30% 高于参考土壤,其余处理组的株高均低于参考土壤,不同污泥堆肥产物和余泥渣土制备的人工土壤对小白菜的生长有促进作用。在 3 组人工土壤和两组对照组之间, A 组与 B 组、C 组、CK1 组之间株高呈极显著差异 ( $p < 0.01$ ), B 组、C 组、CK1 组之间株高差异不显著 ( $p > 0.05$ )。A 组堆肥产物对株高影响最优,在合适的添加比例下甚至优于参考土壤。各组小白菜最终根长为:  $A70\% > A50\% > A30\% > CK2 > B70\% > C50\% > C70\% > B30\% > B50\% > CK2 > C30\%$ 。A 组堆肥产物对根长影响效果最好,在不同添加比例下均优于参考土壤, B 组和 C 组的根长虽低于参考土样,但高于市购营养土。

2) 人工土壤的综合评价。如表 6 所示为不同人工土壤标准化后指标及综合评价系数。从表中可以看出人工土壤中污泥+菌菇渣堆肥产物添加量为 30% (A30%) 和污泥+菌菇渣堆肥产物添加量为

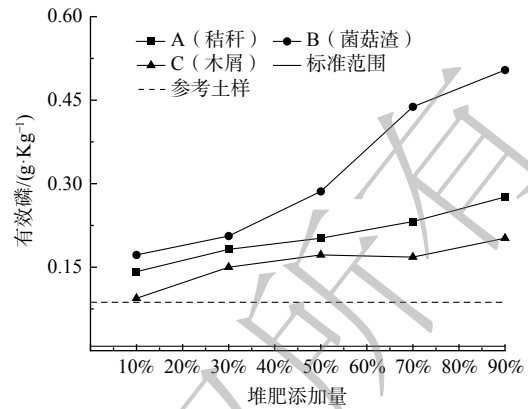
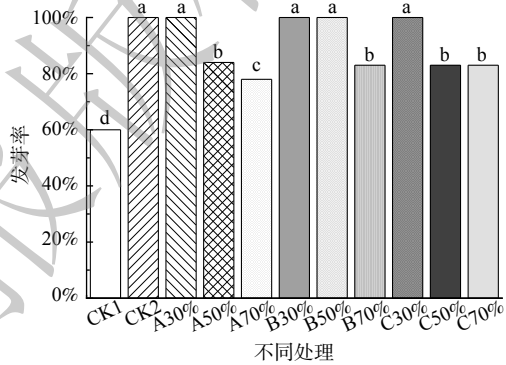


图 8 不同人工土壤中有效磷的变化

Fig. 8 Changes in available phosphorous in different artificial soils



注: 不同字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 9 不同人工土壤中小白菜发芽率的变化

Fig. 9 Changes in the germination rate of chard in different artificial soils

表 5 不同人工土壤中小白菜株高和根长的变化

Table 5 Changes in height and root length of chard plants in different artificial soils

种类	添加比例	株高	根长
A	30%	5.36±1.16a	4.94±0.72ab
	50%	4.78±1.27abc	5.46±2.83a
	70%	4.92±0.91ab	5.54±0.99a
B	30%	2.68±0.88d	2.96±1.04bc
	50%	3.12±0.98d	2.84±0.98c
	70%	3.48±0.45bcd	4.6±1.57abc
C	30%	3.7±0.89bcd	2.82±0.72c
	50%	3.3±1.18cd	3.54±0.9abc
	70%	3.6±0.71bcd	3.46±1.76abc
CK1	100%	2.58±0.56d	2.83±0.17c
CK2	100%	4.94±0.83ab	4.8±0.33abc

注: 不同字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表 6 不同人工土壤标准化后指标及综合评价系数

Table 6 Indicators and combined evaluation coefficients after standardisation of different artificial soils

样品	pH	EC	有机质	有效磷	肥力平均值	土壤综合肥力	排名
A10%	2.1	1.7	3	3	2.45	1.58	9
A30%	2.54	3	3	3	2.89	2.04	5
A50%	2.98	3	3	3	3	2.24	2
A70%	3	0.9	3	3	2.48	1.32	12
A90%	3	0.16	3	3	2.29	1.22	13
B10%	2.3	1.72	3	3	2.51	1.61	8
B30%	3	3	3	3	3	2.25	1
B50%	3	3	3	3	3	2.25	1
B70%	3	0.86	3	3	2.47	1.38	11
B90%	3	0	3	3	2.25	1.19	14
C10%	1.84	1.37	3	3	2.30	1.42	10
C30%	1.88	2.1	3	3	2.50	1.66	7
C50%	2.46	3	3	3	2.87	2	6
C70%	2.82	3	3	3	2.96	2.17	3
C90%	3	3	3	3	3	2.25	1
CK2	2.8	3	3	3	2.95	2.16	4

50% (B50%)，以及污泥+木屑堆肥产物添加量为 90% (C90%) 配制而成的人工土壤综合肥力系数最高为 2.25。污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 50% (A50%)、污泥+菌菇渣堆肥产物添加量为 30% 和 50% (B30%、B50%)、污泥+木屑堆肥产物添加量为 90% (C90%) 时肥力平均值最高。根据土壤综合肥力系数，污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 70%、余泥渣土添加量为 30% 和污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 90%、余泥渣土添加量为 10% 的人工土壤属于肥力中等土壤，而其余人工土壤以及参考土壤均属于肥沃土壤。在实际应用种植时应选择合适的堆肥产物和余泥渣土添加量，使得人工土壤的综合肥力达到最优。

### 3 结论

1) 玉米秸秆、菌菇渣、木屑 3 种辅料均可使污泥堆肥在经过 30 d 好氧堆肥时满足腐熟要求，堆肥过程中种子发芽指数符合国家相关标准要求。

2) 以污水污泥、菌菇渣、玉米秸秆、木屑、余泥渣土为原料制备人工土壤，经堆肥后的人工土壤除污泥+木屑堆肥产物添加量为 10%、余泥渣土添加量为 90% 的人工土壤外，其余人工土壤 pH 均满足《绿化用有机基质》要求；堆肥产物添加量为 30%、50%、70% 的人工土壤均符合《绿化用有机基质》中电导率 EC 的要求，有机质、总氮、有效磷含量均远高于《绿化人工土壤》要求。

3) 人工土壤种植应用时，添加污泥+玉米秸秆堆肥的人工土壤种植效果最好，污泥+木屑堆肥次之，污泥+菌菇渣堆肥效果最差。考虑理化性质、植物生长及土壤综合肥力，人工土壤不同添加量中，污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 30%、余泥渣土添加量为 70% 和污泥+玉米秸秆堆肥产物添加量为 50%、余泥渣土添加量为 50% 是本研究中最优质的人工土壤。

### 参考文献

- [1] 白莉萍, 伏亚萍. 城市污泥应用于陆地生态系统研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 416-426.
- [2] 严爱兰, 李军, 马挺, 等. 自来水厂与污水厂污泥联合处理处置研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 30-34.
- [3] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 57(3): 1-5.
- [4] 徐智明, 汪帅马. 江西省城镇污泥处理处置现状及建议[J]. 能源研究与管理, 2021(3): 104-108.

- [5] 刘燕, 马若男, 李国学, 等. 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 202-209.
- [6] 陈俊, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥好氧发酵处理技术现状与对策[J]. 中国给水排水, 2012, 28(11): 105-108.
- [7] 姜明吉. 浅谈城市污水处理厂污泥处理技术现状[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 8-12+161.
- [8] 李思文, 王毅, 李师. 国外余泥渣土的处置方法及其借鉴作用[J]. 中国土地, 2020(12): 44-46.
- [9] 周谷城. 基于荆江河段粘性弃土固化利用的土体特性研究[J]. 现代交通技术, 2016, 13(4): 73-76.
- [10] 姚粉霞, 陈贵屏, 胡伟, 等. 利用不同有机和无机固体废物配制人工土壤的研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 8-13.
- [11] ZOCCHÉ J J, SEHN L M, PILLON J G, et al. Technosols in coal mining areas: Viability of combined use of agro-industry waste and synthetic gypsum in the restoration of areas degraded[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2023: 100618.
- [12] 住房和城乡建设部 环境保护部 科技部关于印发《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2009(21): 30-33.
- [13] 鲍仕旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 汪震, 艾为党, 田凯勋, 等. 通风对微小型密闭好氧堆肥过程的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3374-3382.
- [15] 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.
- [16] 毛红祥, 桂素萍, 肖植特. AA3型连续流动分析仪测定有机肥料全氮含量[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 116-119.
- [17] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7-2014[S]. 北京: 农业出版社, 2014.
- [18] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY/T 525-2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [19] 方海兰, 徐忠, 张浪, 等. 园林绿化土壤质量标准及应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 53-55.
- [20] 张隗利, 刘青, 徐智, 等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. 环境工程学报, 2008(2): 266-269.
- [21] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 等. 不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度[J]. 环境科学, 2001(3): 60-65.
- [22] ZUCCONI F., PERA A., FORTE M., et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. BioCycle(USA), 1981, 22(2): 54-57.
- [23] 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.
- [24] 徐秋桐, 孔樟良, 章明奎. 不同有机废弃物改良新复垦耕地的综合评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 567-576.
- [25] 谢细竹, 宋书巧, 陈冠海. 市政污泥好氧堆肥研究进展[J]. 大众科技, 2022, 24(10): 40-44.
- [26] 周继豪, 沈小东, 张平, 等. 基于好氧堆肥的有机固体废物资源化研究进展[J]. 化学与生物工程, 2017, 34(2): 13-18.
- [27] 曹秀芹, 刘超磊, 朱开金, 等. 微生物菌剂强化餐厨垃圾和污泥联合堆肥[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 576-583.
- [28] 王琳. 不同配比蘑菇渣和园林绿化废弃物共堆肥效果研究与应用[D]. 北京林业大学, 2020.
- [29] CHUKWUDI O O, VICTOR C I, VJOYCE N O, et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190: 140-157.
- [30] 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.
- [31] 魏自民, 席北斗, 赵越, 等. 城市生活垃圾外源微生物堆肥对有机酸变化及堆肥腐熟度的影响[J]. 环境科学, 2006(2): 376-380.
- [32] 邱家洲. 污泥堆肥施加对土壤—植物生长系统影响研究[D]. 同济大学, 2006.

(责任编辑: 金曙光)

## Analysis and evaluation of physical and chemical properties of the artificial soil based on sludge compost products and sludge mud residue

WANG Min<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Zhaole<sup>2</sup>, WANG Minhui<sup>2</sup>, LIU Jiawei<sup>2</sup>, HAN Na<sup>2</sup>, CHENG Wen<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

\*Corresponding author, E-mail: wangmin@xaut.edu.cn

**Abstract** In order to realize the synergetic treatment and resource utilization of sewage sludge and mud residue, this study prepared the artificial soil by "two-step method", and investigated the effect of different ratio conditions on the physical and chemical properties of the artificial soil. The aerobic composting was carried out with sewage sludge mixing with three different auxiliary materials (corn stalk, mushroom residue and wood chips) and the results showed that the maturity and heavy metal content after composting were in line with relevant national standards. The artificial soil was prepared by sludge composting and sludge residue, and its physical and chemical properties were similar to those of natural soil. The added amount of compost can significantly affect the water-stable agglomerates, pH value, electrical conductivity, organic matter, total nitrogen and available phosphorus of the artificial soil. In the application of artificial soil planting, the compost planting effect of corn stalk+sludge was the best. The improved Nemerow comprehensive index method was used for comprehensive evaluation. After comprehensive consideration, sludge+corn stalk compost product addition of 30%, residual sludge residue content of 70% and sludge+corn straw compost product addition of 50%, residual mud residue addition of 50% are the best artificial soil, followed by sludge+wood chips compost, sludge+mushroom residue compost effect is the worst.

**Keywords** sludge; compost; added ratio; artificial soil; physical and chemical property