



孙玉鑫,常瑞雪,李季,李彦明. 园林绿化垃圾堆肥化处理的优化策略研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(03): 63-78.

SUN Yuxin, CHANG Ruixue, LI Ji, LI Yanming. Study on the optimization strategies for green waste composting treatment[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(03): 63-78.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.06

园林绿化垃圾堆肥化处理的优化策略研究

孙玉鑫^{1,2} 常瑞雪^{1,2} 李季^{1,2} 李彦明^{1,2*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州), 江苏 苏州 215100)

摘要 为探究园林绿化垃圾堆肥促腐减排的优化策略,以中国学术期刊网络出版总库(CNKI)和 Web of Science 核心合集数据库为研究基础,对园林绿化垃圾堆肥的相关文献进行梳理和总结,探讨了园林绿化垃圾的时空特征、理化特性及其堆肥技术面临的挑战,并从园林绿化垃圾的预处理方法、堆肥物料营养结构调控、堆肥菌群功能调控及堆肥工程工艺参数优化等方面,综述了园林绿化垃圾堆肥增效促腐与提质减排的优化策略。结果表明:园林绿化垃圾堆肥时,应根据原料特性、操作成本和堆肥应用场景等因素选用合适的预处理手段或物料调配策略,接种特定功能微生物并优化微生物菌剂接种手段,合理选用堆肥工程工艺技术,以加快堆肥腐殖化进程,减少恶臭气体排放。为今后园林绿化垃圾高温好氧堆肥技术的创新提出了研发攻关方向,以期加快园林绿化垃圾快速降解技术的提升,为我国城市园林绿化垃圾处理和资源化利用试点建设提供支撑。

关键词 园林绿化垃圾; 堆肥; 优化策略; 微生物; 物料调配

中图分类号 X705

文章编号 1007-4333(2024)03-0063-16

文献标志码 A

Study on the optimization strategies for green waste composting treatment

SUN Yuxin^{1,2}, CHANG Ruixue^{1,2}, LI Ji^{1,2}, LI Yanming^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Organic Recycling Research Institute (Suzhou), China Agricultural University, Suzhou 215100, China)

Abstract Composting is one of the important ways to promote the construction of the technical system of harmless treatment and recycling of urban green waste. In order to explore the optimization strategies for promoting decay and reducing emission of green waste composting, based on CNKI and Web of Science Core Database, the literature related to green waste composting was sorted and summarized. The spatial and temporal characteristics, physical and chemical properties of green waste and the challenges of composting technology were discussed. Meanwhile, from the aspects of pretreatment method of green waste, nutrient structure of compost materials, regulation of bacterial community function and optimization of compost engineering parameters, the optimization strategies of green waste composting were summarized. The results showed that: Suitable pretreatment methods or material allocation strategies should be selected according to multiple factors such as raw material characteristics, operating cost and composting application scenarios. It is necessary to inoculate specific functional microorganisms and optimize microbial inoculant methods with reasonable selections of composting engineering technology to

收稿日期: 2023-08-08

基金项目: 北京市设施蔬菜创新团队项目(BAIC01-2023); 中国农业大学教授工作站(No. 20210505)

第一作者: 孙玉鑫(ORCID:0009-0001-7856-6923), 硕士研究生, E-mail: 1476342271@qq.com

通讯作者: 李彦明(ORCID:0000-0002-3438-7923), 副教授, 主要从事废弃物处理与资源化研究, E-mail: liym@cau.edu.cn

promote compost humification process and reduce odor gas emission. In order to accelerate the rapid degradation technology of green waste, and provide support for the pilot construction of urban green waste treatment and resource utilization, the research direction of high temperature aerobic composting technology for green waste is proposed in the end.

Keywords green waste; composting; optimization strategies; microorganism; material recombination

随着我国城市化进程持续推进,园林绿化事业随之快速发展,2021年城市园林绿地面积达到347.98万 hm^2 ,城市建成区绿化覆盖率为42.42%^[1]。城市园林绿化垃圾年均产率为1.0~1.5 kg/m^2 ,据此估算,2021年其产生总量为2492.5万~4413.75万 t ^[2]。据报道,目前我国城市园林绿化垃圾的资源化率普遍低于30%^[3]。为此,国家住房和城乡建设部办公厅于2022年11月7日发布了《关于开展城市园林绿化垃圾处理和资源化利用试点工作的通知》(建办城函[2022]367号),该文件明确对园林绿化垃圾进行了定义,即指自然凋落产生的植物残体,以及人工管理过程中产生的绿化修剪物,主要包括树皮、树枝、树叶、草屑和花卉等园林材料;并明确提出开展城市园林绿化垃圾处理和资源化利用试点的决策,探索建立城市园林绿化垃圾处理和资源化利用体系,切实改善城市生态和人居环境^[4]。

园林绿化垃圾的传统处理处置方法为填埋或焚烧,因传统处理易造成渗滤液、恶臭等二次污染问题,因此,欧美发达国家于20世纪80年代推行禁止园林绿化垃圾焚烧和填埋的政策。美国主推园林绿化垃圾堆肥化,处理率已达60%以上;英国、日本等国家也分别通过制定严格的法律法规,大力发展堆肥相关的机械制造,并结合机械化生产的理念建立堆肥工厂等方式推进园林绿化垃圾资源化处理的进程^[5-7]。我国园林绿化垃圾的资源化利用及相关研究起步较晚,建设部于2007年出台了《关于建设节约型城市园林绿化的意见》(建城[2007]215号),提出通过堆肥等方式处理修剪的树枝,减少占用垃圾填埋库容,实现循环利用的意见^[8]。

堆肥技术是一种简便可靠的回收处理和利用园林绿化垃圾的途径,兼具良好的经济环境效益^[9]。其技术原理是在人工控制条件下,利用多种微生物的协同代谢作用,将有机固废中可生物降解的不稳定组分转化为稳定腐殖质的生物化学过程^[10]。园林绿化垃圾富含营养物质、木质素、纤维素和半纤维素等,有机部分降解难度较大,堆肥周期长^[6]。同

时,由于其具有组成成分复杂、分布范围广泛、易受季节影响、运输管理成本高、再生能力优越和利用方式多样等特点^[4],若处理处置不当,会造成火灾和环境污染等问题,在堆肥过程中也会排放大量的污染气体^[11]。已有研究探索了园林绿化垃圾堆肥化处理的优化策略与途径,可通过堆肥物料预处理、添加外源调理剂、优化堆肥工艺等方面来提升园林绿化垃圾堆肥的效率和产物品质,改善堆肥中的臭气污染问题^[12]。

目前已有研究侧重于园林绿化垃圾堆肥的技术攻坚,对园林绿化垃圾堆肥促腐减排的相关方法策略和工艺技术缺乏系统性的梳理。因此,为进一步探究园林绿化垃圾堆肥的促腐减排优化策略,本研究拟以中国学术期刊网络出版总库(CNKI)和Web of Science核心合集为研究对象,梳理总结园林绿化垃圾及园林绿化垃圾堆肥相关文献,探究园林绿化垃圾的产生及其特点、堆肥面临的挑战,重点从园林物料预处理、堆肥物料营养结构调控、堆肥菌群功能调控和堆肥工程工艺优化4个方面展开综述。以期从促进物料快速腐熟、减排污染气体和提升堆肥品质等方面,为园林绿化垃圾快速好氧生物转化工艺构建和技术升级提供指导,促进我国城市园林绿化垃圾处理和资源化利用体系建设提供支撑,推动“无废城市”和“双碳”发展目标落实,对全面贯彻生态文明和美丽中国发展战略具有重要意义。

1 园林绿化垃圾的产生与特点

园林绿化垃圾的产生具有季节性、周期性等特点。不同季节产生的种类不同,北方秋季的园林绿化垃圾产生数量最多,春夏适中,冬季最少。且秋季园林绿化垃圾以落叶为主,春夏时节则以草屑最多,冬季草屑产生量少^[13]。另外,园林绿化垃圾的产生也具有一定的空间性,即存在经纬度和场景性的差异,如南北方的地域差异,以及社区、公园和道路等的场景差异。园林绿化垃圾具有量大面广的特征,产生相对分散,收集难度大,运输成本高,就

地处理利用技术缺乏^[14]。

园林绿化垃圾中约65%为修剪草,其他为乔木、灌木、绿篱等产生的凋落及养护废弃物^[15]。研究资料显示,园林绿化垃圾中包括有机酸、醇、糖和木质纤维素等物质,其中有机酸的含量为29.0%~56.2%、醇类为10.0%~25.8%、糖类为13.7%~16.1%,木质纤维素含量可高达75%(木质素为10%~30%;纤维素为30%~40%;半纤维素为20%~30%)^[16-17]。园林绿化垃圾中木质纤维素的结构关系及各组分的组成单元如图1所示。可见:木质素是一种具有极强刚性的酚聚合物,主要由松柏醇、芥子醇、对-香豆醇3种结构单元构成,其内部的苯丙烷官能团之间通过3种键型(碳碳键、醚键和酯键)连接成三维网状结构,致使其性质稳定,难以降解^[18-19]。纤维素是由微纤维构成的长链聚合物,包括高度有序的晶体结构和无序的无定形区域两部分,其内部纤维的微观结构主要借助范德华力、氢键和共价键的作用连接^[20]。纤维素是支撑植物细胞壁的主要骨架,被半纤维素和木质素通过物理结构和化学作用包裹在木质纤维素复合物的内层,被破坏的难度较大。半纤维素是木质纤维素结构中最易降解的部分,通常由不同类型的2种或2种以上单糖组成,主要包括五碳糖和六碳糖^[18,21]。园林绿化垃圾属于富碳物质,有机碳含量为46.8%~76.1%,木本类园林的有机碳含量高于草本类约20%,且C/N的差异大^[17,22];其氮、磷、钾等营养元素的含量偏低,其中全氮含量为0.40%~1.18%,全磷为0.11%~0.59%,全钾为0.61%~1.71%^[2]。

园林绿化垃圾包括草本和木本2类。草屑和落叶虽类别不同,但性质相近,均富含糖类和纤维素,木质素含量较少,而树枝中木质素和纤维素含量较高。从木质素的含量来看,木本的含量较高为20%~35%,而草本为15%~25%^[21]。不同类园林的木质素结构单元也存在差异,其中针叶类由愈创木基丙烷单元构成,阔叶类由愈创木基丙烷和紫丁香基丙烷2个单元构成,草本类则是由愈创木基丙烷、紫丁香基丙烷和对羟基苯丙烷3个单元组成^[23]。园林绿化垃圾的组分差异也较大,在含水量方面,新鲜树叶和修剪草的含水量可高达90%,落叶的含水量偏低,约为6%~60%,干草的含水量可低至10%左右,树枝中含水量也较低;在C/N方面,新鲜草屑的C/N为10.0~18.0,而枯枝则为56.5^[22]。再

者,同种园林绿化垃圾的组成结构也略有不同。以树枝为例,软木中木质素、纤维素、半纤维素分别为28%、41%、24%,硬木中则分别为20%、39%、35%,而废弃的树枝中纤维素、木质素的含量大约为40%、25%^[24-25]。

2 园林绿化垃圾堆肥面临的挑战

与发达国家相比,我国城市园林绿化垃圾处理利用的相关能力建设严重滞后,科技储备严重不足。进入21世纪以来,我国虽然不断加大园林绿化垃圾处理利用相关领域的资源投入,但仍处于初级起步阶段。目前园林绿化垃圾尚未纳入《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》^[26]的管理范畴,许多城市也未设置专门的处理场所,以北京、深圳为例,其对园林绿化垃圾的处理成效和资源化利用率均低于30%^[27-30]。

园林绿化垃圾是优质的堆肥原料,借助堆肥技术可实现其减量化、无害化、资源化,获得优质的有机肥料,用于城市绿地的土壤改良和化肥替代;与填埋相比,堆肥处理可增加每吨85元的经济效益;与焚烧相比,其可减排230 kg/t的CO₂^[22,31-32]。但堆肥技术也面临着园林绿化垃圾种类繁多、时空变异大和堆肥发酵周期长等重大挑战。现有堆肥技术主要聚焦于多元物料协同发酵,缺乏适用于单一园林绿化垃圾的快速堆肥技术;通常单一原料的营养结构较差,会影响功能微生物菌群的正常生长代谢,这也会增加其自发单独腐熟的难度^[22];园林绿化垃圾难免掺杂携带一些抗生素、病原菌、重金属、塑料制品等风险污染物,其堆肥产物也存在不确定的环境风险^[33];另外,若园林绿化垃圾堆肥过程管理不善,会排放大量的温室气体和恶臭气体,威胁环境安全和人类健康,并加剧全球变暖趋势。综上,园林绿化垃圾堆肥具有较强的资源化利用潜力,但在促腐增效、绿色低碳和减排提质等方面也面临着诸多挑战。

3 园林绿化垃圾预处理

针对园林绿化垃圾等木质纤维素生物质废弃物难降解的特点,堆肥前可采用预处理来调控,主要包括物理法、化学法、生物化学法和物理化学法等^[33-36],详见表1。通过对堆肥原料的预处理,可以改善物料的理化性质,破坏园林绿化垃圾中木质纤

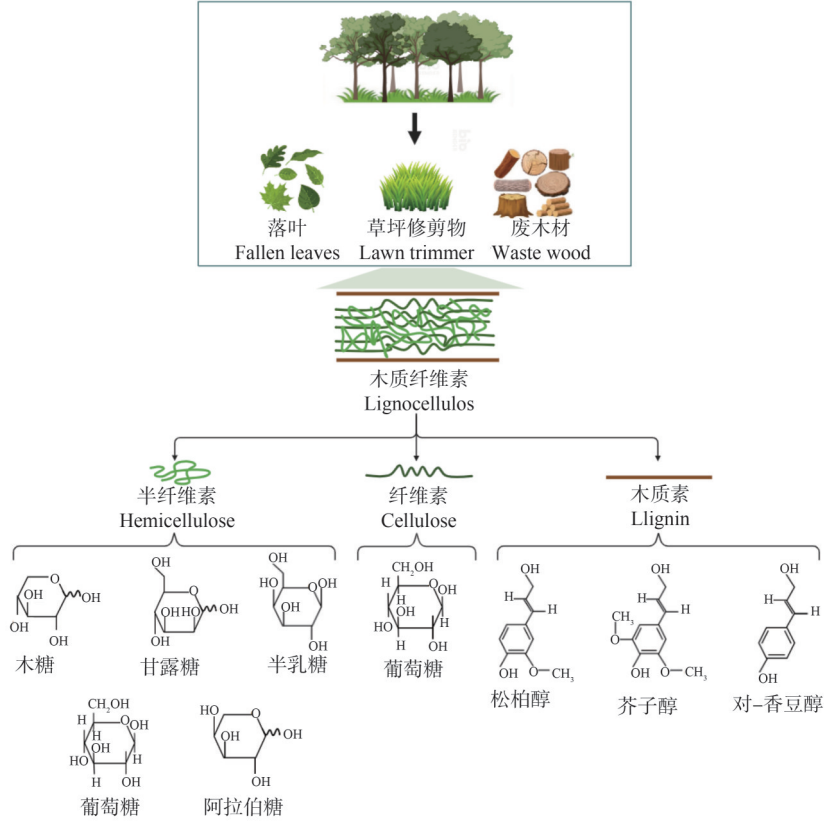


图1 园林绿化垃圾中木质纤维素的结构组成

Fig. 1 Composition and structure of lignocellulose in green waste

纤维素之间的稳定结构,促进半纤维素的部分水解及纤维素的表面氧化,从而提高物料的可生物降解性。

3.1 物理法

破坏园林绿化垃圾中木质纤维素结构的物理法主要包括机械操作(如切割、粉碎、研磨、挤压)、微波预处理、超声预处理等方式^[34]。通过物理法可增加木质纤维素的表面积和孔隙度,从而促进微生物的附着以及有机物自身的酶解^[35]。稻草经热压缩水处理后,可使产物中葡萄糖和木糖的产率提高到70.3%和88.6%^[37]。Yoo等^[38]研究发现大豆壳经挤压预处理可促进其中纤维素的转化,使大豆壳的酶解葡萄糖产率提高132.2%,但该方法容易产生发酵抑制剂。在运用机械手段操作时,还会添加一些添加剂如酸、碱、有机溶剂和矿物,对设备具有一定的腐蚀作用,也增加了操作成本^[36]。Qu等^[39]将小麦秸秆磨碎成不同粒径(<1.00 mm、<0.50 mm和超细粉末)后用NaOH溶液对其进行浸泡处理,其中超细粉末可使弱碱处理物料中的半纤维素和

木质素降解率达到93.76%和86.14%。物理法虽操作简单,但能耗较大,且处理效果不佳。

3.2 化学法

常用的化学法主要包括酸热预处理、碱预处理、氧化预处理等方式,以破坏木质素和半纤维素等的稳定结构,增大废弃物的比表面积和功能酶的可及性。Nair等^[40]研究发现,经100℃稀硫酸和磷酸预处理的麦麸在酶水解后,葡萄糖产率可达到82%~94%。与生物法相比,经碱法处理的餐厨垃圾的厌氧消化产气量降低了17.8%,且该法可避免“酸化”现象出现^[41]。Yoo等^[38]指出,与挤压预处理等物理法相比,酸热预处理和碱预处理的效果也具有一定的局限性。酸碱预处理的作用条件比较激烈,且后续需要调节pH,容易产生抑制性副产物,不利于堆肥发酵^[40,42]。氧化法对处理设备具有腐蚀性,且耗能较大,但其中的芬顿法通过高度破坏性的羟基自由基氧化攻击木质纤维素的顽固结构,进而提高功能酶对纤维素和半纤维素的降解,具有环境友好,作用条件温和等优势^[43]。Wu等^[43]发现,稻

表 1 木质纤维素预处理手段
Table 1 Lignocellulosic pretreatment methods

方法 Method	分类 Classification	优点 Advantage	缺点 Shortcoming
物理法 Physical method	机械处理(如切割、粉碎、研磨、挤压)	环境友好,易于控制,操作简单	
	微波预处理	缩短木质纤维生物质的加热时间	能耗较大,处理效果较差,成本较高
	超声预处理	对于木质纤维素的破坏程度较高	
化学法 Chemical method	酸热预处理		
	碱预处理	对木质素,纤维素和半纤维素具有较 高的去除率,处理效果好	容易产生抑制性的副产物,腐蚀反应 容器,回收难度大,成本高
	氧化预处理		
生物化学法 Biochemical method	微生物预处理	作用条件较温和,环境友好,不会产生 抑制性的副产物,能耗低	处理时间较长,处理效果不佳,微生物 培养和生长等的要求较严格
	酶解预处理		
物理化学法 Physicochemical method	蒸汽爆破预处理	对木质纤维素类物质的去除效果较 好,能耗低,环境污染水平低	物料损失较大,无法彻底去除木质素
	水热预处理	产生的抑制性副产物浓度较低,对设 备的影响小	能耗较大,反应控制难度大,对于木质 纤维素类物质的去除效果较差

草经芬顿预处理后进行堆肥,促进了有机物的快速降解转化,使有机质和碳纤维分别下降 16.46% 和 37.27%。综上,化学预处理的方法所受限制因素众多,普适化程度不高。

3.3 生物化学法

生物化学法主要包括微生物预处理、酶解预处理等^[33]。目前已经发现的用于微生物预处理的功能菌株能够产生一些分解木质素和纤维素的酶,如木质素过氧化氢酶、多酚氧化酶、漆酶等^[44]。稻草经嗜热真菌预处理后,木质素的降解活性显著增加,稻草酶水解后的糖化率可提高 54% 以上^[45]。同样,Hermosilla 等^[46]研究了白腐真菌和褐腐真菌对小麦秸秆预处理的接种方式,与未经接种的对照处理相比,连续接种的方式可使葡萄糖产量提高 43.6%,比单次接种处理的产量高 140%~150%。酶解预处理主要是运用辅助性的酶如木聚糖酶或木质素降解酶促进木质纤维素的降解^[35]。Lou 等^[47]利用木聚糖酶和漆酶制备的固定化酶来预处理玉米秸秆,使玉米秸秆表面结构变得疏松,木质素和半纤维素部分降解。但对于工业环节来说,生物预处理的速度过于缓慢,时效性差,且需要严格控制微生物的生长环境,一般将生物化学法作为预处理的第一步,与其他预处理方式联合使用。

3.4 物理化学法

物理化学法主要包括蒸汽爆破预处理、水热预处理等。蒸汽爆破预处理利用蒸汽的冲击力量破坏木质纤维素的结构,包括高压水解和减压 2 个阶段,能耗较低,但是存在容易生成发酵抑制剂、木质素-碳水化合物基质降解不彻底等问题^[34,48]。Zhou 等^[48]运用蒸汽爆破预处理的方法处理玉米秸秆,当预处理条件为 200 ℃/120 s 时,纤维素和半纤维素的降解率高达 53.46% 和 49.54%,比对照增加了 13.72% 和 16.79%。水热预处理是在高温和高压同时存在的条件下,使水保持液态,借助水合氢离子促进木质纤维素降解的过程。水热预处理可打破木质纤维素的屏障,有助于半纤维素解聚,并借助空间位阻效应增强纤维素的可及性,相较其他方法而言,产生的抑制性副产物较少^[39,49]。Nakhshiniev 等^[50]发现,稻草经水热预处理(180 ℃,1.0 MPa)后,可加速堆肥进程,缩短堆肥腐熟周期。小麦秸秆在 160 ℃及 90 min 的水热预处理条件下,木质纤维素的降解效果最好^[51]。还有学者研究了玉米秸秆在两阶段水热预处理中的最佳反应条件,经两阶段预处理和 72 h 酶解后,葡萄糖产率高达 89.55%,总糖的产量可增加 7.80%^[52]。综上,不同物理化学预处理法之间存在较大差异,对于木质纤维素的降解效果有待进一步提升。

4 园林绿化垃圾堆肥物料营养结构调控

由于园林绿化垃圾富含木质纤维素类物质且营养结构较为单一,单独堆肥的降解难度大。堆肥时通过添加不同功能的调理剂、与其他物料协同发酵等措施,优化堆肥物料的营养结构,缩短堆肥周期,提高堆肥腐殖化进程。

4.1 添加调理剂

堆肥过程中添加的调理剂主要为营养丰富的有机或无机类材料,以调控堆体物料的营养结构、pH等,满足微生物生长需要,包括营养型调理剂、多孔型调理剂、酸碱调理剂等^[53]。不同外源调理剂对堆肥过程的影响,详见表2。目前在堆肥处理中常用的是营养型调理剂。

营养型调理剂可以为堆肥微生物提供所需的碳源和氮源,以加速其繁殖和生长,从而促进园林绿化垃圾中木质纤维素的降解转化,还可以改善园林绿化垃圾中磷素营养不足的特点,此类调理剂主要有葡萄糖、蔗糖、红糖、尿素、过磷酸钙等^[54]。Li等^[53]发现在园林绿化垃圾中添加10%生物炭、20%豆渣、15%茶渣时,可使纤维素和半纤维素的降解率分别提高24.19%和25.19%。Zhang等^[55-56]将咖啡渣与牛粪添加到园林绿化垃圾堆肥中,使木质素、纤维素、半纤维素的降解效率分别提高了36.07%、56.86%、40.35%,将堆肥腐熟周期缩短至21 d;还发现同时添加25%的甜菜渣和10%的废纸也能加速园林绿化垃圾中木质纤维素的高效降解,可将堆肥腐熟周期缩短至20 d以内。Wang等^[57]发现在园林绿化垃圾堆肥中添加蛋壳渣,能提高脱氢酶、蛋白酶、纤维素酶和木质素过氧化物酶等的活性,木质纤维素被蛋壳渣中的亲水性物质吸附后,更易被酶分解,并获得了更高的HA/FA比率;蛋壳渣和稻壳均可以有效促进堆肥腐熟^[58]。

多孔型调理剂具有比表面积较大,且疏松多孔的特点,可在堆体内构筑良好的通气路径,增加堆体物料与微生物的接触几率,从而加大对营养物质、水分的吸附和木质纤维素的降解,主要有生物炭、麦饭石、膨润土、天然沸石等^[54]。Wang等^[59]发现在堆肥中添加生物炭和沸石可显著提高堆肥产物的种子发芽率,促进有机质的腐殖化,减少氮素的损失,与对照相比,可使氨气减排63.40%。酸碱

调理剂主要用来调节堆肥原料的pH,有醋酸钠、竹酢液、木酢液、青贮料等。Zhang等^[60]将废石灰作为园林绿化垃圾和中草药残渣堆肥的添加剂,发现HA/FA比率从1.32增加到2.49,半纤维素、纤维素降解率分别提高了45%、41%。与上述3种调理剂相比,表面活性剂在堆肥中的应用主要为实验室规模的研究,包括鼠李糖脂、烷基糖苷等。

综上,在园林绿化垃圾堆肥实践中应秉承以废治废的理念,通过选择合适的调理剂,推动城市社区、公园等园林绿化垃圾产生场景的就地堆肥处理,加快腐熟,提升堆肥产品质量,实现源头资源化减量。在堆肥中直接添加调理剂的措施操作简单,促腐效果明显。但是,调理剂的选择需要结合材料特性、作用效果、成本费用和堆肥实际情景等多因素进行分析。

4.2 多元物料协同发酵

4.2.1 与厨余垃圾协同堆肥

城市社区在产生园林绿化垃圾的同时也会产生大量的厨余垃圾。园林绿化垃圾属于富碳可堆肥原料,C/N相对较高;厨余垃圾属于高含水且低C/N的富氮可堆肥原料。将园林绿化垃圾与厨余垃圾协同堆肥发酵,既可实现二者的营养结构互补,又可促进社区有机废弃物的就地资源化利用,以及城市垃圾的源头减量。由于在城市社区中产生的废弃物不会立即被处理掉,为此Oviedo-Ocaña等^[65]模拟现实场景,在环境温度下将园林绿化垃圾在1个开放空间中储存2周,将加工过的厨余垃圾在有盖容器内储存1 d,未加工过的厨余垃圾储存3 d;将园林绿化垃圾与加工过、未加工过的厨余垃圾按不同比例混合,与不添加厨余垃圾的对照相比,添加厨余垃圾可使堆肥周期明显缩短至少10 d,当三者质量比例为5:3:2时,堆体高温期持续时间可延长4 d以上。Neugebauer等^[66]研究发现,在园林绿化垃圾中投加40%~50%的厨余垃圾,可以获得最高的累积温度和最低的氨排放量。将园林绿化垃圾与厨余垃圾按照91.4%和8.6%的比例进行堆肥发酵,可使NH₃的排放量明显降低^[67]。因此,厨余垃圾和园林绿化垃圾属于同源有机固废,二者协同处理既可解决主辅料碳氮营养结构不匹配的难题,又可减排污染气体,获得优质的堆肥产品,促进就地有机循环链的建设。

表 2 不同外源调理剂对堆肥过程的影响
Table 2 Effects of different exogenous conditioner on composting process

类型 Type	调理剂 Conditioner	添加量/% Additive amount	功能酶 Functional enzyme	污染气体排放 Pollution gas discharge	参考 文献 Reference
营养型 Nutritional type	豆渣、茶渣、生物炭	20、15、10		减少碳损失和 CH ₄ 、CO ₂ 的排放	[53]
	咖啡渣、牛粪	45、20	增加物料吸附能力及对酶的可接触性	吸附 NH ₄ ⁺ -N, 减少 NH ₃ 排放	[55]
	甜菜渣、废纸	25、10	增加纤维素酶、蛋白酶、木质素过氧化物酶和多酚氧化酶的活性以及达到峰值的速度和峰值高度	使 NH ₃ 最高的排放速率下降至 1 g/(m ³ ·h)	[56]
酸碱型 Acid-base type	废石灰、中草药残渣	2.5、20		为固氮细菌生长提供适宜的条件, 减少 NH ₃ 的排放	[60]
	粉煤灰、醋渣	15、55	通过降低堆肥过程中的 C/N, 增加酶的产量和活性	粉煤灰强大的吸附能力, 明显减少 NH ₃ 的挥发, 有助于氮素保留	[61]
多孔型 Porous type	蛋壳渣、稻壳	10、25	蛋壳渣增加堆肥材料的孔隙率和表面积, 增加对酶的吸附	蛋壳渣比表面积大, 增加了 NH ₄ ⁺ -N 和 NH ₃ 的吸收率, 降低 NH ₃ 的产生和排放	[57]
	膨润土、海藻	35.0、4.5	膨润土具有多孔微结构和高表面积, 增加对酶的吸附, 提高酶的活性和稳定性	膨润土高吸附能力和大表面积可以吸附 NH ₃ , 有利于氮的同化, 减少 NH ₃ 和 N ₂ O 的挥发; 海藻富含微生物群落, 抑制反硝化作用, 从而减少 N ₂ O 排放	[62]
表面活性剂 Surfactant	鼠李糖脂	0.15	诱导酶合成或延长次级代谢产物的生成, 刺激酶的产生; 增加暴露于酶攻击的概率		[63]
	鼠李糖脂、吐温-80	0.15	促进微生物胞外酶从堆肥物料表面解吸, 增强酶的稳定性和纤维素酶的活性。		[64]

4.2.2 与畜禽粪便协同堆肥

与园林绿化垃圾相比, 畜禽粪便的含氮量和含水量均较高, 将二者协同堆肥, 恰好能够实现 2 种物料营养结构的优缺点互补。研究表明, 园林绿化垃圾与牛粪进行混合堆肥可延长高温期持时间, 与单独堆肥相比, 使堆体峰值温度提高 8℃^[68]。在此基础上, Zhang 等^[55]开展了园林绿化垃圾和“牛粪+咖啡渣”的联合堆肥研究, 当添加 20% 的牛粪和 45% 的咖啡渣时, 高温期持续时间长达 16 d, 所得堆肥产品的无害化程度和品质最佳。Santos 等^[69]研究了园林绿化垃圾与猪粪混合堆肥的效果, 与其他处理相

比, 该处理的堆体温度较高, 且 CO₂ 的排放量减少了约 14%。Chen 等^[70]将鸡粪、猪粪和羊粪作为园林绿化垃圾堆肥处理的氮源调理剂, 发现氮素损失减少 19%~25%, 促进有机质的腐殖化。畜禽粪便堆肥过程会排放大量的恶臭气体, 需要大量的结构和碳源调理剂, 因此可将城市公园、社区等场所产生的园林绿化垃圾运用于畜禽粪便的环境污染治理工程。

4.2.3 与城市污泥协同堆肥

污泥是与鸡粪的性质相近的一种富含微生物的生物固体, 具有含水量高、低 C/N 的特点, 且易携

带病原菌。将其作为辅料与园林绿化垃圾共堆肥,有助于有机物快速腐殖化和污泥中重金属的钝化,可获得用于园林绿化的土壤改良剂^[71]。有学者运用模糊综合评价法和灰色聚类法,研究了园林绿化垃圾添加量对污泥堆肥肥效的影响,发现随着添加量的增加,堆肥的土壤养分综合指数逐渐提高,甚至可高达165.14%;园林绿化垃圾添加量为40%时,堆肥产物的种子发芽指数高达91.3%,且堆体升温快,高温期长,能够加速堆肥腐熟^[72-73]。胡自航等^[74]研究也表明,二者的堆肥产物能够提高土壤的微生物活性和酶指数,改善土壤肥力质量。Si等^[75]发现,施用二者质量比为1:1的堆肥产物可改善桑树的根冠比,增加土壤总生物量33.5%,促进桑树对营养元素的吸收和生长,降低重金属有效性。但乔永等^[76]的研究发现,施用园林绿化垃圾与市政污泥共堆肥的产物会抑制桑树种子的萌发,这种抑制作用随着污泥所占比例减少而降低;污泥所占比例为25%的混合堆肥可提高桑树幼苗地下生物量约77%。园林绿化垃圾和市政污泥具有同源性,可以互为主辅料,二者协同处理可实现优势互补。但园林绿化垃圾的季节性和空间性特质,与污泥的恰好相反,所以堆肥实践中应提前做好场地规划和运输协调等工作,避免二者出现时空错位现象。

5 园林绿化垃圾堆肥菌群功能调控

堆肥过程是微生物驱动的生化过程,其代谢活动直接影响物质分解和转化的速率,且促进有机质、木质纤维素类物质的降解是实现堆肥快速腐熟的关键^[77]。堆肥微生物接种剂及其功能群落演替是当前的研究热点,接种微生物菌剂可加速堆肥发酵进程。目前,堆肥中已有的与木质纤维素类物质降解转化相关的功能微生物,见表3。

在实际应用方面,园林绿化垃圾中降解木质纤维素的微生物主要以真菌(白腐真菌、褐腐真菌和软腐真菌)为主。白腐菌通过分泌无色胞外氧化酶破坏木质素,而对纤维素的作用较小,最终使木头腐烂变为苍白海绵状^[78]。褐腐菌在降解初期对纤维素进行弥漫性的攻击,对木质素的降解作用较小。软腐菌大部分为子囊菌和半知菌,通常只能分解纤维素^[79];研究表明,部分软腐菌也能够产生木质素降解酶,但是降解效能较差,所需降解时间较长^[80]。白腐菌中的黄孢原毛平革菌具有繁殖能力

强的特点,可以分泌多种过氧化物酶将木质素矿质化为 CO_2 和 H_2O ,是目前已知的可高效降解木质素的关键功能菌^[78]。Gong等^[81]在园林绿化垃圾堆肥的第0天和第14天分别接种了白腐真菌云芝和黄孢原毛平革菌,发现2次接种菌剂可明显缩短堆肥腐熟时间,使木质素的降解效率分别提高了7.1%、8.2%,纤维素的降解效率分别提高了10.6%、13.6%。与云芝相比,黄孢原毛平革菌处理的堆肥周期缩短了2 d。与不接种菌剂相比,在稻草堆肥中接种黄孢原毛平革菌和长枝木霉,使木质素、纤维素和半纤维素的降解率分别提高6.45%、7.86%和8.87%,腐殖质和腐殖酸的含量也分别提高15.5%和23.6%^[82]。Oviedo-Ocaña等^[83]将芽孢杆菌和拟杆菌接种到堆肥混合物料中,与不接种相比,菌剂的接种使堆肥周期缩短10 d。综上,微生物通过分泌各种功能酶,加速对有机质的降解;且与单一菌剂相比,多种微生物之间的协同作用更能提升木质纤维素的降解率。

6 园林绿化垃圾堆肥工程工艺优化

基于园林绿化垃圾堆肥腐熟周期长, NH_3 、 H_2S 等恶臭气体排放等问题,通过调控堆肥过程工艺参数、外源菌剂接种方法、控制堆肥温度等措施,优化园林绿化垃圾堆肥的促腐控臭路径。

6.1 堆肥控臭工艺

堆肥过程容易排放氨气、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚等恶臭气体,且持续时间较长,其中排放量最大的是 NH_3 和 H_2S ,对全球变化和人类健康带来负面影响^[92-93]。堆肥中 NH_3 和 H_2S 的产生与转化过程如图2所示。 NH_3 排放主要发生在堆肥高温期,且高温期越长, NH_3 挥发量越大。木质纤维素降解的关键期也在堆肥高温期,通过延长高温期可以促进其降解,缩短堆肥周期。这就使得延长高温期的同时实现臭气减排成为全球关注的焦点^[94]。

目前研究主要聚焦于堆肥物料水分、堆体结构和通风方式,以及翻堆频率等工艺参数的调控对园林堆肥恶臭气体的减排作用,有研究关注外源物理、化学和生物添加剂对恶臭气体的控制。Zhang等^[95]和Xu等^[96]对堆肥过程曝气强度进行了优化研究。Zhang等^[95]发现 $0.2\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 曝气强度下减排臭气效果最佳,在低曝气强度 $0.1\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 下会造成堆体局部厌氧,加剧VSCs的排放,减排 NH_3 ;

表 3 堆肥中与木质纤维素降解相关的功能微生物

Table 3 Functional microorganisms associated with lignocellulosic degradation in compost

功能类型 Functional type	分类 Classification	主要菌株 Dominant strain	代表性微生物 Representative microorganism	特点 Characteristic	参考文献 Reference
木质素降解菌 Lignin degrading bacteria	真菌	白腐真菌、褐腐真菌、软腐真菌	黄孢原毛平革菌	无性繁殖迅速,分泌木质素降解酶,是研究木质素降解的模式菌	[84]
	细菌	不动杆菌属、黄杆菌属、微球菌属、黄单胞菌属、假单胞菌属等	假单胞菌、芽孢杆菌	在木质素降解的最后阶段起作用,只能降解木质素低分子量的部分和木质素的降解产物,对于木质素的降解率小于10%	[85]
	放线菌	链霉菌属、节杆菌属、高温放线菌属、小单胞菌属、诺卡氏菌属等	链霉菌	在细菌中的降解能力较强,可以增加木质素的水溶性,链霉菌对于木质素的降解率可以达20%	[25,85]
纤维素降解菌 Cellulose degrading bacteria	真菌	木霉属、曲霉属、毛霉菌属、青霉属、根霉属、枝顶孢霉属、漆斑霉属、脉孢霉属、毛壳霉属等	里氏木霉、康氏木霉、拟康氏木霉、长枝木霉、绿色木霉	可产生菌丝体、分生孢子和厚垣孢子3种繁殖体,生长繁殖较快,对环境的适应能力强	[84,86-89]
			黑曲霉、米曲霉	耐高温,生长周期短,产功能酶的种类较为丰富,产酶量大,酶活性高	
			拟青霉、斜卧青霉	分解蛋白质等复杂有机物,加速堆肥进程	
	细菌	纤维杆菌属、纤维素单胞菌属、假单胞菌属、纤维弧菌属、噬纤维菌属、生孢噬纤维菌属、多囊菌属、芽孢杆菌属、链球菌属等	毛霉	具有较强的蛋白质分解能力,促进堆肥腐熟	[90-91]
			纤维单胞菌	在自然条件下能产生多种与纤维素降解相关的酶类	
放线菌	单孢子菌属、高温放线菌属、纤维放线菌属、诺卡氏菌属、链霉菌属等	嗜热放线菌	嗜热放线菌比嗜热真菌更加耐热,在堆肥降温阶段也能保持一定的活性	[89]	

Xu 等^[96]发现在高曝气强度 0.48 L/(kg·min)下能够减排 19.0% 的 H₂S,同时还能促进腐殖质前体的大量生成。

堆肥中菌剂接种的生物处理手段也可以影响堆肥中的臭气排放情况,很多微生物如硫氧化细菌、氨同化细菌、厌氧粪臭素等均具有良好的除臭效果^[97]。Xu 等^[98]对菌剂接种方式展开研究,在园林绿化垃圾和厨余垃圾堆肥中采用菌剂多级接种

的方式,将嗜淀粉乳杆菌、嗜热芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌分别在堆肥的第 0、2、14 天接种,与不接种和单级接种菌剂相比,多级接种延长堆肥高温期,使 NH₃ 的累积排放量分别减少 176.5 和 138.9 g,有效改善堆肥高温期延长后的 NH₃ 排放问题。Sun 等^[99]对菌剂接种的次数展开研究,在樟树废弃物堆肥中分别接种嗜热淀粉芽胞杆菌 1 和 2 次,分别使 NH₃ 减排 37.6% 和 24.1%。此外,薛晶晶等^[100]采用熟

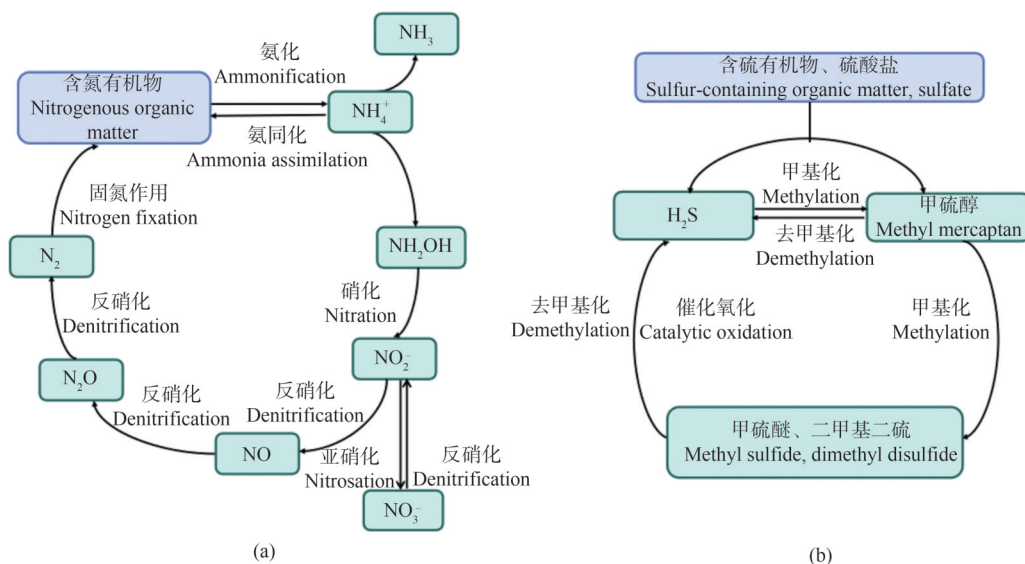


图2 堆肥中主要恶臭气体 NH_3 (a)和 H_2S (b)的产生与转化

Fig. 2 Production and transformation of main odor gases NH_3 (a) and H_2S (b) in compost

料回流的间接生物处理手段减缓臭气排放,将10%的腐熟堆肥以混合或覆盖的方式添加到厨余垃圾中,混合处理使得温室气体总量减排69.2%, NH_3 、 CH_4 和 N_2O 分别减少58.0%、44.8%和73.6%。

综上,通过调控堆肥工艺参数、优化菌剂接种方法均可以改善堆肥中的臭气排放问题。但是堆肥物料的不确定性和复杂性会使工艺参数优化结果相左,需要根据实际情况具体问题具体分析;且目前通过工艺参数调节的方式以实现园林堆肥臭气减排的研究较少,外源微生物菌剂的生物强化作用及其对恶臭气体的协同减排表现出明显的优势。

6.2 堆肥促腐工艺

6.2.1 堆肥过程管理

目前国内外均普遍采用传统堆肥的方式,整个堆肥过程包括升温期、高温期、降温期和腐熟期4个基本时期。双阶段堆肥则是划分为初级堆肥(PC)阶段和次级堆肥(SC)阶段,其中初级堆肥阶段到达降温期后,直接进入次级堆肥阶段,重新经历堆肥的4个时期,最终完成双阶段堆肥。堆肥过程中经历2次高温期,温度达到2个峰值(50~60℃),整个过程中延长的高温阶段可以缩短堆肥发酵进程,提高最终产品的质量^[56]。其中初级堆肥阶段仅包括传统堆肥的前3个时期,而次级堆肥阶段具备堆肥的4个时期。Zhang等^[101]在园林绿化垃圾堆肥中运用双阶段堆肥的方式,PC阶段中易降解的有机物质

在微生物的作用下得以分解,由于存在一部分未被降解或降解起来较为困难的有机物,SC阶段温度再次升高,且高温期的时间要普遍比PC长^[57]。经过双阶段堆肥的2次高温处理,有机物质降解速度加快,与传统堆肥相比,堆肥周期可缩短至20 d。但是有学者认为,传统堆肥与双阶段堆肥效果的差异并不显著。Oviedo-Ocaña等^[102]将园林绿化垃圾与厨余垃圾的传统堆肥与双阶段堆肥进行了对比,发现传统堆肥在升温期和高温期的有机物降解率更高,并且在这2个阶段中高温持续时间更长,木质素含量较低,但双阶段堆肥产物的N、P等营养成分含量较高。因此,仍需要对堆肥中的更多理化指标与特征进行分析对比,以探索最优解。

6.2.2 堆体温度调控

堆肥中的高温阶段是有机物质充分降解,微生物活动强烈的时期,堆肥过程中2/3的木质素在高温期得以降解^[102]。通过延长高温阶段的持续时间、提升高温期温度等方式来强化高温期的堆肥效果,可以有效的促进堆肥进程。传统堆肥工艺温度一般维持在50~70℃,存在堆肥周期长、物料腐殖化水平低等问题,而全程高温好氧堆肥、超高温堆肥技术等技术的开发能够有效改善这些问题。

全程高温堆肥技术是指在外加热源的条件下使堆肥温度保持在50℃以上。石文军等^[103]发现园林绿化垃圾与厨余垃圾在全程高温堆肥处理中的

微生物活性较高,在第16天时即能达到腐熟状态,与传统堆肥相比,堆肥周期明显缩短12 d。另外有学者在餐厨垃圾中接种耐高温菌剂进行全程高温堆肥,发现菌剂接种显著提高耐高温木质纤维素降解菌的多样性,而嗜中温木质纤维素降解菌的多样性并未受到抑制,多种微生物的协同作用促进木质纤维素的更快降解^[104]。因此,全程高温堆肥提高了堆肥效率,但也增加了堆肥成本,同时对于微生物的生存条件具有一定的筛选作用。超高温堆肥技术可以在没有外加热源的情况下,通过极端嗜热微生物代谢分解有机物释放的热量产生极端高温,使高温期温度达到80℃以上^[105]。黄殿男等^[106]在厨余垃圾堆肥中采用超高温堆肥工艺,发现堆肥周期缩短到13 d,GI达到98%。同样有研究在蔬菜废弃物堆肥中运用超高温堆肥工艺,发现当调节堆肥物料容重为0.35 kg/L且易生物降解有机物质含量为45%时,堆肥温度可以达到70℃以上^[107]。超高温堆肥技术可以使堆肥温度高达80℃以上并持续5~7 d,有效促进物质的降解,但是也存在温室气体控制困难、堆肥固氮困难等问题,不适用于含氮量较高的厨余垃圾的处理。

在园林绿化垃圾堆肥中,大部分木质纤维素降解菌难以在50℃以上的高温下生存,超高温堆肥容易抑制部分嗜中温微生物的活性,因此适用于园林绿化垃圾堆肥的温度优化策略有待进一步探索。

7 结束语

园林绿化垃圾的无害化处理与资源化利用攸关国家“双碳”战略和“无废城市”的发展目标。堆肥化是世界各国推动城市园林绿化垃圾资源化处理和减量化、无害化处置的重要途径,尽管国内外科技人员开展了其堆肥的研究及工程应用实践,但我国园林绿化垃圾堆肥产业技术及装备起步较晚,尚处于初级阶段。仍存在以下问题亟待解决:

1) 园林绿化垃圾的营养特性会随时空变异而发生变化,其不确定性难以满足好氧菌群功能的稳定降解转化需求,因此堆肥处理时需根据原料的特性选用合适的预处理手段或物料调配策略;

2) 通过添加外源调理剂或辅料等营养结构调控手段,可有效促进木质纤维素的降解和堆肥腐熟,但“物料-微生物-环境”的相互作用与响应机制有待揭示;

3) 堆肥中接种微生物菌剂可促进园林绿化垃圾的快速腐解稳定,增加与有机物降解转化相关功能酶的活性,减少恶臭气体的排放。但堆体内外源微生物与土著微生物的关系(共生、竞争或拮抗)需进一步明确,如何使外源微生物发挥其功能并保持菌群优势值得进一步深入探究;

4) 通过管理堆肥过程和运用堆肥工艺参数调控策略可以实现园林绿化垃圾的促腐减排,提高无害化程度,但仍需结合园林绿化垃圾堆肥的特性进一步优化。

总之,赋能城市绿色发展和环境治理决策,亟需推动堆肥处理优化策略的科技创新,加快城市园林绿化垃圾低成本快速堆肥的技术体系建设,助力我国生态文明建设和生物循环经济发展。

参考文献 References

- [1] 住房和城乡建设部计划财务与外事司. 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
Ministry of Housing and Urban-Rural Development Planning and Finance and Foreign Affairs Department. *China Urban and Rural Construction Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese)
- [2] 刘瑜, 戚智勇, 赵佳颖, 张冬冬, 林伟, 王虹, 周晚来. 我国城市园林废弃物及其资源化利用现状[J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13(8): 38-44
Liu Y, Qi Z Y, Zhao J Y, Zhang D D, Lin W, Wang H, Zhou W L. Urban garden waste and its resource utilization in China [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2020, 13(8): 38-44 (in Chinese)
- [3] 周铁成, 王巨安. 城市园林绿化废弃物处理现状与资源化利用对策探讨[J]. 经济研究导刊, 2017(15): 147-148
Zhou T C, Wang J A. Discussion on the present situation of urban landscaping waste treatment and the countermeasures of resource utilization [J]. *Economic Research Guide*, 2017 (15): 147-148 (in Chinese)
- [4] 住房和城乡建设部办公厅. 住房和城乡建设部办公厅关于开展城市园林绿化垃圾处理和资源化利用试点工作的通知[EB/OL]. [2023-08-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202211/20221107_768754.html
General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Circular of the general office of the ministry of housing and urban-rural development on carrying out the pilot work of urban landscaping waste treatment and resource utilization [EB/OL]. [2023-08-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202211/20221107_768754.html (in Chinese)
- [5] 宋良红, 杨志恒, 李翰书, 林博, 姚博涵. 郑州市园林绿化废弃物处理方式初探[J]. 河南林业科技, 2017, 37(4): 33-35
Song L H, Yang Z H, Li H S, Lin B, Yao B H. Preliminary study on disposal methods of landscaping waste in Zhengzhou [J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2017, 37 (4): 33-35. (in Chinese)
- [6] 刘瑞亮. 园林绿化废弃物堆肥效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022

- Liu R L. Study on composting effect of landscaping waste [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022 (in Chinese)
- [7] 郑乐怡, 吴佳鸣, 刘浩然, 柴梦佳, 杨萌, 陈蕊, 刘桂林. 园林废弃物堆肥应用及技术进展[J]. 现代园艺, 2021, 44(15): 90-92
- Zheng L Y, Wu J M, Liu H R, Chai M J, Yang M, Chen R, Liu G L. Application and technical progress of garden waste composting [J]. *Contemporary Horticulture*, 2021, 44(15): 90-92 (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国建设部. 关于建设节约型城市园林绿化的意见[EB/OL]. [2023-08-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/200709/20070903_157289.html
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Opinions on building conservation type urban landscaping [EB/OL]. [2023-08-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/200709/20070903_157289.html (in Chinese)
- [9] 郭振胜, 张可意, 冀薇, 卫佩行. 园林废弃物与污泥混合堆肥的理化性质变化规律研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(20): 57-62
- Guo Z S, Zhang K Y, Ji W, Wei P X. Study on changes of physicochemical properties of co-composting of garden waste and sludge [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(20): 57-62 (in Chinese)
- [10] 魏天娇, 李广, 关法春, 解娇, 滕星, 高星爱, 崔彦如. 农业废弃物好氧堆肥技术的研究与应用[J]. 农业与技术, 2023, 43(20): 11-15
- Wei T J, Li G, Guan F C, Xie J, Teng X, Gao X A, Cui Y R. Research and application of aerobic composting technology for agricultural waste [J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(20): 11-15 (in Chinese)
- [11] 张悦, 李爽. 园林废弃物堆肥的研究进展[J]. 肥料与健康, 2023, 50(4): 14-18
- Zhang Y, Li S. Research progress in composting of garden waste [J]. *Fertilizer & Health*, 2023, 50(4): 14-18 (in Chinese)
- [12] 赖余港, 陈君晓, 赵彩霞, 丁颖. 园林废弃物堆肥操作参数调控及优化策略研究进展[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2022, 21(3): 291-300
- Lai Y G, Chen J X, Zhao C X, Ding Y. Operation parameter control and optimization strategy of garden waste composting: A review [J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 21(3): 291-300 (in Chinese)
- [13] 李婧男. 园林废弃物堆肥化处理及其产物对滨海盐渍土的改良效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020
- Li J N. Study on composting of garden wastes and the improvement effect of products on coastal saline soil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020 (in Chinese)
- [14] 于薇, 张征, 张波, 孙坚. 西湖水上园林废弃物的资源化利用[J]. 资源节约与环保, 2022(2): 69-72
- Yu W, Zhang Z, Zhang B, Sun J. Resource utilization of the waste of water garden waste in West Lake [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2022(2): 69-72 (in Chinese)
- [15] 于鑫, 孙向阳, 徐佳, 杜建军, 张骅, 王惠. 北京市园林绿化废弃物现状调查及再利用对策探讨[J]. 山东林业科技, 2009, 39(4): 5-7, 11
- Yu X, Sun X Y, Xu J, Du J J, Zhang H, Wang H. Investigation on the present situation of landscaping waste in Beijing and discussion on its reuse countermeasures [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2009, 39(4): 5-7, 11 (in Chinese)
- [16] Oviedo-ocaña E R, Soto-Paz J, Domínguez I, Sanchez-Torres V, Komilis D. A systematic review on the application of bacterial inoculants and microbial consortia during green waste composting [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2022, 13(8): 3423-3444
- [17] 鞠艳艳, 丁元君, 邵前前, 张晓春, 高红艳, 连梦莹, 卞荣军, 王晓明, 潘根兴. 城市园林废弃物生物质炭性质及其应用潜力[J]. 林业科学, 2020, 56(8): 107-120
- Ju Y Y, Ding Y J, Shao Q Q, Zhang X C, Gao H Y, Lian M Y, Bian R J, Wang X M, Pan G X. Properties and application potential of biochar from urban green wastes [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(8): 107-120 (in Chinese)
- [18] 牛佳钰. 秸秆源木质纤维素在好氧堆肥化中的降解研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022
- Niu J Y. Study on degradation of lignocellulose from corn straw during aerobic composting [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022 (in Chinese)
- [19] Wang H J, de Vries FRITS P, Jin Y C. A win-win technique of stabilizing sand dune and purifying paper mill black-liquor [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(4): 488-493
- [20] Horn S J, Vaaje-Kolstad G, Westereng B, Eijsink V. Novel enzymes for the degradation of cellulose [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2012, 5(1): 1-13
- [21] 黄丹莲. 堆肥微生物群落演替及木质素降解功能微生物强化堆肥机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011
- Huang D L. Study on microbial community succession and lignin degradation mechanism of composting enhanced by functional microorganisms [D]. Changsha: Hunan University, 2011 (in Chinese)
- [22] 春建伟, 刘鸿雁, 梁顺文, 曾军, 吴学龙. 深圳市园林绿化垃圾的产生和收集现状及处置对策[J]. 环境卫生工程, 2009, 17(1): 47-49
- Chun J W, Liu H Y, Liang S W, Zeng J, Wu X L. Output collection and disposal of landscape and greening waste in Shenzhen city [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2009, 17(1): 47-49 (in Chinese)
- [23] 王强. 降解木质纤维素的侧耳属菌株的筛选及酶学特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019
- Wang Q. Screening of *Pleurotus* strains degrading lignocellulose and its enzymatic characteristics [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019 (in Chinese)
- [24] Krylova A Y, Zaitchenko V M. Hydrothermal carbonization of biomass: A review [J]. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, 52(2): 91-103
- [25] 姚怡敏. 枝条堆肥腐熟剂的发酵工艺优化与应用效果[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021
- Yao Y M. Optimization of fermentation process and application effect of branch composting detergent [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [26] 人民出版社法律与国际编辑部. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[M]. 人民出版社, 2020
- Law and International Editorial Department, People's Publishing House. *Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste* [M]. Beijing: People's Publishing House, 2020 (in Chinese)
- [27] 龚小强. 园林绿化废弃物堆肥产品改良及用作花卉栽培代用基质研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
- Gong X Q. Study on improvement of garden greening waste compost products and its use as substitute substrate for flower cultivation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013 (in Chinese)
- [28] 殷小冬. 畜禽粪污和园林废弃物的好氧堆肥及基质化开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2020
- Yin X D. Aerobic composting and substrate development of livestock and poultry manure and garden waste [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [29] 高红艳. 城市园林生物质废弃物及其炭化循环利用探索: 基于深圳基地的试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2019

- Gao H Y. Exploration on biomass waste from urban gardens and its carbonization and recycling—Based on the experiment of Shenzhen base[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [30] 彭青, 陈曦, 赵旋. 武汉市园林废弃物资源化利用现状及对策[J]. 江西农业, 2018(24): 69-70, 72
- Peng Q, Chen X, Zhao X. Present situation and countermeasures of resource utilization of garden waste in Wuhan[J]. *Jiangxi Agriculture*, 2018(24): 69-70, 72 (in Chinese)
- [31] 蔡维国. 园林废弃物绿色处置及资源化创新利用研究: 以淮安市园林废弃物处理项目为例[J]. 科技创新与生产力, 2019(12): 52-54
- Cai W G. Study on the green disposal and innovative resource innovation of garden waste—Taking the garden waste treatment project of Huai'an city as an example[J]. *Sci-Tech Innovation and Productivity*, 2019(12): 52-54 (in Chinese)
- [32] 劳惠达, 李晓东, 刘新鲁, 夏聪. 新常态下城市绿色废弃物循环利用存在的问题及对策研究[J]. 环境与发展, 2017, 29(3): 60-61
- Lao H D, Li X D, Liu X L, Xia C. Study on problems and countermeasures of recycling of green waste in urban area under new normal[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(3): 60-61 (in Chinese)
- [33] 于薇, 张征, 蔡晓冬. 浅谈园林废弃物的资源化利用[J]. 再生资源与循环经济, 2022, 15(5): 17-19.
- Yu W, Zhang Z, Cai X D. Analysis and discussion on resource utilization of landscaping residues[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2022, 15(5): 17-19 (in Chinese)
- [34] 黄文锋. 油棕废弃物预处理对造纸污泥共堆肥腐殖化的影响及机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2021
- Huang W F. Effect and mechanism of oil palm waste pretreatment on humification of papermaking sludge co-composting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021 (in Chinese)
- [35] 王圆圆, 韩秀丽, 阎振丽, 杜朝军, 陈玉洁, 常春. 秸秆类生物质预处理技术的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(11): 1-10
- Wang Y Y, Han X L, Yan Z L, Du C J, Chen Y J, Chang C. Research progress on pretreatment technology of straw biomass[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(11): 1-10 (in Chinese)
- [36] Konan D, Koffi E, Ndao A, Peterson E C, Rodrigue D, Adjallé K. An overview of extrusion as a pretreatment method of lignocellulosic biomass[J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3002.
- [37] Hiden A, Inoue H, Tsukahara K, Fujimoto S, Minowa T, Inoue S, Endo T, Sawayama S. Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(10): 2706-2711.
- [38] Yoo J, Alavi S, Vadrani P, Amanor-Boadu V. Thermo-mechanical extrusion pretreatment for conversion of soybean hulls to fermentable sugars[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(16): 7583-7590
- [39] Qu T J, Zhang X M, Gu X W, Han L J, Ji G Y, Chen X L, Xiao W H. Ball milling for biomass fractionation and pretreatment with aqueous hydroxide solutions[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(9): 7733-7742
- [40] Nair R B, Kalif M, Ferreira J A, Taherzadeh M J, Lennartsson P R. Mild-temperature dilute acid pretreatment for integration of first and second generation ethanol processes[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 145-151
- [41] 黄建钦. 油脂和预处理对餐厨垃圾厌氧消化产气特性的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020
- Huang J Q. Effect of oil and pretreatment on gas production characteristics of anaerobic digestion of kitchen waste[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020 (in Chinese)
- [42] 张元晶, 魏刚, 张小冬, 魏云鹏, 乔宁. 木质纤维素生物质预处理技术研究现状[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 272-277
- Zhang Y J, Wei G, Zhang X D, Wei Y P, Qiao N. Status in pretreatment technologies of lignocellulosic biomass[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(11): 272-277 (in Chinese)
- [43] Wu D, Wei Z M, Zhao Y, Zhao X Y, Mohamed T A, Zhu L J, Wu J Q, Meng Q Q, Yao C H, Zhao R. Improved lignocellulose degradation efficiency based on Fenton pretreatment during rice straw composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294(C): 122132
- [44] Agbor V B, Cicek N, Sparling R, Berlin A, Levin D B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application[J]. *Biotechnology Advances*, 2011, 29(6): 675-685
- [45] Sreemahadevan S, Roychoudhury P K, Thankamani V, Ahammad S Z. Biological pretreatment of rice straw using an alkalophilic fungus MVI. 2011 for enhanced enzymatic hydrolysis yield[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018, 30: 304-313
- [46] Hermosilla E, Rubilar O, Schalchli H, da Silva A S, Ferreira-Leitao V, Diez M C. Sequential white-rot and brown-rot fungal pretreatment of wheat straw as a promising alternative for complementary mild treatments[J]. *Waste Management*, 2018, 79: 240-250
- [47] Lou C H, Zhou Y L, Yan A, Liu Y. Extraction cellulose from corn-stalk taking advantage of pretreatment technology with immobilized enzyme[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(2): 1208-1215
- [48] Zhou J, Yan B H, Wang Y, Yong X Y, Yang Z H, Jia H H, Jiang M, Wei P. Effect of steam explosion pretreatment on the anaerobic digestion of rice straw[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(91): 88417-88425
- [49] Yu Q, Liu J, Zhuang X S, Yuan Z H, Wang W, Qi W, Wang Q, Tan X S, Kong X Y. Liquid hot water pretreatment of energy grasses and its influence of physico-chemical changes on enzymatic digestibility[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 199: 265-270
- [50] Nakhshiniev B, Biddinika M K, Gonzales H B, Sumida H, Yoshikawa K. Evaluation of hydrothermal treatment in enhancing rice straw compost stability and maturity[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 151: 306-313
- [51] Serna-loaiza S, Dias M, Daza-Serna L, de Carvalho C C C R, Friedl A. Integral analysis of liquid-hot-water pretreatment of wheat straw: Evaluation of the production of sugars, degradation products, and lignin[J]. *Sustainability*, 2021, 14(1): 362
- [52] Lü H S, Shi X F, Li Y H, Meng F M, Liu S Y, Yan L. Multi-objective regulation in autohydrolysis process of corn stover by liquid hot water pretreatment[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, 25(4): 499-506
- [53] Li L, Guo X P, Zhao T N, Li T Y. Green waste composting with bean dregs, tea residue, and biochar: Effects on organic matter degradation, humification and compost maturity[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 101887
- [54] 夏金利. 不同措施对园林废弃物堆肥腐熟效果的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2021
- Xia J L. Effects of different measures on the decomposition effect of garden waste compost[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021 (in Chinese)
- [55] Zhang L, Sun X Y. Using cow dung and spent coffee grounds to enhance the two-stage co-composting of green waste[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 152-161
- [56] Zhang L, Sun X Y. Influence of sugar beet pulp and paper waste as

- bulking agents on physical, chemical, and microbial properties during green waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 182-191
- [57] Wang W, Zhang L, Sun X Y. Improvement of two-stage composting of green waste by addition of eggshell waste and rice husks[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Pt B): 124388
- [58] Meng L Q, Zhang S M, Gong H N, Zhang X C, Wu C D, Li W G. Improving sewage sludge composting by addition of spent mushroom substrate and sucrose[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 197-203
- [59] Wang Q, Awasthi M K, Ren X N, Zhao J C, Li R H, Wang, Z, Chen H Y, Wang M J, Zhang Z Q. Comparison of biochar, zeolite and their mixture amendment for aiding organic matter transformation and nitrogen conservation during pig manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 300-308
- [60] Zhang L, Sun X Y. Effects of waste lime and Chinese medicinal herbal residue amendments on physical, chemical, and microbial properties during green waste composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 31381-31395
- [61] Zhang L, Sun X Y. The use of coal fly ash and vinegar residue as additives in the two-stage composting of green waste[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(27): 28173-28187
- [62] Zhang L, Sun X Y. Addition of seaweed and bentonite accelerates the two-stage composting of green waste[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 154-162
- [63] Zhang L, Sun X Y. Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 163: 112-122
- [64] Yin Y Y, Gu J, Wang X J, Zhang Y J, Zheng W, Chen R, Wang X C. Effects of rhamnolipid and Tween-80 on cellulase activities and metabolic functions of the bacterial community during chicken manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121507
- [65] Oviedo-Ocaña E R, Domínguez I, Komilis D, Sánchez A. Co-composting of green waste mixed with unprocessed and processed food waste: Influence on the composting process and product quality [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(1): 63-74
- [66] Neugebauer M, Sołowiej P. The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 865-875
- [67] Williams S R, Zhu-Barker X, Lew S, Croze B J, Fallan K R, Horwath W R. Impact of composting food waste with green waste on greenhouse gas emissions from compost windrows [J]. *Compost Science & Utilization*, 2019, 27(1): 35-45
- [68] Haynes R J, Zhou Y F. Comparison of the chemical, physical and microbial properties of composts produced by conventional composting or vermicomposting using the same feedstocks [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(11): 10763-10772
- [69] Santos A, Bustamante M A, Moral R, Bernal M P. Carbon conservation strategy for the management of pig slurry by composting: Initial study of the bulking agent influence[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(7): 1093-1105
- [70] Chen M L, Huang Y M, Liu H J, Xie S W, Abbas F. Impact of different nitrogen source on the compost quality and greenhouse gas emissions during composting of garden waste[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 124: 326-335
- [71] 余映云, 贾丛榕, 吴春来, 陈月, 杨丽军. 园林废弃物堆肥用作栽培基质的研究进展[J]. *南方农业*, 2021, 15(5): 77-78
- Yu Y Y, Jia C R, Wu C L, Chen Y, Yang L J. Research progress of garden waste compost as cultivation substrate [J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(5): 77-78 (in Chinese)
- [72] 孟国欣. 城市污泥堆肥腐熟度、应用效果及其生态风险评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Meng G X. Maturity, application effect and ecological risk assessment of municipal sludge compost[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 (in Chinese)
- [73] 孟国欣, 查同刚, 巩满, 张晓霞, 陈茜, 刘峥, 周金星. 污泥添加园林废弃物堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1538-1546
- Meng G X, Zha T G, Gong X, Zhang X X, Chen X, Liu Z, Zhou J X. Parameter changes and comprehensive evaluation of maturity during the composting process of adding garden waste to sewage sludge[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(8): 1538-1546 (in Chinese)
- [74] 胡自航, 赵霞, 董晓芸, 郑景明, 蒋丽伟. 污泥与园林废弃物混合堆肥施用量对林地土壤重金属质量分数及微生物活性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(1): 31-37
- Hu Z H, Zhao X, Dong X Y, Zheng J M, Jiang L W. Effect of sludge and garden waste composting rates on heavy metal content and microbial activity in plantation soil[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(1): 31-37 (in Chinese)
- [75] Si L, Peng X W, Zhou J X. The suitability of growing mulberry (*Morus alba* L.) on soils consisting of urban sludge composted with garden waste: A new method for urban sludge disposal[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 26: 1379-1393 (in Chinese)
- [76] 乔永, 王小平. 城市污泥和园林废弃物混合堆肥对桑树种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *林业科学*, 2020, 56(3): 164-171
- Qiao Y, Wang X P. Effects of mixed compost of municipal sludge and garden waste on germination and seedling growth of mulberry [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(3): 164-171 (in Chinese)
- [77] 王继莲, 李明源, 周茜, 茹仙古丽·尤努斯, 张甜. 堆肥中纤维素降解菌的筛选及复配菌降解性能研究[J]. *核农学报*, 2023, 37(1): 180-187
- Wang J L, Li M Y, Zhou Q, Younusi R, Zhang T. Screening of cellulose-degrading bacteria in compost and study on degradation performance of compound bacteria[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(1): 180-187 (in Chinese)
- [78] 杨文敏. 黄孢原毛平革菌和康氏木霉联合降解园林废弃物及其应用[D]. 金华: 浙江师范大学, 2021
- Yang W M. Degradation of garden waste by *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma koningii* and its application[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2021 (in Chinese)
- [79] 于淑玲. 土壤真菌在生态系统中物质分解作用的研究进展[J]. *邢台学院学报*, 2006, 21(4): 126-128
- Yu S L. Research progress on decomposition of soil fungi in ecosystem[J]. *Journal of Xingtai University*, 2006, 21(4): 126-128 (in Chinese)
- [80] Betts W B, Dart R K. The degradation of lignin-related compounds by *Aspergillus flavus*[J]. *Microbiology*, 1988, 134(9): 2413-2420
- [81] Gong X Q, Li S Y, Sun X Y, Zhang L, Zhang T, Wei L. Maturation of green waste compost as affected by inoculation with the white-rot fungi *Trametes versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium*[J]. *Environmental technology*, 2017, 38(7): 872-879
- [82] He J, Zhu N M, Xu Y S, Wang L, Zheng J Q, Li X. The microbial mechanisms of enhanced humification by inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma longibrachiatum* during biogas residues composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 351: 126973

- [83] Oviedo-ocana E R, Soto-Ppaz J, Sanchez-Torres V, Castellanos-Suarez L J, Komilis D. Effect of the addition of the *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp. bacterial strains on the co-composting of green and food waste[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107816
- [84] 李倩, 许之扬, 阮文权. 黄孢原毛平革菌后处理深度提升醋糟产甲烷潜力[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(5): 904-911
- Li Q, Xu Z Y, Ruan W Q. Improvement of methane production potential by post-treatment of vinegar residue with *Phanerochaete chrysosporium*[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(5): 904-911 (in Chinese)
- [85] 郁红艳. 农业废物堆肥化中木质素的降解及其微生物特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007
- Yu H Y. Research on lignin degradation and its microbial characteristics during composting of agricultural wastes [D]. Changsha: Hunan University, 2007 (in Chinese)
- [86] 何桂霞. 绿色木霉的筛选及秸秆的二次组合发酵[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013
- He G X. Screening of *Trichoderma viride* and secondary combined fermentation of straw [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [87] 李凤玲, 范明夏, 边传周. 黑曲霉的产酶特性及在动物生产中的应用[J]. 现代牧业, 2018, 2(4): 47-49
- Li F L, Fan M X, Bian C Z. The enzymatic properties of *Aspergillus niger* and its application in animal production [J]. *Modern Animal Husbandry*, 2018, 2(4): 47-49 (in Chinese)
- [88] 周海宾, 刘娟, 丁京涛, 孟海波, 张曦, 程红胜, 王健, 程琼仪, 沈玉君, 罗文海. 采用EEM-FRI方法研究黑曲霉对牛粪堆肥腐熟及纤维素降解影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 276-286
- Zhou H B, Liu J, Ding J T, Meng H B, Zhang X, Cheng H S, Wang J, Cheng Q Y, Shen Y J, Luo W H. Effects of *Aspergillus niger* on maturity and cellulose degradation of cow manure composting using EEM-FRI method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 276-286 (in Chinese)
- [89] 孙谱. 高效纤维素降解菌群构建及其对园林废弃物堆肥理化性质的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2021
- Sun P. Construction of high-efficiency cellulose-degrading microflora and its effect on Physicochemical properties of garden waste composting [D]. Suzhou: Soochow University, 2021 (in Chinese)
- [90] 付丽丽. 作物秸秆纤维素降解菌的分离与筛选[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
- Fu L L. Isolation and screening of cellulose-degrading bacteria from crop straw [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese)
- [91] 石云霄, 余利岩, 张玉琴. 纤维单胞菌属放线菌的研究进展[J]. 微生物学报, 2019, 59(1): 1-10
- Shi Y L, Yu L Y, Zhang Y Q. Research progress on the genus *Cellulomonas* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(1): 1-10 (in Chinese)
- [92] 李赞, 袁京, 李国学, 张地方, 王国英, 张邦喜, 宫小燕. 辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1031-1039
- Li Y, Yuan J, Li G X, Zhang D F, Wang G Y, Zhang B X, Gong X Y. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1031-1039 (in Chinese)
- [93] 张红玉. 厨余垃圾堆肥过程中臭气产生规律和控制技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012
- Zhang H Y. Mechanism of odor formation during kitchen waste composting and mitigation technologies [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [94] Oshima T, Moriya T. A preliminary analysis of microbial and biochemical properties of high-temperature compost [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1125: 338-344
- [95] Zhang H Y, Li G X, Gu J, Wang G Q, Li Y Y, Zhang D F. Influence of aeration on volatile sulfur compounds (VSCs) and NH_3 emissions during aerobic composting of kitchen waste [J]. *Waste Management*, 2016, 58: 369-375
- [96] Xu Z C, Qi C R, Zhang L X, Ma Y, Li J G, Li G X, Luo W H. Bacterial dynamics and functions for gaseous emissions and humification in response to aeration intensities during kitchen waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125369
- [97] Andraskar J, Yadav S, Kapley A. Challenges and control strategies of odor emission from composting operation [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2021, 193(7): 2331-2356
- [98] Xu M Y, Yang M, Sun H S, Meng J, Li Y S, Gao M, Wang Q H, Wu C F. Role of multistage inoculation on the co-composting of food waste and biogas residue [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 361: 127681
- [99] Sun X W, Li Z, Li J Q, Li Z, Ma Y N, Zhou Z C, Liu Y X, Zeng J, Xu L Z, Li L. Dynamic composting actuated by a *Caldibacillus thermoamylovorans* isolate enables biodecomposability and reusability of *Cinnamomum camphora* garden wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 376: 128852
- [100] Yang F, Li Y, Han Y H, Qian W T, Li G X, Luo W H. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 262-269
- [101] Zhang L, Sun X Y, Tian Y, Gong X Q. Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 68-75
- [102] Oviedo-Ocaña E R, Hernández-Gómez A M, Ríos M, Portela A, Sánchez-Torres V, Domínguez I, Komilis D. A comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust [J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1109
- [103] 石文军, 杨朝晖, 肖勇, 曾光明, 孙珮石, 骆滨, 黄翠. 全程高温好氧堆肥快速降解城市生活垃圾[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10): 2126-2133
- Shi W J, Yang Z H, Xiao Y, Zeng G M, Sun P S, Luo B, Huang C. Composting of municipal solid waste by continuous high-temperature aerobic composting [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2126-2133 (in Chinese)
- [104] 宋彩红, 齐辉, 魏自民, 夏训峰. 耐热复合菌系强化全程高温堆肥快速处理餐厨垃圾[J]. 环境工程, 2021, 39(5): 111-117, 130
- Song C H, Qi H, Wei Z M, Xia X F. High-speed treatment of food waste by continuous high-temperature composting enhanced by thermophilic microbial consortium [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(5): 111-117, 130 (in Chinese)
- [105] 廖汉鹏, 陈志, 余震, 卢晓梅, 汪涌, 周顺桂. 有机固体废物超高温好氧发酵技术及其工程应用[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2017, 46(4): 439-444
- Liao H P, Chen Z, Yu Z, Lu X M, Wang Y, Zhou S G. Development of hyperthermophilic aerobic composting and its engineering applications in organic solid wastes [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2017, 46(4): 439-444 (in Chinese)
- [106] 黄殿勇, 侯文涛, 刘闯, 赵超越, 傅金祥. 超高温好氧堆肥厨余垃圾技术研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2022, 38(3): 570-576.
- Huang D N, Hou W T, Liu C, Zhao C Y, Fu J X. Aerobic compost with

super-high temperature bacteria for kitchen waste treatment[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2022, 38(3): 570-576 (in Chinese)

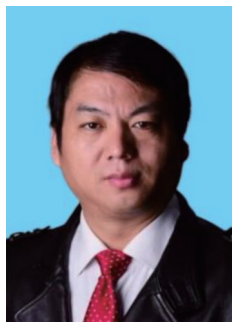
[107] 常瑞雪. 蔬菜废弃物超高温堆肥工艺构建及其过程中的氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

Chang R X. Study on the construction of ultra-high temperature composting process for vegetable wastes and nitrogen loss in the process[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 孙玉鑫, 硕士研究生, 现就读于中国农业大学。研究方向为废弃物处理与资源化利用, 主要围绕社区有机废弃物的处理与资源化利用, 聚焦于园林绿化垃圾好氧堆肥中的促腐减排技术。研究生期间获得二等学业奖学金, 参与中国农业大学有机循环教授工作站、生物质废弃物降解需氧规律研究及其低氧耗堆肥工艺构建项目。参加第十六届全国堆肥技术与工程研讨会、有机循环学术讲座等学术研讨会。目前发表相关论文2篇。



通讯作者简介: 李彦明, 博士, 中国农业大学副教授, 博士生导师。现为中国农业大学上庄实验站副站长, 深圳万科有机循环教授工作站负责人、现代农业产业技术体系岗位专家、农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室副主任等; 兼任有机废弃物资源化利用产业联盟秘书长; 中国农学会农业环境损害鉴定评估分会副秘书长。主要从事城乡有机固体废弃物无害化处理、生物与功能性有机肥料产品研发等领域的研究开发与技术推广工作。累计承担国家、省部级、地方、企业委托以及国际合作等项目30余项; 共获得中华神农奖、大北农环境工程奖等省部级奖励10项, 其中一等奖4项; 发表论文50余篇, 其中SCI/EI论文14篇; 发明专利10件, 参与著作共计6部。