《蔬菜废弃物低碳处理技术规范 第1部分：

多原料联合堆肥技术（征求意见稿）》

农业行业标准

**编制说明**

**承担单位**： **中国农业大学水利与土木工程**

**标准负责人：段娜**

**联系电话： 13810264860**

**邮箱： duanna@cau.edu.cn**

2025年4月

**目 录**

一、工作简况 2

（一）任务来源 2

（二）制定背景 2

（二）起草过程 3

二、标准编制原则、主要内容及其确定依据 4

（一）标准编制原则 5

（二）提出本标准主要内容的依据 5

三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益 22

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况 31

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因 31

六、与现行的有关法律、行政法规及相关标准的关系 31

七、重大分歧意见的处理经过和依据 31

八、涉及专利的有关说明 31

九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议 32

十、其他应予说明的事项 32

参考文献 32

# 一、工作简况

**（一）任务来源**

根据农业农村部农产品质量安全监管司《关于下达2023年农业国家和行业标准制修订项目计划的通知》（农质标函〔2022〕198号），起草单位承担了本标准的起草任务，本标准编号\*\*，归口单位为农业农村部农产品质量安全监管司。

**（二）制定背景**

随着设施农业的发展和人们对营养与健康生活的追求，中国蔬菜产量逐年增加。根据国家统计局数据，到2022年，中国蔬菜产量已达到8亿吨。然而，在蔬菜的储存、运输和加工过程中，产生了大量废弃物。蔬菜的产量与废弃物产生量的比例约为1:1，其中仅来自原产地的蔬菜废弃物就占到33.6%，约为2.69亿吨。如果这些废弃物未经有效处理，不仅会造成资源浪费，还可能对产地环境和生态系统造成污染。目前，蔬菜废弃物的主要处理方式包括填埋、焚烧、直接还田和堆肥等。填埋处理成本较低，但会占用大量土地资源，并可能产生渗滤液和温室气体CH4；焚烧虽然能减少废弃物体积，但存在较高的能耗和有害气体排放问题；直接还田虽然简便，但可能带来病虫害，影响土壤健康；而堆肥作为一种资源化利用的方式，可以将废弃物转化为有机肥料，改善土壤质量，同时减少废弃物填埋和焚烧带来的环境污染。

尽管堆肥技术具有显著优势，当前的蔬菜废弃物处理仍面临着许多技术和管理上的挑战，特别是在多原料联合堆肥及堆肥过程中氮养分保留和温室气体排放等方面。蔬菜废弃物不同于普通的粮食作物秸秆，它具有种类繁多、水分含量高、碳氮比差异大等特性，这增加了堆肥工艺的复杂性。同时，传统的堆肥技术周期较长，分解不完全，容易产生臭气。而且，不科学的堆肥操作会导致大量氮流失和温室气体排放，从而影响堆肥的质量。因此，明确蔬菜废弃物多原料联合堆肥的技术要求、操作步骤和工艺参数，提高堆肥效率，降低碳排放，尤其通过优化堆肥工艺并引入低碳技术来减少温室气体排放，显得尤为重要。

虽然目前已有部分关于蔬菜废弃物堆肥的行业标准，但缺乏对堆肥过程中氮养分保留和低碳技术的相关规范。因此，制定一套符合园区或合作社要求的蔬菜废弃物堆肥低碳处理行业标准至关重要。通过这一标准的制定，不仅能够规范堆肥过程中的技术操作，提高堆肥产品的质量，降低碳排放，还能为行业提供统一的技术指导，推动废弃物资源化的应用与普及。该标准的实施将优化多种废弃物联合堆肥的技术路径，提升废弃物处理的整体效率，推动农业领域绿色、低碳的可持续发展，符合国家对环保和资源循环利用的战略需求。

**（二）起草过程**

**1.成立起草小组**

起草单位于2023年5月签订任务书，正式启动起草工作。本标准由中国农业大学牵头组织，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、北京市农林科学院、湖北省农业科学院植保土肥研究所、北京市奥格尼克生物科技有限公司等单位共同起草。起草单位专门召开了会议，成立了起草小组，明确了各成员的任务分工，人员名单及分工如下。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **姓名** | **性别** | **职称** | **主要职责** | **单位** |
| 段娜 | 女 | 教授级高级工程师 | 负责人，标准具体编制 | 中国农业大学 |
| 刘宏斌 | 男 | 研究员 | 技术筛选，标准具体编制 | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 |
| 薛文涛 | 男 | 助理研究员 | 现场调研，参与标准编制 | 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所 |
| 丁国春 | 男 | 副教授 | 现场调研，参与标准编制 | 中国农业大学 |
| 左强 | 男 | 助理研究员 | 现场调研，参与标准编制 | 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所 |
| 李貌 | 男 | 博士研究生 | 现场调研，参与标准编制 | 中国农业大学 |
| 张富林 | 男 | 研究员 | 现场调研，参与标准编制 | 湖北省农科院植保土肥研究所 |
| 陈添庚 | 男 | 工程师 | 现场调研，参与标准编制 | 北京市奥格尼克生物科技有限公司 |

**2.国内外相关资料收集**

2023年5月至2023年12月系统查阅国内外蔬菜废弃物联合堆肥以及温室气体减排策略相关的研究和报道等相关文献资料。其中，收集相关标准资料20份，查阅相关文献资料150份。

**3.调研和试验**

2024年1月—2024年6月，选取典型堆肥厂和公司开展实地调研，与实施单位的相关人员进行交流，同时在实验室和企业开展相应的试验探究和验证。

**4.起草**

2024年7月—2024年12月，在以上基础上，根据标准有关要求，起草草案，形成《蔬菜废弃物低碳处理技术规范 第1部分：多原料联合堆肥技术》标准初稿和编制说明。在编制过程中咨询了相关科研院所、农业农村部相关部门等领域的专家与管理人员，为标准编制提供了很好的意见建议。

2025年1月—2025年3月，标准编制组多次召开了标准编制研讨视频会和线下会，对标准初稿逐条进行讨论，提出了修改意见，经认真修改后形成了征求意见稿和编制说明。

# 二、标准编制原则、主要内容及其确定依据

针对目前蔬菜废弃物生产有机肥的生产现状及发展趋势，确定了本标准的以下制定原则。

**（一）标准编制原则**

**适用性**

调查分析不同地区不同蔬菜废弃物堆肥的技术要求及管理相关要求。合理确定标准内容，做到标准具有可操作性、广泛适用、质量达标，并能在园区和农业合作社中有效实施。

**科学性**

标准的制定应严格遵循科学原理，基于现有的科学实验和实践经验，以提升蔬菜废弃物的资源化利用率，为实现可持续发展和保障国家粮食安全提供技术支撑。

**协调性**

质量标准制定要从全局出发，在符合相关技术要求及管理基础上，既要考虑农业废弃物处理等有关企业的利益，更要考虑种植户和有机肥使用者的利益，根据不同需要做出科学合理的技术。

**（二）提出本标准主要内容的依据**

本标准的编制严格遵照国家标准GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定。基于对国内外相关质量标准要求的文献调研，目前我国行业和团体标准中关于蔬菜废弃物和低碳堆肥的有：NY∕T 3441-2019 《蔬菜废弃物高温堆肥无害化处理技术规程》和T\_SOFIDPA 0004—2023《有机肥（好氧发酵）低碳技术规范》。现有的行业标准和团体标准虽然都对蔬菜废弃物堆肥处理和有机肥低碳技术做了规定，但该团体标准仅限于粮食作物秸秆，而且仅有相关的计算依据，缺乏相关的低碳措施和温室气体的测算方法。因此，结合国内外相关的技术标准和文献研究，以及生产实际调研，制定本标准。

**3 术语和定义**

在制定本文件时，在NY/T 3442 《畜禽粪便堆肥技术规范》中出现的已经出现的槽式堆肥、条垛式堆肥和反应器堆肥等已经界定的术语和定义，本文件不再赘述。对以下术语和定义，进行了一定程度上的修改。

3.1 蔬菜废弃物 vegetable wastes

因本标准的适用范围为蔬菜种植园区、农业合作社，不涉及蔬菜的销售过程，且这些蔬菜废弃物都是无商品价值的。故结合NY∕T 3441《蔬菜废弃物高温堆肥无害化处理技术规程》中蔬菜废弃物的定义进行修改。因此定义如下：

蔬菜生产、收获、加工和储运过程中，产生和去除的无商品价值部分。

3.2 联合堆肥 co-composting

针对堆肥的原理、堆肥过程主要参数的调控以及堆肥的产物。定义如下：

在人工控制条件下（含水率、通风和碳氮比等）将蔬菜废弃物与其他有机物料按照一定比例进行好氧发酵最终形成稳定腐殖质的过程。

3.3 膜堆肥 Membrane-covered Composting

参考NY/T 3442 《畜禽粪便堆肥技术规范》中对不同堆肥方式的定义，以及实际中各种功能膜材料的区别而将膜堆肥定义如下：

在堆体上覆盖功能性膜材料，以强制通风为供氧方式的好氧堆肥工艺。

注：功能性膜材料主要由聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚酯（PET）、聚氨酯（PU）及生物可降解材料（如PLA）等制成透气防水膜、微孔薄膜、功能性复合膜、纳米纤维膜、可降解膜和智能控释膜等。透气性为1.5-6.5 m3/m2/h，透湿性≥6000 g/m2/24h。

3.4 低碳处理 Low carbon treatment

参考T/SOFIDPA 0004《有机肥（好氧发酵）低碳技术规范》中有机肥（好氧发酵）低碳生产的定义“降低有机肥（好氧发酵）生产工艺的碳排放和增加产品的碳营养，低碳工艺生产富碳肥料”。本标准是通过前除杂减少后期设备能耗，优化物料配比、添加促腐减排添加剂、调控曝气翻堆频率等措施来减少堆肥过程中温室气体排放和能耗为目标，因此形成本定义：

堆肥过程中，通过前除杂、优化物料配比、添加促腐减排添加剂、调控曝气翻堆频率等措施来减少能耗、降低温室气体排放和减少碳氮损失。

**4 基本原则**

4.1 因地制宜

根据蔬菜种植园区的规模、种植结构、废弃物特性、周边原料的可获取性与资金投入能力，选择适宜且低成本的联合堆肥工艺。

制定理由：蔬菜种植园区的规模、种植结构、废弃物特性以及周边原料的可获取性与资金投入能力是影响堆肥工艺选择的重要因素。不同规模的园区和不同的种植结构在堆肥过程中所需的设备、工艺复杂度及操作管理方式有所不同。此外，周边原料如畜禽粪便、农作物秸秆等的可获取性也是影响堆肥工艺的因素。因此，应根据蔬菜种植园区的规模、种植结构、废弃物特性与周边原料的可获取性与资金投入能力，选择适宜且低成本的联合堆肥工艺。

4.2 循环利用与安全消纳

合理规划蔬菜废弃物和畜禽粪便等有机废物的处理规模，确保处理后的有机肥料符合NY/T 3442堆肥产物质量要求并优先用于园区内种植消纳，形成“废弃物-肥料-种植”闭环循环模式，减少外部化肥依赖，保障农业生产安全与生态健康。

制定理由：蔬菜废弃物和畜禽粪便等有机废物的有效处理不仅有助于减少环境污染，还能转化为有机肥料供园区种植使用，形成“废弃物-肥料-种植”的闭环循环模式，进一步减少外部化肥依赖。这一循环模式符合可持续发展的要求，保障了农业生产的安全与生态健康。通过确保堆肥产物符合NY/T 3442标准，能够确保堆肥产品质量安全，避免因废弃物处理不当而产生的环境问题。同时，合理规划废弃物处理规模，使其适应园区的生产需求，达到资源的有效利用，推动农业废弃物的无害化、资源化和减量化。

4.3 低碳环保与可持续

在蔬菜废弃物处理过程中，采用低碳措施，减少温室气体排放，降低碳足迹；推动园区废弃物资源化利用，实现环境保护与农业生产的双重目标，推动园区绿色低碳发展。

制定理由：在蔬菜废弃物的处理过程中，通过采用低碳技术和管理措施，减少温室气体的排放，降低碳足迹，符合当前农业生产的绿色发展理念。低碳环保的措施不仅能够减少农业活动对环境的负担，还能推动园区实现绿色低碳发展目标。通过废弃物的资源化利用，可以有效促进农业生产与环境保护的双重目标，提升园区的环境友好性和社会责任感。因此，低碳环保与可持续原则是推动园区健康、持续发展的核心要求。

**5 基本要求**

5.1 原料要求

5.1.1 蔬菜废弃物应符合NY/T 3441中原料的要求。

5.1.2 辅料应易获取，符合NY/T 525中有机肥料生产原料适用类别。

制定理由：参考NY∕T 3441-2019 4.1，因园区蔬菜生产过程中为了更好的向上生长以及抑制病虫害和保温等都会使用绑绳和地膜等以提高生产。因此在生产结束时候这些绑绳和塑料薄膜等仍存在，而它们在堆肥等条件中几乎是无法降解的，而且还会影响产品品质，此外，土壤等也会影响堆肥效果，因此在使用前需要经过人工或机械去除。本标准适用于蔬菜种植园区、农业合作社，因此辅料应该易获取才能使堆肥更容易进行。同时辅料还需要满足生产有机肥的标准，而NY/T 525中对有机肥生产原料进行了规定，主要以农林业废弃物为主，可以实现资源循环利用。而生活垃圾成分复杂，含有的杂质或有害物质比较多，因此不宜添加。同样，污泥中积累有大量的重金属、抗生素等污染物，通过堆肥还田容易将这些污染物带入农田并污染农田，甚至还会富集到农作物进而影响人体健康。

5.2 场地要求

处理设施应建在蔬菜种植园区内或附近。场地应经硬化处理，原料储存和发酵设施应具备防渗漏、防雨、防火和防风条件，成品储存区应干燥、通风和防雨。

制定理由：结合本标准的适用范围为蔬菜种植园区，因此场地应当满足就近原则，所以处理设施应建在蔬菜种植园区内或附近。同时参考NY∕T 3441-2019 4.2及4.3和NY/T 3442-2019 4对场地的要求制定。确保原料和发酵设施等应具备防渗漏、防雨、防火和防风条件，成品储存区应干燥、通风和防雨。

**6 堆肥工艺**

6.1 工艺流程

注：虚线表示可选步骤。

**蔬菜废弃物**

**粉碎**

**筛选**

**物料混合**

**好氧发酵**

**陈化**

**堆肥产物**

**辅料**

**添加剂**

**低碳措施**

**臭气处理**

**后除杂**

**前除杂**

**图1 蔬菜废弃物低碳处理联合堆肥工艺流程**

制定理由：参考NY∕T 3442-2019 5.1的堆肥工艺并结合现场调研相关堆肥工艺进行制定。针对蔬菜废弃物原料首先由产地进行第一次人工挑选除杂，即前除杂。然后进行粉碎，再过筛以选择适宜堆肥的原料粒径，经过添加辅料以及添加剂进行充分混合后即可开始发酵，根据蔬菜废弃物的产量选择适宜的堆肥方式。在发酵过程中还需采取调节曝气翻堆频率等工艺措施以减少温室气体排放，同时对产生的臭气进行收集和处理等。待发酵完后根据使用目的可进行后除杂，最后将产物进行陈化或使用。

6.2 原料预处理

6.2.1 前除杂

蔬菜废弃物宜在收集过程中去除大部分绑绳、塑料薄膜、泥土等杂质。

制定理由：由于蔬菜种植园区大多都会使用绑绳、塑料薄膜等辅助生产，同时在采收后为了防止病虫害，往往都会将根部一起清理，因此还会有根和泥土等杂物。而这些杂物在短期堆肥过程中是难以分解的，而且泥土过多也会影响堆肥效果。结合相关堆肥厂等现场调研结果，除杂是可以做到并可减少后续的处理难度。因此，在预处理中提出对原料的要求，需要在田间对绑绳、薄膜等清理，同时对泥土和大量的根进行必要的清除。

6.2.2粉碎

选择适宜的粉碎设备，蔬菜废弃物粉碎粒径宜控制在5 cm以下。

制定理由：参考NY∕T 3441-2019 6.1.1的规定，蔬菜废弃物粒径宜控制在5 cm以下。

6.2.3 筛选

可采用滚筒筛进一步去除较大粒径的茎秆和薄膜等杂质。

制定理由：结合北京市奥格尼克生物科技有限公司等一些园区堆肥工程现场调研以及实验研究发现，在前除杂以及粉碎后，因存在前除杂疏漏以及粉碎不彻底的情况，导致粉碎之后还存在一些塑料和未充分粉碎的大粒径茎秆，其不符合原料要求，且在堆肥中难以有效分解，因此可采用滚筒筛进一步去除较大粒径的茎秆和薄膜等杂质。

6.3 物料混合

6.3.1 辅料

宜选择农作物秸秆类、畜禽粪便类等有机废弃物作为辅料，农作物秸秆粉碎粒径宜控制在5 cm以下。

制定理由：根据我们的前期研究和文献报道表明新鲜叶菜类（小白菜、甘蓝等）、茄果类（番茄、黄瓜和辣椒等）以及根茎类（红萝卜、包萝卜、土豆等）的含水率普遍在80%以上，除根茎类外，叶菜和茄果的C/N普遍在15以下[1-3]，因此需要添加高C/N和含水率较低的辅料，如粮食作物秸秆（水稻、小麦、玉米）或木屑[4]。部分原料的参数见表1。而前期我们的研究发现番茄秸秆中添加牛粪可以丰富微生物类群并促进有机质的降解，添加0%、10%、20%、30%、40%和50%的牛粪（鲜重比）其有机质降解率分别为16.2%、21.8%、21.3%、19.1%、 25.0%和26.9%（图2）。添加猪粪可提高茄果类蔬菜废弃物堆肥早期Proteobacteria（变形菌门）和Chloroflexi（绿湾菌门）相对丰度，促进堆肥升温，延长嗜热期[5]。而在甜瓜秧堆肥中添加50%鸡粪可以显著促进有机质和木质纤维素降解，较对照组有机质和木质纤维素降解率分别提高18.5%和16.9%，而添加25%鸡粪可有效促进腐殖酸的生成[6]。因此，针对难降解的茄果类和根茎类原料可适当添加畜禽粪便及其垫料等易降解辅料，不仅可以丰富微生物类群，还可以提供更多易降解的有机质。

**表1 原料的理化特性**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 原料 | N%（干基） | C:N | 含水率（%） |
| 牛粪 | 1.5-4.2 | 11-30 | 67-87 |
| 蛋鸡粪 | 4-10 | 3-10 | 62-75 |
| 肉鸡粪 | 1.6-3.9 | 12-15 | 22-46 |
| 羊粪 | 1.3-3.9 | 13-20 | 60-75 |
| 猪粪 | 1.9-4.3 | 9-19 | 65-91 |
| 玉米秸秆 | 0.6-0.8 | 60-73 | 12 |
| 锯末 | 0.13 | 170 | - |
| 木屑 | 0.06-0.08 | 200-750 | - |
| 稻壳 | 0-0.04 | 113-1120 | 7-12 |
| 叶菜类废弃物 | 3.05 | 11.5 | 93.2 |
| 茄果类废弃物 | 3.09 | 13.8 | 89.5 |
| 根茎类废弃物 | 1.24 | 34.6 | 89.4 |



**图2 番茄秸秆与牛粪联合堆肥对有机质降解效果的影响**

6.3.2促腐减排添加剂选择

6.3.2.1宜选择易获取且成本低的物理、化学、微生物添加剂中的一种或组合，在混料过程中均匀加入。

制定理由：添加外源添加剂的措施可以促进蔬菜废弃物联合堆肥的腐熟、提高堆肥后产物的品质，并提升生产效率。例如，在冬季添加微生物菌剂能促进堆体升温。同时，研究发现优化堆肥工艺和使用添加剂是减少温室气体排放的重要措施[7]。而当前添加剂主要包括物理、化学和微生物三大类添加剂。它们都在一定程度上都有促进堆肥腐熟或减少温室气体排放的作用，因此可以根据添加剂的易获取程度、当地的情况以及添加剂的价格等因素选择物理、化学、微生物添加剂中的一种或组合。而为了降低堆肥的操作难度，通常都会在物料混合环节将添加剂同原料和辅料一同进行混合，同时为了更好的达到添加目的，需要在混料过程中均匀加入。

6.3.2.2物理添加剂宜选择生物炭、黏土、沸石、膨润土和硅藻土等，添加量宜控制在5%～10%（干物质基础）。

制定理由：在“双碳”战略目标下，我国近年来在堆肥中尝试了各种方式以减少堆肥过程中温室气体的排放。尤其是在基于参数调节之后尝试了各种添加剂的应用效果。本标准结合目前的研究和应用现状，筛选了一些价格相对适宜且经过广泛实验和验证具有促腐熟和减少碳排放效果的添加剂。生物炭主要是由木材、农业废弃物（如作物秸秆、玉米芯、甘蔗渣等）或畜禽粪便等在控制温度（一般300℃~800℃）和氧气供应的环境下热解制备而来。因具有较大的比表面积和较多的官能团结构而增加堆体氧气的分布进而促进硝化作用，可以减少堆肥中温室气体的排放[8]。在西红柿茎蔓堆肥中添加10%的生物质炭添最有利于降低堆肥的挥发性氨的释放，其氮素损失率仅为24.60%，比对照降低了37.88%[9]。范晓霞研究添加不同比例的生物炭（0%、2.5%、5%、10%）以及气流膜覆盖对尾菜废弃物和菇渣共堆肥的影，结果表明添加10%的生物炭组的种子发芽指数较对照组提高了70.86%，总养分含量提高了33.11%，腐殖质提高了44.92%。此外，生物炭的添加降低了堆肥结束时真菌的丰度和多样性，提高了木质纤维素降解相关真菌的存活率[10]。Liu等探究在羊粪中添加0%、2.5%、5%、7.5%和10%的生物炭对堆肥气体排放的影响，发现当添加量为7.5%和10%时才具有明显的减排效果[11]。Awasthi等探究在鸡粪中添加0%、2%、4%、6%、8%和10%的竹生物炭对温室气体排放的影响，结果发现随着生物炭添加量的增加，温室气体减排效果越明显，因此建议添加量为10%[12]。综上，在基于成本和添加效果的情况下，我们建议生物炭的添加量宜为5%～10%。粘土主要是由蒙脱石和高岭石组成的多孔矿物，具有较高的比表面积和孔隙度，分布广泛且价格低廉易得。黏土因提高堆体孔隙度以及改变细菌的相对丰度和促进腐殖化而可以减少温室气体的排放[13]。添加10%的粘土可使猪粪堆肥中CH4和N2O的排放量分别减少45.88%和86.79%[14]。添加10%的热改性伊利石/蒙脱石粘土可使堆肥中CH4和N2O的排放量分别比对照减少了8.67%和14.79%[15]。然而，在实际生产中我们需要考虑成本问题，为了不影响堆肥效果，我们建议膨润土的添加量为5%～10%。沸石作为一种具有多孔结构、较大比表面积和吸附性良好的材料，其可以通过调节堆体孔隙度并改善供养条件而抑制反硝化作用等减少CH4和N2O的排放[16]。在蔬菜废弃物堆肥中添加10%的沸石使NH3排放总量比对照组减少了36.14%，且添加沸石可以改变堆肥高温期的细菌群落结构，增强蜡状杆菌属（*Cerasibacillus*）和假单胞菌属（*Pseudomonas*）等细菌群落的活性，并促进了有机物的降解，提升了堆肥产品的品质[17]。在猪粪堆肥中添加5%的沸石可使CH4和N2O排放分别减少67%和69%[18]。在餐厨垃圾堆肥中添加5%的沸石可使CH4和N2O的累积释放量分别减少28.4%[19]。同样，在探究污泥堆肥中添加沸石对气体排放的影响时发现添加10%与15%和30%的差异不是很大。因此，为了有效的降低成本，我们建议沸石的添加量为5%～10%[20]。膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的天然黏土矿物，具有层状结构和强吸附性、膨胀性、悬浮性等特性。在堆肥中通过改善结构和促进微生物活动的作用进而减少温室气体的排放。任秀娜探究在鸡粪中添加2%、4%、6%、8%和10%的膨润土对温室气体排放的影响，表明添加膨润土是减少氮损失、温室气体排放并提升腐殖化程度的有效方法，其建议添加量为4%～10%[13]。在猪粪堆肥中添加5%的膨润土可以使处理NH3和N2O排放分别减少18.82%和72.56%[21]。Wu等研究表明在猪粪堆肥中添加10%的膨润土使CH4和N2O的排放量分别减少了约17%和29%[22]。综上，我们建议膨润土的添加量为5%～10%。硅藻土是一种多孔硅酸盐材料，具有化学惰性，孔隙率，高比表面积和较高的吸附性，从而使得堆肥过程中的CH4和N2O排放减少。任秀娜在猪粪联合堆肥过程中添加不同比例的（0%、2.5%、5%、10%、15%和20%）硅藻土以探究其对气体排放的影响，结果表明添加量为10%时效果最佳，而当添加量达到5%时对N2O才有明显的减排效果[13]。因此，综合成本和添加效果，我们建议硅藻土的添加量在5%～10%为宜。

6.3.2.3化学添加剂宜选择过磷酸钙（磷超标地区慎用）、磷石膏、有机酸（如草酸、柠檬酸）、硝化抑制剂等，硝化抑制剂应与过磷酸钙或磷石膏等联合使用。有机酸宜控制在0.1%~2.0%（干物质基础）、硝化抑制剂宜控制在0.1%~0.5%，其他添加量宜控制在5%~10%（干物质基础）。

制定理由：化学添加剂如过磷酸钙、磷石膏和有机酸（如草酸、乳酸、柠檬酸）等都是因为本身为酸性材料，添加到堆体中通过降低堆体的pH值，进而影响堆肥过程中NH3等的排放，而对CH4的排放则主要归因于抑制产CH4菌活性。前期我们研究了草酸（添加量相当于0.96%、3.2%和4.8%）以及硫酸对堆肥过程中氮损失的影响，并对比了0.4%、0.7%和1.0%的乳酸和1%的柠檬酸的氮减排效果。发现从经济效益来讲0.96%的草酸具有较好的氮减排效应，尽管添加量的增加有利于减少氮损失，但从成本角度来看不可取（见表2）[23]。当前有机酸的价格较高，其中，草酸2000~5000元/吨，乳酸为5000~10000元/吨，柠檬酸为3000~8000元/吨，且市场价格波动较大，因此，建议根据市场价格选择适宜的添加剂，且建议有机酸的添加量宜控制在0.1%~2.0%（干物质基础）。周顺研究表明在番茄秸秆堆肥中添加5%的过磷酸钙仅可减少19.3%的NH3排放量[24]。杨岩等添加0%~25%的过磷酸钙，结果表明10%的添加量可获得最佳减排效果[25]。可见，过高的添加量不仅增加成本而且不一定有显著效果[25]。但有研究表明，当添加量达到10%时，不利于堆肥的碳转化，且过磷酸钙的添加对堆肥中N2O的减排效果不明显[26]。同样，Pan等研究发现添加5%的过磷酸钙虽然可以减少NH3的排放，但会增加N2O的排放，且提高了堆肥的盐度。李云等也表明添加过磷酸钙虽然可以减少NH3排放，但也增加了N2O的排放[27]。可见，过磷酸钙的减排效果存在不一致。因此并不建议直接作为减排添加剂。Yang等发现在厨余垃圾好氧堆肥过程中添加10%的磷石膏可以有效的削减23.5%的NH3排放和85.8%的CH4排放，但是稍微增加了3.2%的N2O排放[28]。罗一鸣等也报道称在蔬菜废弃物堆肥过程中使用磷石膏可以有效的削减NH3排放[29]。Li等也报道称磷石膏可以削减猪粪堆肥过程中NH3的排放量，但是稍微增加了N2O的排放量[30]。可见，磷石膏的添加虽然能减少NH3的排放，但间接导致了N2O排放的增加[31]。因此，也不建议直接作为低碳的添加剂。双氰胺作为一种硝化抑制剂，Jiang等研究表明，与对照相比，堆肥开始时向原料中加入0.4%双氰胺显著增加了32.5%的NH3排放量。而堆肥开始时向原料中加入0.4%双氰胺、堆肥开始时向原料中添加0.2%双氰胺+地面铺撒0.2%双氰胺处理的N2O排放量分别显著下降35.1%和51.8%。CH4排放量分别下降了33.9%和31.8%[32]。而Luo等研究发现，当添加5%或10%的磷石膏与0.2%的双氰胺联合使用时，磷石膏可以减少NH3的排放，而双氰胺可以减少N2O的排放[33]。因此，综上，磷石膏和过磷酸钙可联合双氰胺等硝化抑制剂联合使用，才能达到减少氮损失和N2O等温室气体的排放。当联合使用时，硝化抑制剂宜控制在0.1%~0.5%，磷石膏和过磷酸钙等宜控制在5%~10%（干物质基础）。

**表2 添加不同酸对气体减排效果的经济分析**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **OA1** | **OA2** | **OA3** | **SA1** | **0.4% 乳酸** | **0.7% 乳酸** | **1.0%乳酸** | **1%柠檬酸** |
| 添加量/kg·t−1 DM | 9.59 | 31.71 | 47.69 | 9.12 | 4 | 7 | 10 | 10 |
| 添加成本/美元·t−1 DM | 4.32 | 14.29 | 21.46 | 0.71 | 4.72 | 8.26 | 11.8 | 5.76 |
| 氮固定量/kg·t−1 DM | 0.66 | 1.57 | 1.8 | 1.01 | 1 | 2.48 | 4.42 | 0.85 |
| 氮保留效益/美元·t−1 DM | 0.47 | 1.13 | 1.29 | 0.72 | 0.72 | 1.78 | 3.17 | 0.61 |
| NH3减排量/kg·t−1 DM | 0.73 | 1.29 | 1.84 | 0.97 | 0.4 | 0.94 | 1.74 | 0.84 |
| NH3减排效益/美元·t−1 DM | 0.91 | 1.61 | 2.3 | 1.21 | 0.5 | 1.18 | 2.18 | 1.05 |
| H2S 减排量/g·t−1 DM | 10.25 | 9.9 | 7.32 | −19.25 | / | / | / | / |
| H2S 减排效益/美元·t−1 DM | 14.56 | 14.06 | 10.39 | −27.34 | / | / | / | / |
| 氮转化效益/美元·t−1 DM | −2.94 | −11.55 | −17.87 | 1.22 | −3.50 | −5.30 | −6.45 | −4.10 |
| 总效益/美元·t−1 DM | 11.62 | 2.58 | −7.48 | −26.08 | / | / | / | / |

注：经济分析是根据其初始含量在干重基础上进行的。其中OA为草酸，SA为硫酸。OA1、OA2、OA3分别代表三个不同的处理组，草酸添加量为0.03 mol/kg、0.10 mol/kg和0.15 mol/kg 即9.59、31.71和47.69 kg·t−1 DM。SA1为硫酸添加量0.03 mol/kg，即9.12 kg·t−1 DM。草酸和硫酸具有工业级的价格；工业草酸含有2分子结晶水。草酸450美元/t， 乳酸 1180美元/t， 柠檬酸 675美元/t，硫酸78美元/t。氮气单价按尿素（含氮量46%）330美元/吨计算。NH3减排成本单价为1.25美元/公斤。H2S减排成本单价为1.42美元/克。氮转化效益=（氮保留效益+ NH3减排效益）−添加剂成本。总效益=（氮保留效益+ NH3减排效益+ H2S减排效益）−添加剂成本。

6.3.2.4微生物添加剂质量应符合GB20287标准，按每2 m3~3 m3粉碎物料添加1 kg微生物菌剂进行添加。

制定理由：堆肥成熟是一个由微生物驱动的生理和生化过程，其中堆肥通过微生物代谢被矿化、分解并变得无害，最终转化为成熟的有机改良剂。相关研究表明，微生物制剂等外源添加剂可以有效减少堆肥过程中含碳和含氮气体的排放。例如在猪粪和废弃蘑菇培养基共堆肥过程中接种木质纤维素降解微生物，可以通过将氮转化为NO3⁻-N来减少N2O的排放[34]。Wang等将2株嗜热固氮菌（枯草芽孢杆菌和褐球固氮菌）等比例混合后添加至堆肥中，提高了堆肥中细菌的丰度和多样性，促进了芽孢杆菌的增殖，使N2O排放降低[35]。李舒清等在牛粪堆肥中接种含解淀粉芽孢杆菌和灰绿曲霉的复合菌剂，使堆肥前期mcrA基因丰度显著降低，pmoA基因丰度显著升高，CH4排放通量与对照相比显著下降[36]。因此，微生物菌剂的添加可以促进堆肥腐熟和减少温室气体排放。可根据当地市场价格选择添加。且微生物添加剂质量应符合GB20287标准，其添加量参考NY/T 3441按每2 m3~3 m3粉碎物料添加1 kg微生物菌剂进行添加。

6.3.3 优化配比

将蔬菜废弃物、辅料和促腐减排添加剂混合均匀，调节含水率宜为55%~65%，碳氮比为25:1~35:1。

制定理由：当初始含水率分别为55%、60%和65%时，对气体排放的影响研究结果表明，含水率为65%时NH3的减排效果最佳，而含水率为60%时N2O的减排效果最佳[37]。而且，现有研究表明，当含水率为 55%~65%时，具有较好的腐熟效果和较少的温室气体排放。而当含水率>65%时，因CH4和N2O排放造成的碳氮损失迅速增加[38]。同时，DB12/T 1225—2023《茄果类蔬菜秸秆好氧堆肥技术规程》中也建议调节物料水分含量至55%～65%。因此，本标准建议初始含水率宜控制在55%～65%。黄瓜秧-鸡粪堆肥等联合堆肥在初始C/N为17.5、22.5和27.5时，最适宜的碳氮比为27.5[39]。前期我们经过实验研究证明番茄秸秆初始碳氮比在22～37时（糠醛渣作为调理剂），随着碳氮比的增加温室气体排放逐渐降低（见图3）。但大部分碳氮比调理剂难以将蔬菜废弃物堆肥的初始碳氮比调节在35以上，同时，DB12/T 1225—2023《茄果类蔬菜秸秆好氧堆肥技术规程》中也建议调整物料碳氮比为25:1-35:1。因此，结合NY/T 3441，NY/T 3442的要求，因此我们将初始碳氮比（C/N）定为（25:1）~（35:1）。



**图3 不同碳氮比对番茄秸秆联合堆肥气体排放的影响**

6.4 好氧发酵

6.4.1 堆肥方式与要求

6.4.1.1根据园区规模、经济情况、处理场地、蔬菜废弃物类型和产量等选择适宜的堆肥处理方式。小型园区或合作社宜采用条垛式、膜堆肥工艺；大型园区或合作社宜采用槽式、膜堆肥、反应器堆肥工艺。

制定理由：不同规模的园区和合作社在处理能力、技术要求、资金投入等方面存在差异。因此，根据园区规模、经济情况、处理场地、蔬菜废弃物类型和产量等合理选择堆肥方式可以最大限度地提高资源利用效率和处理效果。其中，对于小型园区或合作社，因其处理规模较小、投资能力有限，适宜采用条垛式或膜堆肥工艺。因为条垛式和膜堆肥都可以根据蔬菜废弃物的量来灵活调整堆体的大小，且方法成本较低、操作简便、占地面积小，同时能够满足基本的堆肥需求。而对于大型园区或合作社，由于其处理规模大、原料丰富，适宜采用槽式、膜堆肥或反应器堆肥工艺。因为槽式堆肥和反应器的尺寸或容积通常是固定的，且槽式和反应器堆肥工艺能够提供更大的处理量和更高的堆肥效率，适合大规模的有机废弃物处理；膜堆肥也可以设置更大尺寸的堆体以满足大型园区或合作社的需求。

6.4.1.2 采用条垛式堆肥，物料混合后堆制成梯形或三角形，堆体宽度不宜小于2 m，高度宜在1.2 m~1.5 m。

制定理由：参考NY/T 3441中5.4关于条垛式堆肥的要求，即采用条垛式堆肥工艺方式，物料混匀后堆制成梯形或三角形，条垛宽度不小于2m，高度宜控制在1.2 m~1.5 m。

6.4.1.3采用槽式堆肥，发酵槽宽度根据处理规模和翻抛机参数确定，一般宽度为2.0 m~3.0 m，高度宜在1.5 m~2.0 m。

制定理由：参考NY/T 3441中5.4关于槽式堆肥的要求并结合调研发现的实际生产情况进行调整。因生产中通常是一次性进行翻抛，而发酵槽的宽度往往和翻抛机的宽度相当，＞3 m的翻抛机在生产中难以实现，因此建议槽式堆肥的宽度为2.0 m~3.0 m，高度宜在1.5 m~2.0 m。

6.4.1.4采用膜堆肥，堆体底部宽度宜在2.0 m~8.0 m，高度宜在1.2 m~2.0 m;通风管道每间隔1.0 m~2.0 m设置一根管道。将功能膜覆盖在堆体上并进行密封。

制定理由：如北京奥格尼克生物科技有限公司的“慧膜法”示范项目的规格为长\*宽\*高为30 m\*8 m\*2 m，大连市庄河市吴炉镇的案例规格为长35 m，宽8 m。山东莱西市姜山镇兴隆屯村一个家庭农场的膜堆肥其高度最大为1.8 m。新疆昌吉市规模化养殖场地的膜堆肥案例其长为15 m，宽8 m，高1.2 m，并在底部布有4根通风管[40]。同样，北京密云一奶牛场的膜堆肥其堆体长为30 m，宽6 m，高1.5 m[41]。综上，相关的案例在养殖场中应用较多，整理的宽度都不超过8 m，高度不超过2 m，而长度可根据处理量来调整。蔬菜种植园区的产量相比于养殖场较少，因此，建议其堆体底部宽度宜在2.0 m~8.0 m，高度宜在1.2 m~2.0 m; 通风管道每间隔1.0-2.0 m设置一根管道。将功能膜覆盖在堆体上并进行密封。长度可根据处理量来调整。

6.4.1.5 采用反应器堆肥，反应器容积根据处理规模确定。

制定理由：相关堆肥设备生产公司的反应器尺寸大小可以根据用户需求而进行定制，最小的可达到实验室规模的几十升，而在实际工程中则可达到100 m3及以上。因此，每个园区或合作社的反应器容积根据处理规模确定。

6.4.2 一次发酵

6.4.2.1 采用翻堆或通风保持通透性，氧气浓度不宜小于5%，强制通风流量宜为0.05 m3/min~0.2 m3/min（以每立方米物料为基准），通风时间不宜超过30 min/次，槽式和条垛式堆肥曝气间隔时间不宜超过2 h，膜堆肥和反应器堆肥曝气间隔时间不宜超过50 min。

制定理由：参考NY/T 3442的5.3.2堆体内部氧气浓度宜不小于5%，曝气风量宜为0.05 m²/min~0.2 m²/min(以每立方米物料为基准）的规定进行。参考NY/T 3441的6.2.1.1槽式和条垛式堆肥的通风或曝气时间不宜超过30 min/次，间隔时间不宜超过2 h。此外，徐鹏翔等曾结合实际工程研究表明，条垛式堆肥一般采取翻堆结合自然通风工艺，槽式堆肥采取分段强制通风工艺，反应器堆肥一般采取间歇式通风工艺；槽式和反应器堆肥建议通风速率为0.05 m3/min/m~0.2 m3/min/m[42]。采用间歇通风，间歇通风在减少氨挥发的同时会增加温室气体的排放，可通过调节间歇时间减少温室气体的排放[43]。我们前期研究也发现当充分置换容器内气体后，间歇通风时间在50 min内均可以减少NH3、CH4和N2O等的排放（如图4）。同样，Zeng等也研究表明反应器堆肥的曝气间隔不宜超过50 min[44]。曾经理在鸡粪膜堆肥过程中表明膜堆肥宜采用间歇性曝气，每小时曝气10 min[45]。因此，建议通风时间不宜超过30 min/次，槽式和条垛式堆肥曝气间隔时间不宜超过2 h，膜堆肥和反应器堆肥曝气间隔时间不宜超过50 min。



**图4 番茄秸秆堆肥中不同曝气间隔对气体排放的影响**

6.4.2.2 通过调节堆体水分和通风，控制堆肥温度在55℃~65℃，条垛式和膜堆肥维持55℃以上时间不少于15 d，槽式堆肥和膜堆肥不少于7 d，反应器堆肥不少于5 d。堆体温度高于65℃时，应通过翻堆、搅拌、曝气降低温度。

制定理由：参考NY/T 3442的5.3.1通过堆体曝气或翻堆，使堆体温度达到55℃以上，条垛式堆肥维持时间不得少于15 d、槽式堆肥维持时间不少于7 d、反应器堆肥维持时间不少于5 d。堆体温度高于65℃时，应通过翻堆、搅拌、曝气降低温度。此外，我们通过实验室60 L的反应器堆肥发现，温度在55℃以上可以维持5 d以上（见图5）。因此，建议反应器堆肥不少于5 d。而结合奥格尼克生物科技有限公司的膜堆肥案例，在55℃以上均可维持7 d以上。因此，建议膜堆肥不少于7 d。同时，因过高的温度（＞65℃）会抑制微生物生长甚至杀灭部分有益微生物[4]，因此也建议温度高于65℃时通过增加曝气、翻堆或搅拌等方式以降低堆体温度。



**图5 番茄秸秆堆肥过程中温度变化**

注：图a为番茄秸秆和牛粪不同配比对堆肥温度的影响，图b为不同碳氮比对堆肥温度的影响，图c为不同曝气间隔对堆肥温度的影响。

6.4.2.3 条垛式堆肥和槽式堆肥翻堆频率根据堆体温度变化确定，条垛式升温期宜2 d～3 d翻堆一次，高温期宜5 d~7 d翻堆一次，降温腐熟期宜7 d~10 d翻堆一次。槽式宜每天翻堆1次，反应器堆肥宜采用间歇搅拌方式。

制定理由：结合现场应用案例以及常规的工程案例，槽式堆肥因存在每天进料的情况，因此需要每天翻堆1次。同样，反应器堆肥因自带搅拌功能，未保证物料发酵的均匀性，同时也存在边进料边出料的堆肥方式，因此采用间歇搅拌方式。而膜堆肥在将物料混合堆置发酵直接堆肥结束时通常都不需要进行翻堆。而条垛式堆肥以宁夏西吉县兴隆镇川口村的堆肥为例，通常是中后期2～3天翻堆一次。此外，邯郸市畜禽养殖粪污资源化利用技术宣传明白纸也强调条垛式堆肥前期翻堆一般为每天1次，中后期为2 d～3 d一次。但本标准以低碳为目标，减少翻堆频率可以减少能耗投入，同时在高温期减少翻堆频率可减少热量损失。因此，结合现场工程案例主要为升温期宜2 d～3 d翻堆一次，高温期宜5 d~7 d翻堆一次，降温腐熟期宜7 d~10 d翻堆一次。因此，本标准建议条垛式升温期宜2 d～3 d翻堆一次，高温期宜5 d~7 d翻堆一次，降温腐熟期宜7 d~10 d翻堆一次。

6.4.3 二次发酵

工艺参数与条件控制参照NY/T 3441。

制定理由：二次发酵的要求参考NY/T 3441进行。

6.5 臭气控制

反应器堆肥和膜堆肥过程中产生的恶臭气体应进行有效收集，采用生物过滤等措施进行净化处理。槽式和条垛式堆肥可采用喷洒除臭菌剂和吸附剂辅助除臭。经处理后的恶臭气体浓度应符合GB 3095和GB 14554相关要求。

制定理由：除臭主要是控制堆肥过程中产生的NH3硫化氢和二甲硫醚Me2S等恶臭气体，因此一方面通过低碳的参数和添加剂调控措施以减少臭气排放。另外，我们参考NY/T 3441和NY/T 3442对除臭的规定通过添加除臭和空气过滤等设备以减少和抑制臭气的排放。

6.6 温室气体控制

6.6.1宜采取优化物料配比、控制曝气和翻堆频率、添加促腐减排添加剂，确保堆体处于好氧状态，减少CH4和N2O排放。

6.6.2宜采取前除杂、缩短物料和堆肥产品输送距离、控制堆肥能耗，减少CO2排放。

制定理由：CH4、N2O和CO2的全球变暖潜力值（GWP）约为25、298和1。文献研究表明，堆肥过程中CH4的排放量在0.02-10.2 g/kg.DM，N2O的排放量在0.002-1.5 g/kg.DM，而CO2的排放量在370-1460 g/kg.DM（见表3）。而我们的研究（见图3和图4）表明CH4的排放量在0.02-0.09 g/kg.DM，N2O的排放量在0.23-0.2.2 g/kg.DM，而CO2的排放量在370-440 g/kg.DM。可见不同的体系中各类温室气体的排放差异非常大，难以用一个准确的值用于衡量低排放的标准。因此，基于低碳堆肥的目标，我们建议通过优化物料配比、控制曝气和翻堆频率、添加促腐减排添加剂，确保堆体处于好氧状态，减少CH4和N2O排放，因为CH4通常是在厌氧环境下产生的，而通过控制碳氮比等可以减少N2O排放。此外，通过前除杂可以有效的清除杂质以减少后期的能耗，同时缩短物料和堆肥产品输送距离也可以减少运输的能耗，控制堆肥过程中的曝气和翻堆频率等也可以减少能耗，而化石或电能的消耗也是间接的CO2排放。因此，宜采取前除杂、缩短物料和堆肥产品输送距离、控制堆肥能耗，减少CO2排放。

**表3 不同堆肥体系中温室气体排放情况**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| CO2（g/kg.DM） | CH4（g/kg.DM） | N2O（g/kg.DM） | CH4的kg CO2-eq/t DM） | N2O的 kg CO2-eq/t DM） | 参考文献 |
|  | 0.04-0.25 | 0.12-0.37 |  |  | [46] |
|  | 5.2-10.2 | 0.03-0.17 |  |  | [47] |
|  | 0.10-0.22 | 0.32-0.47 |  |  | [48] |
|  | 0.03 | 0.02-0.06 |  |  | [49] |
|  |  | 0.01-0.06 |  |  | [50] |
|  | 0.4-0.78 | 0.13-0.37 |  |  | [51] |
|  | 0.03-0.28 | 0.13-0.38 |  |  | [52] |
|  | 0.06-0.28 | 0.1-0.25 |  |  | [53] |
| 370-520 | 1.2-4.0 | 0.07-0.32 |  |  | [54] |
| 420-580 | 2.1-2.7 | 0.007-0.025 |  |  | [55] |
| 1200-1460 | 3.2-4.7 | 0.31-0.73 |  |  | [56] |
|  | 0.03-3.1 | 0.002-0.15 |  |  | [7] |
|  | 0.1-0.46 | 0.3-0.58 |  |  | [57] |
|  | 0.05-0.47 | 0.17-0.27 |  |  | [58] |
|  | 0.08-0.09 | 0.05-0.17 |  |  | [59] |
|  | 0.02-0.04 | 0.006-0.27 |  |  | [60] |
|  |  | 0.007-0.022 |  |  | [61] |
|  | 1.6-3.2 | 0.03-1.5 |  |  | [62] |

6.7 后处理

 包括后除杂、堆肥储存，储存条件要求干燥、通风。堆肥成品制有机肥时，应符合NY/T 525或NY 884标准。

制定理由：堆肥因成品含水率还未降至有机肥标准范围内，因此需要进行陈化储存。为达到更好的降低水分含量，因此储存条件要求干燥、通风。当堆肥成品需要用于生产商品有机肥或要求较高时通常需要进行再次除杂，结合现场生产工艺以及实验研究发现，在堆肥结束后可能还存在部分未分解的大粒径的茎秆，且前除杂不一定能够充分清除掉里面残留的薄膜等杂质，因此，在后续用于生产商品有机肥等需要进一步去除其中的杂质。

**7 检测方法**

7.1 采样

样品的采集按照GB/T 25169-2022中7.3.3的规定执行，样品的标记按照GB/T 25169-2022中7.5的规定执行，样品的制备和保存按照GB/T 25169-2022中第9章的规定执行。

制定理由：因都属于固体废弃物堆肥，均为检测堆肥后样品的常规指标，故采样及样品的制备和保持参考GB/T 25169-2022中具体内容执行。

7.2 检测

7.2.1 温度

不同堆肥类型的温度检测参考NY/T 3442-2019进行。配有温度传感器的可实时或定期监测堆体各部位的温度。无传感器的采用接触式温度计测量堆体各部位的温度，每天在同一时间测定一次。

制定理由：参考NY/T 3442-2019，其详细介绍了条垛式和槽式堆肥的温度测定方法。而膜式堆肥的堆体结构和条垛式和槽式一样[4]，如图6所示，因此也可采用相同的测量区域，而膜式堆肥应处于密封状态，因此往往会在前期提前放置温度传感器以监测温度情况。而密闭式的反应器堆肥一般都在上中下等位置设有温度传感器并使用控制系统进行实时监测（简易示意图如图7所示[5]）。



**图6功能膜覆盖好氧堆肥系统结构示意图**

注:1基建，2下水沟，3通风管路，4发酵堆体，5功能膜，6传感器(温度、氧浓度、压力)，7控制系统，8膜密封装置。



**图7反应器好氧堆肥系统结构示意图**

注：(1)气泵，(2)气体流量计，(3)筛板，(4)保温层，(5)堆肥物料，(6)温度传感器，(7)气体洗涤，(8)计算机监控系统，(9)取样口，（10）渗滤液出口。

7.2.2 含水率和pH

按NY525的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.3 全氮和有机质

按NY525的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.4 种子发芽率

按NY525的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.5 重金属

按NY/T1978的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.6 蛔虫卵死亡率

按GB/T 19524.2的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.7 粪大肠杆菌

按GB/T 19524.1的规定进行测定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

7.2.8 气体监测

按附录C的规定进行NH3、CH4、CO2和N2O的测定。

制定理由：非密闭式堆肥的以静态箱法进行测定，其测定参考鲍美文论文中的方法进行[63]。而密闭式反应器的测定则基于中国农业大学前期采用的测定方法[64]，以采集部分气体测定其浓度并通过监测和换算气体通量得出最终的气体排放量。

**8 堆肥产品质量要求**

满足NY525中4.2的规定。

制定理由：都属于生产有机肥范畴，故参考NY525的规定进行测定。

# 三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

**（一）主要试验或验证的分析、综述报告**

在本标准的基本内容确定后，完成相关试验内容研究，并基于文献等建立了以蔬菜废弃物为主要的低碳处理技术。为了验证本文件的可行性，项目组在北京等地开展应用试点，并详细记录相关实验过程，并对应用效果进行跟踪监测。结果表明经济、社会、生态效益明显。

**1.不同原料和添加剂对条剁式堆肥NH3和CO2排放的影响**

开展基于氮素释放调控的好氧堆肥工艺的效果评价试验。明确几种堆肥原料配比对氮素有效性的影响，明确堆肥环保膜降低氨挥发损失的效果；明确堆肥过程中温室气体的排放量。实验使用蔬菜废弃物、鸡粪、牛粪、青贮玉米秸秆粉、生物炭、硫酸铵、腐殖酸、粉碎树枝等原料，采用露天条垛式堆肥工艺进行堆肥试验。

1.1对CO2排放量的影响

各处理CO2排放速率均符合随着温度变化，先快速增大后逐渐降低，最后趋于平缓的规律。在堆肥开始时，有机物料中含有较多微生物可利用的易降解碳源，因此六个处理均在前5天内达到CO2释放速率高峰，70%蔬菜废弃物+30%鸡粪处理，70%蔬菜废弃物+30%鸡粪+10%生物炭的CO2排放速率较高为3529.593 mg/kg/d和3920.26 mg/kg/d。蔬菜+牛粪的四个处理排放速率相对较低，70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）分别为2678.05 mg/kg/d、3160.58 mg/kg/d、2685.19 mg/kg/d和2808.78 mg/kg/d。在堆肥20天左右，各处理CO2排放速率基本达到一个稳定的水平一直持续到堆肥结束。

70%蔬菜废弃物+30%鸡粪+10%生物炭的CO2排放速率大于70%蔬菜废弃物+30%鸡粪处理，平均排放速率提高20.02%；同理70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵>70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵，平均排放速率提高29.76%。表明生物炭可显著提高堆体CO2的排放，这是因为生物炭自身具有疏松多孔的特性，可为堆体提供充足的氧气，在氧气充足的情况下，好氧微生物活动剧烈快速分解物料产生大量CO2，此外有研究表明生物炭还可促进易分解碳源转化为CO2。由于堆肥初始70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）和70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）并没有加入硫酸铵，因此堆体的C/N大于70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵，微生物活动更加剧烈，所以CO2排放速率和总量比70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵更大。在堆肥第10 d~15 d，70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）和70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）的CO2排放速率相对于其他处理略有回升趋势，原因在于70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）在第十天加入了青贮玉米秸秆粉，相当于补充了碳源，微生物活动逐步增强；70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）添加了生物炭，使未降解完全的有机物料加速降解，释放出CO2；但在全堆肥过程尺度来看，70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）的CO2累积排放量相比对照处理70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵提高16.00%，70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）和70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵两处理之间则差异不大。此外，在本实验条件下，除了添加生物炭能促进堆肥进程外，堆肥过程中CO2排放速率及累积量蔬菜+鸡粪处理要明显大于蔬菜+牛粪处理，这与Kulcu等实验结果类似，导致该现象的原因可能在于原料不同导致堆体中微生物的活性水平不同。

1.2对NH3排放量的影响

各处理NH3的排放速率与CO2排放速率类似，均呈现出先快速增加后逐渐降低，最后趋于平缓的规律。NH3的挥发主要集中在前两周内。这是由于在堆肥前期物料充足，堆体中的微生物活动剧烈，导致大量有机氮矿化，铵态氮含量迅速增加，而NH3在高温、高pH值条件（pH＞7.5）下不溶于水，从而促进挥发。由于堆肥温度的快速上升，各处理均在前3天内达到NH3释放速率高峰，70%蔬菜废弃物+30%鸡粪处理、70%蔬菜废弃物+30%鸡粪+10%生物炭排放速率较高为39.13 mg/kg/d和26.39 mg/kg/d，蔬菜+牛粪的四个处理排放速率相对较低，70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）、70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）分别为30.29 mg/kg/d、20.63 mg/kg/d、26.10 mg/kg/d和29.70 mg/kg/d。在堆肥20 d左右，各处理NH3排放速率基本达到一个稳定的水平一直持续到堆肥结束。每次翻堆后，NH3挥发会呈一定程度的上升，这是因为翻堆为堆体内部提供了氧气，并且使表层和内部的原料重新混合均匀，微生物活性恢复到较高水平，有机物料发生进一步分解。

70%蔬菜废弃物+30%鸡粪+10%生物炭的NH3排放速率小于70%蔬菜废弃物+30%鸡粪处理，平均排放速率降低28.56%；70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵＜70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵，平均排放速率降低36.74%；70%蔬菜废弃物+30%鸡粪+10%生物炭的NH3排放累积量相比70%蔬菜废弃物+30%鸡粪处理降低了31.31%；同理蔬菜+牛粪处理的70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵相比70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵累积排放量降低38.16%；这表明添加生物炭可以明显降低NH3的排放，原因在于生物炭自身孔隙结构十分发达，较强的吸附能力可在NH3挥发前就将其保留在堆体内部，减少NH3挥发。前人研究在堆肥过程中添加生物炭对氨挥发的影响差异较大，Chen等比较不同类型生物炭对畜禽粪便堆肥过程中氨挥发的影响，发现在堆肥中添加10%的竹炭，能减少9.2±1.3%NH3排放；各试验产生的这些差异是因为，生物炭自身的相关特性会根据其原材料、工艺手段以及裂解温度的不同而有所差别，使其具有不同的环境效应和环境应用。

70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）和70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）处理在第10天补充了硫酸铵，因此在第10天后NH3挥发有一定幅度的升高，在堆肥全过程中70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵（高温期后加）和蔬牛（炭铵）与对照70%蔬菜废弃物+30%牛粪+硫酸铵差异不大，在堆肥开始10天后加入硫酸铵，并没有明显降低NH3挥发总量，而且70%蔬菜废弃物+30%牛粪+10%生物炭+硫酸铵（高温期后加）中添加的生物炭也没有起到较好的降氨效果，出现以上现象原因可能在于第10天后堆体温度依旧较高以及高pH促进了外来氮素的挥发。

****

**图8 相关工作照片**

**2.不同添加剂及添加量对堆肥腐熟和气体排放的影响**

开展条剁式堆肥，长10米，宽1.5米，高1.5米。微生物菌剂为沃土微生物菌剂。将蔬菜废弃物切成<5 cm的段。将粪便和蔬菜废弃物按照2:1的比例混合（8吨牛粪：4吨蔬菜废弃物），然后分别设置12个不同的处理，即分别添加5%、10%和15%的生物炭、园林废弃物、腐殖酸或蘑菇渣。并测定温度、pH、含水率、有机质、氮磷钾养分、碳氮比等指标，对气体（CO2和NH3）排放量进行监测。表4显示了不同原料的理化性质。

表4 原料的理化特性

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 原料 | pH | 有机质(g/kg) | 含水率（％） | 氮（g/kg） | 磷（g/kg) | 钾(g/kg) |
| 牛粪 | 9.19 | 305 | 54.9 | 12.4 | 4.2 | 8.2 |
| 蔬菜废弃物 | 9.63 | 287 | 45.8 | 12.6 | 6.6 | 13.3 |
| 生物质炭 | 9.53 | 605 | 11.1 | 11.2 | 4.3 | 15.2 |
| 腐殖酸 | 7.64 | 566 | 4.3 | 4.5 | 0.9 | 3.1 |
| 蘑菇渣 | 9.35 | 194 | 8.4 | 9.1 | 4.5 | 7.6 |
| 木屑 | 6.75 | 773 | 10.6 | 6.8 | 1.0 | 2.7 |

2.1对养分和腐熟指标的影响

图9显示了不同添加剂和添加量对堆肥常规指标的影响，由图可以看出，所有处理的温度在50℃以上都维持在7天以上，均符合堆肥腐熟的要求。添加生物炭比腐殖酸、木屑和蘑菇渣更有利于维持堆体温度。由于堆体初始pH较高，随着堆肥的进行pH逐渐降低。所有处理的初始碳氮比在开始和结束时都维持在一个较稳定的范围（10-19）。

图10显示了不同添加剂及添加量对堆肥养分指标的影响，在堆肥结束时样品鲜重的有机质含量在15%～33%，换算为干重计大部分均满足NY/T525要求的有机质含量≥30%的标准。生物炭、木屑和蘑菇渣添加量的增加有利于提高堆肥全氮的含量。10%的生物炭和蘑菇渣对提升磷和钾含量效果最佳。15%的木屑对提升磷和钾含量的效果最佳。



图9 **不同添加剂及添加量对堆肥常规指标的影响**



图10 **不同添加剂及添加量对堆肥养分指标的影响**

2.2对气体排放的影响

不同添加剂及添加量对气体排放的影响如图11所示，添加腐殖酸使NH3的排放量最高，而蘑菇渣和木屑处理的NH3排放量最低，尤其是10%的蘑菇渣效果最佳。而生物炭以5%和15%的添加量NH3排放量最低。可见蘑菇渣、木屑和生物炭对NH3的减排都有一定的效果。而从CO2排放量来看，生物炭的添加使CO2排放量最高，而蘑菇渣的添加使CO2排放量最低，其中以10%的蘑菇渣添加效果最好。同样，5%的生物炭添加其CO2排放量也相对较低。



**图11 不同添加剂及添加量对气体排放的影响**

**3.不同添加剂对堆肥腐熟和气体排放的影响**

开展条剁式堆肥，长10米，宽1.5米，高1.5米。微生物菌剂为沃土微生物菌剂。将蔬菜废弃物切成<5cm的段。将粪便和蔬菜废弃物按照2:1的比例混合（8吨牛粪：4吨蔬菜废弃物），然后分别设置6个不同的处理，即分别添加10%沸石、5%草炭、10%氯化钙、2%过磷酸钙、1%沃土菌剂和1%阿姆斯菌。并测定有机质、氮磷钾养分、氨氮、硝氮等指标，对气体（CO2和NH3）排放量进行监测。通过对6种不同添加剂的探究，所有处理组的温度均满足NY/T 525的要求，堆肥结束时鲜重有机质含量在19%～28%，换算为干重基本满足NY/T 525的要求。同样，钾和磷也有不同程度的增加。而从气体排放来看，沸石和氯化钙的添加对NH3和CO2的减排效果较好，草炭的效果相对较差。



**图12 不同添加剂对堆肥养分和腐熟的影响**



**图13 不同添加剂对气体排放的影响**

****

**图14 相关工作照片**

**（二）技术经济论证、预期的经济效益和社会效益及生态效益**

本文件主要为双季稻轮作种植过程中碳氮排放风险期界定、农田基础设施要求、秸秆还田要求、整地要求、施肥要求、水分管理要求及其它土壤保育措施要求技术规范内容。根据本标准阐述的技术原理和规定的技术要求，可以通过为水稻生产过程中稻田的碳氮减排和土壤保育提供实用性和可操作性的技术方法和技术支撑。

本标准将为蔬菜废弃物好氧堆肥过程中温室气体的减排提供技术依据。为园区解决蔬菜废弃物处理难的问题，所生产的产物还可以通过还田以减少化肥的使用，或生产成产品增加收益。同时还可以减少堆肥过程中氮的流失，降低环境污染。不但为种植户省下了资金，从长远的角度看，还对耕地的可持续性和周围环境有很大的保护。

本标准中技术的实施，不仅可以提升堆肥品质，尤其是氮的保留，还能大幅度降低堆肥过程中温室气体的排放，减少环境治理成本。

标准的制定与实施，可以培肥土壤、减少化肥投入、减少温室气体的排放，具有促进农业绿色可持续发展的作用。

# 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

无。

# 五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

无。

# 六、与现行的有关法律、行政法规及相关标准的关系

与NY∕T 3441-2019 蔬菜废弃物高温堆肥无害化处理技术规程相比，沿用了里面的术语以及原料等部分相同的内容。不同之处在于限定了适用的范围为蔬菜种植园区和农业合作社；增加了堆肥工艺的流程；增加了膜堆肥、低碳处理等术语内容；增加了对堆肥过程中温室气体的控制策略以及相关气体的检测方法。T/SOFIDPA 0004 有机肥（好氧发酵）低碳技术规范相比，本标准去除了繁杂的能耗等碳排放的相关内容，而且我们侧重是通过技术调节以实现低碳的生产。而T/SOFIDPA 0004则是侧重于粮食作物（玉米、小麦和水稻）秸秆碳排放相关值的核算，同时也缺乏过程中温室气体排放的检测方法。与现有的法律、法规无冲突。

# 七、重大分歧意见的处理经过和依据

无

# 八、涉及专利的有关说明

无。

# 九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

实施要求：从事堆肥技术工作的人员应接受相关培训，了解标准内容及其重要性，以保证操作规范，并建立完善的记录机制。

组织措施：由政府、行业协会和企业代表组成专项工作组，负责标准的推广与实施监督，确保实施过程有序推进。建立信息反馈渠道，及时收集行业内对标准实施的意见和建议，进行适时调整。

技术措施：提供详细的技术手册和指导文件，帮助企业掌握多原料联合堆肥的关键技术。鼓励企业投资现代化的堆肥处理设备，提高处理效率和降低环境影响。

# 十、其他应予说明的事项

无

# 参考文献

GB/T 25169 畜禽粪便监测技术规范

T/SOFIDPA 0004有机肥（好氧发酵）低碳技术规范

NY/T 3441 蔬菜废弃物高温堆肥无害化处理技术规程

NY/T 3442 畜禽粪便堆肥技术规范

DB12/T 1225—2023茄果类蔬菜秸秆好氧堆肥技术规程

[1] 明司齐. 畜禽粪便与尾菜联合厌氧发酵产甲烷与新污染物去除强化工艺研究[D]. 中国农业大学，2024.

[2] 隋钦宇. 尾菜农用酵素制备工艺与抑菌效果研究[D]. 中国农业大学，2024.

[3]韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等.不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J].农业资源与环境学报, 2015, 32(04):377-382.

[4] Ezeah, C., Osuagwu, J.C., Adesiyan, I.M., 2023. Design principles of sustainable composting and recovery of value from compost. In: A. Pandey, M. Awasthi, and Z. Zhang, editors, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, pp. 143–168.

[5]陆晓林,杨玉欣,洪春来,等.猪粪辅料促进茄果类蔬菜废弃物堆肥品质的微生物机理[J].农业环境科学学报,2022,41(05):1097-1107.

[6]张陆,曹玉博,王惟帅,等.鸡粪添加对蔬菜废弃物堆肥腐殖化过程的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(02):258-267.

[7] Huang D, Gao L, Cheng M, et al. Carbon and N conservation during composting: A review[J]. Science of The Total Environment. 2022;840:156355.

[8] Wang J, Wang B, Bian R, et al. Bibliometric analysis of biochar-based organic fertilizers in the past 15 years: Focus on ammonia volatilization and greenhouse gas emissions during composting. Environmental Reserach. 2024;243:117853.

[9]徐路魏,王旭东.生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(06):1160-1166.

[10] [1]范晓霞.生物炭添加对尾菜气流膜好氧堆肥腐殖化进程的影响及其基质化利用[D].西南大学,2024.

[11] Liu H , Awasthi M K , Zhang Z ,et al.Evaluation of gases emission and enzyme dynamics in sheep manure compost occupying with peach shell biochar[J].Environmental Pollution, 2024, 351(000):11.

[12] B M K A A , A Y D , A S K A ,et al.Influence of bamboo biochar on mitigating greenhouse gas emissions and nitrogen loss during poultry manure composting[J].Bioresource Technology, 303[2025-03-06].

[13]任秀娜.矿物材料对畜禽粪便好氧堆肥碳氮转化的影响机制研究[D].西北农林科技大学,2022.

[14]A X R , A Q W , A R L ,et al.Effect of clay on greenhouse gas emissions and humification during pig manure composting as supported by spectroscopic evidence[J].Science of The Total Environment, 2020, 737.

[15] Cao Z , Qin X , Wen X ,et al.Modified Illite/smectite clay promoted composting humification and maturation mediated by reducing greenhouse gas emissions[J].Biomass Conversion and Biorefinery:1-13[2025-03-06].

[16]李慧杰,王一明,林先贵,等.沸石和过磷酸钙对鸡粪条垛堆肥甲烷排放的影响及其机制[J].土壤,2017,49(01):63-69.

[17]徐建楠.添加剂对蔬菜废物好氧堆肥进程及品质的影响研究[D].重庆大学,2022.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.002373.

[18]B H M A , A H Z , A Q F ,et al.Effects of four additives in pig manure composting on greenhouse gas emission reduction and bacterial community change - ScienceDirect[J].Bioresource Technology, 292[2025-03-06].

[19] Geng X , Yang H , Gao W ,et al.Greenhouse gas emission characteristics during kitchen waste composting with biochar and zeolite addition[J].Bioresource technology, 399:130575[2025-03-06].

[20] Huang , Hui ,Ren, et al.Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting[J].Bioresource Technology Biomass Bioenergy Biowastes Conversion Technologies Biotransformations Production Technologies, 2016.

[21] Guo H, Gu J, Wang X, et al. Beneficial effects of bacterial agent/bentonite on nitrogen transformation and microbial community dynamics during aerobic composting of pig manure[J]. Bioresource Technology. 2020;298:122384

[22] Wu JP, Li ML, Wang Y, et al. Impact of bentonite on greenhouse gas emissions during pig manure composting and its subsequent application[J]. Journal of Environmental Management. 2023;344:118453.

[23] Xue, W.; Li, M.; Zhang, L; et al. Contribution of Acid Additive to Co-Composting of Chicken Manure: Gas Emission Reduction and Economic Assessment. Agriculture 2025, 15 (4).

[24]周顺.添加剂对番茄茎秆堆肥和氮素养分影响及堆肥产物应用效果研究[D].西北农林科技大学,2024.

[25]杨岩,孙钦平,李妮,等.不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(01):66-72.

[26]段亚军,吴洪生,李贞伟,等.畜禽粪便堆肥过程中CH4和N2O减排研究进展[J/OL].农业环境科学学报,1-15[2025-03-24].

[27]李云,邱慧珍,张建斌,等.添加过磷酸钙和糠醛渣对好氧堆肥过程中氨气排放和氮素转化的影响[J].环境工程学报,2021,15(12):3992-4000.

[28] Yang F, Li G, Shi H, Wang Y. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. Waste Management, 2015, 36: 70-76

[29]潘亚杰.添加剂对猪粪堆肥的影响与堆肥产物的应用[D].河南科技大学,2023.

[30] Lei L, Gu J, Wang X, et al. Effects and microbial mechanisms of phosphogypsum and medical stone on organic matter degradation and methane emissions during swine manure composting[J]. Journal of Environmental Management. 2022;315:115139.

[31] Li Y, Luo W, Li G, et al. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting[J]. Bioresource Technology. 2018;250:53-59.

[32] Jiang J , Kang K , Wang C ,et al.Evaluation of total greenhouse gas emissions during sewage sludge composting by the different dicyandiamide added forms: Mixing, surface broadcasting, and their combination[J].Waste Management, 2018, 81(NOV.):94-103.

[33] Luo Y .Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH3, N2O and CH4 emissions during composting[J].环境科学学报(英文版), 2013.

[34] Huang D, Gao L, Cheng M, et al. Carbon and N conservation during composting: A review[J].Science of The Total Environment. 2022;840:156355.

[35] Wang S, Xu Z, Xu X, et al. Effects of two strains of thermophilic nitrogen-fixing bacteria on nitrogen loss mitigation in cow dung compost. Bioresource Technology. 2024;400:130681.

[36]李舒清,张镜丹,纪程,等.接种复合菌剂对牛粪好氧堆肥进程及温室气体（CH4和N2O）排放的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(06):1041-1050.

[37] [1]Tao,Jiang,and,et al.Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting[J].Journal of Environmental Sciences, 2011.

[38]袁京, 刘燕, 唐若兰, 等. 畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2428-2438

[39]张金辉,李银月,张发文,等.物料碳氮比及微生物菌剂接种量对黄瓜秧-鸡粪堆肥过程的影响[J].江苏农业学报,2024,40(02):260-269.

[40]许栋,王梅. 昌吉市规模化肉羊养殖场粪便采用纳米膜堆肥技术处理实例分析[J]. 新疆畜牧业,2023,39(5):34-36.

[41]温富勇,赵海明,张晶,等. "生物+气流膜"发酵技术试验示范应用案例[J]. 中国畜牧业,2021(21):70-71.

[42]徐鹏翔,王越,杨军香,等.好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2403-2408.

[43]曹玉博,张陆,王选,等.畜禽废弃物堆肥氨气与温室气体协同减排研究[J].农业环境科学学报,2020,39(04):923-932.

[44] Zeng,Jianfei,Yin,et al.Effect of aeration interval on oxygen consumption and GHG emission during pig manure composting[J].Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies, 2018.

[45]曾经理,谢诗茵,邓毅恒,等.复合菌剂添加对鸡粪膜堆肥过程中耐药基因消减的影响[J/OL].农业环境科学学报,1-20[2025-03-26].

[46] Zhang, L.; Shi, T.; Xu, Z, et al. Effect of lime and calcium magnesium phosphate on gaseous emissions, maturity, and bacterial dynamics during food waste composting[J]. Environmental Technology & Innovation 2023, 32.

[47] Zhang, L.; Gao, X.; Shi, T, et al. Regulating aeration intensity to simultaneously improve humification and mitigate gaseous emissions in food waste digestate composting: Performance and bacterial dynamics[J]. Science of The Total Environment 2023, 889, 164239.

[48] Zhang, L.; Gao, X.; Li, Y, et al. Optimization of free air space to regulate bacterial succession and functions for alleviating gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. Bioresource Technology 2023, 387, 129682.

[49]Xie, T.; Zhang, Z.; Zhang, D, et al. Effect of hydrothermal pretreatment and compound microbial agents on compost maturity and gaseous emissions during aerobic composting of kitchen waste[J]. Science of The Total Environment 2023, 854, 158712.

[50] Tang, R.; Liu, Y.; Ma, R, et al. Effect of moisture content, aeration rate, and C/N on maturity and gaseous emissions during kitchen waste rapid composting[J]. Journal of Environmental Management 2023, 326 (Pt A), 116662.

[51] Peng, L.; Tang, R.; Wang, G, et al. Effect of aeration rate, aeration pattern, and turning frequency on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. Environmental Technology & Innovation 2023, 29.

[52] Liu, Y.; Ma, R.; Wang, J, et al. Effect of nano zero-valent iron, potassium persulphate, and biochar on maturity and gaseous emissions during multi-material co-composting[J]. Environmental Technology & Innovation 2023, 32.

[53]Liu, G.; Yang, Y.; Ma, R, et al. Thermophilic compost inoculating promoted the maturity and mature compost inoculating reduced the gaseous emissions during co-composting of kitchen waste and pig manure[J]. Environmental Technology & Innovation 2023, 32.

[54] Li, M.; Li, S.; Meng, Q, et al. Feedstock optimization with rice husk chicken manure and mature compost during chicken manure composting: Quality and gaseous emissions[J]. Bioresource Technology 2023, 387, 129694.

[55] Cheng J, Gao X, Yan Z, et al. Intermittent aeration to reduce gaseous emission and advance humification in food waste digestate composting: Performance and mechanisms[J]. Bioresource Technology. 2023;371:128644.

[56]Qi, C.; Yin, R.; Cheng, J, et al. Bacterial dynamics for gaseous emission and humification during bio-augmented composting of kitchen waste with lime addition for acidity regulation[J]. Science of The Total Environment 2022, 848, 157653.

[57] Xu, Z.; Qi, C.; Zhang, L, et al. Bacterial dynamics and functions for gaseous emissions and humification in response to aeration intensities during kitchen waste composting[J]. Bioresource Technology 2021, 337, 125369.

[58] Xu, Z.; Ma, Y.; Zhang, L, et al. Relating bacterial dynamics and functions to gaseous emissions during composting of kitchen and garden wastes[J]. Science of The Total Environment 2021, 767, 144210.

[59] Gao, X.; Xu, Z.; Li, Y, et al. Bacterial dynamics for gaseous emission and humification in bio-augmented composting of kitchen waste[J]. Science of The Total Environment 2021, 801, 149640.

[60] Zhang, B.; Xu, Z.; Jiang, T, et al. Gaseous emission and maturity in composting of livestock manure and tobacco wastes: Effects of aeration intensities and mitigation by physiochemical additives[J]. Environmental Technology & Innovation 2020, 19.

[61] Liu, Y.; Ma, R.; Li, D, et al. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer, biochar and spent mushroom substrate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. Journal of Environmental Management 2020, 267, 110649.

[62]Yang, F.; Li, Y.; Han, Y, et al. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting[J]. Science of The Total Environment 2019, 657, 262-269.

[63]鲍美文.多元物料堆肥过程中温室气体的排放规律及机制[D].中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2023.

[64] Zhang J, Kong Y, Yang Y, et al. Effects of thermophilic bacteria inoculation on maturity, gaseous emission and bacterial community succession in hyperthermophilic composting. Sci Total Environ. 2024;927:172304.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **附录A****（资料性）****蔬菜废弃物堆肥监测记录表**蔬菜废弃物堆肥监测记录表内容和格式见A.1、A.2、A.3 **表A.1 堆肥数据及原料来源表 日期：**

|  |  |
| --- | --- |
| 园区名称 |  |
| 地址 |  省（市、自治区） 市（州、盟） 县（市、区、旗） 乡（镇、街道） 村（社区） |
| 堆肥方式 |  | 规模（立方米/吨） |  |
| 曝气量 |  | 曝气间隔 |  |
| 翻堆方式 |  | 翻堆频率 |  |
| 物料种类 | 运输距离（千米） | 运输方式 | 含水率（%） | 用量（吨） |
| 蔬菜废弃物1 |  |  |  |  |  |
| 蔬菜废弃物2 |  |  |  |  |  |
| 蔬菜废弃物3 |  |  |  |  |  |
| 蔬菜废弃物4 |  |  |  |  |  |
| 辅料1 |  |  |  |  |  |
| 辅料2 |  |  |  |  |  |
| 辅料3 |  |  |  |  |  |
| 添加剂1 |  |  |  |  |  |
| 添加剂2 |  |  |  |  |  |
| 添加剂3 |  |  |  |  |  |
| 总生产天数（天） |  | 一次发酵（天） |  | 二次发酵（陈化）（天） |  |

**表A.2 样品采集记录表 日期：**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 规模（立方米/吨） |  | 发酵天数 | 第 天 | 排气量（升/分钟） |  |
| 样品编号 | 采样时间 | 采样位置 | 采样量（千克/升） | 现场预处理情况 | 备注 |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

**记录人：\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 采样人：\_\_\_\_\_\_\_\_\_****表A.3 样品检测记录表 日期：**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 |  | 检测值 | 样品编号 |  | 检测值 |
| 气体指标 | CH4，mg/kg |  | 气体指标 | CH4，mg/kg |  |
| CO2，g/kg |  | CO2，g/kg |  |
| N2O，mg/kg |  | N2O，mg/kg |  |
| NH3，mg/kg |  | NH3，mg/kg |  |
| 技术指标 | 有机质含量，% |  | 技术指标 | 有机质含量，% |  |
| 酸碱度（pH） |  | 酸碱度（pH） |  |
| 种子发芽率，% |  | 种子发芽率，% |  |
| 总养分，% |  | 总养分，% |  |
| 含水率，% |  | 含水率，% |  |
| 机械杂质含量，% |  | 机械杂质含量，% |  |
| 限量指标 | 总砷（AS），mg/kg |  | 限量指标 | 总砷（AS），mg/kg |  |
| 总砷（AS），mg/kg |  | 总砷（AS），mg/kg |  |
| 总砷（AS），mg/kg |  | 总砷（AS），mg/kg |  |
| 总砷（AS），mg/kg |  | 总砷（AS），mg/kg |  |
| 总砷（AS），mg/kg |  | 总砷（AS），mg/kg |  |
| 粪大肠杆菌数，个/g |  | 粪大肠杆菌数，个/g |  |
| 蛔虫卵死亡率，% |  | 蛔虫卵死亡率，% |  |
| 氯离子的质量分数，% |  | 氯离子的治理分数，% |  |
| 杂草种子活性，株/kg |  | 杂草种子活性，株/kg |  |
| 其他 |  |  |  |  |  |
| 其他 |  |  |  |  |  |

**记录人：\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 采样人：\_\_\_\_\_\_\_\_\_****附录 B****（规范性）****气体排放测定**本文件方法中所用水应符合中三级水的规定。所列试剂，除注明外，均指分析纯试剂。本文件中所用的标准滴定溶液、标准溶液、试剂溶液和指示剂溶液，在未说明配制方法时，均按照HG/12843的规定配制。**B.1 方法原理**硼酸吸收法测定NH3是利用NH3通过与硼酸结合形成硼酸氨，以标准溶液硫酸（或盐酸）滴定使硼酸氨与硫酸（或盐酸）作用下分解，释放出NH3，并计算NH3的含量。气相色谱仪测定CH4、CO2和N2O是利用各种气体在固定相中的分配系数差异，在色谱柱内实现分离，随后由灵敏检测器对其浓度进行检测和定量。**B.2试剂**B.2.1硫酸（p=1.84 g/mL）。B. 2.2硼酸溶液（2%，m/V）：称取20g硼酸溶于水中，稀释至1 L。B. 2.3混合指示剂：称取0.5g溴甲酚绿和0.1g甲基红溶于100 mL，95%乙醇中。B. 2.4 硼酸指示剂混合液：每50 mL 2%硼酸（B.1.2.4）溶液中加入3-5滴混合指示剂（B.1.2.5），此溶液放置时间不宜过长。B.2.5 硫酸c（1/2H2SO4），=0.1 mol/L）或盐酸c（H）=0.1mol/L标准滴定溶液。B.2.6 CH4、N2O和CO2标准气体（无定量）。**B.3 仪器、设备**B.3.1 实验室常用仪器设备B.3.2 静态收集箱B.3.3 1L以上气袋B.3.4 真空采集管B.3.5 气相色谱仪**B.4 密闭场景中气体排放的测定方法****B.4.1NH3排放量测定方法**每天量取2%的硼酸溶液至于密闭反应器排气口处（吸收时间视堆体的大小可进行调整），同时封闭其他的排气口，加入混合指示剂（B.2.3），吸收饱和后，吸收瓶中液体由红色变成蓝色，记录吸收时间，然后用硫酸进行滴定（B.2.5），并进行换算。公式（1）如下：$E\_{NH\_{3}}=\sum\_{i=1}^{j=n}\frac{V×c×17×24}{m×t×1000}$ （1）$E\_{NH\_{3}}$——累计单位质量内NH3的排放量（g/kg﹒DM）i——第i天的排放量j——实际堆肥的总天数（d）V——滴定消耗的盐酸的量，如果是使用硫酸则还需要乘以2（mL）c——硫酸/盐酸的浓度（mol/L）m——堆体的初始干重（kg）t——每天收集的时间（h）24——每天对应的小时数17——NH3的相对分子量1000——L换算为mL的倍数**B.4.2 CH4、NH3和N2O排放量测定方法**用注射器采集气体至于真空管并使用气相色谱仪测定气体浓度，并根据气体流速计算出CH4和N2O每天的排放量总计得出，累计排放量为每天的排放量之和。计算公式（2）如下：$EM=\sum\_{i=1}^{j=n}\frac{101.375×1000×Q×24×\left（b−a\right）×10^{−6}×M}{8.314×（273+T\_{0}）×m}$ （2）EM——单位质量内CO2、CH4和N2O的累积排放量（g/kg·DM）i——第i天测得的排放量Q——是通气量（m3/h）b——气体的体积分数（ppm）M——气体的相对分子质量（g/mol）T0——环境温度（℃）m——干物质的质量（kg）**B.5 开放式场景中气体排放的测定方法****B.5.1 NH3排放量测定方法**每天量取2%的硼酸溶液至于静态箱内，加入混合指示剂（B.2.3），吸收饱和后，吸收瓶中液体由红色变成蓝色，记录吸收时间，用硫酸进行滴定（B.2.5），并进行换算，计算公式（3）如下：$E\_{NH\_{3}}=\sum\_{i=1}^{j=n}\frac{V×c×17×24}{m×t×1000}$ （3）$E\_{NH\_{3}}$——累计单位质量内NH3的排放量（g/kg·DM）i——第i天的排放量j——实际堆肥的总天数（d）V——滴定消耗的硫酸/盐酸的量，如果是使用硫酸则还需要乘以2（mL）c——硫酸/盐酸的浓度（mol/L）m——实静态监测箱内初始堆肥干重（kg）t——每天收集的时间（h）24——每天对应的小时数17——NH3的相对分子量1000——L换算为mL的倍数**B.5.2 CH4、NH3和N2O排放量测定方法**静态密闭箱采集气体的基本工作原理是用已知容积和底面积的密闭箱体（由化学性质稳定的材料制成）将要测定的地表罩起来每隔一段时间抽取箱内气体进行目标气体浓度的测定。具体方法步骤如下：采气前将堆肥装置及静态箱放置于底座上，用水密封。将100 mL注射器与三通阀相连，进行气体样品采集，分别采集四个重复气体样品，重复样品采集时间间隔为15 min（可根据实际情况进行调整）。采集后样品使用容量为100 mL铝箔气体采样袋储存或注入玻璃真空管进行储存，然后使用气相色谱仪进行测定。通过堆体下降的高度对堆肥箱内气体体积进行计算。公式（4）如下：$V\_{空}=\left(π×H×R^{2}\right)-\frac{π}{3}×\left(r^{2}+r×r\_{上}+r\_{上}^{2}\right)×\left(h-h\_{测}\right)$ （4）V空——堆肥箱内气体体积H——静态箱高度R——静态箱半径r——PVC桶底半径r上——PVC桶内堆肥上层半径；h——PVC桶高度；h测为PVC桶内堆肥下降高度。温室气体排放速率（Er）和排放通量（Ef）的计算公式（5）如下：$Er=\frac{∆c}{∆t}×\frac{M}{Vs}×\frac{P}{P0}×\frac{273}{T}×V\_{空}$ （5）∆C——在时间间隔∆t期间气体浓度的变化（ppm·min-1）∆t——时间间隔（min）V空——箱内气体体积（L）M——相关气体的相对分子质量（CO2、CH4和N2O分别为44、16和44）Vs ——标准温度和压力下1mol气体所占据的体积（22.4L）P——大气压力（bar）P0——标准压力（1.013 bar） T——采样时间中箱内温度，以Kelvin表示 排放通量的计算公式（6）如下：E𝑓 =$\frac{Er}{W}$ （6）W是堆肥材料的初始干物质质量（kg）。 温室气体的累积排放量（Ec）是用梯形积分法则计算，计算公式（7）如下：$Ec=\sum\_{}^{}\frac{\left(t\_{a}−t\_{b}\right)×\left(Ef\_{ta}−Ef\_{tb}\right)}{2}$ （7） ta和tb是两次测量的时间，Efta和Eftb是两次测量日期的气体排放通量。累积的CH4、N2O排放量转换为CO2当量（CO2-eq）以计算全球增温潜势。**附表 气相色谱仪建议运行参数**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | CO2 | CH4 | N2O |
| 检测器类型 | 氢火焰离子检测器FID | 氢火焰离子检测器FID | 微电子捕获检测器μECD |
| 柱箱温度 | 70℃ | 70℃ | 70℃ |
| 进样口温度 | 常温 | 常温 | 常温 |
| 检测器温度 | 200℃ | 200℃ | 330℃ |
| 色谱柱长度(m) | 2 | 3 | 3 |
| 色谱柱直径（英寸） | 1/8 | 1/8 | 1/8 |
| 色谱柱填充物 | Porapak.Q填充柱 | Porapak.Q填充柱 | Porapak.Q填充柱 |
| 色谱柱填充物目数 | 80-100目 | 80-100目 | 80-100目 |
| 载气类型 | N2 | N2 | N2 |
| 载气流量（ml/min） | 20 | 25 | 25 |
| 燃气类型 | 氢气 | 氢气 | - |
| 燃气流速 | 40 | 40 | - |
| 助燃气类型 | 空气 | 空气 | - |
| 助燃气流速 | 400 | 400 | - |
| 标准品提供单位 | 国家标准计量中心 | 国家标准计量中心 | 国家标准计量中心 |
| 标准等级 | 国家一级标准物质 | 国家二级标准物质 | 国家一级标准物质 |
| 测定相对误差 | <1% | <1% | <1.5% |
|  |  |  |  |

样品中的CO2要先经过Ni催化剂在375℃下被H2还原为CH4后再FID检测。 |