**《沼液堆肥生物干化技术规程》编制说明**

**《沼液堆肥生物干化技术规程》编制组**

**二〇二四年十一月**

江苏省地方标准

《沼液堆肥生物干化技术规程》

编 制 说 明

一、**目的意义**

据统计，截至2024年11月江苏省共有农村户用沼气池70万个，建设沼气工程4065处。厌氧发酵制备沼气产生的残余物（沼液和沼渣）产量巨大，多数得不到合理的处理和利用。该残余物含有大量的植物生长的养分如有机物、N、P、K和微量元素等，同时也含有污染环境的物质，沼渣虽经厌氧消化处理，但直接土地利用仍然存在风险，必须经过好氧堆肥处理后才能进入土地。沼液的产生量较大，在雨季和非农用的季节必须考虑沼液的出路，若长时间的存放继续存在着恶臭、传播畜禽疾病和人畜共患病的危险，不合理的使用方式或连续过量使用会导致硝酸盐、磷及重金属的沉积，从而对地表水和地下水构成污染。因此，沼液的消纳及处理问题已经成为制约规模化厌氧发酵制备沼气产业化推广的瓶颈。沼液和秸秆混合生物干化回收沼液中的养份，同时将秸秆制备成高品质有机肥是沼液处理和秸秆资源化利用的有效技术之一，该过程利用生物转化过程的热量将沼液中的水分蒸发掉，沼液中的养份可以与秸秆好氧发酵制备成有机肥。该技术的推广使用，不仅大大降低的沼液的处理成本，同时回收了沼液中的养份，并与秸秆协同处置，提高了秸秆的资源化利用率和附加值，可大幅度缩短沼气工程的投资回报期，该多联产模式可实现沼气工程“自身造血”，对国家实现节能、减排与环境治理的综合统筹和可持续发展具有重要的战略意义。

鉴于国内尚无沼液堆肥生物干化技术规程，为更好地引导和规范沼液资源化利用和促进有机废弃物沼气产业的发展，南京工业大学联合江苏省内外多家单位联合研究制定沼液堆肥生物干化技术规程。制定本标准是用于规范沼液的处理和资源化利用，解除制约规模化厌氧发酵制备沼气产业化推广的瓶颈，意义重大。农业有机废弃物厌氧发酵制备沼气兼具节能、减排、减污三重意义，沼液的消纳及处理问题已经成为制约规模化厌氧发酵制备沼气产业化推广的瓶颈。**沼液和秸秆混合生物干化回收沼液中的养份，同时将秸秆制备成高品质有机肥是沼液处理和秸秆资源化利用的有效技术之一，该过程利用生物转化过程的热量将沼液中的水分蒸发掉，沼液中的养份可以与秸秆好氧发酵制备成有机肥**。该技术的推广使用，不仅大大降低的沼液的处理成本，同时回收了沼液中的养份，并与秸秆协同处置，提高了秸秆的资源化利用率和附加值，可大幅度缩短沼气工程的投资回报期，该多联产模式可实现沼气工程“自身造血”，对国家实现节能、减排与环境治理的综合统筹和可持续发展具有重要的战略意义。

据大量市场调查，目前沼液处理成本高，沼液的消纳及处理问题已经成为制约规模化厌氧发酵制备沼气产业化推广的瓶颈。项目以规模化沼气工程产生的沼液为原料，运用沼液就地与秸秆混合生物干化的思路，处理过程的运行成本约150元/吨秸秆（1吨秸秆可固化2.0-3.0吨沼液），可生产约0.5-0.65吨有机肥，按450元/吨有机肥计算，可实现盈利。因此，鉴于国内尚无沼液堆肥生物干化技术规程，为更好地引导和规范沼液资源化利用和促进有机废弃物沼气产业的发展，立项研究制定沼液堆肥生物干化技术规程不仅十分必要且迫切。

二、任务来源

2023年8月江苏省市场监督管理局下发《省市场监管局关于下达2023年度江苏省地方标准项目计划的通知》（苏市监标〔2023〕173号），其中将《沼液生物固化清洁工艺技术规范》列为2023年度江苏省农业农村厅地方标准制定计划。南京工业大学为标准编制的承担单位，参编单位有江苏省农业科学院、南京农业大学、南京师范大学、兰州大学、中石化碳产业科技股份有限公司、徐州市环能生态技术有限公司等组成标准编制组。

三、编制过程

**1、资料收集阶段**

时间：2023年3月——2023年5月。

工作安排：

收集沼气发酵、沼液处理、秸秆堆肥、有机肥、沼渣处理等相关法律、法规、标准与规范、要求等技术资料。

**2、调查研究与分析阶段**

时间：2023年5月——2023年7月

工作安排：

1）编制标准大纲与有关要求，明确标准编制组人员分工。

2）编制标准编制工作方案。

3）研究沼气发酵、沼液处理、秸秆堆肥、有机肥、沼渣处理等相关法律、法规、标准与规范、要求等技术资料，全面了解相关要求。

4）调查研究江苏省内目前沼液和秸秆的资源化利用的工程案例。

5）取证沼液生物干化技术在江苏省内的实施成效，总结成功案例的技术要求。分析其推广应用可行性、成熟性、先进性，佐证其创造的生态、社会与经济效益。

**3、制定标准编制草案**

时间：2023年8月——2023年9月

自2023年8月，南京工业大学接到江苏省市场监督管理局下发《省市场监管局关于下达 2023 年度江苏省地方标准项目计划的通知》（苏市监标〔2023〕173 号）后，2023年9月，南京工业大学会同江苏省农业科学院、南京农业大学、南京师范大学、兰州大学、中石化碳产业科技股份有限公司、徐州市环能生态技术有限公司联合成立标准编制组，确定了主要标准制定原则、制定大纲、人员分工、进度计划以及实施方案，确定《沼液生物固化清洁工艺技术规范》标准框架。编制组依据标准编制实施方案及职责分工，通过资料收集、调查研究与分析等工作，结合沼气生物干化过程及产品应用中面临的技术问题，认真开展了标准初稿的编制工作，于2023年9月完成了标准初稿的编制。

**4、标准研讨**

时间：2023年9月——2023年10月

通过多次研讨和专家咨询，发现了标准初稿中存在的问题，提出了相关建议，编制组通过进一步的资料收集和专家咨询，对标准的内容、框架、格式等进行了修改、补充和完善，并对标准内容进行了修改。形成标准征求意见稿。

研讨修改情况如下：

1. 补充更新了规范性引用文件。
2. 对术语和定义进行了部分更正和补充、调整。

**5、制定标准编制征求意见稿**

时间：2023年9月——2023年12月

为广泛征求各方意见，拟于2023年9月25日起至2023年12月31日，标准编制组将本标准的征求意见稿下发至江苏省农业农村厅、江苏省生态环境各级行政主管部门、高校、沼气工程运营、秸秆及畜禽粪便资源化利用等相关的单位。在征求意见阶段，合计发送了40个单位，收到“征求意见稿”后回函的单位数29个，合计收到61条征集意见；采纳52条意见，部分采纳6条意见，未采纳的意见3条。

**6、专家初审**

标准编制组内部于2023年12月组织召开了《沼液生物固化清洁工艺技术规范》地方标准研讨会。根据收集的征求意见，在对标准修改、补充、完善的基础上，标准编制组对标准主要内容及编制情况进行详细介绍，与会代表和专家提出标准存在问题，对标准内容展开讨论，从标准内容、格式规范、语言表述等方面提出修改意见。会后，标准编制小组根据专家意见对标准文本进一步修改完善，形成了标准送审稿，并提交江苏省质量技术监督局，等待审查。

**7、终审**

2024年11月13日下午，江苏省市场监管局标准化管理处组织7位专家对由南京工业大学等单位承担的《沼液生物固化清洁工艺技术规范》地方标准进行了审查。评审专家组一致同意通过审查，并提出了17条审查意见，编制组采纳了17条。项目组根据专家意见对技术规程和编制说明进行修改，形成最终文件。

四、主要内容技术指标确立

本标准确定的原则是切合实际、措施具体、操作简便、科学规范、技术先进、逻辑严谨和文字简明。主要技术指标来源于标准起草人员工作积累以及国内外文献，并经提炼论证，具有科学性、实用性和指导性。同时，对本标准中涉及的关键技术进行了试验验证，明确了沼液堆肥生物干化的技术参数和应用效果。

1. 主要试验或验证的内容

本团队从2013年开始开展了沼气发酵及沼液的干化和资源化利用，相关研究成果获得了国家973计划项目、国家重点研发计划、江苏省农业自主创新项目的支持，在江苏徐州、盐城、宿迁等多个地方得到了推广应用。

* 1. **沼液生物干化过程**

沼液、秸秆（2-5 cm）的性质如下表1所示，沼液来自发酵体积为1200 m3的沼气工程。本研究在徐州市某沼气示范工程堆肥厂内进行，为期40 d，采用静态条垛生物干化形式开展研究，设置无膜覆盖生物干化组（CK）、无膜覆盖添加水热炭生物干化组（HG）、膜覆盖+水热炭生物干化组（HM）和膜覆盖生物干化组（MG）4个处理：（1）CK—沼液混合秸秆，（2）HG—沼液混合秸秆添加5‰水热炭，（3）HM—覆膜沼液混合秸秆添加5‰水热炭，（4）MG—覆膜沼液混合秸秆，湿重比为2.5：1。本实验使用的生物分子膜为高分子疏水性聚酯纤维与聚四氟乙烯复合而成的微孔膜，南京工业大学生物能源研究所自制（Q/YK 7001S - 2019）。将四组的含水率调整至60%~65%。单个堆体体积为4.5×2×1.5 m³；每个堆体使用规格相同的通风管通向堆体提供氧气。建堆完成时，堆体状况见图2。每周进行一次翻堆，以避免厌氧环境。分别在0、2、4、6、8、10、12、15、18、20、25、30、35、40天，从4个堆体的多个位点收集样品，并每天使用温度计测量堆体不同分层的最高温度，多次测量取其平均值并记录。

**表1不同原料的理化性质**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **指标** | **沼液** | **秸秆** | **水热炭** |
| pH | 7.36±0.04 | 7.05±0.02 | 3.93±0.02 |
| 含水率（%） | 83.65±1.25 | 9.94±0.19 | 65.31±2.16 |
| 总碳（g/kg，干重） | 278.39±1.14 | 468.97±2.54 | 461.13±1.61 |
| 总氮（g/kg，干重） | 15.41±0.67 | 9.82±0.031 | 24.47±0.26 |
| NH4+-N（mg/L） | 1826±12.68 | — | — |
| NO3--N（mg/L） | 16.54±0.22 | — | — |
| 总氮（mg/L） | 1977.46±4.36 | — | — |

****

**图2 沼气生物干化现场实验**

* 1. **沼液生物干化过程中基本理化性质的变化**

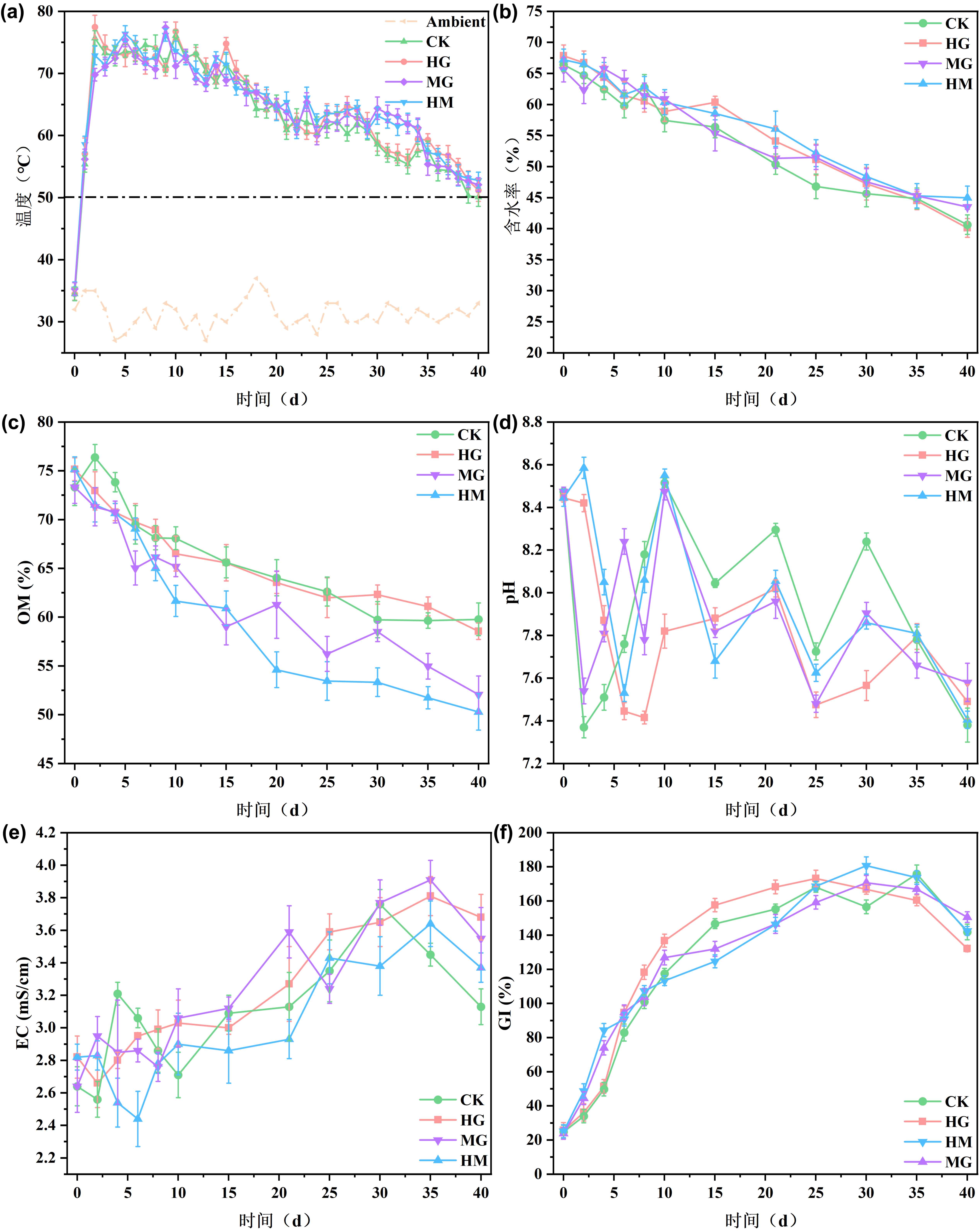
如图3（a）所示，各处理组沼液生物干化过程堆体温度变化趋势类似，均依次经历了升温-嗜热-中温维持-降温阶段，在生物干化初期各处理组的温度都急剧上升，都在第1天进入高温期（50°C以上），且在第2天达到70°C以上。其中，CK组在第2天达到最高温度75.7°C，高温期持续40天；HG组在第2天达到最高温度77.5°C，高温期持续40天；HM组在第6天达到最高温度76.4°C，高温期持续40天；MG组在第9天达到最高温度77.4°C，高温期持续40天。HG组温度略高于CK组，水热炭的多孔结构为微生物的生长繁殖提供了富氧环境，加速生物干化体系有机物的降解，从而促进了热量的累积。由于水热炭的热稳定性高，导致微生物活性较高，使堆体具有较高的温度。参考《粪便无害化卫生》GB7959-2012文件相关规定四个处理生物干化体系均满足粪便无害化安全标准。

生物干化过程中各处理组含水率的变化如图3（b）所示。各处理组由于温度的快速升高导致水分蒸发，含水率呈下降趋势。在第1-8天，HG组生物干化体系含水率的下降速度快于CK组，可能是水热炭增加了堆体的孔隙度，促进了堆体的空气流通，从而加速了水分的蒸发。生物干化结束时，CK组、HG组、HM组和MG组的含水量分别下降了38.81%，40.89%，33.10%，33.65%；最终含水率分别为40.64%，40.11%，44.98%，43.52%。在生物干化期间，由于分子膜表面的冷凝水会回流到体系中，导致覆膜处理组的含水率明显高于未覆膜处理组。

各处理组生物干化过程中有机质的变化如图3（c）所示。物料中有机物逐渐被微生物分解代谢，四组生物干化体系中有机质含量均呈下降趋势。在第0-10天，CK组有机质降解率为7.13%，HG组有机质降解率为11.51%，HM组有机质降解率为17.96%，MG组有机质降解率为11.08%，覆膜和水热炭丰富的孔隙结构为微生物的生命活动提供了适宜的生存环境，促进了有机物的分解代谢。生物干化结束时，CK组、HG组、HM组和MG组的含量分别为59.78%、58.56%、50.29%和52.07%，有机质降解率分别为18.46%、22.08%、33.09%和28.98%，HM组生物干化体系有机质降解最彻底。四个处理组均满足有机肥标准（NY/T525-2021），即有机质含量需达到30%。

各处理组生物干化过程中pH和EC的变化如图3（d）和（e）所示。初始pH在8.5左右，HG组和HM组pH变化趋势相似，在前2天略微上升，到第10天呈下降趋势，未添加水热炭处理组与之相反，由于氧气的大量消耗和局部厌氧环境，堆体中的微生物分解有机物产生了有机酸和无机酸导致pH值降低，通过翻堆，温度的不断升高各堆体的pH开始上升。由于水热炭富含酚羟基和羧基等酸性官能团，抑制了高温阶段pH值的上升。生物干化过程结束时，pH值在7.3~7.9左右，达到有机肥要求标准。EC值与植物毒性有关，EC值越大植物毒性越大。初始EC值在2.6-2.8 mS/cm，由于水分快速蒸发导致其含量呈上升趋势，翻堆也加速了低通风量处理组中有机物的分解，释放出大量的矿物盐。到生物干化过程结束时，CK组、HG组、HM组和MG组EC值分别为3.13 mS/cm、3.68 mS/cm、3.37 mS/cm和3.55 mS/cm，并且均未超过4 mS/cm，表明最终产品不具有植物毒性。

各处理组生物干化过程中GI值的变化如图3（f）所示。各处理组GI随着生物干化时间的延长逐渐增加，在第10天各处理组达到70%以上，到生物干化过程结束时，CK组GI达到141.88%，HG组GI达到132.13%，HM组GI达到150.53%，MG组GI达到142.52%，HM组腐熟度最高。四个处理组均满足有机肥标准（NY/T525-2021）即GI值需大于70%。当达到当种子萌发指数>70%时，表明最终产品已完全腐熟。覆膜且添加水热炭条件下提高了最终产品品质。



**图3 生物干化过程中理化性质的变化**

**（a：温度，b：含水率，c：有机质，d：pH，e：电导率，f：种子萌发指数）**

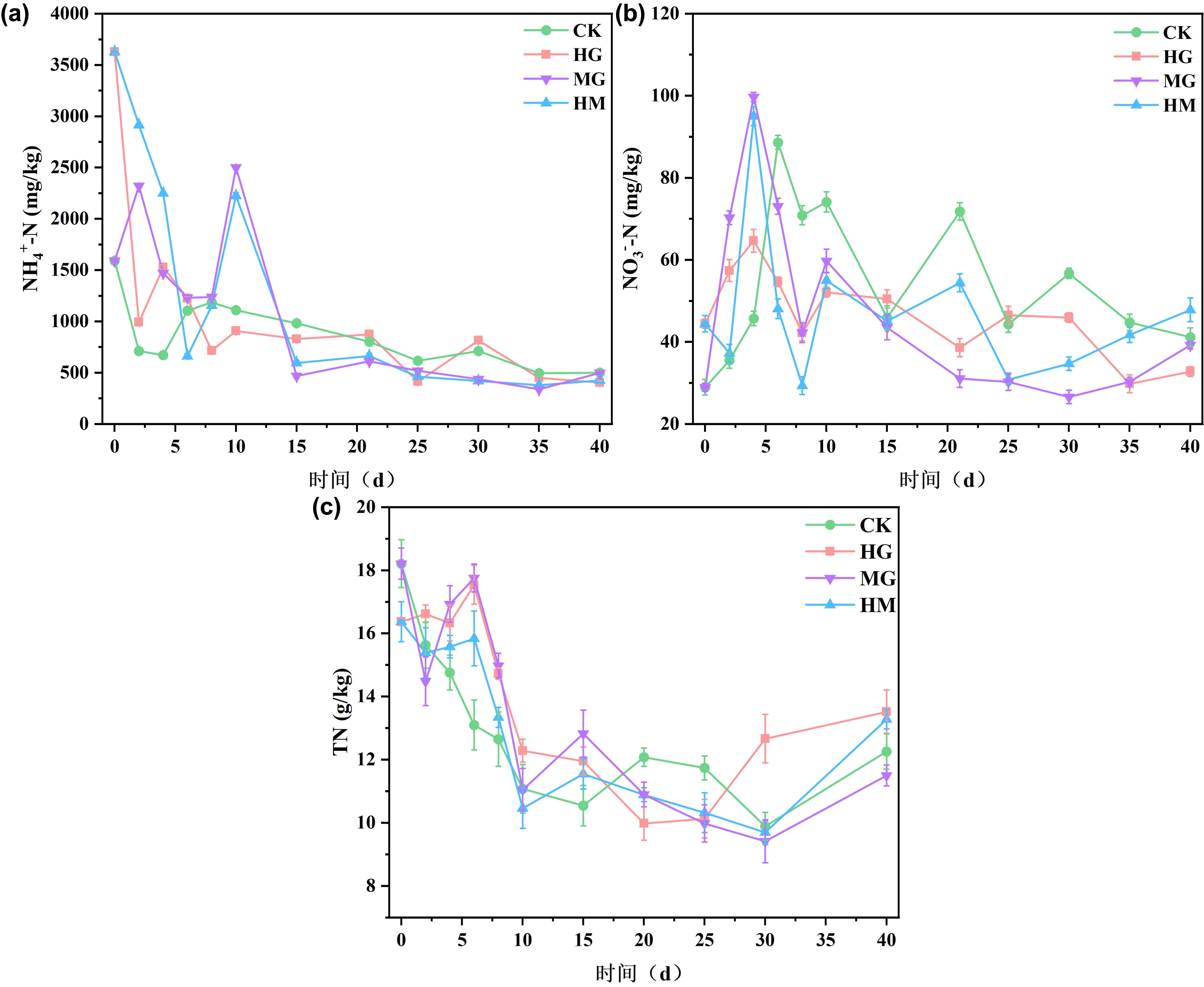
* 1. **沼液生物干化过程中氮素及养分含量的变化**

各处理组在生物干化过程中NH4+-N含量的变化如图4（a）所示。HG组和HM组NH4+-N含量在第0天达到3627.10 mg/kg，两组变化趋势相似，含量在前期急剧减少，尤其是HM组在第二天NH4+-N含量降至992.07 mg/kg，在高温期含量上升，这可能是由于水热炭含有酸性官能团，这些官能团与水溶性NH3结合，有助于NH4+在堆体中的保存。CK组和MG组在第0天含量是添加水热炭组的一半，达到1590.98 mg/kg，CK组在第8天之后稳定呈下降趋势，MG组前期呈上升趋势，之后呈下降趋势，NH4+-N浓度增加是由于含氮有机化合物的生物降解引起的氨化作用，各处理组到生物干化过程后期NH4+-N逐渐趋于平稳。生物干化过程结束时，HM组NH4+-N含量降至425.529 mg/kg，HG组NH4+-N含量降至404.089 mg/kg，CK组NH4+-N含量降至499.719 mg/kg，MG组NH4+-N含量降至499.494 mg/kg。

各处理组在生物干化过程中NO3--N含量的变化如图4（b）所示。HG组和HM组NO3--N含量在第0天为44.43 mg/kg，CK组和MG组NO3--N含量在第0天为28.95 mg/kg，各处理组在前期NO3--N含量呈上升趋势，HG组、HM组和MG组在第4天达到峰值，然而CK组在第6天才达到峰值。高pH和硝化反应导致大量NH4+-N转化为NO3--N，各处理组NH4+-N含量下降，NO3--N含量增加。前期覆膜处理组NO3--N含量高于未覆膜处理组，添加水热炭处理组含量低于未添加处理组，表明水热炭表面丰富的孔隙结构和吸附位点，有利于水热炭吸附NH3及NH4+-N，为硝化细菌的生命活动提供了适宜的环境。由于反硝化作用，NO3--N含量在达到峰值后下降。

各处理组总氮含量在前30天减少，在第30天之后呈上升趋势，如图4（c）所示。到生物干化过程结束时，HG组TN含量最高，达到13.52 g/kg，比CK组高9.32%，CK组氮素损失为32.67%，HG组氮素损失为17.42%，HM组氮素损失为18.89%，MG组氮素损失为36.84%。水热炭可以促进生物干化过程中的硝化作用，并将NH4+-N转化为NO3--N，从而减少NH3排放，增加了生物干化产品中的TN含量，表明覆膜及水热炭提高了氮素保留率。

初始混合物料及最终产品的总磷和总钾含量如表2所示。在初始物料中，四个处理组总磷和总钾的含量都较低，这与其他研究不同，这可能是由于原料为沼液和秸秆的缘故，经厌氧发酵后的残余物中养分含量较低。到第40天生物干化过程结束时，CK组、HG组、MG组和HM组总磷含量分别为2.07 g/kg、6.74 g/kg、1.25 g/kg和1.10 g/kg。HG组总磷含量最高，表明添加水热炭促进了总磷含量的提高。在生物干化过程初期，添加水热炭组总钾含量高于对照组，表明添加水热炭能够提高堆体中的总钾含量。然而，到生物干化过程结束时，HG组总钾含量变化不明显，水热炭在生物干化过程中对总钾的影响效果不显著。



**图4 生物干化过程中氮素含量的变化**

**（a：氨氮，b：硝氮，c：总氮）**

**表2 初始物料及最终产品的总磷和总钾含量**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 样品名称 | 总磷（g/kg） | 总钾（g/kg） |
| CK0 | 0.33±0.10 | 1.66×10-2±0.02 |
| HG0 | 0.26±0.21 | 2.71×10-2±0.01 |
| MG0 | 0.33±0.10 | 1.66×10-2±0.02 |
| HM0 | 0.26±0.21 | 2.71×10-2±0.01 |
| CK40 | 2.07±0.74 | 2.28×10-2±0.01 |
| HG40 | 6.74±1.02 | 2.41×10-2±0.02 |
| MG40 | 1.25±0.01 | 0.32×10-2±0.01 |
| HM40**生物干化** | 1.10±0.19 | 0.77×10-2±0.01 |

* 1. **沼液过程中的气体排放**

沼液生物干化过程中的温室气体及恶臭气体的排放情况，如图5所示。CH4是生物干化过程中释放的主要温室气体之一。如图5（a）和（b）所示，各处理组的CH4排放趋势一致，主要集中在生物干化过程早期，在第2天达到排放峰值，这可能是因为大量有机物的降解消耗了生物干化体系中的大部分氧气，导致堆体部分区域处于厌氧状态，提高了产甲烷菌的活性。随后，随着有机物逐渐完全降解，堆体的内部环境也逐渐稳定。生物干化过程结束时，各处理的CH4排放速率迅速下降，并逐渐趋于零。与CK组相比，HG组CH4累积排放量减少了10.32%，这是由于水热炭对NH4+-N的吸附可以抑制产甲烷菌对NH4+-N的利用，从而减少CH4的排放；与HM组膜内累积排放量相比，HM组膜外CH4累积排放量减少了27.39%，与MG组膜内累积排放量相比，MG组膜外CH4累积排放量减少了30.98%。结果表明，覆盖生物分子膜也能有效减少CH4的排放，降低了环境污染的风险。

在生物干化过程中，CO2的生成和释放主要是由于微生物在分解有机物的代谢活动所致。各处理的CO2每日排放趋势和累积排放含量如图5（c）和（d）所示。CO2的排放速率可以直接指示微生物活性及有机物的分解与矿化速度。各处理组在前期CO2排放量较大，这与温度的升高和有机质的降解有关。CK组在第6天达到CO2排放峰值13886 mg/m3，MG组膜内气体在第2天达到峰值15074 mg/m3，在第20天之后，各处理组CO2含量逐渐下降，直到生物干化过程结束，这是由于可溶性有机物的快速消耗，导致碳源减少。与CK组相比，HG组CO2累积排放量减少了20.48%，与HM组膜内累积排放量相比，HM组膜外CO2累积排放量减少了65.24%，与MG组膜内累积排放量相比，MG组膜外CO2累积排放量减少了73.80%。添加水热炭处理组CO2排放量明显低于对照组，这可能是由于水热炭的吸附性能限制了CO2的排放，并且覆盖生物分子膜也起到减排作用。

各处理的N2O每日排放趋势和累积排放含量如图5（e）和（f）所示。N2O排放主要通过NH4+-N硝化和NO3--N反硝化在生物干化过程的降温和成熟阶段产生。与其他气体相比，N2O排放量极低，堆体中N2O的初始排放可能是由于OM的快速降解导致堆体的局部厌氧沉降，从而促进了NO3--N通过反硝化作用形成N2O。较高的温度抑制了硝化细菌的生长，从而对N2O的排放也起到抑制作用，到中温期大量的腐殖质的生成为硝化细菌生长提供了适宜的生存环境。与CK组相比，HG组N2O累积排放量减少了29.67%，与HM组膜内累积排放量相比，HM组膜外N2O累积排放量减少了16.52%，与MG组膜内累积排放量相比，MG组膜外N2O累积排放量减少了13.61%。添加水热炭处理组N2O排放量明显低于对照组，这可能是由于水热炭的加入抑制了硝化微生物的生长，从而抑制了N2O的硝化作用的产生。

在生物干化过程中释放的恶臭气体以NH3为主。如图5（g）和（h）所示，生物干化过程中NH3的释放主要集中在嗜热期，在早期阶段，由于含氮有机物的降解和温度的升高，各处理组的氨排放量迅速增加。由于水热炭的多孔结构和丰富的酸性官能团对NH3的吸附，导致添加水热炭组NH3的最大排放时间延迟，在第6天达到最大排放值，HG组NH3排放量低于CK组，膜覆盖生物干化系统能有效降低NH3的挥发。各处理达到峰值后，随着生物干化进程的推进，由于可降解有机物的逐渐耗尽、氨化细菌活性和温度的降低以及硝化作用的增强，NH3排放速率逐渐降低，并在生物干化过程结束时降至零。与CK组相比，HG组NH3排放量减少了14.74%，与HM组膜内排放量相比，HM组膜外NH3排放量减少了69.06%，与MG组膜内排放量相比，MG组膜外NH3排放量减少了71.45%。覆膜处理组氨挥发相对较少，膜两侧温差形成的凝结水层潜在地有效地吸附、保留和回流NH3到堆体中。以上结果表明，添加水热炭能够抑制温室气体及恶臭气体的产生，分子膜也具有良好的减排效果。据文献报道，生物干化过程中的氮损失占初始总氮的21%-77%，碳损失占初始总碳的34%-77%。在本次沼液生物干化过程中，气体的累积排放量为CO2>NH3>CH4>N2O。CO2和NH3的排放是造成碳和氮损失的主要原因。添加水热炭和覆盖生物分子膜对不同的气体有不同的减排作用。由于水热炭具有良好的吸附性，它有效降低了气体排放。此外，分子膜对堆体所产生的水蒸气表现出选择性的透过性，当水蒸气在膜下凝结，形成水层时在一定程度上吸收并阻碍气体挥发，从而具有显著的减排效果，具有良好的环境效益。



**图5 生物干化过程中气体排放情况**

**（a，c，e，g分别为：CH4、CO2、N2O和NH3日排放含量；b，d，f，h分别为：CH4、CO2、N2O和NH3累积排放含量）**

* 1. **三维荧光光谱特征分析**

生物干化过程中的微生物代谢主要发生在水溶相中，水溶性有机物（DOM）的演变特征及其转化过程能一定程度上反应生物干化过程中有机质的降解、稳定和腐殖化程度。每组各选取了四个代表性样品即第0天，第10天，第20天，第40天用于测定三维荧光光谱，如图6所示。

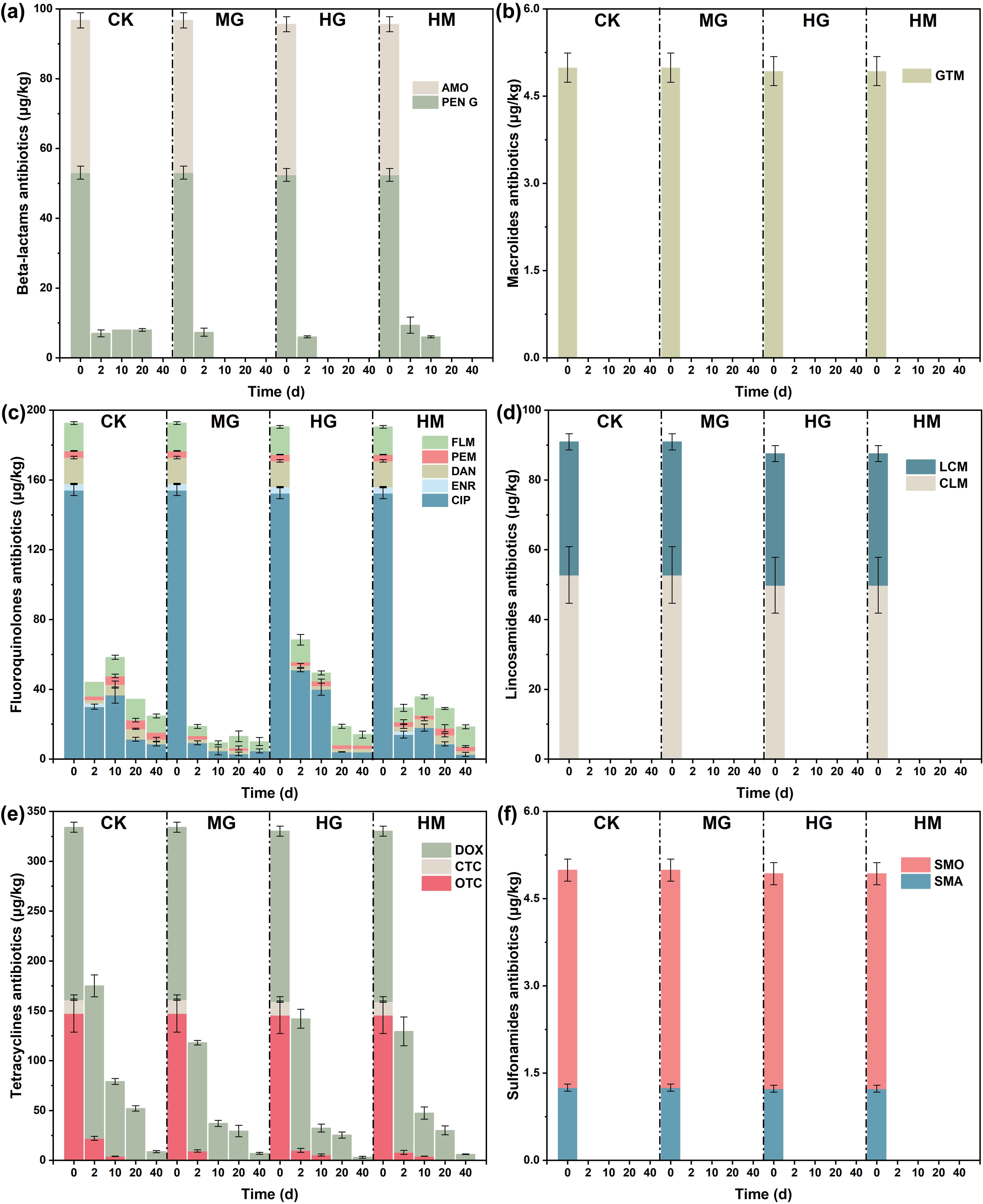
由图6可以看出，初始物料中DOM的主要成分为可溶性微生物代谢物，表现在Ⅳ区存在荧光强度，Ⅴ区域荧光强度较强，这与其他研究结果不一致，可能是经厌氧发酵后的沼液中大分子有机物进行了初步的降解并且腐殖质物质已经初步形成。随着发酵的进行，可溶性微生物代谢物被快速利用导致生物干化过程第10天时其峰值强度降低，向更长的波长偏移，这可能是由于微生物快速消耗了不稳定的腐殖酸。在第10天时，HG组V区荧光强度强于其他三个处理组，表明添加水热炭更有利于生物干化过程中的腐殖化进程；到第20天时，HM组荧光强度最强，由于覆膜对堆体升温有延迟性，使得腐殖程度缓慢；到第40天时，各处理组堆体已接近腐熟并趋于稳定，并且HG组和MG组荧光强度较强，这与GI值一致，表明添加水热炭及膜覆盖系统提高了生物干化过程的腐殖化速度。这可能与微生物代谢活动加速使得堆体内的大分子有机质快速分解从而形成稳定的腐殖质有关。



**图6 生物干化过程中DOM的三维荧光光谱**

* 1. **抗生素浓度的变化**

图7（a-f）分别展示了沼液生物干化过程中β-内酰胺类抗生素（Beta-lactams antibiotics）、大环内酯类抗生素（Macrolides antibiotics）、氟喹诺酮类抗生素（Fluoroquinolones antibiotics）、林可酰胺类抗生素（Lincosamides antibiotics）、四环素类抗生素（Tetracyclines antibiotics）和磺胺类抗生素（Sulfonamides antibiotics）浓度的变化。在生物干化过程初期，添加水热炭处理组的四种抗生素浓度均低于对照组，表明添加水热炭能够降低抗生素的浓度。在生物干化过程中，β-内酰胺类抗生素以阿莫西林（Amoxicillin，AMO）和青霉素（Penicillin G，PEN G）为主，如图7（a）所示，在生物干化过程的第2天时，各处理组AMO均被完全去除，而PEN G去除速度较慢，MG组和HG组都在第10天时被完全去除，HM组在第20天时被完全去除，这三组PEN G去除速度都快于CK组，表明添加水热炭和覆盖生物分子膜能够加快PEN G的去除，到生物干化过程结束时各处理组去除率都达到100%。有研究表明，高温可杀死生物干化体系中的致病菌和耐药微生物，并促进生物干化过程中抗生素的降解，添加水热炭和覆盖生物分子膜加速了堆体温度的上升，从而加快了抗生素的去除。氟喹诺酮类抗生素以氟甲喹（Flumequine，FLM）、甲磺酸培氟沙星（Pefloxacin mesylate，PEM）、达氟沙星（Danofloxacin，DAN）、恩氟沙星（Enrofloxacin，ENR）和环丙沙星（Ciprofloxacin，CIP）为主，如图7（c）所示。CK组到生物干化过程结束时FLM、DAN、ENR和CIP的去除率分别为41.67%、82.20%、100%和94.38%，而PEM增长了0.25 µg/kg，MG组到生物干化结束时FLM、PEM、DAN、ENR和CIP的去除率分别为66.67%、100%、100%、100%和96.97%，HG组到生物干化过程结束时FLM、PEM、DAN、ENR和CIP的去除率分别62.06%、45.96%、86.49%、100%和97.37%，HM组到生物干化过程结束时FLM、PEM、DAN、ENR和CIP的去除率分别为28.33%、32.45%、86.49%、100%和98.25%。氟喹诺酮类抗生素的分子结构由羧基环、氨基环和芳香环构成，其易于被腐殖质吸附。水热炭能够促进生物干化过程体系中腐殖质的形成，从而促进氟喹诺酮类抗生素的去除。四环素类抗生素以土霉素（Oxytetracycline，OTC）、金霉素（Chlortetracycline，CTC）和强力霉素（Doxycycline，DOX）组成（图7（e））。在生物干化过程中，CTC和OTC降解速度较快，各处理组CTC在生物干化过程的第2天就完全被去除，CK组OTC在第20天时被去除，MG组OTC在第10天时被完全去除，HG组和HM组OTC在第20天时被完全去除。四环素类抗生素易于被环境介质所吸附，其降解途径主要为生物降解，水热炭作为一种具有吸附和催化性能的功能碳材料能够增强其对四环素类抗生素的吸附，从而促进四环素类抗生素的生物降解。到生物干化过程结束时，CK组、MG组、HG组和HM组DOX去除率分别达到94.99%、95.96%、98.25%和96.49%。到生物干化过程结束时，CK组、HG组、MG组和HM组抗生素总去除率分别为95.40%、97.62%、97.65%和96.57%。综上所述，水热炭及覆盖生物分子膜能够促进生物干化体系中抗生素的去除，从而进一步降低其环境污染的风险。由于各抗生素类型和化学结构式的不同，在生物干化过程早期，各处理组大环内酯类抗生素（图7（b））、林可酰胺类抗生素（图7（d））和磺胺类抗生素（图7（f））就完全被去除，去除率都达到100%。



**图7 生物干化过程中抗生素浓度的变化**

**（a：β-内酰胺类抗生素，b：大环内酯类抗生素，c：氟喹诺酮类抗生素，d：林可酰胺类抗生素，e：四环素类抗生素，f：磺胺类抗生素）**

**（二）沼液堆肥生物干化经济性分析及应用**

基于实验室和工程化研究，对采用生物干化工艺处理沼液和秸秆进行了经济性分析。采用生物干化的模式，工艺周期为20~40天，1吨秸秆（含水率约10%）可以消纳2.5吨沼液，生产出1.07吨有机肥（国家标准含水率为30%）。据调研，沼液作为水处理成本需要50~60元/吨，而沼液产量巨大，这就使得处理成本过高。与传统水处理相比，生物干化工艺节约了成本。按照有机肥450元/吨的单价及30%的利润计算，可以形成480元的产值，为沼液的减量和资源化利用提供了新的解决方案，有利于沼气工程的产业化推广。目前沼液堆肥生物干化技术已在江苏徐州、盐城、宿迁等地10余家沼气工程上得到了推广应用，多地生产经营者纷纷表示，科学规范地使用沼液堆肥生物干化技术可实现沼气工程的盈利，希望大力加强沼液堆肥生物干化技术的宣传推广和应用指导。

**（三）预期的效果**

**1、经济效益提升**

采用沼液堆肥生物干化的模式，1吨秸秆可以消纳2.5吨沼液，生产出1.07吨有机肥（国家标准含水率为30%），节省了50元/吨的沼液处理费用，按照有机肥450元/吨的单价及30%的利润计算，可以形成480元的产值，经济效益显著，为沼液的减量和资源化利用提供了新的解决方案，有利于沼气工程的产业化推广。

**2、社会效益增强**

制定本标准是用于规范沼气工程产业的沼液的处理和资源化利用，解除制约规模化厌氧发酵制备生物天然气产业化推广的瓶颈，意义重大。农业有机废弃物厌氧发酵制备生物天然气兼具节能、减排、减污三重意义，沼液的消纳及处理问题已经成为制约规模化厌氧发酵制备生物天然气产业化推广的瓶颈。

**3、生态效益改善**

该技术的推广使用，不仅大大降低的沼液的处理成本，同时回收了沼液中的养份，并与秸秆协同处置，提高了秸秆的资源化利用率和附加值，可大幅度缩短生物天然气工程的投资回报期，该多联产模式可实现生物天然气工程“自身造血”，对国家实现节能、减排与环境治理的综合统筹和可持续发展具有重要的战略意义。

**五、重大分歧意见的处理过程和依据**

无重大分歧意见。

**六、与现行法律法规和强制性标准的关系**

目前我省制定了《秸秆有机肥制作技术规程》（DB32/T 3626-2019），主要规范了秸秆制备有机肥的规范，但缺乏沼液资源化利用相关的标准。本标准在消化吸收以往国内外标准的基础上，结合江苏省内沼气生产企业实际需求的基础上制定的，符合国家相关法律和法规的要求。本标准发布实施后，沼气生产单位需按照本标准进行沼液的处理和资源化利用。在标准实施过程中应根据实际情况适当对本标准进行合理修订。

**七、实施推广建议**

**1、实施对象**

主要为1）现有规模化沼气工程业主（亟需新技术转型升级）；2）畜禽粪污的规模化养殖企业；3）城镇有机废弃物处理业主（餐厨、枯枝落叶等）；4）从事沼气工程建设及装备制造的企业；5）发展循环农业的种养一体农场主、合作社；6）政府技术推广部门等。

**2、作为强制性标准或推荐性标准的建议**

本标准为推荐性标准，并不涉及有关国家安全、保护人体健康和人身财产安全、环境质量要求等有关强制性地方标准或强制性条文等的八项要求之一，因此建议作为推荐性农业行业标准发布实施。

**3、推广实施建议**

（1）发挥政府相关单位的行业引导作用，通过江苏省市场监督管理局会同江苏省农业生产主管部门，加大对本标准的宣传、推广力度。

（2）发挥行业主管部门的技术指导作用，加快本标准的落地应用。

（3）加强从事废弃物处理及沼气工程建设企业的市场推广作用，新的工程设计和建设过程中考虑本标准的技术方案，配合本标准的实施应用。

（4）加强地方产业生产的技术示范效果，通过各级农技推广单位和行业协会等，举行技术示范和培训观摩活动，强化本标准的技术指导、示范应用和质量论证。

**八、起草单位和起草人员信息及分工**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **姓名** | **单位名称** | **职务/职称** | **项目分工** | **标准化工作经历** |
| 1 | 周俊 | 南京工业大学 | 教授 | 主持标准的撰写 | 主持、参加多项江苏省地方标准及团体标准的制定 |
| 2 | 奚永兰 | 江苏省农业科学院 | 副研究员 | 技术要求及编制说明的撰写 | 参加江苏省地方标准制定 |
| 3 | 叶小梅 | 江苏省农业科学院 | 所长/研究员 | 技术要求的撰写 | 主持与参加多项省地方标准编制 |
| 4 | 苗晓 | 徐州市环能生态技术有限公司 | 总经理/工程师 | 技术要求的撰写 | 参加江苏省地方标准制定 |
| 5 | 雍晓雨 | 南京工业大学 | 副教授 | 试验方法的撰写 | 无 |
| 6 | 凌宁 | 兰州大学 | 教授 | 技术要求的撰写 | 主持与参加多项省地方标准编制 |
| 7 | 王秋君 | 江苏省农业科学院 | 副研究员 | 技术要求的撰写 | 参加江苏省地方标准制定 |
| 8 | 张楠 | 南京农业大学 | 教授 | 试验方法的撰写 | 主持与参加多项省地方标准编制 |
| 9 | 黄新琦 | 南京师范大学 | 教授 | 技术要求的撰写 | 参加江苏省地方标准制定 |
| 10 | 陈曦 | 中石化碳产业科技股份有限公司 | 高级工程师 | 技术要求的撰写 | 主持与参加多项省地方标准编制 |
| 11 | 黄显著 | 中石化碳产业科技股份有限公司 | 工程师 | 技术要求的撰写 | 无 |
| 12 | 杨朋朋 | 南京农业大学 | 教授 | 技术要求的撰写 | 无 |