



腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥中的作用效果

司孝刚¹ 谯祖勤^{1, 2*} 彭星运¹ 周昌平¹

1 贵州省化工研究院 贵阳 550002

2 昆明学院农学与生命科学学院 昆明 650000

摘 要：我国畜禽粪便、农作物秸秆等产量增加使得农业发展和生态环境面临严峻挑战。堆肥是将畜禽粪便、农作物秸秆资源化、无害化、低碳化利用的有效途径，而传统堆肥技术存在堆肥进程缓慢、养分损失较大、有害气体排放较多等问题，因此，在实践中，常添加外源物质来提高堆肥效率。腐植酸因其结构中含有羧基、羟基、甲氧基、胺基、羰基等多种活性官能团，使其具有吸附、络（螯）合、离子交换等作用而被应用于畜禽粪便、农作物秸秆堆肥。本文从腐植酸降低氮素损失、钝化重金属、调控堆肥温度和 pH、促进堆肥腐殖化、提高抗生素抗性基因去除效率等 5 个方面总结了腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆等堆肥中的作用效果，并总结了腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥的主要作用表现，以期为腐植酸在堆肥中的应用提供参考。

关键词：畜禽粪便；农作物秸秆；腐植酸；作用；堆肥；生态环境

中图分类号：TQ314.1, S141.4 **文章编号：**1671-9212(2024)05-0017-09

文献标识码：A

DOI：10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.05.002

Effects of Humic Acid on Livestock Manure and/or Crop Straw Compost

Si Xiaogang¹, Qiao Zuqin^{1, 2*}, Peng Xingyun¹, Zhou Changping¹

1 Guizhou Research Institute of Chemical Industry, Guiyang, 550002

2 School of Agriculture and Life Sciences, Kunming University, Kunming, 650000

Abstract: The increase of livestock manure and/or crop straw production in our country poses serious challenges to agricultural development and ecological environment. Composting is an effective way to resource, harmless, and low-carbon livestock manure and/or crop straw. However, traditional composting technology has problems such as slow composting process, significant nutrient loss, and excessive emission of harmful gases. Therefore, in practice, external substances are often added to improve composting efficiency. Humic acid is used in livestock manure and/or crop straw composting due to its structure containing various active functional groups such as carboxyl, hydroxyl, methoxy, amino, carbonyl, etc., which enable it to have adsorption, complexation, chelation, ion exchange and other functions. In this paper, the effects of humic acid on composting of livestock manure and/or crop straw were summarized from five aspects: reducing nitrogen loss, passivating heavy metals, accelerating composting process, promoting composting humification, and improving the removal efficiency of antibiotic resistance genes. The main effects of humic acid on composting of livestock manure and/or crop straw were summarized, in order to provide reference for the application of humic acid in composting.

Key words: livestock manure; crop straw; humic acid; effect; compost; ecological environment

[基金项目] 贵州省科技支撑计划项目（项目编号：黔科合支撑〔2023〕一般 017）；贵州科学院青年基金项目（项目编号：黔科院 J 字〔2023〕10 号）。

[收稿日期] 2024-04-25

[作者简介] 司孝刚，男，1994 年生，工程师，主要研究方向为新型绿色肥料与环境保护，E-mail: 215580738@qq.com。

* 通讯作者：谯祖勤，女，工程师，E-mail: 425739318@qq.com。

我国是农业大国,每年都会产生大量的畜禽粪便、农作物秸秆。据统计,2021 年我国畜禽粪便产量达 3.8×10^9 t,但畜禽粪便资源化利用率仅 70%^[1],农作物秸秆年产量 7.0×10^9 t^[2]。大量农作物秸秆的燃烧及未处置的畜禽粪便随意堆放会造成环境污染和资源浪费,如何合理处置畜禽粪便、农作物秸秆已经成为制约农业发展和生态环境治理的重要技术难题。大量研究表明,堆肥是将畜禽粪便、农作物秸秆资源化、无害化、低碳化利用的有效途径。堆肥指有机质在好氧条件下经微生物分解发生矿(质)化和腐殖化作用进一步形成稳定腐殖质的过程^[3]。堆肥不仅可通过微生物降解畜禽粪便、农作物秸秆中的有机质,杀死其中的病原菌,而且能把畜禽粪便、农作物秸秆中含有的营养元素转化为土壤及植物所需。传统堆肥技术一方面堆肥进程较缓慢,另一方面堆肥过程中氮素损失较多,占总氮的 25.6% ~ 42.6%,其中以 NH_3 形式挥发是堆肥中氮素损失的主要形式,平均损失量占氮素损失总量的 54.8%^[4];同时畜禽粪便中重金属活性较高,为畜禽粪便的安全利用带来不容小觑的污染风险^[5],在实际堆肥工艺中往往需将重金属钝化以降低重金属的有效性。此外,抗生素在畜禽生产中被广泛用作饲料添加剂以降低畜禽疾病发病率,据统计,大多数抗生素在家禽肠道中代谢不良,约 30% ~ 90% 通过粪便和尿液排放到土壤及地下水中^[6];家禽粪便是抗生素、抗生素抗性基因和抗生素抗性细菌混合污染的重要来源^[7]。可以说畜禽粪便将极大地促进抗生素抗性基因在环境中的传播,使农业生态系统中的细菌具有抗各种抗生素的能力,最终对人类身体健康产生影响^[8]。已有研究发现,外源添加物对加快堆肥过程具有积极作用,如沸石^[9]、膨润土^[10]、生物炭^[11]等物理添加剂,氯化钙^[12]、过磷酸钙^[13]等化学添加剂,不同类型的添加剂对堆肥作用机制不同,展现出的效果也不一样。

腐植酸是自然界中广泛存在的大分子有机物质,原料易得且成本低廉,同时腐植酸本身就是腐殖化的产物^[14, 15]。由于具有发达的孔隙结构、较大的内表面积、丰富的官能团和极强的吸附能

力^[15 ~ 17],腐植酸作为一种堆肥外源添加剂,在改善堆肥品质、减少氮素损失及有害气体排放和钝化重金属等方面取得了显著成效。在碳中和背景下,将腐植酸应用于畜禽粪便、农作物秸秆堆肥,将更加有利于畜禽粪便、农作物秸秆资源化、无害化、低碳化,同时拓宽腐植酸的应用方向。文章总结了腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥中的作用效果,以期腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥方面的应用提供参考。

1 降低氮素损失

堆肥中的氮素损失主要发生在堆肥高温期,该期间微生物增殖以及有机氮矿化产生了大量的铵态氮。铵态氮在高 pH 和高温条件下,以 NH_3 形式释放到大气中,造成了堆肥过程中的氮素损失^[18]。腐植酸具有强大的内表面积和较强的吸附能力,可以吸附堆肥物料中的铵态氮,有利于后期硝态氮和有机氮的形成,减少氨挥发,也能通过络(螯)合作用稳定氮素^[15]。同时,腐植酸呈酸性,可降低堆体物料 pH、减少物料中氨的挥发,从而降低堆肥中氮素的损失。因此,添加腐植酸可提高堆肥产物氮含量,是一种控制堆肥化氮素损失的天然固定剂。表 1 列出了腐植酸对部分畜禽粪便、农作物秸秆堆肥过程中氮素损失的影响。李森等^[19]在水葫芦堆肥中,将过磷酸钙、腐植酸钠、硫酸亚铁按 5 : 20 : 75 的质量比例配制保氮剂,添加堆肥原料干重的 3% 保氮剂进行好氧堆肥试验。试验结果表明,相对 CK 处理,添加保氮剂以后有机氮含量提高了 13.2%,全氮含量提高了 16.3%,氨挥发总量降低了 42.4%,氮素固定率高达 72.2%。孙志华等^[20]研究表明,牛粪 + 蘑菇渣堆肥原料中加入 10% 风化煤可降低氮素损失,同时增加钾的累积。赵旭等^[21]在牛粪堆肥过程中加入适量的腐植酸可降低氨气释放量,从而降低氮素损失。孔凡克等^[22]在研究不同量腐植酸对鸡粪 + 玉米秸秆堆肥进程和氮素损失的影响时表明,添加腐植酸保氮剂可以提高发酵产物的氮含量,降低干物质的损失率,从而减少氮素的损失率;且随着腐植酸添加



量的增加，保氮效果逐步提高。周顺等^[23]研究认为，腐植酸可减少在番茄秸秆好氧堆肥过程中氮素损失，同时减少了氨气的挥发量。高鹏等^[24]以猪粪+鸡粪+食用菌渣为原料，添加 5% 的腐植酸进行堆肥，结果表明，腐植酸可增加堆肥的全氮含量，降低氮素损失。贺丽等^[25]在空心莲子草堆肥过程中添加腐植酸可加快启动速度、缩短堆肥时间，并能减少氨挥发。江志阳等^[26]在堆肥过程中添加 5% ~ 10% 的褐煤，当堆肥温度 10 ℃ 以上、物料水分 40% 左右时，褐煤中的腐植酸类物质与

氨态氮反应，形成腐植酸铵类物质和腐植酸螯合态营养元素，可减少 33.06% ~ 57.9% 的氨氮挥发。Robert 等^[27]研究发现，在牛粪堆肥过程中添加褐煤可减少 NH₃ 排放及提高堆肥最终的总氮含量。Cao 等^[28]结果表明，添加 15% 的褐煤，能够通过吸附 NH₄⁺ 来抑制氮的损失实现堆肥中氮素保留。综上所述，腐植酸可利用其弱酸性、络（螯）合、吸附性能降低堆肥过程中氮素损失，且保氮效果优于过磷酸钙、磷酸亚铁^[25]等添加物，是当前堆肥过程中降低氮素损失的一种优质添加剂。

表 1 腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥过程中对氮素损失的影响

Tab.1 Effects of humic acid on nitrogen loss during the composting process of livestock manure and/or crop straw

堆肥原料	堆肥添加剂	堆肥添加量	对氮素损失的影响	参考文献
水葫芦	腐植酸钠	堆肥原料干重的 0.6%	氮素固定率达 72.2%	[19]
牛粪+蘑菇渣	风化煤	堆肥原料干重的 10%	全氮含量仅减少 11.11%	[20]
牛粪	腐植酸	牛粪湿重的 5% ~ 10%	NH ₃ 浓度比未加腐植酸的 CK 处理低 20.81% ~ 39.74%	[21]
鸡粪+玉米秸秆	腐植酸	堆肥原料干重的 3%	相对于 CK 处理，氮素损失率为 15.48%，氮素损失减少率为 17.13%	[22]
番茄秸秆	腐植酸	堆肥原料干重的 5%	氮素损失率为 15.00%	[23]
猪粪+鸡粪+食用菌渣	腐植酸	堆肥原料湿重的 5%	氮素损失率为 30.13%	[24]
空心莲子草	腐植酸	堆肥原料干重的 5%	全氮含量降低 12.63%，含量为所有处理组最高	[25]
牛粪	褐煤	堆肥原料干重的 20%	相对于初始总氮素损失为 7.9%，总氮素含量比未添加褐煤组高 10% ~ 19%	[27]

2 钝化重金属

畜禽生长过程中会添加 Cu 和 Zn 等营养元素以促进机体代谢、加速生长和抑制动物肠道有害微生物^[29]，添加 As 可以改善动物的毛色并促进生长，这些添加剂是畜禽粪便中重金属的主要来源^[30]。研究发现，畜禽粪便中 Cd、As、Cu 和 Zn 4 种重金属元素超标率较高，Cu 和 Zn 超标率约 50%（采用德国腐熟标准计算），而 Cd、As 超标率也超过 10%^[31]，因此，畜禽粪便中的重金属超标严重制约了畜禽粪便资源化利用。腐植酸被认为是一种含有多种官能团的钝化剂，包括酚类、羧酸类和酮类，

可以通过吸附和络（螯）合反应与重金属结合^[14]，从而降低其生物有效性。当前腐植酸的钝化效果研究主要针对于 Cd、As、Cu 和 Zn 4 种重金属（表 2）。李荣华等^[32]以猪粪+玉米秸秆为堆肥原料，通过添加不同用量的重金属钝化剂（粉煤灰、风化煤或膨润土）进行 90 天的好氧堆肥，结果表明，添加风化煤对堆肥重金属 Cu、Zn 有良好的钝化作用。侯月卿等^[33]探讨不同钝化材料对畜禽粪便堆肥过程中重金属钝化效果的影响规律，利用猪粪+玉米秸秆进行高温好氧堆肥，结果表明，腐植酸对重金属 Cu、Pb、Zn 和 Cd 表现为相对较好的钝化能力。温凌嵩^[34]在猪粪-蚯蚓堆肥和自然堆肥



中添加腐植酸,研究腐植酸对蚯蚓体内及堆肥产物中 Cu 和 Zn 含量的影响时发现,腐植酸的添加可以减弱蚯蚓对重金属的富集作用,使蚯蚓体内 Cu 和 Zn 的含量降低。Zhou 等^[35]在猪粪堆肥中添加生物腐植酸,Cu、Zn 和 Pb 的钝化率最大,分别为 94.98%、68.78% 和 65.55%。梁霆诗^[36]在研究生化黄腐酸对鸡粪+木薯渣堆肥效果及氰化物和重金属去除的影响时表明,添加生化黄腐酸可以显著降低堆肥产品中 Cu、Zn、Cr、As、Pb、Cd 可交

换态的含量和分配率,使 6 种重金属的钝化效果分别有不同程度的提升,有效降低堆肥产品中重金属的生态环境风险。谭文津等^[37]在猪粪高温好氧堆肥中添加 10% 和 20% 比例的粉煤灰、风化煤、泥炭 3 种重金属钝化剂对 Cu、As、Cr 均有不同程度的钝化作用。由此可见,腐植酸可与重金属发生络(螯)合、吸附及离子交换反应,从而钝化畜禽粪便中的重金属,降低重金属生物有效性,可作为重金属的一种钝化材料。

表 2 腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥中重金属钝化的影响

Tab.2 Effects of humic acid on heavy metals passivation of livestock manure and/or crop straw compost

堆肥原料	堆肥添加剂	添加剂添加量	重金属	钝化效果 (%)	参考文献
猪粪+玉米秸秆	风化煤	堆肥原料干重的 2.5%、10%	Cu	二乙烯三胺五乙酸(DTPA)-Cu 比例下降 24.28	[32]
			Zn	DTPA-Zn 比例下降 6.88	
猪粪+玉米秸秆	生物腐植酸	猪粪干重的 2.5%	Cu	47.78	[33]
			Zn	64.94	
			Cd	87.36	
猪粪	生物腐植酸	堆肥原料干重的 2.5%	Cu	94.98	[35]
			Zn	68.78	
			Pd	65.55	
鸡粪+木薯渣	生化黄腐酸	堆肥原料干重的 2%	Cu	62.28	[36]
			Zn	66.04	
			Cr	80.38	
			As	61.68	
			Pd	46.26	
猪粪+稻壳+木屑	风化煤	堆肥原料干重的 20%	Cu	76.80	[37]
		堆肥原料干重的 10%	As	43.90	

3 调控堆肥温度和 pH

温度是监测堆肥过程的主要参数,是反映微生物活动强度和衡量堆肥进程的重要指标。一般而言,堆肥温度超过 50 ℃并至少维持 5 天,才能满足堆肥腐熟和卫生要求^[38]。孙志华等^[20]研究发现,牛粪+蘑菇渣堆肥原料中加入 10% 风化煤,堆体温度 62 h 内即达到 50 ℃以上,比不添加风化煤处

理提前 6 天。王芳等^[39]研究表明,在牛粪中添加 25% 的褐煤能使堆肥温度达到 57 ℃并维持该温度 5 天。李荣华等^[40]以猪粪和玉米秸秆为原料进行好氧堆肥,结果表明,添加 2.5% 的风化煤能使堆体温度迅速升至近 70 ℃。郭靖等^[41]研究了在木薯渣+干鸡粪+烟杆粉堆肥过程中添加不同量生化黄腐酸对堆肥的影响发现,添加 2% 的生化黄腐酸能促进堆体升温,增加高温持续时间。这是由于褐



煤、风化煤可改善堆体的通气性，且为微生物提供易于分解的有机物料，加快了堆体中微生物生长繁殖，提高了堆体微生物活性；同时，腐植酸可以增加堆肥过程中微生物多样性，促进微生物种群演替，加快对不同物质转化代谢，促进堆肥腐熟^[18, 42]。

pH 是反映堆肥过程快慢的又一重要指标。堆肥过程中堆体的 pH 可影响其中微生物的生长、代谢和活性，适宜的 pH 可提供微生物生长的良好环境，提高有机物降解速率，进而影响腐植酸的合成与转化^[43]。堆体初始 pH 对堆肥过程中微生物群落的结构有显著影响，pH 过高或过低时，微生物活性均会受到抑制，堆肥进程减慢^[27]，适合微生物生长、代谢的 pH 范围一般为 7.5 ~ 8.5，堆肥产品的 pH 范围应在 5.5 ~ 8.5^[44]。李荣华等^[32]通过好氧堆肥的方式向猪粪 + 玉米秸秆混合物料中添加干重为

2.5% 的风化煤，堆肥过程中 pH 基本稳定在 7.83 左右。刘俊等^[45]以牛粪为堆肥原料，加入腐殖土为辅料，结果表明，堆肥结束后 pH 为 7.42。张地方等^[46]在猪粪堆肥中加入泥炭作为添加剂，结果表明，经 28 天好氧堆肥以后，堆肥产品 pH 为 8.0 左右。孟阿静等^[47]在牛粪 + 羊粪 + 棉花秸秆堆肥过程中研究发现，添加 0.4% 黄腐酸能有效降低堆肥物料 pH。可见，由于腐植酸呈弱酸性，在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥过程中添加一定比例的腐植酸可以有效降低堆肥酸碱度，调控堆体 pH。

综合以上研究结论以及表 3 来看，畜禽粪便、农作物秸秆堆肥过程中，腐植酸主要是利用其较大的内表面积改善堆体通气性促进堆体快速升温，并增加高温持续时间以及其弱酸性降低堆体 pH 以加快堆肥腐熟。

表 3 腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥温度和 pH 的影响

Tab.3 Effects of humic acid on temperature and pH of livestock manure and/or crop straw compost

堆肥原料	堆肥添加剂	添加剂添加量	对堆肥温度和 pH 的影响	参考文献
牛粪 + 蘑菇渣	风化煤	堆肥原料干重的 10%	快速达到高温期	[20]
牛粪	褐煤	堆肥原料湿重的 25%	提高堆肥温度并维持 5 天	[39]
猪粪 + 玉米秸秆	风化煤	堆肥原料干重的 2.5%	维持堆肥温度在 55 °C 以上超过 7 天，堆肥过程中 pH 基本稳定在 7.83 左右	[40]
木薯渣 + 干鸡粪 + 烟杆粉	生化黄腐酸	堆肥原料干重的 2%	促进堆体升温，增加高温持续时间	[41]
牛粪	腐殖土	堆肥原料湿重的 25%	堆肥结束后 pH 为 7.42	[45]
猪粪	泥炭	堆肥原料湿重的 5% ~ 20%	堆肥结束后 pH 为 8.0 左右	[46]
牛粪 + 羊粪 + 棉花秸秆	黄腐酸	堆肥原料干重的 0.4%	堆肥 pH 从 9.18 降至 8.42	[47]

4 促进堆肥腐殖化

堆肥过程实质上是堆料腐殖化和有机物料稳定化的一个过程，即小分子有机物逐渐被矿化分解并伴随着可被微生物降解的有机质向稳定的腐殖质转化的生物化学过程^[48]。堆肥的最终产物为腐殖质，主要由腐植酸和黄腐酸组成^[13]，一般来说，新鲜的堆肥混合物中腐植酸含量较低而黄腐酸含量较高。随着堆肥腐殖化的进行，混合物中的腐植酸

含量逐渐增加而黄腐酸含量逐渐减少^[27]。因此，堆肥过程中黄腐酸向腐植酸的转化可以促进堆肥腐熟，提高腐殖化程度^[49]。腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥过程中一方面可以提高堆肥中微生物的多样性^[18]，促进堆体有机物的降解^[50]；另一方面，腐植酸的加入可以促进堆肥产物中腐植酸含量的增加，进而提高堆肥腐殖化程度。吕药灵等^[51]研究认为添加腐殖土能够促进牛粪 + 芦笋秸秆堆肥腐殖化程度，提高堆肥产品品质。郭靖等^[41]研究表

明，木薯渣 + 干鸡粪 + 烟杆粉堆肥过程中添加生化黄腐酸可增加腐植酸 / 黄腐酸的比值，促进堆肥的腐殖化过程。周文兵等^[52]研究发现，在猪粪堆肥过程中添加泥炭，堆肥腐殖化指数明显提高（表

4），说明泥炭有利于堆肥的腐殖化。由此可见，腐植酸可通过促进堆肥有机物的降解及增加堆肥混合物中腐植酸含量以促进畜禽粪便、农作物秸秆堆肥腐殖化。

表 4 腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥腐殖化的影响

Tab.4 Effects of humic acid on humification of livestock manure and/or crop straw compost

堆肥原料	堆肥添加剂	添加剂添加量	对腐殖化程度的影响	参考文献
木薯渣 + 干鸡粪 + 烟杆粉	生化黄腐酸	堆肥原料干重的 2%	腐植酸 / 黄腐酸比值上升速度快，且比空白处理组值大	[41]
牛粪 + 芦笋秸秆	腐殖土	牛粪湿重的 15%	腐植酸含量增加时间早，腐熟阶段腐植酸总量高	[51]
猪粪	泥炭	猪粪与泥炭质量比为 1 : 1	堆肥前后，腐殖化指数由 0.59 增加到 3.46	[52]

5 提高抗生素抗性基因去除效率

抗生素残留导致了动植物体中抗生素抗性基因的进化和发展^[53]。已有研究表明，畜禽粪便堆肥过程中，抗生素抗性基因的动态受到细菌群落和物理化学特性的强烈影响^[54]。腐植酸可以通过不同络（螯）合方式吸附抗生素^[55]，比如腐植酸在氢键和范德华力作用下，与四环素或磺胺嘧啶形成复合物^[56]。Cao 等^[57]在鸡粪堆肥过程中添加不同比例褐煤对抗生素抗性基因去除效果研究发现，添加 10% 褐煤和 15% 褐煤可以提高堆肥过程中抗生素抗性基因的去除效率，使抗生素抗性基因的相对丰度分别下降了 27.7% 和 41.5%，这是因为褐煤具有酸性和较高的阳离子交换能力，添加褐煤可以增加堆肥 NH_4^+ 含量以及降低 pH 来极大地改变细菌群落组成。Shi 等^[58]以猪粪和小麦秸秆为堆肥原料，研究腐植酸在堆肥过程中对细菌 / 噬菌体共介导的抗生素抗性基因的影响，结果表明，在堆肥过程中添加 5% 的腐植酸可以有效降低细菌 / 噬菌体共介导的抗生素抗性基因的绝对丰度，使堆肥产物中抗生素抗性基因的总丰度下降了 75.21%，并抑制了病原微生物的增殖，这可能是由于腐植酸含有多种官能团，可通过不同方式与抗生素结合^[55]，从而减少抗生素诱导微生物产生相应菌 / 噬菌体共介导的抗生素抗性基因的发生；此外，腐植酸的多孔结

构也可避免微生物之间的相互暴露，这可能会降低抗生素抗性基因在微生物之间传播的可能性^[59]。

6 主要作用表现

腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥的主要作用表现在以下 5 个方面（图 2）。



图 2 腐植酸对畜禽粪便、农作物秸秆堆肥的作用
Fig.2 Effects of humic acid to livestock manure and/or crop straw compost

（1）腐植酸通过吸附、络（螯）作用，减少



堆肥过程中的氮素损失。

(2) 腐植酸中的多种官能团与畜禽粪便中残留的重金属发生络(螯)合及离子交换等反应钝化畜禽粪便中重金属离子。

(3) 腐植酸利用其较大的内表面积有效调控和维持堆肥过程温度的上升和稳定;利用腐植酸的弱酸性在堆肥过程中调节堆体的酸碱度,降低堆体的 pH。

(4) 腐植酸加速堆肥有机物的降解,从而促进堆肥腐殖化。

(5) 腐植酸通过其络(螯)合能力与抗生素结合、其多孔结构降低抗生素抗性基因在微生物之间传播,从而提高堆肥过程中抗生素抗性基因的去除效率。

综上所述,在“碳中和”背景下,堆肥过程中通过添加腐植酸、腐植酸原料将相关畜禽粪便、农作物秸秆变废为宝转化为有机肥,减少温室气体排放,从而实现畜禽粪便、农作物秸秆资源化、无害化、低碳化利用是一种可行的方式。腐植酸、腐植酸原料作为堆肥添加剂,具有成本低廉、原料易获得等优势,同时克服传统堆肥过程中的一些缺点,能够促进堆肥腐熟,改善堆肥品质,减少养分损失及有害气体排放等。

腐植酸在畜禽粪便、农作物秸秆堆肥中的应用,一方面应深入剖析腐植酸的结构,了解腐植酸的特性与作用,加强其独特的分子结构在堆肥中减少氮素损失及转化机制、污染物迁移转化规律、温室气体排放机理等方面的基础研究;另一方面根据工业和信息化部 HG/T 5332—2018《腐植酸生物有机肥》^[60]和 HG/T 6082—2022《生物质腐植酸有机肥料》^[61]的行业标准,进一步研究建立腐植酸堆肥添加剂标准化技术体系。

参考文献

- [1] 冯秋莲. 畜禽粪便资源化利用方式、存在问题和解决方法[J]. 今日畜牧兽医, 2023, 39(3): 68 ~ 69, 72.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] 何晶晶. 固体废物处理与资源化技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [4] Zhao S X, Schmidt S, Qin W, et al. Towards the circular nitrogen economy-aglobal meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135401.
- [5] Zhen H Y, Jia L, Huang C D, et al. Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114552.
- [6] Zhang Y J, Hu H W, Gou M, et al. Temporal succession of soil antibiotic resistance genes following application of swine, cattle and poultry manures spiked with or without antibiotics[J]. Environmental Pollution, 2017, 231(P2): 1621 ~ 1632.
- [7] Lau C, Li B, Zhang T, et al. Impact of pre-application treatment on municipal sludge composition soil dynamics of antibiotic resistance genes, and abundance of antibiotic-resistance genes on vegetables at harvest[J]. Science of the Total Environment, 2017, 581 ~ 582: 214 ~ 222.
- [8] Imran M, Das K R, Naik M M. Co-selection of multi-antibiotic resistance in bacterial pathogens in metal and microplastic contaminated environments: an emerging health threat[J]. Chemosphere, 2019, 215: 846 ~ 857.
- [9] 张克霄, 魏毅凡, 韩钟俊, 等. 添加活性炭或沸石粉对猪粪堆肥臭味气体释放量以及氮素转化的影响[J]. 畜牧与兽医, 2023, 55(8): 24 ~ 30.
- [10] 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]. 西北农林科技大学博士学位论文, 2022.
- [11] 黄引超, 董晨曦, 袁京, 等. 生物炭对放牧绒山羊羊粪堆肥腐熟度及臭气排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 157 ~ 168.
- [12] 赵明德, 李慧梅, 王文颖. 不同添加剂对牛粪 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(5): 1060 ~ 1067.
- [13] 李楠, 陆勇泽, 朱光灿, 等. 添加过磷酸钙对乡村有机废弃物太阳能辅助好氧堆肥氮素保持的影响

- [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39 (9): 1221 ~ 1230.
- [14] 刘奇. 腐植酸在土壤重金属淋洗技术中的应用研究进展[J]. 腐植酸, 2023 (6): 30 ~ 34.
- [15] Ampong K, Thilakaranthna M S, Gorim L Y. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health[J]. *Frontiers in Agronomy*, 2022: 4: 848621.
- [16] 成绍鑫. 腐植酸类物质概论 (第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [17] Sun S, Abdellah Y, Miao L, et al. Impact of microbial inoculants combined with humic acid on the fate of estrogens during pig manure composting under low-temperature conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127713.
- [18] 曹丽娜, 王岩, 王跃, 等. 添加麦秸对鸡粪堆肥过程中氮素减排及细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42 (11): 2560 ~ 2569.
- [19] 李森, 罗雪梅, 涂卫国, 等. 保氮剂对水葫芦堆肥进程及氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (4): 1197 ~ 1203.
- [20] 孙志华, 张金水, 同延安, 等. 添加风化煤对蘑菇渣牛粪堆肥的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21 (2): 162 ~ 166.
- [21] 赵旭, 王文丽, 李娟. 腐殖酸煤对牛粪好氧堆肥臭气释放量及微生物群落多样性的影响[J]. 生物技术通报, 2021, 37 (12): 104 ~ 112.
- [22] 孔凡克, 王丽霞, 李煜喆, 等. 腐殖酸保氮剂对降低堆肥过程中氮损失的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41 (3): 30 ~ 36.
- [23] 周顺, 李洋, 张冠智, 等. 添加剂对番茄茎秆好氧堆肥发酵过程及氮素损失的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29 (3): 79 ~ 86.
- [24] 高鹏, 鲁耀雄, 崔新卫, 等. 不同添加剂对畜禽粪便堆肥的保氮效果[J]. 湖南农业科学, 2021 (6): 38 ~ 42.
- [25] 贺丽, 陈英, 邓东周, 等. 不同保氮剂对空心莲子草堆肥的影响[J]. 四川林业科技, 2021, 42 (3): 59 ~ 63.
- [26] 江志阳, 薛冰, 景红双, 等. 腐植酸在堆肥中的含量变化及作用[J]. 农业科技与装备, 2018 (1): 9 ~ 10.
- [27] Robert I, Anthony W, Trevor C, et al. Lignite improved the quality of composted manure and mitigated emissions of ammonia and greenhouse gases during forced aeration composting[J]. *Sustainability*, 2020, 12(24): 10528 ~ 10528.
- [28] Cao Y, Bai M, Han B, et al. Enhanced nitrogen retention by lignite during poultry litter composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 122422.
- [29] 张建国, 高雅, 张继宁, 等. 生物炭调控农业废弃物堆肥过程的研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50 (3): 511 ~ 519.
- [30] 郑丁瑀, 王珏, 常瑞雪, 等. 堆肥工艺钝化粪肥中重金属及其形态变化的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38 (5): 778 ~ 786.
- [31] Yang X P, Li Q, Tang Z, et al. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China[J]. *Waste Management*, 2017, 64: 333 ~ 339.
- [32] 李荣华, 张广杰, 秦睿, 等. 添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32 (10): 2591 ~ 2599.
- [33] 候月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (11): 205 ~ 215.
- [34] 温凌嵩. 腐植酸对蚯蚓生长繁殖及堆肥产物中 Cu 和 Zn 含量的影响[D]. 江西农业大学硕士学位论文, 2021.
- [35] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, et al. Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 279 ~ 286.
- [36] 梁霆诗. 生化黄腐酸对木薯渣堆肥效果及氰化物和重金属去除的影响[D]. 广西大学硕士学位论文, 2016.
- [37] 谭文津, 刘秀梅, 汪怀健, 等. 高温好氧堆肥对猪粪中重金属的钝化技术研究[J]. 猪业科学, 2012, 29 (5): 86 ~ 88.



- [38] 国家质检总局. 粪便无害化卫生要求: GB 7959—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [39] 王芳, 康超, 黄筑, 等. 添加不同辅料对奶牛粪便堆肥的影响[J]. 中国奶牛, 2016(9): 39 ~ 41.
- [40] 李荣华, 张广杰, 王权, 等. 添加矿物质对猪粪好氧堆肥中有机物降解的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 190 ~ 198, 316.
- [41] 郭靖, 王英辉, 陈建新, 等. 生化黄腐酸投加量对木薯渣堆肥效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 7310 ~ 7316.
- [42] 王琼, 王永歧, 马怡, 等. 堆肥腐殖酸演化规律及堆肥工艺对其影响的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(10): 2865 ~ 2869.
- [43] 陈冰, 张思梦, 蒲志红. 我国农村有机生活垃圾好氧堆肥研究进展[J]. 绿色科技, 2020(10): 7 ~ 9.
- [44] 农业农村部种植业管理司. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [45] 刘俊, 海梅荣, 罗南杰, 等. 不同堆肥物料配比对奶牛粪堆肥进程的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 28 ~ 32.
- [46] 张地方, 袁京, 王国英, 等. 木本泥炭添加比例对猪粪堆肥腐熟度和污染及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 233 ~ 240.
- [47] 孟阿静, 努尔买买提·木沙, 阿依努尔·艾海买提, 等. 添加 3 种不同新型肥料对堆肥腐熟效率的影响[J]. 农业科技通讯, 2022(1): 122 ~ 125.
- [48] Sanchez-monedero M A, Roig A, Martinez-pardo C, et al. A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances: relationships between total organic carbon and oxidizable carbon[J]. Bioresource Technology, 1996, 57(3): 291 ~ 295.
- [49] Wu J Q, Zhao Y, Yu H M, et al. Effects of aeration rates on the structural changes in humic substance during co-composting of digestates and chicken manure[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 510 ~ 520.
- [50] 常瑞雪, 甘晶晶, 陈清, 等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 254 ~ 259.
- [51] 吕药灵, 姜晓林, 牛明星, 等. 腐殖土对牛粪好氧堆肥的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 119 ~ 122.
- [52] 周文兵, 刘大会, 朱端卫, 等. 不同调理剂对猪粪堆肥腐殖质特性及元素含量变化的影响[J]. 华中农业大学学报, 2005(6): 599 ~ 603.
- [53] Zhang Y J, Hu H W, Chen Q L, et al. Transfer of antibiotic resistance from manure amended soils to vegetable microbiomes[J]. Environment International, 2019, 130: 104912.
- [54] Lu C, Gu J, Wang X, et al. Effects of coal gasification slag on antibiotic resistance genes and the bacterial community during swine manure composting[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 20 ~ 27.
- [55] Ferrie R P, Hewitt G E, Anderson B D. A fluorescence quenching analysis of the binding of fluoroquinolones to humic acid[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(11): 2512 ~ 2518.
- [56] Wang R, Yang S, Fang J, et al. Characterizing the interaction between antibiotics and humic acid by fluorescence quenching method[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(7): 1458.
- [57] Cao Y, Hu H, Guo H, et al. Lignite as additives accelerates the removal of antibiotic resistance genes during poultry litter composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123841.
- [58] Shi M, Zhao Z, Wang X, et al. Profiles and key drivers of bacteria/phage co-mediated antibiotic resistance genes during swine manure composting amended with humic acid[J]. Bioresource Technology, 2023, 374: 128721.
- [59] Xie J, Gu J, Wang X, et al. Insights into the beneficial effects of woody peat for reducing abundances of antibiotic resistance genes during composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 342: 125903.
- [60] 工业和信息化部. 腐植酸生物有机肥: HG/T 5332—2018[S]. 北京: 中国化工出版社, 2018.
- [61] 工业和信息化部. 生物质腐植酸有机肥料: HG/T 6082—2022[S]. 北京: 中国化工出版社, 2022.