



潘嘉鹏,姜锦汇,杨燕,袁京,李国学. 秸秆覆盖下畜禽粪便兼性堆肥过程腐熟度与腐殖化特征[J]. 中国农业大学学报,2025,30(10):61-72.
PAN Jiapeng, JIANG Jinhui, YANG Yan, YUAN Jing, LI Guoxue. Maturity and humification characteristics of livestock manure during facultative composting under cornstalk covering[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 61-72.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.06

秸秆覆盖下畜禽粪便兼性堆肥过程腐熟度与腐殖化特征

潘嘉鹏 姜锦汇 杨燕 袁京 李国学*

(中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室,北京 100193)

摘要 为明确秸秆覆盖下添加秸秆调控堆体结构对堆肥腐熟度与腐殖化的促进效果,以新鲜猪粪和秸秆为研究对象,在秸秆覆盖条件下通过对猪粪和玉米秸秆进行联合堆肥,将传统堆沤调控为静态兼性堆肥,采用水浸提法和三维荧光光谱技术,探究秸秆覆盖结合秸秆调控对种子萌发以及对猪粪静态兼性堆肥过程腐熟度与腐殖化程度的影响,并对理化指标、腐熟度指标等进行皮尔逊相关性分析。结果表明:秸秆调控提升了堆肥腐熟度,堆肥结束时种子发芽指数从42.05%(猪粪)升至82.48%(猪粪和秸秆);三维荧光光谱表明,秸秆调控处理不同层的腐殖化指数较纯猪粪提高27.5%~79.3%,腐殖化效果显著;相关性分析显示,蛋白质类物质、富里酸类物质、可溶性微生物代谢产物与腐殖酸类物质有显著的正相关关系,有机质的降解促进了腐殖化进程。综上,秸秆覆盖结合秸秆调控可实现畜禽粪便兼性堆肥的高效腐熟与腐殖化,为有机废弃物协同资源化处理提供了理论与技术支持。

关键词 兼性堆肥; 秸秆调控; 秸秆覆盖; 腐熟度; 腐殖化

中图分类号 S141.4

文章编号 1007-4333(2025)10-0061-12

文献标志码 A

Maturity and humification characteristics of livestock manure during facultative composting under cornstalk covering

PAN Jiapeng, JIANG Jinhui, YANG Yan, YUAN Jing, LI Guoxue*

(College of Resource and Environmental Science/Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To elucidate the promoting effects of regulating pile structure on compost maturity and humification under straw-covered conditions by adding additional straw, fresh pig manure and corn straw were taken as substrates. Under straw-covered condition, the co-composting of pig manure and corn straw was conducted to transform traditional composting into a static facultative composting process. Water extraction method and three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy were utilized to investigate the effects of straw covering combining with structural regulation on seed germination and the degree of maturity and humification during static facultative composting of pig manure. Pearson correlation analysis was performed to assess the correlations among all measured parameters. The results showed that: Straw regulation significantly improved compost maturity, with the seed germination index (GI) increasing from 42.05% (pure pig manure) to 82.48% (pig manure and corn straw) at the end of the composting. Three-dimensional fluorescence spectroscopy analyses indicated that the humification index in different layers of the straw-regulated treatment was 27.5% to 79.3% higher than that of pure pig manure composting, demonstrating a remarkable enhancement in humification. The correlation analysis revealed significant positive correlations between protein-like

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1900300)

第一作者: 潘嘉鹏(ORCID:0009-0001-9084-2847),硕士研究生,E-mail:15328633738@163.com

通讯作者: 李国学(ORCID:0000-0002-7371-398X),教授,主要从事废弃物资源化利用研究,E-mail:ligx@cau.edu.cn

substances, fulvic acid-like substances, soluble microbial metabolites, and humic acid-like substances, suggesting that the degradation of organic matter promoted the humification process. In conclusion, the combination of straw mulching with straw regulation can achieve efficient maturity and humification in the facultative composting of livestock manure, providing theoretical and technical support for the synergistic resource utilization of organic waste.

Keywords facultative composting; cornstalk regulation; cornstalk covering; maturity; humification

随着人口的增加和农业的发展,农业废弃物不恰当处理会引发严重的环境问题。为满足不断增长的肉类产品需求,2010—2020年我国畜牧业得到了大规模的扩张,导致每年产生约40亿t的畜禽粪污^[1]。研发合理的畜禽养殖废弃物资源化利用方法,是促进绿色种养、和谐发展的重要途径^[2]。猪粪中氮、磷含量高的特点使其成为有机肥料的重要来源。高温好氧堆肥是减量化、稳定化和无害化处理利用畜禽粪污的有效手段之一^[3]。高温好氧堆肥一方面具有发酵周期短和产品质量稳定等特点,另一方面也存在投资成本高、辅料添加量多等缺点,常用于生产商业有机肥。高技术和高成本的投入限制了高温好氧堆肥在一些地区或小规模农业中的广泛应用^[4]。

传统自然堆沤与高温好氧堆肥相比,具有操作简便和成本投入低的优点。传统自然堆沤系统通常不需要机械搅拌,降低了操作成本和能耗;但是自然堆沤过程由于其不进行强制通风,仅靠空气中氧气向堆体中自然扩散来提供氧气,因此,堆体从上层到下层呈现好氧、兼性厌氧到厌氧的过渡^[5]。因此,自然堆沤的主要缺点在于其发酵周期长且腐熟不均匀,这一缺点在堆体规模较大时尤为显著,根本原因在于氧气的扩散受限:随着堆体体积增大,氧气难以有效扩散至堆体内部,导致局部区域(尤其是核心区)长期处于厌氧状态。这种厌氧环境不仅会显著降低有机物的分解速率,还会造成堆体内部与外部腐熟程度差异明显,最终导致整体堆肥的质量下降^[6]。此外,在自然堆沤过程中也容易出现堆体腐殖化程度低的情况,原因是在堆沤过程中微生物活性不足,加上环境条件不稳定,导致木质素、纤维素等难降解有机物分解缓慢,而腐殖质的形成依赖于这些物质的充分降解和再合成^[7]。

为改善传统自然堆沤腐熟度低的问题,可采用比表面积较大且富含碳元素的生物质废弃物,可起到调节堆体结构、碳氮比的作用。畜禽粪便与生物质废弃物共同堆肥可显著提高堆肥产品的稳定性

与腐熟度^[8]。刘歆等^[9]采用玉米秸秆与鸡粪、猪粪、牛粪堆肥28 d后,相较于不加入玉米秸秆的处理,种子发芽指数提高了5.46%~15.82%,表明添加秸秆辅料显著提高了堆肥腐熟度。生物质材料除了作为辅料调节堆肥结构,兼性堆肥过程通常会使用生物质废弃物、土壤或腐熟堆肥等作为覆盖物来降低兼性堆肥过程中污染气体的排放,且减少热量损失^[10]。Yang等^[11]发现在羊粪兼性堆肥过程中使用秸秆覆盖可减少42%氧化亚氮的排放;卢秉林等^[12]发现在猪粪高温堆肥过程中添加小麦秸秆能够有效促进猪粪的腐殖化进程;张东莉等^[13]探究了秸秆复配对牛粪兼性堆肥的腐熟度与减量化的影响,发现在15%芦苇秸秆添加比例下,胡敏酸类物质能够提高47.1%,种子发芽指数达129.1%。

虽然,兼性堆肥中添加辅料进行腐熟度调节的相关研究较多,但关于在覆盖条件下通过辅料调节对于粪便静态兼性堆肥的研究尚少,在生物质材料覆盖下辅料调控堆体结构对堆肥腐熟度与腐殖化的促进效果不明。因此,本研究拟以来源广泛且易获取的玉米秸秆作为猪粪堆肥的辅料和覆盖物,通过设置不同秸秆添加方式,监测堆体温度、氧气含量及种子发芽指数等关键理化指标,结合腐殖质组分(胡敏酸、富里酸)的动态变化分析,探究在秸秆覆盖条件下,猪粪静态兼性堆肥过程中腐熟度指标和腐殖化的变化,揭示猪粪静态兼性堆肥的腐熟机制,以期为畜禽粪便静态兼性堆肥提供理论与技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

堆肥试验原料为新鲜猪粪和玉米秸秆,其中新鲜猪粪来源于国家昌平综合农业工程技术研究中心昌平试验基地,耕层土壤与玉米秸秆采自中国农业大学上庄实验站。玉米秸秆经自然风干处理后,使用专业粉碎设备加工成1~5 cm规格化段状物料。供试原料基础理化特性详见表1。

表 1 静态兼性堆肥原材料及理化性质

Table 1 Facultative composting raw materials and physicochemical properties

指标 Index	猪粪 Pig manure	玉米秸秆 Corn straw	猪粪混合秸秆 Pig manure and corn straw
总碳/(g/kg) Total Carbon	396.50	413.40	402.20
总氮/(g/kg) Total Nitrogen	3 000.00	12.50	26.80
$m(\text{碳}):m(\text{氮})$	13.23	32.97	16.76
含水率/% Water content	65.59	9.21	60.27

1.2 试验设计

试验共设置 2 种处理,分别为纯猪粪堆肥对照组(P)与猪粪与玉米秸秆调控组(PC)。PC 处理为猪粪与玉米秸秆按 4:1 的湿基质量比混合堆肥。在堆体表层覆盖 10 cm 厚玉米秸秆,堆肥周期为 90 d。试验装置为 100 L 堆肥桶,直径约为 50 cm,高度 80 cm。打开发酵桶顶部,使其自然通风。在第 0、10、20、50、80 天用土钻取堆体混合样品,并在第 90 天从堆肥堆的上层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)和下层(40—60 cm)采集最终样品,用于测定腐熟度与腐殖质化相关指标。

1.3 堆肥指标的测定

腐熟度指标包括温度、pH、电导率(EC)、种子发芽指数(GI)、铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)、总溶解氮(DN)及溶解性有机碳(DOC)等。温度监测采用自动测温仪对堆体中温层(距表层 30 cm 深度)进行连续测定。含水率采用烘干法测定。按 $m(\text{堆肥样品}):V(\text{去离子水})=1:10$ 将堆肥样品与去离子水混合,经 180 r/min 振荡提取 30 min 后静置 10 min,经 0.45 μm 微孔滤膜过滤得到待测液。采用 pH 测试仪与电导率测试仪(pHS-3C,上海精密科学仪器有限公司,中国)测定 pH 和电导率(EC)。溶解性有机碳(DOC)与溶解性有机氮(DN)使用液相色谱法(TOC-L,岛津,日本)测定。种子发芽指数(GI)的测定依据农业行业标准 NY/T 525—2021《有机肥料》^[14],使用恒温培养箱(SHP-250 型,上海精宏实验设备有限公司,中国)在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下,以水浸提液培养萝卜(*Raphanus sativus* L.)种子 48 h 后计算。采用上述方法,以 2 mol/L 氯化钾溶液浸提堆肥样品,经流动分析仪(Auto Analyzer3,Seal,德国)测定铵态氮

(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)含量。

总碳(TC)和总氮(TN)含量使用元素分析仪(Elementar Analysen Systeme, Hanau, Germany)测定。氧气含量(O_2 content)由便携式沼气分析仪(Biogas 5000, Geotech, 英国)测定。挥发性固体(VS)的测定采用燃烧法。

腐殖质的测定采用三维荧光光谱仪(F97pro, 棱光, 中国)对水浸提液进行扫描分析,参数设置为:激发波长 200~400 nm,发射波长 250~550 nm,扫描速率 1 000 nm/min,数据采集间隔 10 nm。利用激发-发射矩阵光谱可以分析已被用于识别溶解有机物组成的变化并评估堆肥的稳定性,光谱可分为 5 个区域,分别为 I 区和 II 区(蛋白质样物质)、III 区(富里酸类物质)、IV 区(可溶性微生物代谢产物)和 V 区(腐殖酸类物质)^[15]。峰值荧光区域被计算为总荧光峰面积的百分比,不包括瑞利和拉曼散射。

1.4 数据分析

试验数据经 Microsoft Excel 2019 进行预处理后,采用 Origin 2021(Origin Lab, 美国)完成绘图,运用 SPSS Statistics 27.0(IBM, 美国)进行 Pearson 相关性分析。

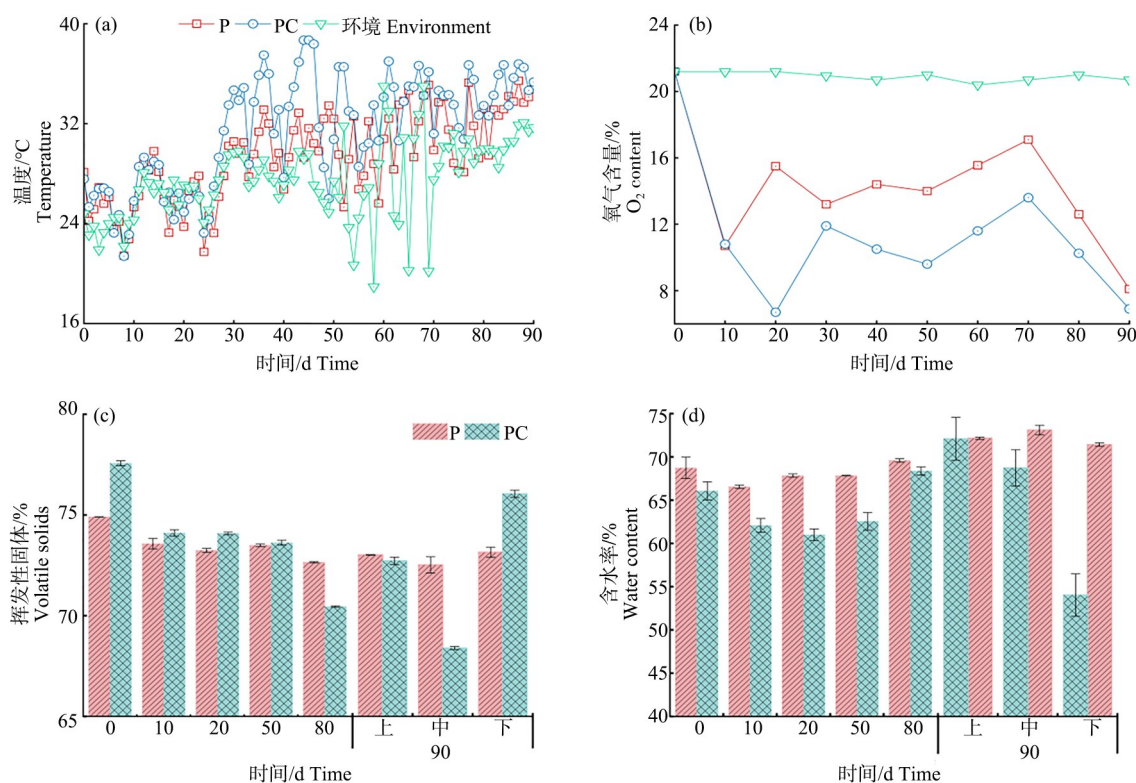
2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖下猪粪兼性堆肥理化指标的变化

堆体温度、氧气含量、挥发性固体及含水率的变化规律如图 1 所示。由图 1(a)可见:静态兼性堆肥过程中堆体温度变化平缓($21.39\sim 38.69^\circ\text{C}$);PC 处理温度较 P 处理最高提升 5.62°C 。由图 1(b)可见:堆肥初期氧气消耗显著,猪粪秸秆处理(PC) 20 d 内氧气下降 68.4%,远超猪粪处理(P)的

51.9% ($P < 0.01$); 30 d后2种处理组的氧气消耗趋缓, 60 d后又出现了一定的下降。由图1(c)可见: 2种处理VS含量均持续下降, PC处理降幅更显著, 由77.57%下降至70.45% ($P < 0.01$), 在90 d时,

中层VS降解最明显。由图1(d)可见: P处理含水率变化并不显著, 维持在66.36%~69.78%, 相比之下, PC处理含水率降幅更大, 且末期上层含水率最低达到最低值52.02%。



P表示纯猪粪处理, PC表示猪粪和秸秆处理。上、中、下分别代表堆体上层、中层、下层。下同。

P denotes the pure pig manure treatment, and PC denotes the pig manure and straw treatment. Upper, middle, and lower denote the top, middle, and bottom layers of the compost pile. The same below.

图1 静态兼性堆肥过程中温度(a)、氧气含量(b)、挥发性固体(c)和含水率(d)等理化指标的变化

Fig. 1 Changes in physicochemical parameters during static facultative composting including temperature (a), oxygen content (b), volatile solids (c) and moisture content (d)

堆体pH、电导率、碳氮比及发芽指数的动态变化如图2所示。由图2(a)可见: 2种处理pH均呈下降趋势, 但PC处理pH显著高于P处理 ($P < 0.01$), 在90 d时PC处理的中层pH最高, 由图2(b)可见: P处理组的EC值呈不断上升趋势, 而PC处理则变化较为平缓, 2种处理组的EC值堆肥末期EC值均较高 (3.96~4.23 mS/cm), PC组在90 d时底层EC值高于上层与中层。由图2(c)可见: PC处理碳氮比在20 d前上升至18.5, 然后逐渐降低至15.3; 而P处理的碳氮比持续上升; 在堆肥末期堆体上层2种处理组的碳氮比均显著低于中下2层 ($P < 0.001$)。由图2(d)可见: PC处理GI在50 d前呈不断上升的趋势, 而P处理变化并不明显, 甚至有所下

降, PC处理在50 d时达到82.48%, 符合腐熟标准 ($GI > 70\%$); 在堆肥结束时, PC处理的上层GI达到95.27%, 而下层GI为0.15%。

2.2 秸秆覆盖下猪粪兼性堆肥碳氮含量的变化

堆肥过程的碳氮含量变化如图3所示。由图3(a)可见: 2种处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量都呈现先增后降的趋势; P处理从4.41 g/kg上升到11.33 g/kg, 显著高于PC处理 ($P < 0.01$), 但随着时间的推移, PC处理的下降程度更大, 约86%; 在堆肥结束时, PC的上层和中层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低, 而P处理组3层中差异不显著。由图3(b)可见: 2种处理组的硝态氮含量均较低, P处理组全堆肥过程没有硝态氮的产生, 而PC处理组在50 d后出现了硝态氮的积

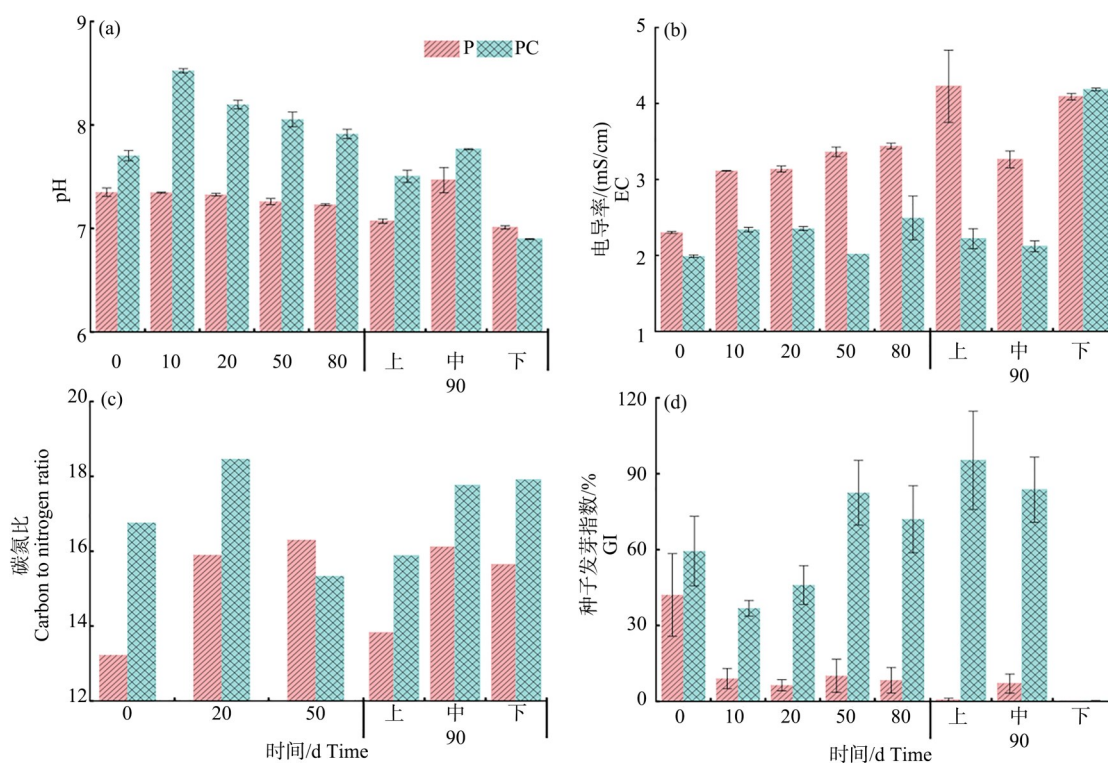


图 2 静态兼性堆肥过程中 pH(a)、电导率(b)、碳氮比(c)和种子发芽指数(d)等理化指标的变化

Fig. 2 Changes in physicochemical parameters during static facultative composting including pH (a), electrical conductivity (b), carbon to nitrogen ratio (c) and germination index (d)

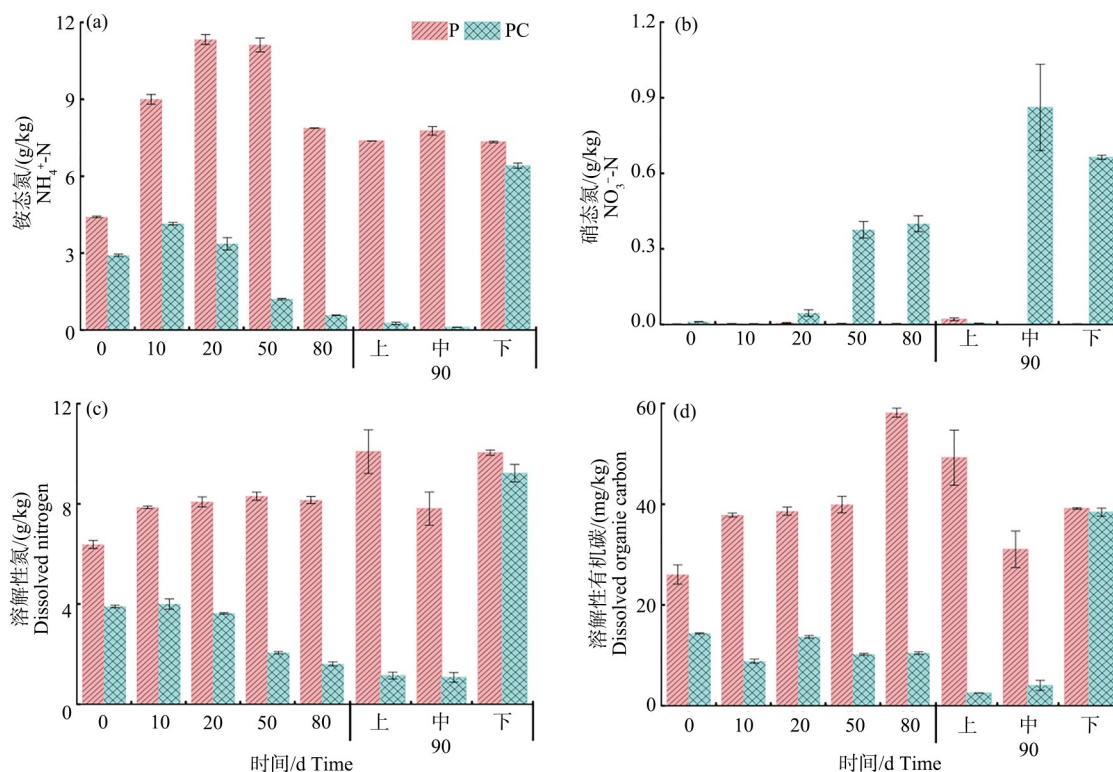


图 3 静态兼性堆肥过程中铵态氮含量(a)、硝态氮含量(b)、溶解性氮(c)和溶解性有机碳(d)等碳氮含量的变化

Fig. 3 Changes in carbon and nitrogen content during static facultative composting including ammonium nitrogen content (a), nitrate nitrogen content (b), dissolved nitrogen (c) and dissolved organic carbon (d)

累。由图3(c)可知:P处理的DN呈不断上升的趋势,而PC处理呈不断下降的趋势,PC组的DN从3.90 g/kg下降到1.61 g/kg;在堆肥结束时,PC处理的下层的DN显著高于上、中2层($P<0.001$),而P处理的3层并无显著差异。由图3(d)可知:PC处理的DOC均显著低于P处理($P<0.01$),且P处理总体呈不断升高的趋势,而PC处理总体呈下降的趋势,PC组的DOC从初始的14.37 g/kg下降到10.45 g/kg;在堆肥末期,PC处理下层的DOC含量显著高于其他2层。

2.3 秸秆覆盖下猪粪兼性堆肥腐殖化指标的变化

堆肥过程中腐殖质组分的光谱特征变化如图4与图5所示。由图4可见:堆肥30 d前P处理与PC处理IV区峰值远高于V区;随着堆肥的推移,PC处理的IV区峰值逐渐降低V区峰值明显增高;P处理并无明显变化,在堆肥结束时PC处理的V区峰度显著高于P处理($P<0.01$),且上层的V区峰度明显高于底层。

由图5(a)可见:第0天的2种处理的主要组分均呈现IV区占比最高,随着堆肥的进行,IV区所占百分比均下降,而V区所占百分比含量升高,最终2种处理的上中下层 P_V 分别为12.9%、16.4%、16.9%和79.7%、77.9%、14.1%。由图5(b)可见,PC组的 P_V/P_m 呈不断上升的趋势,由5.13上升至13.51,而P处理的 P_V/P_m 并无明显变化;在堆肥末期,PC组 P_V/P_m 的上、中、下层分别较P组高出66.7%、79.3%、27.5%,且PC组的上、中2层 P_V/P_m 显著高于下层($P<0.001$)。

2.4 秸秆覆盖下猪粪兼性堆肥理化指标、腐殖化指标相关性分析

对理化指标、腐殖化指标与碳氮含量指标进行Pearson相关性分析,结果见图6。由图6(a)可见:在P处理中,溶解性有机碳(DOC)与电导率(EC)呈显著正相关($r=0.72, P<0.01$),DOC与 NO_3^- -N亦呈正相关($r=0.65, P<0.05$);EC和溶解性氮(DN)与种子发芽指数(GI)呈显著负相关($r=-0.68$ 和 $-0.61, P<0.05$),而挥发性固体(VS)与GI呈正相关($r=0.58, P<0.05$)。由图6(b)可见:在秸秆覆盖下的猪粪堆肥过程中,DOC、DN与 NH_4^+ -N呈正相关($r=0.69$ 和 $0.64, P<0.01$);而三者均与氧气含量呈负相关($r=-0.53\sim-0.61, P<0.05$)。三维荧光光谱分析显示,腐殖酸类物质

(区域V)与蛋白质类物质(区域I和区域II)和微生物代谢产物(区域IV)呈显著负相关($r=-0.71$ 和 $-0.66, P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 秸秆覆盖下秸秆添加对猪粪兼性堆肥的理化性质的影响

静态兼性堆肥过程中堆体温度变化不大,是因为静态兼性堆肥过程中堆体的有机质分解缓慢,堆体温度随环境温度的变化而波动^[6]。本研究发现由于秸秆的添加补充了PC处理的碳源,并增加了堆体孔隙结构,从而使得堆体的微生物的代谢活动增强,分解有机物的速度也相应增加,促使PC处理堆肥温度较P处理升高。氧气含量的变化反映出微生物活动的强烈^[16],在堆肥过程的初期,微生物活动旺盛,消耗大量的氧气来分解有机物,因此,氧气浓度在这一阶段会迅速下降,PC处理在30 d前氧气下降更快,表明加入秸秆后堆体利用了更多氧气。30 d后,由于有机物的分解,微生物活动减缓,氧气消耗量逐渐降低。

挥发性固体是微生物生命活动的基本来源,可评估有机物的降解情况^[17]。本研究在堆肥过程中,PC处理VS降幅显著大于P处理,且中层降解最为显著,这是因为秸秆添加后,堆体中层氧气渗透最佳且中层温度梯度适宜微生物活动。含水率过高或过低都会影响堆肥的氧气供应和微生物活性,进而影响堆肥的质量和稳定性^[18]。2种处理组在堆肥周期内含水率呈先降低后增加趋势,原因是微生物进行生命活动消耗水,而在堆肥中后期分解有机物产生了水导致含水率增加。2种处理组区别在于PC处理组含水率由于微生物活性更高等原因下降程度更高。在堆肥的末期,PC处理的下层含水率更高的原因是中下层微生物分解大分子物质产生水后挥发难,且存在重力作用,上层水向下流动。

堆体的pH是由堆肥过程中微生物活动和有机物降解产物共同决定^[19]。堆肥过程中2处理组的pH总体都呈现下降趋势,这与Guo等^[20]研究发现堆肥过程中铵态氮向硝态氮转化与氨气的挥发相吻合。此外,PC处理pH较高的原因是P处理孔隙率较低,结构致密氧气扩散率低,在厌氧的情况下会有有机酸的产生。这与Yang等^[21]研究发现堆体的中层的pH最高,表明加入秸秆后 O_2 流通至中层,

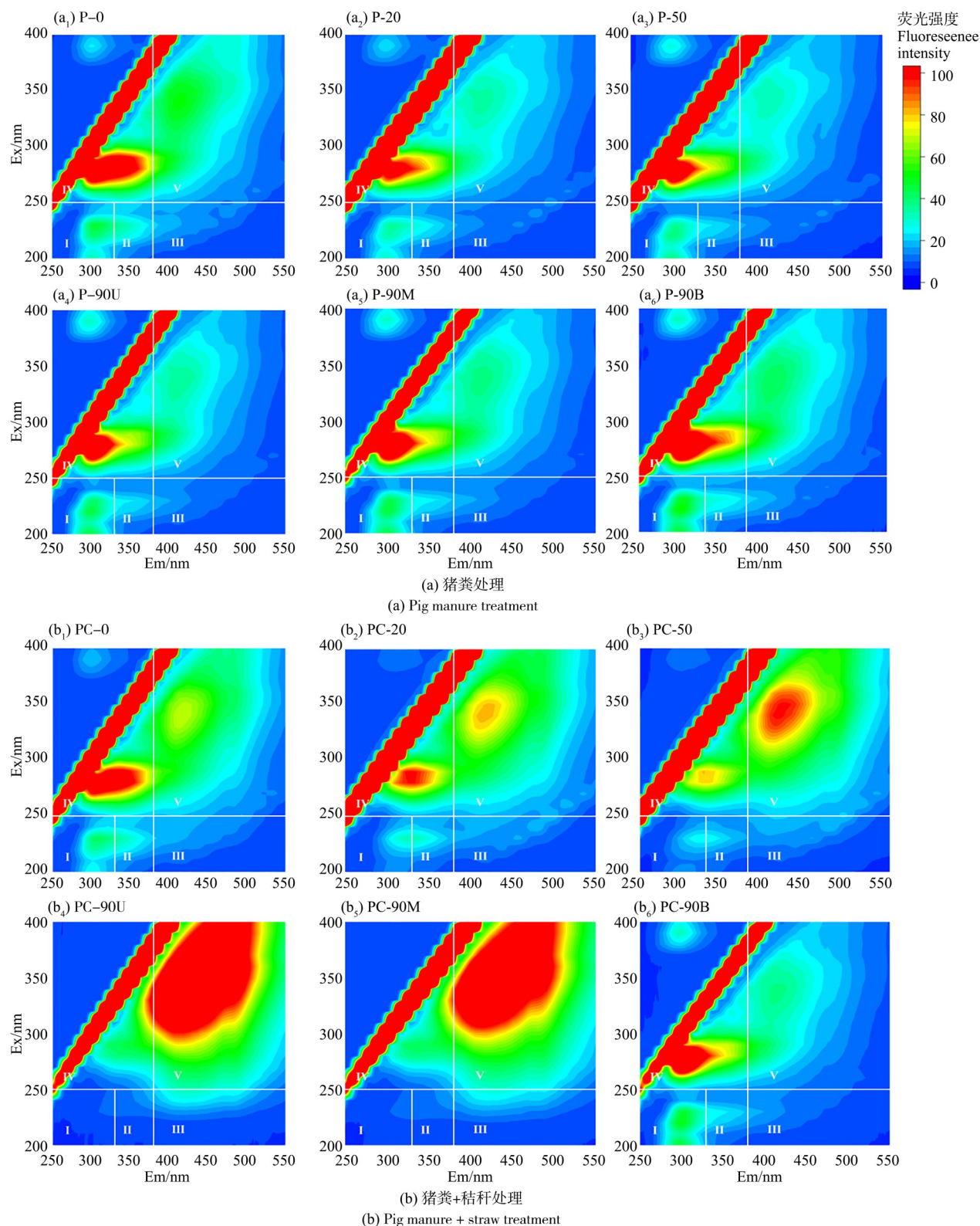


图4 静态兼性堆肥过程中猪粪处理(a)和猪粪+秸秆处理(b)的激发-发射矩阵光谱的变化

Fig. 4 Changes in excitation-emission matrix spectra during static facultative composting of “pig manure treatment” (a) and “pig manure + straw treatment” (b)

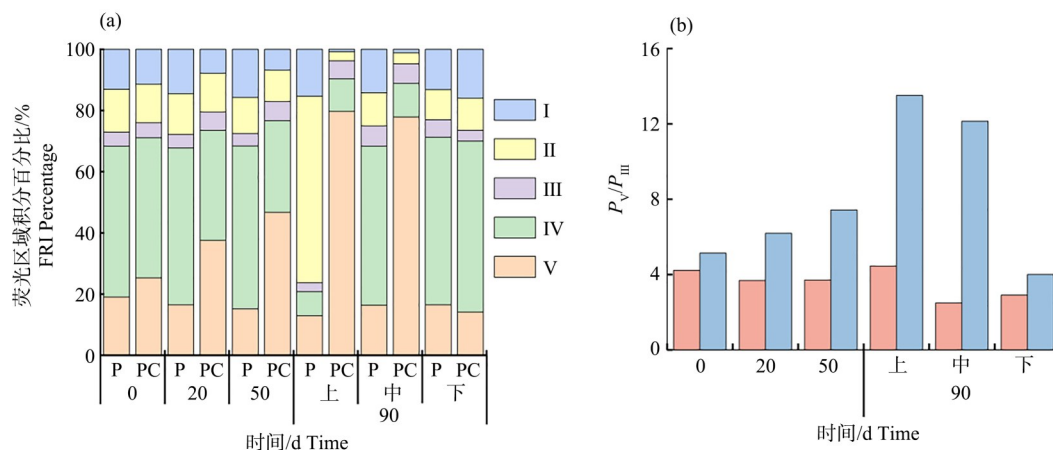


图5 静态兼性堆肥过程中溶解有机物分布(a)、 P_V/P_{III} 比值(b)的变化

Fig. 5 Changes in dissolved organic matter distribution (a) and P_V to P_{III} ratio (b) during static facultative composting

易降解的化合物被矿化为 CO_2 、 NH_3 和 H_2O 相一致。

电导率在堆肥中主要用来反映盐分含量。已有大量研究报道,在好氧堆肥过程中, NH_4^+-N 转化为 NH_3 、小分子有机酸与盐离子的相互作用以及大分子向腐殖质的转化会降低 $EC^{[22-23]}$ 。然而,静态兼性堆肥过程中物质转化相对较慢,水溶性物质无法快速代谢,导致 EC 值较高。堆肥结束时,2种处理组的下层 EC 值均较高的原因是水分受重力影响向下渗透,携带大量可溶性盐分,且静态兼性堆肥的底层通常氧气不足,易形成厌氧环境,这与陈是吏等^[24]的研究相似。

碳氮比是评估堆肥质量和过程效率的关键参数之一,碳氮比低导致氮的大量损失而降低肥效,碳氮比值高则降低有机物料的分解速度,使发酵时间延长。堆肥过程中,PC处理在升温期上升是由于堆肥初期有机碳的降解速率更高。而后由于微生物的分解作用^[25],碳氮比逐渐降低。而P处理始终呈上升趋势,表明秸秆的添加有效地加快了腐熟过程^[26]。

GI是一种评估堆肥腐熟度和毒性的重要指标,它综合反映堆肥产品的植物毒性。从堆肥过程来看,PC处理GI显著高于P处理,这是因为秸秆添加提高了堆体自由孔隙率,提高了有机物的转化以及有毒物质的降解^[27]。堆肥结束时,PC处理下层GI极低,这是因为下层氧气扩散受限,主要为厌氧条件,腐殖质降解不完全,产生低分子量有机酸。这与Wang等^[28]的研究发现高浓度的有机酸和氨氮会抑制植物组织重要生化过程,从而抑制种子发芽研究内容一致。

3.2 秸秆覆盖下秸秆添加对猪粪兼性堆肥的碳氮含量的影响

堆肥过程中无机氮主要是以 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 形式存在, NH_4^+-N 是堆肥初期的主要氮形式,随着堆肥过程的进行,由于微生物的作用,部分 NH_4^+-N 会转化为 $NO_3^--N^{[29]}$ 。2种处理组 NH_4^+-N 含量都呈现先增后降的趋势。P处理 NH_4^+-N 显著高于PC处理是由于秸秆作为高碳低氮物质会稀释 $NH_4^+-N^{[30]}$ 。随着堆肥进行,PC处理下降程度更大的原因是秸秆添加改善了堆体结构,促进了好氧条件的形成,从而加速了 NH_4^+-N 的硝化作用。堆肥结束时,上层和中层 NH_4^+-N 含量低,表明这2层反应最强烈。 NO_3^--N 的积累仅在PC处理中被检测到,且出现在堆肥后期,这是因为前期高温条件可能抑制了硝化细菌活性,随着温度降低和pH稳定,硝化作用逐渐增强。秸秆添加创造的微环境更有利于硝化过程的进行,这与Deng等^[31]研究发现的硝化作用启动条件的研究结果一致。值得注意的是,P处理组在整个堆肥过程中均未检测到 NO_3^--N 的积累,进一步证实了秸秆添加对硝化过程的促进作用^[32]。

DOC是堆肥中可溶解的有机碳形式,是衡量堆肥微生物活动的重要指标^[33]。P处理的DOC和DN的含量显著高于PC处理组,原因是秸秆调控物质的降解使堆肥的物料粒度变小,孔隙率下降,堆体中的厌氧核增多,从而形成了局部厌氧状态,使硝化作用受到抑制,而反硝化作用增强,生成了大量氮氧化物,这与姜继韶等^[34]研究结果相似,同时,堆肥过程中形成的腐殖物质被分解,使氮以氨的形式

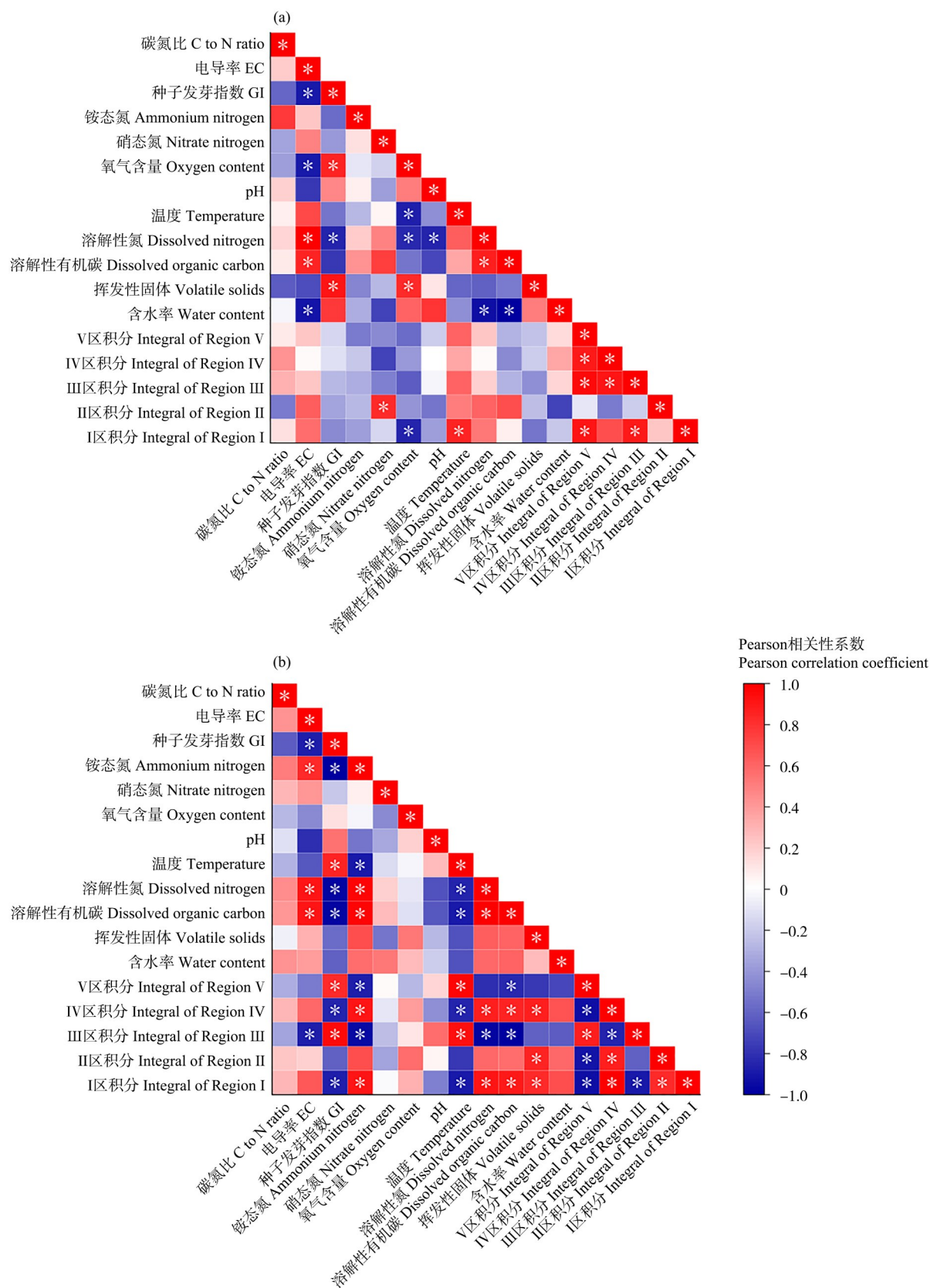


图 6 静态兼性堆肥过程中猪粪处理(a)、猪粪+秸秆处理(b)相关性热图

Fig. 6 Correlation heatmap of “pig manure treatment” (a) and “pig manure + straw treatment” (b) during static facultative composting

挥发,增加了养分的流失^[35]。

3.3 秸秆覆盖下秸秆添加对猪粪兼性堆肥的腐殖化指标的影响

本研究通过光谱分析探讨了P与PC处理组在堆肥过程中腐殖质的动态变化规律。在30 d前,P与PC处理的IV区峰值均显著高于V区,表明堆肥初期有机质仍以未完全降解的中间产物为主。然而,随着堆肥的进行,PC处理的IV区峰值逐渐降低,而V区峰值显著上升,最终PC处理的V区峰度显著高于P处理($P<0.001$),这与尹子铭等^[6]的研究发现玉米秸秆能够通过调节孔隙度和碳氮比来提高了腐殖化程度的研究内容一致。此外,90 d时,PC处理的上层和中层的V区峰度显著高于底层($P<0.001$),表明堆体上层和中层由于更好的通气条件和微生物活动,腐殖化进程更为充分。这之前测量的理化和腐熟度指标结果一致。

腐殖酸类物质和富里酸类物质之间的相互作用通过 P_V/P_{III} 的比值反映^[36]。PC处理的 P_V/P_{III} 比值不断升高表明猪粪在兼性堆肥过程中加入秸秆后腐殖酸显著增加,这与唐朱睿等^[37]研究的三维荧光光谱的结论一致,这表明添加秸秆后显著提高了堆肥过程中微生物的作用,加强兼性堆肥腐殖化过程。

3.4 秸秆覆盖下猪粪兼性堆肥理化指标、腐殖化指标相关性分析

在P处理中,DOC与EC的正相关性表明有机质降解过程中小分子有机酸和盐离子的释放是导致EC升高的主要原因。DOC与 NO_3^- -N的正相关性说明硝化作用与溶解性有机碳的降解环境条件相似,均需充足的氧气供应,这与Bernhardt等^[38]的研究一致。EC和DN与GI的负相关性证实高盐分和可溶性氮积累会对植物产生毒性,而VS与GI的正相关性表明有机质降解程度直接影响堆肥的腐熟度。

秸秆的添加显著改变了堆肥过程的相关性。DOC、DN与 NH_4^+ -N的正相关性及它们与氧气含量的负相关性表明,秸秆通过改善孔隙结构促进好氧硝化,加速 NH_4^+ -N向 NO_3^- -N转化,同时减少溶解性碳氮的积累^[39]。腐殖酸类物质与蛋白质类及微生物代谢产物的负相关性表明,在秸秆调控下,微生物活性增强,能够更高效地利用易降解组分(如蛋白质)驱动腐殖化进程。这一结果与PC处理

更高的 P_V/P_{III} 比值一致,证实秸秆添加能够优化碳氮代谢,从而提升腐殖化效率。

4 结 论

本研究旨在阐明秸秆覆盖条件下添加秸秆调控堆体结构对猪粪静态兼性堆肥腐熟度与腐殖化进程的促进机制,以新鲜猪粪和玉米秸秆为研究对象,通过对比纯猪粪与猪粪+秸秆2种处理,探究秸秆覆盖结合秸秆调控对堆肥微环境、腐熟度指标及腐殖化特征的影响。主要结论如下:

1)秸秆覆盖下,秸秆调控可显著优化猪粪兼性堆肥的微环境,通过提升堆体自由孔隙率改善氧气扩散效率,使堆体最高温度升高 5.62°C ,促进了微生物对有机物的降解。

2)秸秆覆盖下,秸秆调控作用能显著提高静态兼性堆肥的腐熟度,堆肥结束时猪粪与秸秆混合处理的种子发芽指数达到82.48%,远高于纯猪粪处理的42.05%,表明其腐熟度高、植物毒性低,有利于粪污的就地就近还田利用。

3)秸秆覆盖下,采用秸秆调控可以加快腐殖质的形成进程,使堆肥产物具有更高的腐殖化指数。激发-发射矩阵光谱分析,显示出猪粪+秸秆处理组 P_V/P_{III} 比值较猪粪处理组高出27.5%~79.3%。相关性分析表明,蛋白质类物质、富里酸类物质及可溶性微生物代谢产物与腐殖酸类物质呈显著正相关,揭示有机质降解是驱动腐殖化进程的关键机制。

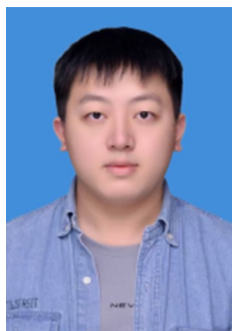
参考文献 References

- [1] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,陈家斌,周雪飞.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176
Wu H W, Sun X Q, Liang B W, Chen J B, Zhou X F. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176 (in Chinese)
- [2] 周海宾,丁京涛,孟海波,沈玉君,王健,张曦,程红胜,宋立秋,徐鹏翔,张朋月,王鑫宇.中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析[J].农业工程学报,2022,38(9):237-246
Zhou H B, Ding J T, Meng H B, Shen Y J, Wang J, Zhang X, Cheng H S, Song L Q, Xu P X, Zhang P Y, Wang X Y. Survey and development analysis of resource utilization technology of livestock and poultry wastes in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9): 237-246 (in Chinese)
- [3] 黄国锋,吴启堂,孟庆强,黄焕忠.猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J].华南农业大学学报,2002,23(3):1-4
Huang G F, Wu Q D, Meng Q Q, Huang H Z. Substance changes and

- maturity evaluation during pig manure composting[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2002, 23(3): 1-4 (in Chinese)
- [4] 徐鹏翔, 沈玉君, 丁京涛, 周海宾, 宋立秋, 程红胜, 王健, 程琼仪, 张朋月. 中国东北地区畜禽粪污处理技术与资源化利用模式分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(22): 199-206
- Xu P X, Shen Y J, Ding J T, Zhou H B, Song L Q, Cheng H S, Wang J, Cheng Q Y, Zhang P Y. Analysis of the treatment technology and resource utilization mode of livestock and poultry manure in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(22): 199-206 (in Chinese)
- [5] Zhang M Q, SHI A P, Ajmal M, Ye L H, Awais M. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(7): 5445-5468
- [6] 尹子铭, 杨燕, 唐若兰, 鲍紫阳, 李丽琼, 彭丽娟, 李国学, 袁京. 秸秆对猪粪静态兼性堆肥无害化和腐熟度的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 218-226
- Yin Z M, Yang Y, Tang R L, Bao Z Y, Li L Q, Peng L J, Li G X, Yuan J. Effects of maize stover on the harmlessness and maturity during the static facultative composting of pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7): 218-226 (in Chinese)
- [7] Ayilara M S, Olanrewaju O S, Babalola O O, Odeyemi O. Waste Management through composting: Challenges and potentials [J]. *Sustainability*, 2020, 12(11):4456
- [8] 赵汝东, 董恒诚, 黄华, 刘玉涛, 李骅. 我国畜禽粪污肥料化利用研究现状[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(5): 151-156
- Zhao R D, Dong H C, Huang H, Liu Y T, Li H. Research status of fertilizer utilization of livestock and poultry in China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(5): 151-156 (in Chinese)
- [9] 刘歆, 陈群, 邱玉朗, 侯国喜, 李林, 闫晓刚, 柳冬梅, 吕智超, 高星爱, 李忠和, 张云影, 闫秋良. 猪粪与玉米秸秆好氧堆肥处理及其安全性评价[J]. *中国畜牧兽医*, 2022, 49(12): 4945-4952
- Liu X, Chen Q, Qiu Y L, Hou G X, Li L, Yan X G, Liu D M, Lyu Z C, Gao X A, Li Z H, Zhang Y Y, Yan Q L. Aerobic composting treatment of pig manure with corn straw and its safety evaluation [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, 49(12): 4945-4952 (in Chinese)
- [10] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, Guo C X, Liu Y Q, Lei Z F, Zhang Z Y. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 530-535
- [11] Yang Y, Chen W J, Liu G L, Kong Y L, Wang G Y, Yin Z M, Li G X, Yuan J. Effects of cornstalk and sawdust coverings on greenhouse gas emissions during sheep manure storage[J]. *Waste Management*, 2023, 166: 104-114
- [12] 卢秉林, 王文丽, 李娟, 马忠明. 添加小麦秸秆对猪粪高温堆肥腐熟进程的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(4): 926-930
- Lu B L, Wang W L, Li J, Ma Z M. Effect of wheat straw on maturing of pig manure high-temperature composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(4): 926-930 (in Chinese)
- [13] 张东莉, 吕同瑞, 赖海玉, 张兰霞, 罗文海, 李国学, 侯勇, 肖然, 钟顺和, 王春荣, 刘飞, 徐志程. 秸秆复配对奶牛粪便兼性堆肥过程促腐减排与减量化的影响[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(3): 737-750
- Zhang D L, Lv T R, Lai H Y, Zhang L X, Luo W H, Li G X, Hou Y, Xiao R, Zhong S H, Wang C R, Liu F, Xu Z C. Effect of straw on maturity, gaseous emission, and weight reduction during anoxic composting of cow manure[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(3): 737-750 (in Chinese)
- [14] NY/T 525—2021, 有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- NY/T 525—2021. Organic fertilizer[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2021 (in Chinese)
- [15] Wang N, Huang D D, Shao M S, Sun R, Xu Q Y. Use of activated carbon to reduce ammonia emissions and accelerate humification in composting digestate from food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126701
- [16] Wan L B, Wang X T, Cong C, Li J B, Xu Y P, Li X Y, Hou F Q, Wu Y Y, Wang L L. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122730
- [17] 杨森, 佟敏, 崔亚茹, 王体朋, 史昌明. 牛粪与玉米秸秆沼渣混合堆肥及其对环境的影响研究[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(12): 168-173
- Yang S, Tong M, Cui Y R, Wang T P, Shi C M. Study on mixed compost of cow dung and corn stalk biogas residue and its impact on environment[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(12): 168-173 (in Chinese)
- [18] Li M X, He X S, Tang J, Li X, Zhao R, Tao Y Q, Wang C, Qiu Z P. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting[J]. *Chemosphere*, 2021, 264: 128549
- [19] 乔如陆, 刘佳琪, 孙玉鑫, 周陈俊男, 李明章, 仰颀, 王凌霄, 许钊, 艾为党, 常瑞雪, 李彦明. 厨余堆肥污染气体减排的工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 223-231
- Qiao R L, Liu J Q, Sun Y X, Zhou C, Li M Z, Yang J, Wang L X, Xu Z, Ai W D, Chang R X, Li Y M. Optimization of process parameters for reducing gas emission from kitchen waste compost[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 223-231 (in Chinese)
- [20] Guo X X, Liu H T, Wu S B. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 501-510
- [21] Yang Y, Kong Y L, Wang G Y, Shen Y J, Tang R L, Yin Z M, Yang J, Li G X, Yuan J. Temporal succession and spatial heterogeneity of humification, pathogens and bacterial community in facultative heap composting [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 176: 734-746
- [22] Li Y, Luo W H, Li G X, Wang K, Gong X Y. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 53-59
- [23] Jiang J S, Wang Y, Yu D, Hou R, Ma X N, Liu J Q, Cao Z G, Cheng K, Yan G X, Zhang C Y, Li Y B. Combined addition of biochar and garbage enzyme improving the humification and succession of fungal community during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126344
- [24] 陈是吏, 袁京, 李国学, 何胜洲, 张邦喜. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及NH₃排放[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 199-206
- Chen S L, Yuan J, Li G X, He S Z, Zhang B X. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH₃ emissions during sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 199-206 (in Chinese)
- [25] 王若斐, 刘超, 操一凡, 乔策策, 李荣, 沈其荣. 不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥效[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 127-134, 154
- Wang R F, Liu C, Cao Y F, Qiao C C, Li R, Shen Q R. Research on the composting of pig manure and rice husk with different C/N and plant growth promotion effects of the products[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6): 127-134, 154 (in Chinese)
- [26] Goyal S, Dhull S K, Kapoor K K. Chemical and biological changes during

- composting of different organic wastes and assessment of compost maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(14): 1584-1591
- [27] Sánchez-García M, Albuquerque J A, Sánchez-Monedero M A, Roig A, Cayuela M L. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 272-279
- [28] Wang G Y, Yang Y, Kong Y L, Ma R N, Yuan J, Li G X. Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126809
- [29] 王立群, 喻其林, 黄明媛. 鸡粪好氧堆肥氨氧化霉菌的筛选及氮转化能力的研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2763-2767
- Wang L Q, Yu Q L, Huang M Y. Screening and nitrogen transformation activity of ammonia-oxidizing molds during aerobic chicken manure composting [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2763-2767 (in Chinese)
- [30] Wang B, Lehmann J, Hanley K, Hestrin R, Enders A. Adsorption and desorption of ammonium by maple wood biochar as a function of oxidation and pH[J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 120-126
- [31] Deng L T, Zhao Y, Zhang J Z, Bello A, Sun Y, Han Y, Wang B, Uzoamaka Egbeagu U, Li D T, Jong C, Xu X H. Insight to nitrification during cattle manure-maize straw and biochar composting in terms of multi-variable interaction[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124572
- [32] Cáceres R, Malińska K, Marfà O. Nitrification within composting: A review [J]. *Waste Management*, 2018, 72: 119-137
- [33] Said-Pullicino D, Erriquens F G, Gigliotti G. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(9): 1822-1831
- [34] 姜继韶, 黄懿梅, 黄华, 刘学玲. 猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(11): 2511-2517
- Jiang J S, Huang Y M, Huang H, Liu X L. Carbon and nitrogen dynamics and stabilization time of a swine manure-straw compost[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2511-2517 (in Chinese)
- [35] 杨延梅, 杨志峰, 张相锋, 刘鸿亮, 席北斗. 底物含氮量对厨余堆肥氮素转化及其损失的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 993-999
- Yang Y M, Yang Z F, Zhang X F, Liu H L, Xi B D. Nitrogen transformation and loss during the composting of food wastes with different nitrogen contents [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 993-999 (in Chinese)
- [36] Tian W, Li L Z, Liu F, Zhang Z H, Yu G H, Shen Q R, Shen B. Assessment of the maturity and biological parameters of compost produced from dairy manure and rice chaff by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 330-337
- [37] 唐朱睿, 席北斗, 何小松, 檀文炳, 张慧, 李丹, 黄彩虹. 猪粪堆肥过程中水溶性有机物结构演变特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(5): 1526-1532
- Tang Z R, Xi B D, He X S, Tan W B, Zhang H, Li D, Huang C H. Structural characteristics of dissolved organic compounds during swine manure composting[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(5): 1526-1532 (in Chinese)
- [38] Bernhardt E S, Likens G E. Dissolved organic carbon enrichment alters nitrogen dynamics in a forest stream[J]. *Ecology*, 2002, 83(6): 1689-1700
- [39] Wang X G, Li C S, Luo Y, Hua K K, Zhou M H. The impact of nitrogen amendment and crop growth on dissolved organic carbon in soil solution[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(1): 95-103

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 潘嘉鹏, 硕士研究生。2020—2024年就读于西华师范大学; 2024年9月至今就读于中国农业大学资源与环境学院资源与环境专业。2023年获得全国大学生数学竞赛省级3等奖。



通讯作者简介: 李国学, 二级教授, 博士生导师, 现任中国农业大学生物质工程中心主任和有机资源循环利用创新团队首席专家。近5年主持国家及省部级相关项目15项, 获省部级奖一等奖3项、二等奖1项; 授权专利13件, 出版著作2部, 发表论文160篇。