

贺滢霖, 时珺玮, 池汝安, 等. 水稻秸秆联合磷石膏腐解规律及腐殖化研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(6): 76–83. He Yinglin, Shi Junwei, Chi Ru'an, et al. Study on the decay characteristics and humification of rice straw combined with phosphogypsum[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(6): 76–83.

水稻秸秆联合磷石膏腐解规律及腐殖化研究

贺滢霖¹, 时珺玮¹, 池汝安², 申文娟¹,
李建芬¹, 秦振华^{1*}

(1. 武汉轻工大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430023;

2. 湖北三峡实验室, 湖北 宜昌 443007)

摘要:为探索水稻秸秆和磷石膏2种废弃物资源化利用的新途径,文章以水稻秸秆为供试物料,利用尿素调节碳氮比,以干秸秆质量为基准添加不同比例磷石膏(0%、10%、20%、30%、40%),探究磷石膏作为外源调理剂对水稻秸秆腐解效能以及腐殖品质影响。结果表明:腐解过程中水稻秸秆的I型结晶纤维素的含量显著降低,磷石膏的优势晶面发生崩解,添加磷石膏对秸秆的腐解历程没有显著影响。联合腐解过程的pH、NH₄⁺-N含量、荧光光谱、紫外光谱及其光谱系数比分析显示磷石膏的添加有利于稳定腐解体系的酸碱性,降低氨的逸失,促进腐解的腐殖化进程;腐解60 d后,不同磷石膏添加量处理组的种子发芽指数(GI)分别为84.8%、87.1%、89.7%和83.9%,高于空白组的83.1%。综合研究结果,添加磷石膏可以促进腐解产物的腐熟和脱毒,对水稻秸秆和磷石膏的协同资源化具有指导作用。

关键词:腐解; 水稻秸秆; 磷石膏; 腐殖化; 种子发芽指数

中图分类号:X712 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.2225.24.338 文章编号:1003-6504(2025)06-0076-08

Study on the Decay Characteristics and Humification of Rice Straw Combined with Phosphogypsum

HE Yinglin¹, SHI Junwei¹, CHI Ru'an², SHEN Wenjuan¹,
LI Jianfen¹, QIN Zhenhua^{1*}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 443007, China)

Abstract: In order to explore the new ways of resource utilization of rice straw and phosphogypsum waste, rice straw was used as the raw experimental material, and the C/N ratios were adjusted by using urea, and based on the mass of dry straw, five treatment groups were set by adding different amounts (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%) of phosphogypsum to investigate the effects of phosphogypsum as exogenous putrefaction conditioning agent on the decomposition efficiency and humus quality of the straw. The results showed that the content of type I crystalline cellulose in rice straw was significantly reduced during the combined humification process, and the dominant crystal face of phosphogypsum disintegrated. Additionally, the addition of phosphogypsum had no significant effect on the decomposition process of straw. Furthermore, the analysis of pH, NH₄⁺-N content, fluorescence spectra, ultraviolet spectra and their spectral coefficient ratios showed that the addition of phosphogypsum was helpful for stabilizing the acidity and alkalinity of the decomposition system, reducing the loss of ammonia, and promoting the humification process of decomposition. After 60 d of humification, the seed germination indexes (GI) of the experimental groups with different phosphogypsum dosage were 84.8%, 87.1%, 89.7% and 83.9% respectively, which were higher than that of the blank group (83.1%). From the above, the addition of phosphogypsum could promote the composting and detoxification of the decomposition products, and had a guiding effect on the synergistic resource utilization of rice straw and phosphogypsum.

Key words: decomposition; rice straw; phosphogypsum; humification; seed germination index

秸秆是作物收割后产生的副产物,我国数量庞大的作物秸秆类废弃物是丰富的生物质原料来源^[1]。近年来,农业农村部深入推动农作物秸秆的综合利用,其中,秸秆肥料化还田是秸秆资源化利用的首要选择,在秸秆综合利用率中占比达到57.6%。秸秆肥料化后还田能将自身的有机质、氮、磷、钾等营养物质扩散到环境中,改善土壤营养环境^[2]。然而,秸秆直接还田存在有机物料分解慢、影响种子发芽和诱发下茬作物再生病害等问题^[3]。为增强秸秆有机质及营养成分的利用率,研究者通常添加菌种并联合其他外源物质对秸秆进行腐解处理。如Wang等发现洲玉米螟消化酶能够提高白腐真菌对玉米秸秆木质素、纤维素和半纤维素的降解效果^[4]。此外,叶富英等研究表明在秸秆腐解过程中添加蒙脱石、粉煤灰和铁锰尾渣等工业固废有利于形成胡敏酸类大分子物质,在保留碳素、氮素的同时,提高堆肥稳定性和腐熟度^[5]。

磷石膏是磷化工行业的主要固体废物,数据显示我国磷石膏的年产量超过7 000万t,累计库存超6亿t,但利用率仍不足40%^[6]。磷石膏在农业领域具备改良盐碱土地、增强土壤肥力的潜力,然而直接施用磷石膏会造成土壤pH值下降,且存在重金属超标的环境风险。近年来,研究者认为磷石膏与有机质协同生物改性是实现磷石膏资源化利用的有效途径。如Jin等联合磷石膏与秸秆制备的生物肥料可以提高土壤中总氮、交换性钾和可溶性磷等养分含量,且土壤的孔隙度和酶活性也显著增加^[7]。Wu等在铝土矿残渣与秸秆协同堆肥过程中添加磷石膏,堆体中腐殖酸和黄腐酸的含量分别增加了27.1%和22.9%^[8]。徐子棋等发现秸秆覆盖配合磷石膏可以改善苏打盐碱土理化性质,且联合施用磷石膏比单独覆盖秸秆的增产效果更为明显^[9]。尽管磷石膏与秸秆的协同资源化在农业领域已取得较好效果,然而目前研究多局限于评价秸秆-磷石膏联用在土壤中的效能,秸秆-磷石膏协同转化过程中物料的结构演变和腐解规律则鲜有报道。因此,本研究以水稻秸秆为主要原料,研究腐解过程中秸秆和磷石膏的结构演变特征,探究磷石膏添加量对腐解体系pH、氨氮、腐殖质组分以及种子发芽指数的影响,探索秸秆腐解对磷石膏的消纳能力,以期对秸秆和磷石膏的协同资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

实验所用磷石膏来自湖北三峡实验室,pH为2.13。水稻秸秆购自江苏省徐州稻草制品生产基地,粉碎后粒径约20目,掺杂部分细小纤维,碳含量为37.03%,

氮含量为1.03%。固体腐解菌种购自慧可丰生物科技有限公司,主要有效菌包括枯草芽孢杆菌、哈茨木霉、白曲霉、米曲霉、黑曲霉、细黄链霉菌等。氨氮试剂购自北京连华永兴科技发展有限公司。

主要仪器包括DHG-9055A鼓风干燥箱、PHS-3C型pH计、5B-3B(V11)型多参数水质测定仪、Nico IS10傅里叶变换红外光谱、A380型紫外-可见分光光度计、F98荧光分光光度计、JSM-7100型扫描电子显微镜、岛津7000型X射线衍射仪。

1.2 实验设计

将秸秆与磷石膏均置于105℃烘箱2h,烘干至恒重。准确称取15.0g秸秆(过40目筛)于250mL已灭菌的锥形瓶中,利用尿素调节C/N为27:1,以磷石膏比例为试验因子,共设置5组处理,磷石膏含量分别为0%、10%、20%、30%、40%(以秸秆干重计,分别记作CK、A₁、A₂、A₃、A₄)。加入无菌水调节含水率为65%,覆盖保鲜膜,并在保鲜膜上均匀扎15个孔后置于30℃的恒温培养箱中。在实验开始后的第0、30、60天分别对样品进行取样,所取样一部分用于鲜样测定,另一部分进行自然风干,常温储存。

1.3 指标测定

取2g鲜样,加入20mL去离子水,30℃条件下水平振荡2h,振荡幅度为140r/min,静置30min过滤,滤液分为2份,分别测pH及种子发芽指数。另取2g鲜样,加入40mL氯化钾溶液(1mol/L),30℃条件下水平振荡2h,振荡幅度为140r/min,测定氨态氮。

取0.5g风干粉碎后样品,加入超纯水,质量体积比1:20(m/V),30℃条件下水平振荡5h,振荡速度为140r/min。振荡结束后以9 000r/min离心15min,上清液过孔径为0.45μm的滤膜,获得含有溶解性有机质(DOM)的滤液,对DOM进行紫外光谱分析,波长范围选取200~400nm,扫描间隔1nm。

DOM的吸收系数及光谱斜率计算公式如下^[10]:

$$\alpha(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / m \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \exp[S(\lambda - \lambda_0)] \quad (2)$$

式中, $\alpha(\lambda)$ 为波长 λ nm处的吸收系数; $A(\lambda)$ 为波长 λ nm处的吸光度; m 为所用石英比色皿光程; $\alpha(\lambda_0)$ 为参考波长 λ_0 处的吸收系数值; S 为所选波段的光谱斜率。

取上述DOM滤液,以超纯水作为空白,使用1cm四通光石英比色皿进行荧光光谱测试。仪器扫描参数设置如下:氙灯光源激发功率为650W,激发波长(Ex)设置为200~400nm,发射波长(Em)设置为280~550nm,扫描速度3 000r/min,狭缝宽度为5nm。每个样品测量在扣除空白之后,进行瑞利散射和拉曼散

射矫正。

1.4 数据统计分析

研究数据采用Microsoft Excel 2016进行整理,趋势图通过Origin 2021作图,荧光数据处理通过MATLAB 2023a进行瑞利散射和拉曼散射矫正。

2 结果与分析

2.1 腐解过程中的XRD分析

图1是腐解过程中秸秆及磷石膏的XRD谱图。水稻秸秆中结晶态的纤维素结构致密,是秸秆直接还田腐解慢的主要原因^[11]。由图1(a)可知,在腐解初期,XRD谱在 2θ 为 15° 与 22° 附近均出现了纤维素I型的特征峰。随着腐解时间的增长,纤维素I型的特征峰

逐渐减弱,说明腐解后水稻秸秆中I型结晶纤维素的含量显著降低。研究认为秸秆纤维素的降解通常需要先突破半纤维素和木质素形成的保护屏障,因此结晶纤维素的降解说明腐解体系选取的复合菌剂对水稻秸秆具有高效的降解作用。图1(b)中XRD谱图显示磷石膏为(PDF#33-0311)相,具有良好的结晶性,在 2θ 为 11.52° 、 20.68° 、 23.35° 和 29.12° 出现的衍射峰分别对应于二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的(020)、(021)、(040)和(041)晶面,随着腐解时间的变化,磷石膏在 2θ 为 11.52° 位置的最强衍射峰相对强度逐渐降低,这说明磷石膏与秸秆的联合腐解在降解秸秆的同时,也破坏了磷石膏晶体的优势生长方向,磷石膏结构发生了崩解,有利于磷石膏与水稻秸秆的土壤化。

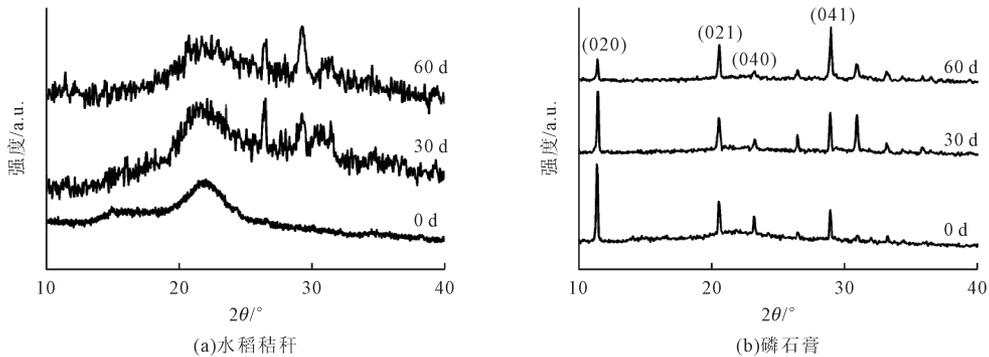


图1 腐解过程中水稻秸秆和磷石膏的XRD图谱
Fig.1 XRD patterns of straw and phosphogypsum during decomposition

2.2 腐解过程中的SEM分析

图2是秸秆及磷石膏腐解前后的扫描电镜图。由图2(a)可见,经过机械破碎的秸秆表面光滑、带有裂缝及少量微孔隙。经过60 d腐解后的秸秆(图2(b))表面粗糙,表明经过腐解刻蚀后,逐渐暴露出秸秆的内部组织,并出现大量的网状结构以及微孔隙。因此,腐解导致秸秆纤维呈现出塌陷崩解的趋势,降低了秸秆纤维的强度。图2(c)与图2(d)分别为磷石膏腐解前后的样貌,腐解前磷石膏颗粒的形态主要为板状晶体,外观形状呈现出平行四边形状,表面附着部分不规则的小颗粒。腐解后磷石膏的晶体结构的表面发生明显变化,部分表面物质发生剥离分解,呈现出腐蚀后的孔隙结构。

2.3 腐解过程中的红外光谱分析

图3(a)和图3(b)分别是CK及A₃在腐解第0、30、60天的红外光谱图。结果表明,不同处理组中秸秆腐解过程中的物质组分变化具有相似性,在 $1067\sim 1111\text{ cm}^{-1}$ 、 $1422\sim 1426\text{ cm}^{-1}$ 、 $1625\sim 1646\text{ cm}^{-1}$ 、 $2916\sim 2920\text{ cm}^{-1}$ 、 $3406\sim 3414\text{ cm}^{-1}$ 均出现了腐解产物的主要吸收峰。其中 $1067\sim 1111\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰来自于秸秆中纤维素、半纤维素以及腐解形成的多糖类物质中的C—O

伸缩振动^[12],在不同的腐解阶段此处的峰值强度的变化说明秸秆纤维素的C—O键的分解在持续进行。 $1625\sim 1646\text{ cm}^{-1}$ 处出现的吸收峰主要与C=O伸缩、芳香环相连的C—O和C=C伸缩振动有关,主要来源于木质素被微生物分解产生的醌类、醛类、酮类等大分子芳香族环化合物,且研究显示木质素的衍生产物可直接参与秸秆腐解初期富里酸合成^[13]。 $3406\sim 3414\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰来自于碳水化合物的一OH以及酰胺类化合物的一NH伸缩振动^[14],表明秸秆中的纤维素类、蛋白质、脂肪类化合物等被微生物分解,使得更多含有一OH、一NH的化合物暴露在腐解体系内。 $2916\sim 2920\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为亚甲基和末端甲基的C—H伸缩振动峰,这些基团主要来自于秸秆组织中的碳水化合物和脂环族化合物^[15]。 $1422\sim 1426\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰则为羧酸类—COOR反对称伸缩振动以及脂肪类化合物—CH₂的摇摆振动^[16]。另一方面,不同阶段秸秆腐解残体的红外特征峰的强弱变化也能表明秸秆中物质组成的变化。如 1040 cm^{-1} 附近的C=O的伸缩振动峰逐渐减弱是秸秆中容易降解的多糖和酰胺类的物质逐渐减少的标志,而随着腐解的进行,在 870 和 790 cm^{-1} 处出现吸收峰,分别指示了碳酸盐和硅酸

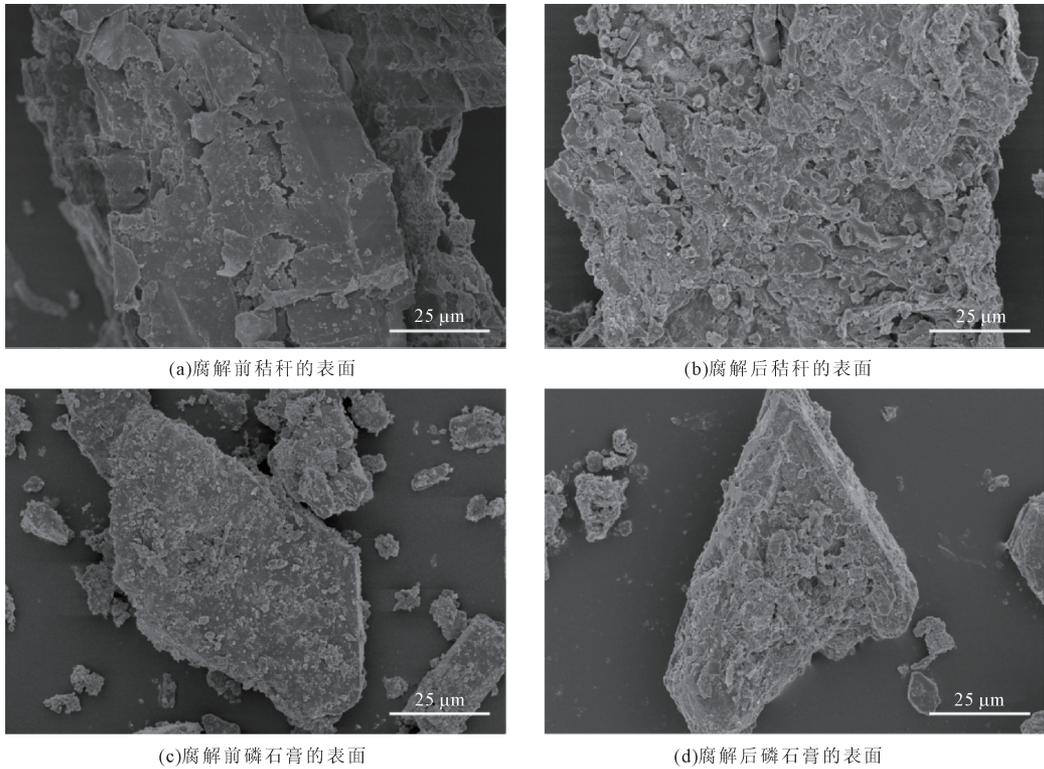


图2 腐解前后秸秆和磷石膏SEM图
Fig.2 SEM images of straw and phosphogypsum before and after decomposition

盐的生成^[17-19]。此外,与CK组相比,A₃实验组在腐解第30天及60天时,3 550 cm⁻¹附近出现的吸收峰来源于游离—OH的伸缩振动,在600及670 cm⁻¹处的吸收峰则归属于S—O键的不对称伸缩振动^[20],推测是在

微生物的好氧作用下,伴随着秸秆的腐解和腐殖酸的生成,A₃实验组中磷石膏发生了刻蚀作用和崩解,导致硫酸根离子释放,增强了A₃实验组中的S—O吸收峰强度。

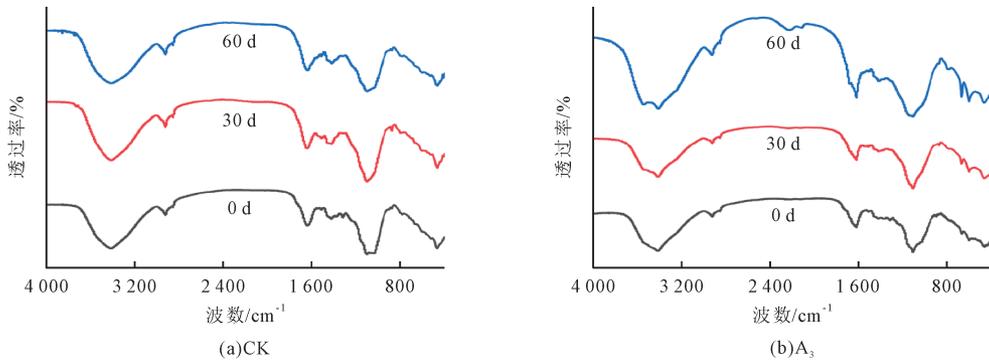
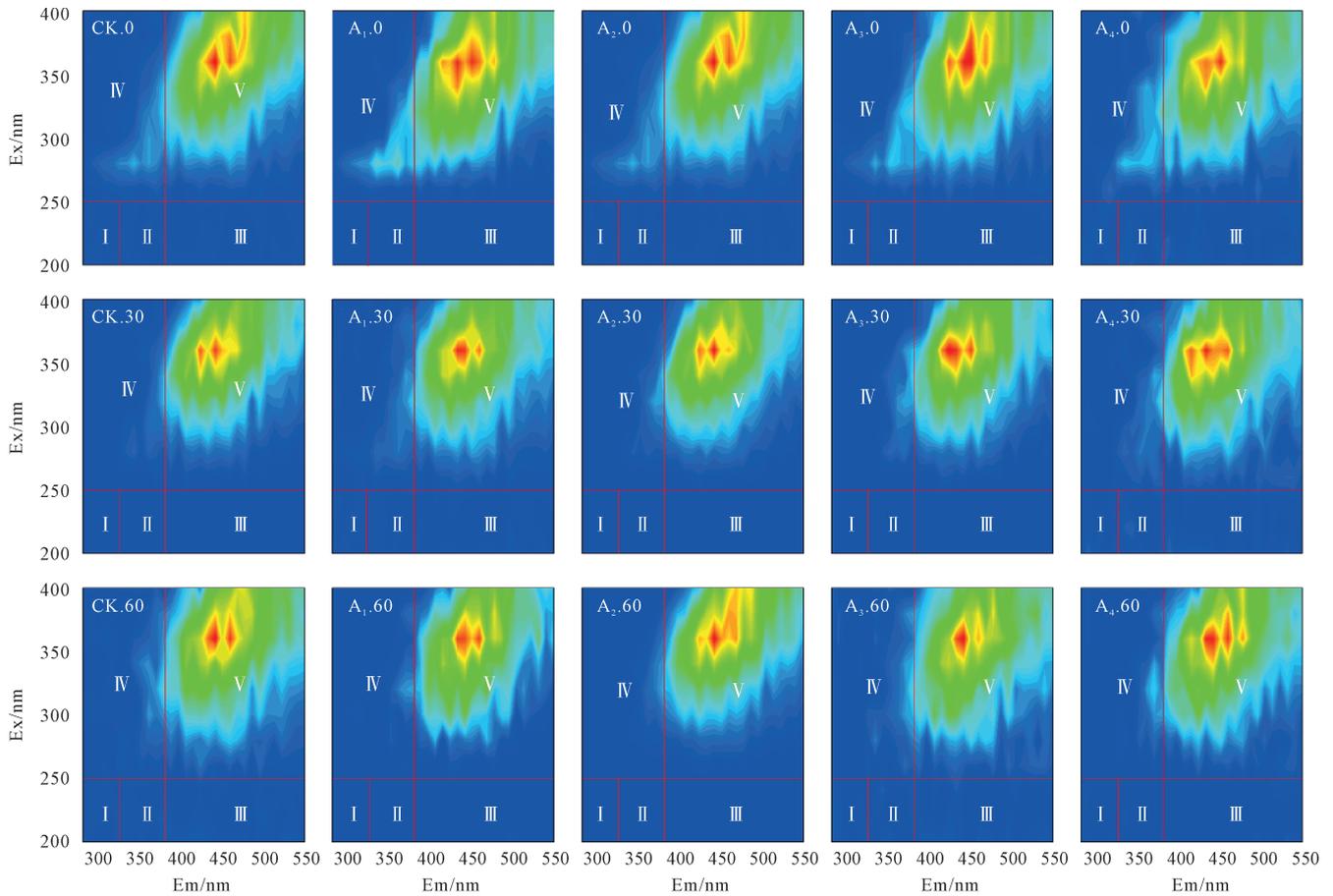


图3 CK和A₃处理组的FTIR图
Fig.3 Infrared spectra of CK and A₃ treatment group

2.4 腐解过程中DOM的荧光光谱分析

图4为腐解第0、30和60天时水溶性有机质(DOM)的荧光光谱图。DOM的三维荧光中心峰的位置可以表征其组分特征,并通过峰值法推测得出DOM荧光峰对应的物质。DOM的三维荧光光谱可以分为5个区域,其中I和II区域均表示芳香性蛋白质(如酪氨酸及色氨酸),III区域表示类富里酸物质,IV区域表示溶解性微生物代谢产物,V区域表示类腐殖酸物质^[21]。如

图4所示,腐解产物的DOM荧光峰主要位于V区,说明腐解过程中形成的DOM主要为类腐殖酸物质。在腐解开始阶段,因剧烈的微生物活动使得此阶段出现较为明显的溶解性微生物代谢产物,随着腐解时间推移,易被微生物利用的物质减少,故IV区域峰值减弱。此外,不同磷石膏添加量的腐解产物的DOM荧光峰和变化趋势具有相似性,说明磷石膏对腐解体系中的活性菌没有抑制作用,不影响秸秆的腐解演变历程。



注: CK.0表示CK组第0天, CK.30表示CK组第30天, CK.60表示CK组第60天, 依此类推。

图4 腐解过程中不同处理组DOM的3D荧光光谱图

Fig.4 3D fluorescence spectra of DOM released from different treatment groups during decomposition

2.5 腐解过程中DOM的紫外光谱分析

图5为腐解产物第0、30及60天的水溶性有机质的紫外吸收光谱,紫外光谱可用于表征不饱和双键和芳香族化合物的组成状况^[22]。如图5所示,不同磷石膏添加量腐解体系中DOM的紫外吸收光谱变化趋势具有很强的相似性,说明DOM的官能团、化学结构及其腐解过程的变化趋势具有相似性,这与图4荧光光

谱的分析结果较为一致。DOM的紫外吸收强度整体上均随吸收波长增加而下降,然而在280 nm附近出现一个吸收峰,这是由于腐殖类物质中的共轭结构受紫外光激发的 $n-\pi^*$ 电子跃迁所致^[23]。随着腐解时间的延长,磷石膏联合秸秆的腐解体系的吸收光谱均出现红移现象,说明腐解体系的腐殖化程度在逐步增强,提高了腐殖质的芳香度和不饱和性。

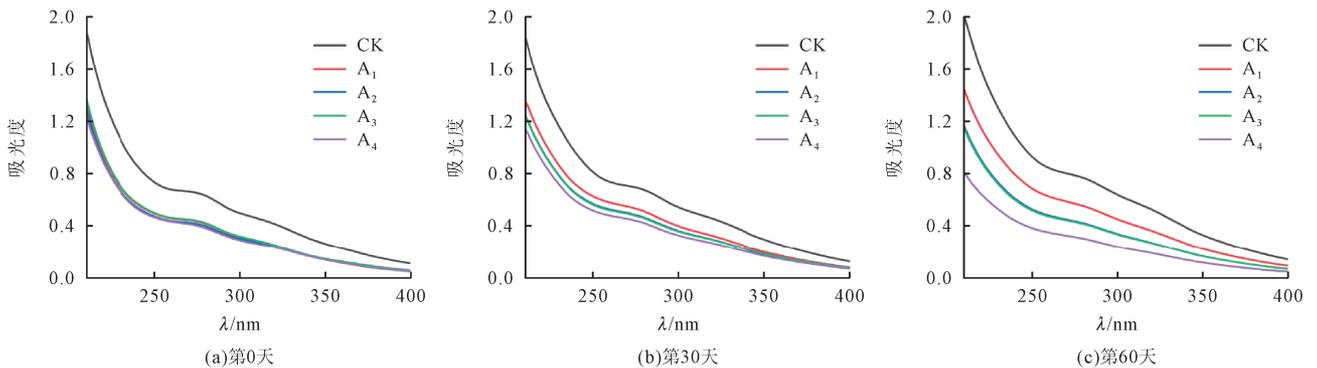


图5 腐解过程中不同处理组DOM的紫外光谱图

Fig.5 UV spectra of DOM released from different treatment groups during decomposition

由表1可知,不同腐解体系的 E_{300}/E_{400} 均大于3.5,说明腐解过程主要的腐殖质成分是富里酸^[24]。与初

始数值相比,在腐解结束时 E_{300}/E_{400} 数值均出现不同程度的下降,因 E_{300}/E_{400} 与腐殖化程度呈负相关,说

明腐殖化程度加深,产生更多稳定的腐殖质。同时,光谱斜率比SR是275~295 nm与350~400 nm波长范围光谱斜率的比值(即 $S_{275-295}/S_{350-400}$),而SR与DOM分子量大小呈负相关。不同处理组的SR数值先降后升反映腐解过程中DOM分子量的动态变化

特征。在腐解结束时,SR均呈现出大于初始数值的现象,说明腐解后续阶段产生了更多的小分子腐殖物质。植物根系对于小分子腐殖质吸收效果更佳,因此腐解后期产生的腐殖物质更有利于植物吸收^[25]。

表1 不同腐解处理组的紫外可见吸收特征参数
Table 1 UV-vis characteristic parameters of different decomposition groups

时间/d	E_{300}/E_{400}					SR				
	CK	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	CK	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
0	4.55	5.62	5.47	5.68	5.86	0.80	0.83	0.82	0.83	0.80
30	4.32	5.00	4.98	4.61	4.63	0.72	0.75	0.75	0.76	0.76
60	4.53	4.90	4.97	4.91	5.10	0.95	0.93	0.93	0.94	0.93

2.6 腐解产物的理化性质分析

2.6.1 pH的变化

pH反映腐解系统的酸碱程度和整体环境状态,是影响微生物活动的重要因素^[26]。由图6得知,第0天时A₁、A₂、A₃及A₄的pH分别为7.06、6.66、6.53、6.42,均小于CK的7.26,且随着磷石膏加入量的增加而逐渐降低,这主要是磷石膏本身的酸性所致。随着腐解过程的进行,不同腐解体系的pH在6.4~8.5之间变化,腐解完成后的pH均高于初始阶段,这是由于秸秆在腐解发酵过程中,有机物中的氮素在微生物的作用下逐渐转化生成氨气,造成系统碱性升高^[27]。此外,CK、A₁的pH先上升后下降,当增加磷石膏含量时,A₂、A₃及A₄的pH整体呈现上升趋势。这可能源于更多的磷石膏增加了秸秆的腐解强度,同时腐解产生的CO₂和NH₄⁺分别与磷石膏中硫酸钙解离形成的硫酸根和钙离子作用生成稳定的碳酸钙和硫酸铵^[28]。因此,添加适量的磷石膏对其与秸秆联合腐解体系的pH具有稳定作用。

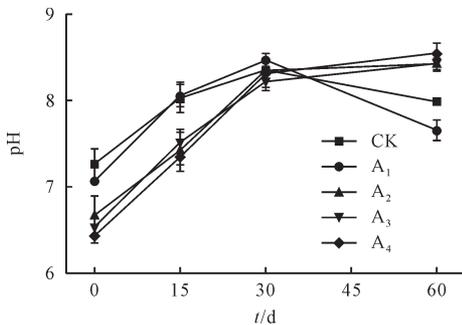


图6 腐解过程中pH变化
Fig.6 pH change during decomposition

2.6.2 铵态氮的变化

腐解过程中氮素形态主要包括铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮、有机氮等,主要的氮素损失是NH₄⁺-N部分转化为NH₃逸于空气所致^[29]。由图7可得,腐解过程中NH₄⁺-N含量整体处于下降趋势,一方面是秸秆腐解产生的NH₄⁺-N转化为NH₃逸出有关,另一方面是

因为腐殖化过程中部分NH₄⁺-N转变为硝态氮。在腐解第15天,磷石膏添加组的NH₄⁺-N含量分别为1.99、2.39、2.52、2.90 mg/g,均高于CK中的NH₄⁺-N含量,且正相关于磷石膏的添加量,推测是一方面磷石膏促进了微生物的繁殖,加速了有机氮的分解;另一方面磷石膏的存在降低了腐解体系的pH,减少了NH₄⁺-N向NH₃的转化,促进NH₄⁺-N的累积。随着腐解的持续进行,添加磷石膏的腐解体系的NH₄⁺-N含量下降更为明显,这是因为在腐解后期,磷石膏对维持腐解体系pH的稳定具有积极作用,增强了腐解体系中微生物对NH₄⁺-N的利用程度。腐解结束时,CK、A₁、A₂、A₃及A₄的NH₄⁺-N含量趋向一致,分别为1.28、1.22、1.20、1.31及1.42 mg/g。

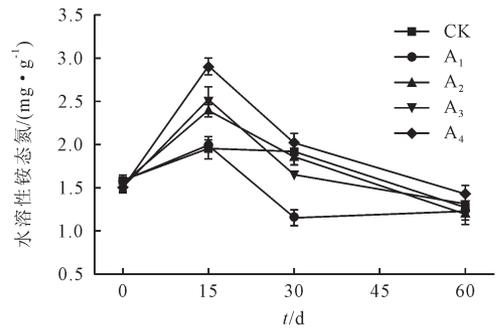


图7 腐解过程中氨氮的变化
Fig.7 Changes of NH₄⁺-N content during decomposition

2.6.3 种子发芽指数的变化

种子发芽指数(GI)是反映腐解环境生物毒性强弱最敏锐和关键的指标^[30]。由图8得知,所有腐解体系的GI随时间增长均呈现出上升趋势,说明腐解作用有利于磷石膏和水稻秸秆的腐殖化和脱毒。在腐解的第0天,CK组种子发芽指数为61.9%,高于A₁、A₂、A₃及A₄的55.1%、49.2%、51.8%、49.2%,这可能是因为磷石膏的添加降低了环境pH,影响了种子的生存环境。第30天起,腐解产物的GI均高于70%,说明此时腐解产物已达到基本的种植标准^[31]。在腐解第60天,当磷石膏的添加量为30%时,腐解产物的GI从CK组的83.1%增加至

A₁ 84.8%、A₂ 87.1%和A₃ 89.7%。但是当磷石膏的添加量继续增加至40%时,腐解产物的GI降至83.9%。结果表明在联合腐解体系中添加30%磷石膏最利于腐解产物的腐熟和脱毒,有利于促进植物的正常生长。

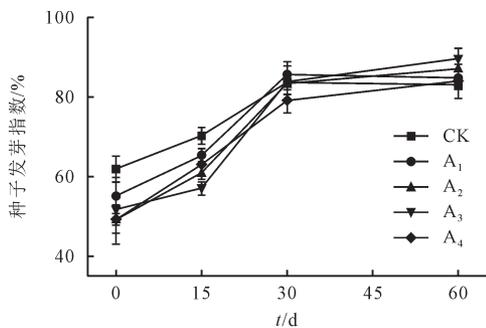


图8 腐解过程中种子发芽指数的变化

Fig.8 Changes of seed germination index during decomposition

3 结论

(1)不同腐解处理组中水稻秸秆的官能团和腐解形成的可溶性有机质的转化趋势表现出一致性,表明联合腐解过程中添加磷石膏不改变秸秆的降解历程。

(2)磷石膏的添加对联合腐解体系的pH具有稳定作用,可以降低腐解过程的氨逸失,提高联合腐解体系的腐解强度,增强腐解产物的脱毒效果。 E_{300}/E_{400} 和SR分析显示联合腐解后续阶段产生了更多的小分子腐殖物,提高了腐解产物的种子发芽指数。

(3)综合添加磷石膏对腐解体系pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、腐殖化程度和GI的影响,在水稻秸秆为主要原料的腐解体系中,磷石膏的最大消纳量可以达到30%,为秸秆和磷石膏的协同资源化提供了一种思路。

[参考文献]

[1] 杨传文,邢帆,朱建春,等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023,44(2):1149-1162.
Yang Chuanwen, Xing Fan, Zhu Jianchun, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. Environmental Science, 2023,44(2):1149-1162.

[2] Gao X Y, Liu W Z, Li X Q, et al. A novel fungal agent for straw returning to enhance straw decomposition and nutrients release[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023,30:103064.

[3] 马子钰,马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023,55(1):205-210.
Ma Ziyu, Ma Wenlin. Effects of straw returning on soil organic carbon in China's cropland: a meta-analysis[J]. Soils, 2023,55(1):205-210.

[4] Wang Y C, Yang X D, Lin Y P, et al. Studies on the degradation effect of corn straw by Asian corn borer larva (*Ostrinia furnacalis*) digestive enzymes combined with white rot

fungus (*Phanerochaete chrysosporium*)[J]. Biotech, 2023,13(9):298.

[5] 叶富英,彭语欣,刘树根,等. 铁锰固废促进污泥堆肥进程及其腐殖化特性[J]. 环境科学与技术, 2024,47(3):219-227.
Ye Fuying, Peng Yuxin, Liu Shugen, et al. Iron-manganese solid waste promotes sludge composting process and its humification characteristics[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(3):219-227.

[6] Li J, Peng X Q, Zheng J Y, et al. Simultaneous removal of phosphorus and organic contaminants from phosphogypsum using hydrothermal method for gypsum resource regeneration[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022,10(5):108441.

[7] Jin Y T, Yang D, Wu Y H, et al. Preparation of biofertilizer with phosphogypsum and straw: microbial community changes and plant growth effects[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024,24(2):3873-3888.

[8] Wu H, Zhu X Z, Tang C J, et al. Variation of humic carbon and microbial communities in bauxite residue following co-application of straw and phosphogypsum[J]. Journal of Central South University, 2024,31(2):460-476.

[9] 徐子祺,张瑜,王博宇,等. 秸秆覆盖和磷石膏对苏打盐碱土性状及牧草生长的影响[J]. 中国水土保持, 2024(8):47-52.
Xu Ziqi, Zhang Yu, Wang Boyu, et al. Effects of straw mulching and phosphogypsum on properties of soda saline-alkali soil and forage growth[J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(8):47-52.

[10] 程澳,陈丹,任兰天,等. 蘑菇渣和稻秸堆肥中不同分子量水溶性有机物含量分布和光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2024,44(5):1330-1337.
Cheng Ao, Chen Dan, Ren Lantian, et al. The distributions and spectral characteristics of molecular weight-fractionated dissolved organic matter derived from mushroom residue and rice straw compost[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024,44(5):1330-1337.

[11] Rizwan M, Lin Q M, Chen X J, et al. Synthesis, characterization and application of magnetic and acid modified biochars following alkaline pretreatment of rice and cotton straws[J]. Science of the Total Environment, 2020,714:136532.

[12] Wang D M, Mao Y L, Mai L W, et al. Insight into humification of mushroom residues under addition of rich-N sources: comparing key molecular evolution processes using EEM-PARAFAC and 2D-FTIR-COS analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2023,329:117079.

[13] Yu Z, Liu X M, Zhao M H, et al. Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: molecular characterization of dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2019, 274:

- 198–206.
- [14] 苏云,李卫华. 豆腐渣堆肥过程中的多维光谱解析与建模[J]. 科学技术与工程, 2024,24(1):439–446.
Su Yun, Li Weihua. Multidimensional spectral analysis and modeling in the composting process of Tofu residue[J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(1):439–446.
- [15] Tao X H, Xiang F M, Ahmad Khan F Z, et al. Decomposition and humification process of domestic biodegradable waste by black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae from the perspective of dissolved organic matter[J]. Chemosphere, 2023,317:137861.
- [16] Biyada S, Merzouki M, Elkarrach K, et al. Spectroscopic characterization of organic matter transformation during composting of textile solid waste using UV–visible spectroscopy, infrared spectroscopy and X–ray diffraction (XRD)[J]. Microchemical Journal, 2020,159:105314.
- [17] Feng Y, Xue Z X, Zhang B F, et al. Effects of phosphogypsum substitution on the performance of ground granulated blast furnace slag/fly ash–based alkali–activated binders[J]. Journal of Building Engineering, 2023,70:106387.
- [18] Gijbels K, Pontikes Y, Samyn P, et al. Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate–activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum[J]. Cement and Concrete Research, 2020,132:106054.
- [19] Pan X Y, Shi R Y, Hong Z N, et al. Characteristics of crop straw–decayed products and their ameliorating effects on an acidic Ultisol[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021,67(12):1708–1721.
- [20] Ou L, Li R, Zhu H Z, et al. Upcycling waste phosphogypsum as an alternative filler for asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,420:138332.
- [21] 侯智斌,谢益平,曹长春,等. 添加不同比例玉米生物炭的堆肥腐殖质光谱学表征[J]. 科学技术与工程, 2023,23(26):11459–11475.
Hou Zhibin, Xie Yiping, Cao Changchun, et al. Spectroscopic characterization of compost humus with different proportions of corn biochar[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(26):11459–11475.
- [22] 周向军,齐婷,高茹霞. 玉米秸秆腐解释放溶解性有机质的光谱分析[J]. 黑龙江农业科学, 2022(10):76–82.
Zhou Xiangjun, Qi Ting, Gao Ruxia. Spectral analysis of dissolved organic matter of maize straw in decomposition process[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2022(10):76–82.
- [23] 陈丙法,郑京成,顾鑫才,等. 不同水热温度条件下典型滩涂植物水热炭及炭化液溶解性有机质(DOM)光谱特征[J]. 生态与农村环境学报, 2024,40(1):1533–1545.
Chen Bingfa, Zheng Jingcheng, Gu Xincan, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in hydrothermal charcoal and carbonization solution of typical tidal flat plants at different hydrothermal temperatures[J]. China Industrial Economics, 2024,40(1):1533–1545.
- [24] 张方方,高娜,吴锁智,等. 长期施氮和覆膜对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. 环境科学学报, 2023,43(11):300–313.
Zhang Fangfang, Gao Na, Wu Suozhi, et al. Effects of long-term film mulching and nitrogen application on soil dissolved organic matter content and structure characteristics in different soil layers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(11):300–313.
- [25] Belopukhov S, Dmitrevskaya I, Grishina E, et al. Effects of humic substances obtained from shives on flax yield characteristics[J]. Journal of Natural Fibers, 2017,14(1):126–133.
- [26] Al–Rabaia A, Menezes–Blackburn D, Al–Ismaily S, et al. Biochar pH reduction using elemental sulfur and biological activation using compost or vermicompost[J]. Bioresource Technology, 2024,401:130707.
- [27] Wan L B, Wang X T, Cong C, et al. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw[J]. Bioresource Technology, 2020,301:122730.
- [28] 赵兵,王宇蕴,陈雪娇,等. 磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价[J]. 农业环境科学学报, 2020,39(10):2481–2488.
Zhao Bing, Wang Yuyun, Chen Xuejiao, et al. Effect of phosphogypsum and gypsum as conditioners on rice husk and oil cake composting process and evaluation of their physicochemical character as a substrate[J]. Journal of Agro–environment Science, 2020,39(10):2481–2488.
- [29] Gao X Y, Yang J Q, Liu W Z, et al. Effects of alkaline biochar on nitrogen transformation with fertilizer in agricultural soil[J]. Environmental Research, 2023,233:116084.
- [30] Xiao R, Li L, Zhang Y Y, et al. Reducing carbon and nitrogen loss by shortening the composting duration based on seed germination index (SCD@GI): feasibilities and challenges [J]. Science of the Total Environment, 2024,933:172883.
- [31] 全国农业技术推广服务中心,南京农业大学,安徽省土壤肥料总站. 有机肥料[Z]. 行业标准–农业. 2012:13P.
National Agricultural Technology Extension Service Center, Nanjing Agricultural University, Anhui Soil Fertilizer General Station. Organic Fertilizers[Z]. Industry Standards–Agriculture. 2012:13P.