

蚯蚓活动下矿物对凋落物分解及腐殖化的影响

邱柏淞, 宋鑫, 谭智诚, 严秋玲, 李芳芳

引用本文:

邱柏淞, 宋鑫, 谭智诚, 严秋玲, 李芳芳. 蚯蚓活动下矿物对凋落物分解及腐殖化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 2050-2059.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2024-0443>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓作用下不同C/N秸秆还田对土壤CO₂及N₂O排放的影响

王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 伍玉鹏

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1908-1915 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0187>

等碳量玉米秸秆及其腐解、炭化材料还田对黑土腐殖质的影响

邵满娇, 窦森, 谢祖彬

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2202-2209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0123>

里氏木霉利用玉米秸秆形成类胡敏酸(HAL)的特异性研究

张一枫, 窦森, 叶淑芬, 张丹丹

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2184-2192 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0360>

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774-1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵, 李建明

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1944-1953 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邱柏淞, 宋鑫, 谭智诚, 等. 蚯蚓活动下矿物对凋落物分解及腐殖化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 2050–2059.

QIU B S, SONG X, TAN Z C, et al. Effects of minerals on litter decomposition and humification under earthworm activity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(9): 2050–2059.



开放科学 OSID

蚯蚓活动下矿物对凋落物分解及腐殖化的影响

邱柏淞, 宋鑫, 谭智诚, 严秋玲, 李芳芳*

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500)

摘要:凋落物分解是植物向土壤输入有机碳的主要途径, 蚯蚓和矿物的存在会改变凋落物的分解及其腐殖化。为探究培养后蚯蚓和矿物对玉米秸秆的有机元素组成、溶解性有机碳含量以及腐殖化程度的变化, 本研究以玉米秸秆(CS0)为原料, 分别通过添加蒙脱石和赤铁矿(原料: 矿物=7:3, $m:m$), 在蚯蚓活动下进行 135 d 培养, 标记为: 玉米秸秆(CS)、玉米秸秆+蒙脱石(CSM)、玉米秸秆+赤铁矿(CSF)、玉米秸秆+蚯蚓(CSE)、玉米秸秆+蒙脱石+蚯蚓(CSME)、玉米秸秆+赤铁矿+蚯蚓(CSFE)。研究表明, 分解后各处理组碳含量均有所减少。其中, 与CS相比, CSM和CSF的碳含量平均减少46.01%, 表明矿物加快了凋落物的分解。蚯蚓活动没有显著改变矿物对凋落物的分解。同时, 凋落物培养后碳同位素比值($\delta^{13}C$)降低, 表明 ^{12}C 较 ^{13}C 相对富集保留, 尤其矿物添加下更为明显。但蚯蚓活动减弱 ^{13}C 的损失, 在CSME中最明显。这表明矿物和蚯蚓会影响凋落物不同组分的优先分解。从溶解性有机质(DOM)的组成和性质可知, 培养后与CS相比, CSM和CSF的DOM的腐殖化指数(HIX)和生物指数(BIX)增大, 表明矿物提高凋落物的腐殖化程度和生物可利用性。在蚯蚓活动下凋落物的腐殖化会进一步增强。此外, 蚯蚓和矿物存在下其SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀和SUVA₂₈₀增大, 表明矿物/蚯蚓提高了其芳香化、疏水性和分子量, 尤其是CSME最为显著。因此, 蒙脱石和蚯蚓的添加更能显著增加DOM的腐殖化程度、疏水性和芳香性, 提高土壤有机质的稳定。

关键词:蚯蚓; 矿物; 凋落物分解; 稳定碳同位素; 溶解性有机质

中图分类号: S154.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)09-2050-10 doi:10.11654/jaes.2024-0443

Effects of minerals on litter decomposition and humification under earthworm activity

QIU Baisong, SONG Xin, TAN Zhicheng, YAN Qiuling, LI Fangfang*

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science & Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Litter decomposition is the main way for plants to import organic carbon into soil, the presence of earthworms and minerals alters the decomposition and humification of litter. In order to investigate the changes of organic element composition, dissolved organic carbon content and humification degree of maize stalk by earthworms and minerals after culture, in this study, corn straw (CS0) was used as a raw material and incubation under earthworm activity for 135 days by addition of montmorillonite and hematite (raw material: mineral=7:3, $m:m$), respectively, which was labeled as: corn straw (CS), corn straw + montmorillonite (CSM), corn straw + hematite (CSF), corn straw + earthworm (CSE), corn straw + montmorillonite + earthworm (CSME) and corn straw + hematite + earthworm (CSFE). This study investigated the changes in organic elemental composition, dissolved organic carbon content, and degree of humification of corn straw by earthworms and minerals after incubation. The results of the study showed that carbon content was reduced in all treatment groups after the decomposition. The carbon content of CSM and CSF was reduced by an average of 46.01% compared to CS, indicating that minerals

收稿日期: 2024-05-27 录用日期: 2024-07-24

作者简介: 邱柏淞(1998—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为土壤固碳。E-mail: 935676300@qq.com

*通信作者: 李芳芳 E-mail: fangkust@163.com

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(42267028, 42167030); 云南省重大科技项目(202202AG050019)

Project supported: National Natural Science Foundation Regional Project (42267028, 42167030); Major Science and Technology Projects in Yunnan Province (202202AG050019)

accelerated the decomposition of litter material. Earthworm activity did not significantly alter mineral decomposition of litter. Meanwhile, carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) decreased after litter decomposition, suggesting that ^{12}C composition was more retained compared to ^{13}C composition, especially under mineral addition. However, earthworm activity inhibited the loss of ^{13}C , which was most pronounced in CSME. This suggested that minerals and earthworms affect the preferential decomposition of different fractions of litters. As shown in the composition and properties of dissolved organic matter (DOM), it was clear that the humification index (HIX) and bioindex (BIX) of DOM increased in CSM and CSF compared to CS after the incubation, indicating that the minerals promoted the degree of humification and bioavailability of litters. The humification of litter was further enhanced under earthworm activity. In addition, its SUVA_{254} , SUVA_{260} and SUVA_{280} increased in the presence of earthworms and minerals, suggesting that minerals / earthworms enhanced its aromatization, hydrophobicity and molecular weight, especially for CSME. Therefore, the addition of montmorillonite and earthworms more significantly increase the degree of humification, hydrophobicity and aromaticity of DOM, and improve the stability of soil organic matter.

Keywords: earthworm; mineral; litter decomposition; stable carbon isotope; dissolved organic matter

土壤是一个重要的碳库,是大气碳库的2倍、植被碳库的2~3倍^[1],因此增加土壤中碳储量在解决减缓全球气候变暖问题中显得尤为重要。凋落物是土壤有机质(SOM)的重要来源之一^[2],有关凋落物分解的研究将为增加土壤碳汇提供重要帮助。目前众多研究表明,凋落物的分解会受气候^[3]、凋落物类型^[4]和凋落物分解者^[5]等方面的影响^[6]。例如温度和湿度的提高会加速凋落物的分解^[7-8]。然而近年来越来越多的研究关注到大型动物(通过捕食、掘穴和产粪等活动)和矿物对凋落物分解的影响[矿物成分一方面通过影响微生物活性进而影响凋落物分解,另一方面与凋落物形成稳定的矿物结合态有机碳(MAOC),从而物理保护有机质不被分解^[9-10]],这些过程将直接或间接改变SOM的稳定性^[11-12]。

蚯蚓是土壤中主要的无脊椎动物,广泛分布在全球各大陆^[13],其能够通过自身活动如摄食、挖穴等影响凋落物的分解^[14],促进凋落物进入土壤有机质,形成有机无机复合体或土壤团聚体,从而影响土壤碳循环。研究观察到,凋落物能被蚯蚓实现物理性分解,增加凋落物分解表面积,促进微生物对凋落物的利用^[15-16]。此外,蚯蚓活动(比如蚯蚓体外分泌黏液等)能够改变微生物群落结构,间接影响其他土壤动物^[17]。同时蚯蚓和微生物的代谢处理,对凋落物进行生化分解过程,使凋落物转化为生物肥料,改善了土壤^[18]。值得注意的是,蚯蚓会通过摄食、移动增大矿物与有机质形成有机-矿物复合体或团聚体的几率进而保护有机碳^[19]。此外,不同的矿物对SOM的保护程度和保护模式不尽相同,例如2:1型蒙脱石黏土矿物比1:1型高岭石更能保护有机碳^[20]。同时有研究报道,矿物对有机质(OM)的稳定能力有限,受其表面活性位点的面积密度限制^[21]。在此条件下,假设凋落物渗出的

DOC在向下转移的过程中会与土壤矿物结合形成有机无机复合物,导致其生物可降解性降低,甚至能够在土壤中长期稳定存在。如Vogel等^[22]发现凋落物在蒙脱石上的矿化速度小于伊利石上凋落物的矿化速度,铁氧化物不会对凋落物的降解造成影响。相反,Barthod等^[11]研究发现,矿物的作用反而增加了OM,这可能是矿物刺激了胞外酶活性加速了OM的降解。因此,蚯蚓活动和矿物可能会影响凋落物的分解,但目前关于凋落物分解和转化研究中很少考虑到蚯蚓活动和矿物对凋落物的分解及其转化的影响。

本实验选用玉米秸秆凋落物,在矿物上采用赤铁矿和蒙脱石,两种矿物广泛存在于土壤中且参与反应作用明显^[23]。通过同比例复配,在蚯蚓存在下进行培养实验。本研究旨在探讨在蚯蚓活动下,矿物的添加对凋落物分解的影响,识别不同矿物对凋落物分解后有机碳变化和碳同位素分馏的作用。通过分析溶解性有机质(DOM)的三维荧光光谱特征,研究蚯蚓和矿物对凋落物分解后其腐殖化程度的影响。本研究以期在蚯蚓和矿物对凋落物分解和转化提供理论和实践依据,并探究在两种物质添加下,是否会影响腐殖化程度,甚至提高腐殖化能力,从而为农业绿色生产提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

300目蒙脱石和300目赤铁矿购置于铜陵启顺矿产厂;大平2号赤子爱胜蚯蚓(表栖)购买于河北省石家庄市蚯蚓养殖场;玉米秸秆取自云南昆明梁家箐村庄;发酵菌剂购买于濮阳益加益生物科技有限公司。

1.2 供试凋落物

选取的凋落物为玉米秸秆凋落物(CS),按照菌

剂:葡萄糖:水=1:5:100($m:m:m$)的比例配制发酵液(添加葡萄糖激活EM菌)。玉米秸秆破碎至3~4 cm,把发酵液和发酵原料逐层喷洒均匀,控制发酵原料湿度在50%~60%,用泡沫箱子密封发酵,泡沫箱上部放置温度计,同时采用曝气泵向泡沫箱内通入空气,控制气体流速在0.5~0.75 L·min⁻¹。发酵至高温期以后,箱内温度开始下降,待至室温则认为发酵完成。发酵后玉米秸秆外观颜色从初始浅绿色变为偏黄偏黑。温度在密封完前期为23℃,一周后发酵至高温期为50~60℃。凋落物发酵完后自然风干,风干后磨碎凋落物并过2 mm筛备用。保留部分发酵后产物作为初始原料(CS0)进行后期数据比较。

1.3 培养实验

通过实验室培养箱培养,分析蚯蚓活动下不同矿物对凋落物降解过程中有机质的变化情况。具体操作如下:称取50 g干质量凋落物或模拟样品(凋落物:矿物=7:3, $m:m$)于1 L的培养瓶中,使每个培养瓶含水率维持在50%~60%。其中1/2的实验组添加6条成熟的蚯蚓(每条质量0.2 g),另一组则不添加蚯蚓作为对照组。将实验分为6个处理组:玉米秸秆凋落物(CS)、玉米秸秆凋落物+蒙脱石(CSM)、玉米秸秆凋落物+赤铁矿(CSF)、玉米秸秆凋落物+蚯蚓(CSE)、玉米秸秆凋落物+蒙脱石+蚯蚓(CSME)、玉米秸秆凋落物+赤铁矿+蚯蚓(CSFE)。即CS表示玉米凋落物,E代表添加蚯蚓处理组,M代表蒙脱石添加组,F代表赤铁矿添加组。培养瓶放在(25±2)℃的培养箱进行暗培养,每个处理下重复3次^[24]。培养实验共持续135 d,样品于第135天收集并在-20℃条件下保存。在培养期间每周对蚯蚓进行观察,在第74天时将状态不好的蚯蚓进行更换。同时对原始矿物进行理化性质测量。赤铁矿和蒙脱石pH分别为9.29和9.24,元素组成分别为C:0.02%和0.09%,N:0.02%和0.01%,H:0.28%和0.47%,O:0.01%和0.02%。

1.4 样品采集分析

样品的元素组分分析,是将冷干后样品研磨过300目筛,使用元素分析仪专用的锡舟,称取2.0 mg样品,采用元素分析仪(Vario EL II Elementar,德国)测定。样品的同位素分析,将冷干后样品研磨过300目筛,称取0.15 mg样品,采用同位素比质谱仪(IR-MS)(ElementarIsoPrime100)测定。

水溶性有机碳(DOC)测定,参照Kumada方法^[25],取2 g过100目筛样品于50 mL离心管中,加入15 mL去离子水,在摇床振荡1 h后离心10 min,上清液倒入

50 mL离心管,以10 mL去离子水洗涤沉淀两次,洗涤后沉淀保留,上清液合并后用0.45 μm滤膜过滤,此为DOC,用总有机碳分析仪(Elementar,德国)测定其中的碳含量。

1.5 紫外-可见光谱特征分析

用超纯水(UP)作为空白,将上述所得DOC滤液在200~600 nm范围内,以每间1 nm进行光谱扫描。本研究选择特征紫外光吸收系数为SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀和SUVA₂₈₀分别以A₂₅₄、A₂₆₀和A₂₈₀吸光度与DOC浓度的比值表示,分别表征溶解性有机质(DOM)分子的芳香性、疏水性和分子量^[26-28],计算公式见式(1)。

$$\text{SUVA}_\lambda = A(\lambda) \times 100 / \text{DOC} \quad (1)$$

式中:A(λ)为在波长 λ nm处吸光度,DOC以mg·L⁻¹为单位的浓度。

特征紫外光吸收比选择E2/E3和E4/E5,分别为波长250 nm和365 nm处吸光度之比、波长300 nm和400 nm处吸光度之比。E2/E3用于表征DOM分子大小,E2/E3值与相对分子质量成反比。E4/E5用于表征DOM分子腐殖化程度,E4/E5值与腐殖化程度成反比,E4/E5<3.5时,以胡敏酸为主,E4/E5>3.5时,以富里酸为主^[29]。

1.6 三维荧光光谱(EEM)特征分析

将上述获得滤液进行三维荧光光谱(EEM)扫描。激发光谱(E_x)波长范围为200~500 nm,采集间隔5 nm;发射光谱(E_m)波长范围为250~550 nm,采样间隔2 nm。三维荧光光谱一般将荧光物质所在的荧光光谱分成5个区域,分别为:区域I($\lambda_{E_x} < 250$ nm, $\lambda_{E_m} < 320$ nm),为类酪氨酸物质;区域II($\lambda_{E_x} < 250$ nm, 320 nm < $\lambda_{E_m} < 380$ nm),为类色氨酸物质;区域III($\lambda_{E_x} < 250$ nm, $\lambda_{E_m} > 380$ nm),为类富里酸物质;区域IV($\lambda_{E_x} > 250$ nm, $\lambda_{E_m} < 380$ nm),为可溶性的微生物副产物;区域V($\lambda_{E_x} > 250$ nm, $\lambda_{E_m} > 380$ nm),为类胡敏酸物质。激发波长370 nm时,在470、520 nm两处荧光发射强度的比值即荧光指数(FIX);激发波长为254 nm时,发射波长在435~480 nm范围与300~345 nm范围的积分值的比值即腐殖化指数(HIX);激发波长为310 nm时,在380 nm和430 nm两处的荧光发射强度的比值即生物指数(BIX)。

1.7 数据处理

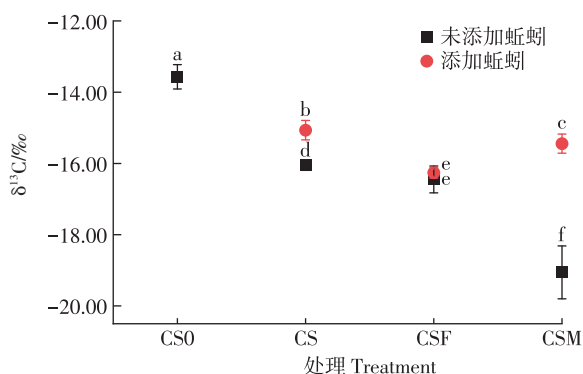
测得的数据利用efc软件^[30-33]和Origin 2021软件进行分析、制图。并运用SPSS 20对不同数据进行单因素分析,所有数据均以 $P < 0.05$ 视为差异显著。

2 结果与分析

2.1 凋落物分解前后有机碳含量变化

2.1.1 各处理分解前后元素组成的变化

通过比较不同处理下调落物分解前后元素组成分析可知(表1),凋落物分解后,所有处理组的有机碳(OC)、氢(H)含量均有减少。其中,相对CS0,CS的OC、H含量分别降低了16.39%和22.01%,矿物添加后(按凋落物:矿物质量比7:3混合原始样品进行了折算),其含量损失降低了30%以上,尤其是赤铁矿添加下OC、H含量降低量可达38.96%和46.83%。然而,研究发现氮(N)、硫(S)含量在凋落物分解后呈现增加的趋势。CS的N、S含量相较于CS0均超过了40%,但矿物添加会抑制N、S的增加。此外,蚯蚓活动下调落物的分解并未观察到明显的变化,其元素含



0代表原始组。不同字母表示处理间差异达到显著性水平($P < 0.05$)。

0 denotes the original group. Different letters indicating that the differences between treatments reach the level of significance ($P < 0.05$).

图1 不同处理凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Figure 1 $\delta^{13}\text{C}$ values of litter under different treatments

量与未添加蚯蚓较为相近。

2.1.2 各处理分解前后稳定碳同位素分馏的变化

由图2可以看出,凋落物分解后,所有处理组的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均减小。矿物的添加促使CS减少2%以上,而且蒙脱石较赤铁矿对凋落物OM的分馏更为显著。此外,研究观察到,蚯蚓活动会增加 $\delta^{13}\text{C}$ 值。特别是蒙脱石组, $\delta^{13}\text{C}$ 值从-19.06‰到-15.44‰,增加最为明显。

2.2 凋落物分解前后DOM的变化

2.2.1 各处理分解前后DOC的变化

如图2所示,经过135 d的分解,不同处理组的凋落物DOC含量总体呈下降趋势。其中,与CS相比,蒙脱石添加下DOC含量降低24.37%,而赤铁矿添加下DOC含量增加17.63%。此外,尽管蚯蚓对总有机碳含量影响较小,但蚯蚓活动下相较于无蚯蚓组,DOC含量分别降低了17.78%、30.68%和14.16%。

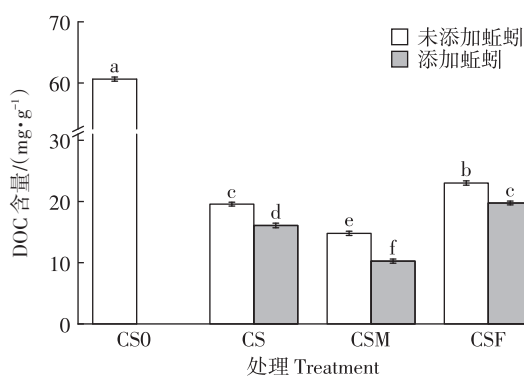


图2 不同处理凋落物的DOC含量

Figure 2 DOC content of litter under different treatments

表1 不同处理凋落物的元素组成与原子比

Table 1 Elemental composition and atomic ratio of litters after the incubation

样品名称	元素质量百分含量					原子个数比		
	N(%)	OC(%)	H(%)	S(%)	O(%)	OC/N	H/C	(O+N)/OC
CS0	2.31±0.07b	41.07±1.43a	5.18±0.10a	0.22±0.01b	35.87±0.62a	20.74±0.06a	1.51±0.02a	0.70±0.02f
CS	3.84±0.53a	34.34±1.48b	4.04±0.19b	0.43±0.06a	31.75±0.82b	10.43±0.08d	1.41±0.04c	0.79±0.03e
CSM	2.11±0.17b	19.53±0.25cd	2.43±0.21c	0.21±0.05b	21.25±0.04c	10.80±0.11cd	1.49±0.03ab	0.91±0.03c
CSF	1.84±0.29b	17.55±1.76d	1.93±0.27d	0.25±0.05b	22.61±0.89c	11.13±0.29bc	1.32±0.05d	1.06±0.02a
CSE	4.07±0.29a	32.63±0.35b	3.84±0.07b	0.44±0.06a	32.11±1.18b	9.35±0.07e	1.41±0.01c	0.85±0.01d
CSME	2.20±0.14b	19.65±0.35c	2.36±0.09c	0.25±0.04b	21.86±1.81c	10.42±0.15d	1.44±0.04bc	0.93±0.02c
CSFE	1.89±0.10b	18.26±0.56cd	2.03±0.09d	0.28±0.04b	21.57±0.91c	11.27±0.47b	1.33±0.03d	0.97±0.01b

注:0代表原始组,按7:3混合后折算后CS各含量N:1.62%,OC:28.75%,H:3.63%,S:0.15%,O:25.11%。同列不同字母表示处理间差异达到显著性水平($P < 0.05$)。

Note:0 denotes the original group, and the contents of each of the CS are converted after mixing 7:3 N:1.62%,OC:28.75%,H:3.63%,S:0.15%,and O:25.11%. With different letters indicating that the differences between treatments reached the level of significance ($P < 0.05$).

2.2.2 各处理分解前后三维荧光光谱特征

为了进一步探究不同处理组的DOC组成变化,由图3可以看出,分解过程中,与CS0相比,培养后腐植酸类物质和富里酸类物质的含量整体均呈上升趋势

势,特别是添加蚯蚓后区域Ⅲ和区域Ⅴ荧光峰增强强烈。因此,从本研究可以看出,蚯蚓的作用改变了DOM的组成和结构,从而导致荧光峰的位置和荧光强度的变化。FI值可用来表示DOM来源,各处理组

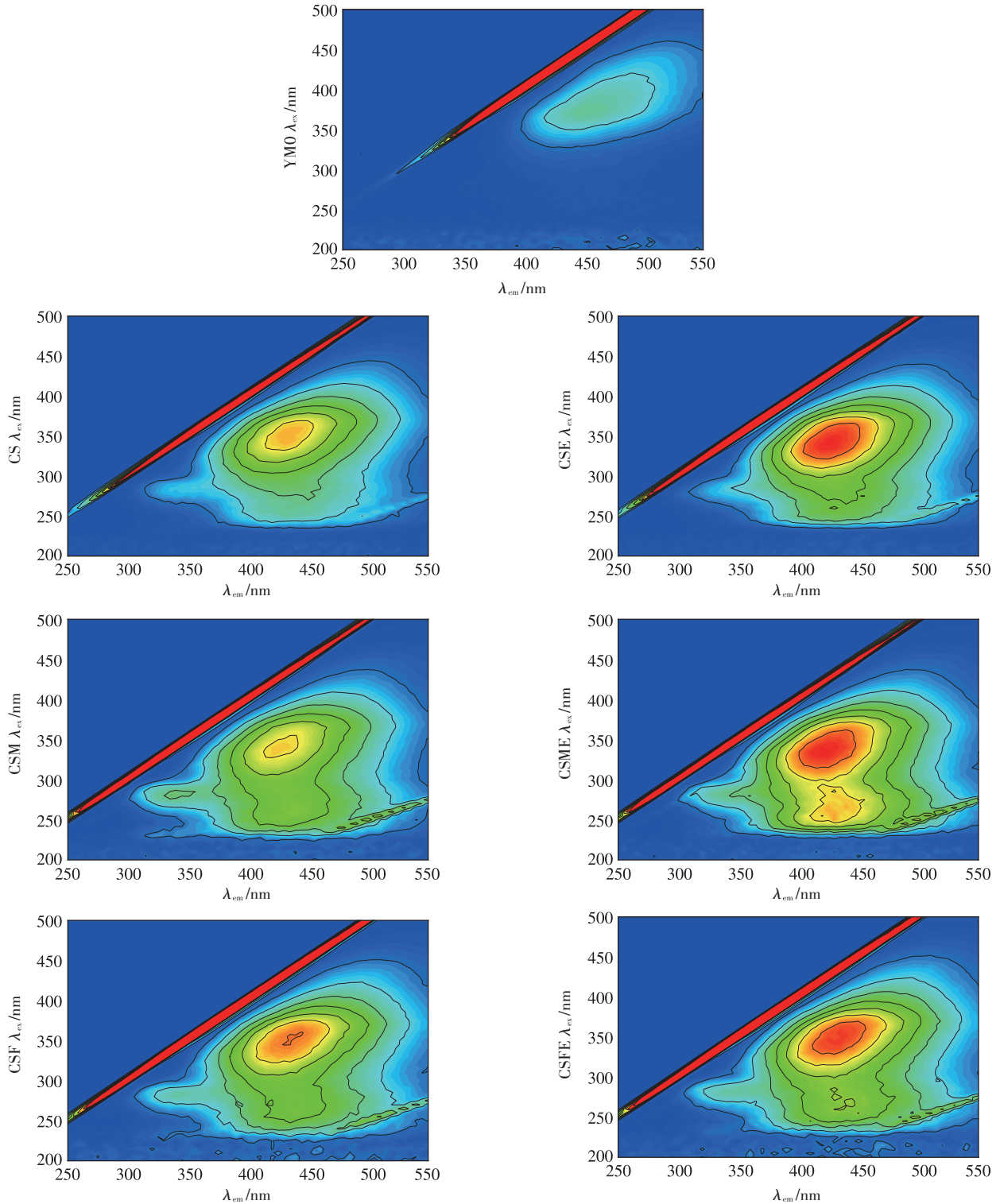


图3 不同处理凋落物三维荧光光谱特征

Figure 3 Three-dimensional fluorescence spectra of litter under different treatments

的FI均大于1.4(图4),表明DOM以微生物来源为主。

HIX值用来表征腐殖化程度。在HIX指数上,各处理组较CS0相比整体呈上升趋势(图4),这一结果表明分解过程中可能是非腐殖质类物质发生降解,而腐殖质类物质的相对含量则不断增加、整体腐殖化和芳构化程度加强。其中与CS相比,CSM提高10.35%,而CSF却降低19.28%。尽管蚯蚓对凋落物元素组成影响较小,但可以看出,在蚯蚓活动下腐殖化程度更强。值得注意的是CSFE相较于CSE,没有表现出CSF的HIX值比CS低的趋势。

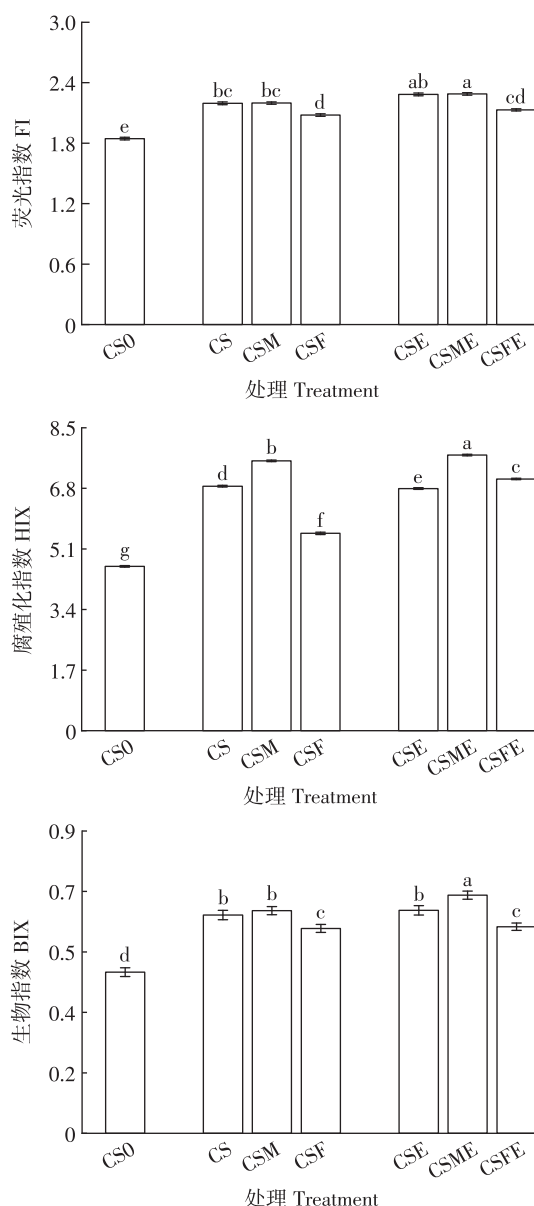


图4 不同处理凋落物荧光光谱参数特征

Figure 4 Characteristics of fluorescence spectral parameters of litter under different treatments

BIX用来表征DOM生物可利用性。添加蚯蚓后BIX有所提高(图4),说明在提升DOM生物可利用性方面,蚯蚓效果最好。因此,在蚯蚓活动和微生物共同作用下,蛋白质、脂肪和碳水化合物等有机物被分解,类胡敏酸类和类富里酸类物质成为DOM的主体部分,剩余有机质趋于稳定,腐熟度增加。

2.3 凋落物分解前后DOM紫外-可见光吸收光谱特征参数

有机质的碳碳双键与SUVA₂₅₄的值有关,通常有机质的芳香程度越高、腐殖化程度越高,分子质量越大时,SUVA₂₅₄值越高。通过图5可知,在135 d的分解后,与CS0相比,各处理的SUVA₂₅₄均有增加,表明在分解过程中,芳香程度增加。与CS相比,CSM的芳香性最大。而蚯蚓活动下,芳香化程度增加更加明显。该现象与前面提到的腐殖化程度是相一致的。

此外,SUVA₂₆₀和SUVA₂₈₀分别表征DOM分子的疏水性和分子量,该值越大,疏水性和分子量越大。通过图5可知,与CS0相比,各处理组SUVA₂₆₀和SUVA₂₈₀都有所提高。而在SUVA₂₈₀中,与CS相比,CSM提高20.63%,CSF却降低了10.93%。

各处理的吸收值/吸收比变化如图5所示。相对于CS0,各处理组的E2/E3均有上升的趋势,其中CSM上升最明显,表明蒙脱石的添加使凋落物的DOM有机质分子量与腐殖化程度增大。这与前两个参数SUVA₂₅₄、SUVA₂₈₀的结果吻合。各处理E4/E5平均值变化范围为3.6~3.74,均大于3.5,说明DOM以富里酸为主。

3 讨论

3.1 蚯蚓和矿物对凋落物OC的影响

矿物的存在会促进OC、H含量的分解。这是因为矿物为微生物提供了更大比表面积和生物源有机物,微生物更好存活,进而容纳更丰富的微生物群落促进有机质分解。根据Kleber等^[34]的研究指出,矿物可以吸附生物源有机物,形成特殊的微聚体占有更多的资源和生态位,因此容纳更多种类的微生物群落。相反N、S含量的增加,一方面是因为矿物颗粒风化和凋落物矿化提高了土壤中N、S等元素的含量,而其他元素如OC、H的损失,导致其相对富集。另一方面是因为微生物生长促进了其分泌物或残体的累积。根据文献报道,微生物源有机质具有较高的含N、S化合物(如氨基酸或蛋白等物质)^[35]。显然,仅添加矿物下的处理组相对CS而言,OC、H的降低量明显低于N、S

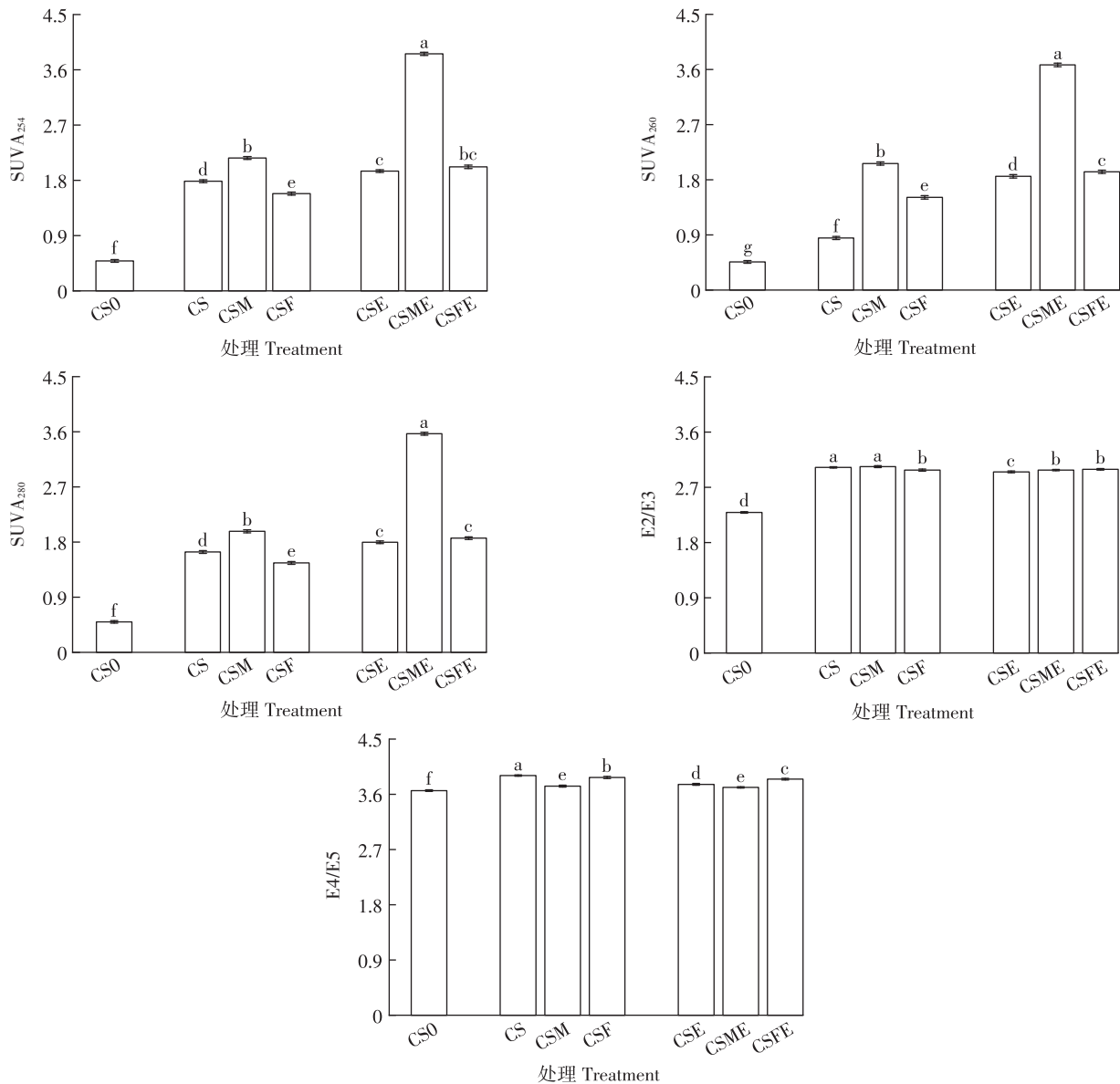


图5 不同处理凋落物紫外-可见光谱吸收值/吸收比

Figure 5 Uv-vis spectral absorption value/absorption ratio of litter under different treatments

的增加量。因此, N、S含量的增加可能更依赖于微生物的大量生长导致含N、S化合物等分泌物生成。在蚯蚓活动下分解与矿物相近, 这可能是因为玉米凋落物具有丰富的低OC/N比值的易降解组分, 其大量组分易被微生物利用并促进其生长, 因此在充足的碳源条件下, 蚯蚓活动虽增加更多易降解组分作为碳, 但微生物仍以凋落物碳源为主。研究报道, 不同类型的碳源会对土壤微生物群落组成和功能产生影响, 发现凋落物作为碳源更能被微生物优先利用^[36]。总的来看, 矿物在135 d培养下改变了样品的元素组成, 而蚯蚓活动并不会明显改变。

稳定碳同位素这一结果表明, CS在分解过程

中¹³C被优先利用分解, 导致¹²C的富集。有研究表明易降解组分如蔗糖、淀粉等, 且相较难降解组分富含¹³C^[37]。因此, 该结果表明微生物优先降解富含¹³C易降解组分。此外, 矿物添加后 $\delta^{13}\text{C}$ 值进一步减小, 结合元素分析数据可知, 矿物添加后OC含量显著降低, 因此, 矿物可能加速了易降解组分的分解。这可能是因为分解中, 蒙脱石中的微生物大量生长, 在利用易降解组分时, 富含¹³C的蔗糖等被消耗, 导致¹²C相对增加。同时有文献报道, 与非铁结合有机碳相比, 铁结合有机碳的脂肪族含量更少, 羧基含量更高, ¹³C含量更丰富^[38]。而在蚯蚓活动下 $\delta^{13}\text{C}$ 值有所改变。有研究报道这是由于蚯蚓需摄取凋落物中的

氨基酸为自身提供能量,使氨基酸基团中含碳键的轻碳同位素优先消解,导致 ^{13}C 组分的富集^[39]。另一方面蚯蚓的添加影响土壤微生物活动和优势种群^[40]。经研究证明,蚯蚓活动下子囊菌和担子菌的相对丰度降低,而子囊菌和担子菌较 ^{12}C 更偏向利用 ^{13}C ^[41]。说明蚯蚓活动会降低蒙脱石组OM的碳同位素分馏,但改变赤铁矿组分相对较少,这是因为蒙脱土是一种具有高离子交换和吸附能力的黏土矿物,吸附潜在的有害物质(如盐)对微生物的生长产生直接影响,例如增加了富含 ^{13}C 的原核生物^[42]。

3.2 蚯蚓和矿物对凋落物DOM结构组成的影响

有研究报道,蒙脱石能促进凋落物的分解^[43],这与本研究的结果一致。一个重要的原因是蒙脱石添加下促进微生物活性,加速利用易降解组分,导致DOC含量的显著减小。赤铁矿添加下DOC含量更高,一方面是因为赤铁矿催化加速CS大分子有机化合物的分解,产生更多DOC。另一方面也可能是赤铁矿抑制了微生物对有机物的利用。同时蚯蚓活动下与未添加蚯蚓相比,DOC含量减少。这主要是蚯蚓通过摄食、消化、产粪等作用促进了微生物对DOC的利用或转化为更稳定的组分如团聚体或矿物结合态组分^[44]。

DOM由一系列分子组成,通过三维荧光光谱进一步分析,矿物的添加增强了荧光强度。在本研究中,蒙脱石对CS的改变最为明显。这是因为蒙脱石通过为微生物提供生存场所,影响微生物群落栖息的微环境来影响微生物的代谢^[45-47]。此外蒙脱石还具有催化作用^[48],让有机前体吸附在蒙脱石表面,从而使微生物进入有利于反应发生的方向,促进了DOC的减少。这两种作用加快了总有机碳的分解,促进了腐殖质组分的积累。而赤铁矿一方面由于较为稳定,球粒状结构导致其吸附效果较差。另一方面过量的赤铁矿会降低微生物群落的丰富度以及多样性(例如硝化细菌)^[49],导致腐殖化低。有研究报道,蚯蚓活动会提高腐殖化程度^[50],这与本研究结果一致。这可能是蚯蚓添加后,一方面蚯蚓肠道的微生物促进了对某些芳香族化合物的降解和转化。另一方面蚯蚓活动使得蚯蚓黏液能富集在矿物和凋落物表面,而由于黏液的加入,细菌群落结构发生了强烈的改变,具体表现为变形菌门的丰度增加较多,而该菌种是腐殖化的主要降解菌^[51]。特别是蚯蚓活动下,BIX值最高。有研究表明,蚯蚓促进了DOM的微生物群落多样性以及微生物代谢能力,进而微生物摄取碳源的方式多元

化^[52]。

紫外可见吸收光谱可以反映DOM分子结构的复杂程度和腐殖化程度。本研究中,仅存在矿物时,蒙脱石的SUVA₂₅₄最大,这可能是当凋落物与蒙脱石混合后,蒙脱石可能吸附并富集了一部分有机物,导致滤液中SUVA₂₅₄值的增加。另一方面,前文提到,蒙脱石更有利于微生物生长(如放射菌门),在分解有机物时释放芳香物质。通过SUVA₂₆₀可知,CSM和CSF显著高于CS组,表明矿物的添加能提高有机质的疏水性,这主要是因为矿物添加促进了易降解极性高的小分子有机化合物的分解。蚯蚓活动会进一步提高其疏水性,这与Zhang等^[53]的研究指出添加蚯蚓会提高疏水性一致。在SUVA₂₈₀中,CSM高而CSF低,这是因为在分解过程中,赤铁矿中的铁元素参与氧化还原反应,导致有机质中的大分子结构断裂。在蚯蚓活动下,蚯蚓增大了各处理的分子量,是由于蚯蚓会优先利用小分子营养物质,并且蚯蚓通过摄食、消化、产粪等作用也产生了更多复杂和密集的芳香结构存在。

4 结论

(1)凋落物在分解过程中,矿物的添加下会促进有机碳比例的减少,而氮、硫比例增加,蚯蚓活动下的元素组成与矿物的趋势无显著差异,表明矿物会促进有机质的分解,蚯蚓活动并不会明显改变。

(2)矿物的加入改变了凋落物的稳定碳同位素的分馏情况,即 ^{12}C 相对富集,蚯蚓活动反而减少了 ^{13}C 的贫化,特别是蚯蚓和蒙脱石组显著改变稳定碳同位素分馏。

(3)蒙脱石和蚯蚓添加下对提升凋落物的生物可利用性、提高溶解性有机质芳香化和腐殖化程度、增加富里酸含量方面均具有显著促进作用。总的来说,适当的矿物添加与蚯蚓活动下均能提高有机质的利用,而本研究表明蒙脱石与蚯蚓共同处理下,效果最好。

参考文献:

- [1] 赵永存,徐胜祥,王美艳,等.中国农田土壤固碳潜力与速率:认识、挑战与研究建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):7. ZHAO Y C, XUN S X, WANG M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):7.
- [2] LORANGER G, PONGE J F, IMBERT D, et al. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):247-252.
- [3] LILI Z, VIVEK Y, HENGCHEN Z, et al. Climate drivers of litterfall biomass dynamics in three types of forest stands on the loess plateau[J].

- Ecological Indicators*, 2024, 164:112088.
- [4] XI L, CHEN S, BIAN H, et al. Organic carbon release from litter decomposition of woody and herbaceous plants in the Dongting Lake wetlands: a comparative study[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2023, 23(3):408–419.
- [5] DAHLSJÖ C A L, ATKINS T, MALHI Y. Large invertebrate decomposers contribute to faster leaf litter decomposition in fraxinus excelsior-dominated habitats: implications of ash dieback[J]. *Heliyon*, 2024, 10(5):e27228.
- [6] COÛTEAUX M M, BOTTLNER P, BERG B. Litter decomposition, climate and litter quality[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(2):63–66.
- [7] VITOUSEK P M, TURNER D R, PARTON W J, et al. Litter decomposition on the mauna loa environmental matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models[J]. *Ecology*, 1994, 75(2):418–429.
- [8] WILLCOCK N, MAGAN N. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2000, 37(1):35–45.
- [9] SOONG J L, COTRUFO M F. Annual burning of a tallgrass prairie inhibits C and N cycling in soil, increasing recalcitrant pyrogenic organic matter storage while reducing N availability[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(6):2321–2333.
- [10] 李文丹, 陈丹, 成金礼, 等. 四川盆地耕地土壤颗粒态和矿物结合态有机碳含量特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2024, doi: 10.13227/j.hjxk.202402001. LI W D, CHEN D, CHENG J L, et al. Characteristics and influencing factors of soil particulate and mineral-associated organic carbon in cropland soil across Sichuan basin[J]. *Environmental Science*, 2024, doi:10.13227/j.hjxk.202402001.
- [11] BARTHOD J, DIGNAC M F, LE MER G, et al. How do earthworms affect organic matter decomposition in the presence of clay-sized minerals[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 143:107730.
- [12] AYRES E, DROMPH K M, BARDGETT R D. Do plant species encourage soil biota that specialise in the rapid decomposition of their litter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(1):183–186.
- [13] PHILLIPS H R P, GUERRA C A, BARTZ M L C, et al. Global distribution of earthworm diversity[J]. *Science*, 2021, 370(6519):922.
- [14] YANG J, TIAN K, LU J, et al. Earthworms increase forest litter mass loss irrespective of deposited compounds – a field manipulation experiment in subtropical forests[J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(5):e10047.
- [15] BRADFORD M A, TORDOFF G M, EGGERS T, et al. Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition[J]. *Oikos*, 2002, 99(2):317–323.
- [16] USHER M B. The biology of soil: a community and ecosystem approach[J]. *Soil Use and Management*, 2006, 22:323.
- [17] BROWN G G, BAROIS I, LAVELLE P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36(3/4):177–198.
- [18] SUN Z J, LIU X C, SUN L H, et al. Earthworm as a potential protein resource[J]. *Ecology of Food and Nutrition*, 1997, 36(2–4):221–236.
- [19] WISEMAN C L S, PÜTTMANN W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1/2):109–118.
- [20] WATTEL-KOEKKOEK E J W, VAN GENUCHTEN P P L, BUURMAN P, et al. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1):27–49.
- [21] KLEBER M, MIKUTTA R, TORN M S, et al. Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(6):717–725.
- [22] VOGEL C, BABIN D, PRONK G J, et al. Establishment of macro-aggregates and organic matter turnover by microbial communities in long-term incubated artificial soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 79:57–67.
- [23] KALLENBACH C M, FREY S D, GRANDY A S. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls[J]. *Nature Communications*, 2016, 7:13630.
- [24] WEI Z, WANG J J, FULTZ L M, et al. Application of biochar in estrogen hormone-contaminated and manure-affected soils: impact on soil respiration, microbial community and enzyme activity[J]. *Chemosphere*, 2020:128625.
- [25] KUMADA K, SATO O, OHSUMI Y, et al. Humus composition of mountain soils in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5):151–158.
- [26] CHIN Y P, AIKEN G, O' LOUGHLIN E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(11):1853–1858.
- [27] DILLING J, KAISER K. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry[J]. *Water Research*, 2002, 36(20):5037–5044.
- [28] WEISHAAR, JAMES L, AIKEN, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20):4702–4708.
- [29] DORADO J, GONZÁLEZ-VILA F J, ZANCADA M A C, et al. Pyrolytic descriptors responsive to changes in humic acid characteristics after long-term sustainable management of dryland farming systems in central Spain[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 68:299–314.
- [30] MURPHY K R, BUTLER K D, SPENCER R G M, et al. Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: an interlaboratory comparison[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010(24):44.
- [31] ZEPP R G, SHELDON W M, MORAN M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating rayleigh and raman scattering peaks in excitation – emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(1–4):15–36.
- [32] HE W, HUR J. Conservative behavior of fluorescence EEM-PARAFAC components in resin fractionation processes and its

- applicability for characterizing dissolved organic matter[J]. *Water Research*, 2015, 83:217–226.
- [33] STEDMON C A, BRO R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, 6(11):572–579.
- [34] KLEBER M, BOURG I C, COWARD E K, et al. Dynamic interactions at the mineral–organic matter interface[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(6):402–421.
- [35] SIX J, FREY S D, THIET R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2):555–569.
- [36] SCHEU S. Microbial activity and nutrient dynamics in earthworm casts (Lumbricidae)[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1987, 5(3):230–234.
- [37] EHLERINGER J R, BUCHMANN N, FLANAGAN L B. Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes[J]. *Ecological Applications*, 2000(2):412–422.
- [38] ZHAO Q, POULSON S R, OBRIST D, et al. Iron-bound organic carbon in forest soils: quantification and characterization[J]. *Biogeosciences*, 2016, 27(2):1–27.
- [39] POTAPOV A M, TIUNOV A V, SCHEU S, et al. Combining bulk and amino acid stable isotope analyses to quantify trophic level and basal resources of detritivores: a case study on earthworms[J]. *Oecologia*, 2019, 189(2):447–460.
- [40] ZHU X, HU Y, WANG W, et al. Earthworms promote the accumulation of maize root-derived carbon in a black soil of Northeast China, especially in soil from long-term no-till[J]. *Geoderma*, 2019, 340:124–132.
- [41] ZHANG Q, GUO T, LI H, et al. Identification of fungal populations assimilating rice root residue-derived carbon by DNA stable-isotope probing[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020:147.
- [42] VIDAL A, LENHART T, DIGNAC M F, et al. Promoting plant growth and carbon transfer to soil with organic amendments produced with mineral additives[J]. *Geoderma*, 2020, 374:114454.
- [43] 黄健, 肖建中, 唐世刚, 等. 添加蒙脱石对猪粪好氧堆肥腐熟度和重金属钝化的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(1):141–148. HUANG J, XIAO J Z, TANG S G, et al. Effect of montmorillonite addition on aerobic composting and heavy metals passivation of pig manure[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(1):141–148.
- [44] SCULLION J, MALIK A. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1):119–126.
- [45] SINGH M, SARKAR B, BISWAS B, et al. Relationship between soil clay mineralogy and carbon protection capacity as influenced by temperature and moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109:95–106.
- [46] BABIN D, DING G C, PRONK G J, et al. Metal oxides, clay minerals and charcoal determine the composition of microbial communities in matured artificial soils and their response to phenanthrene[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 86(1):3–14.
- [47] VOGEL C, BABIN D, PRONK G J, et al. Establishment of macro-aggregates and organic matter turnover by microbial communities in long-term incubated artificial soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 79:57–67.
- [48] ERTEM G, GAN Z. Role of preparation method on the extent of montmorillonite catalysis for oligomer formation[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101:90–93.
- [49] CHEN X T, HAO Q J, XIONG Y F, et al. Effects of hematite and biochar addition on wastewater treatment efficiency, greenhouse gas emission, and microbial community in subsurface flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1492–1499.
- [50] 杨巍, 王东升, 刘满强, 等. 不同有机物料的蚯蚓堆肥及可溶性有机物的三维荧光光谱特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26:3181–3188. YANG W, WANG D S, LIU M Q, et al. Vermicomposting of different organic materials and three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of their dissolved organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26:3181–3188.
- [51] HUANG K, XIA H. Role of earthworms' mucus in vermicomposting system: biodegradation tests based on humification and microbial activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 610–611:703–708.
- [52] 杨格格, 邢美燕, 马小杰, 等. 蚯蚓-微生物协同作用过程中的微生物特性[J]. *环境工程*, 2017, 35:124–128. YANG G G, XING M Y, MA X J, et al. The microbial characteristics in earthworm-microorganism symbiotic system[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35:124–128.
- [53] ZHANG J, HU F, LI H, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 51(6):1–8.

(责任编辑:叶飞)