文章编号：1005-0906(2026)01-0065-08 DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20260108

蚯蚓对玉米秸秆不同部位的分解作用及红外光谱特征的研究

窦笑萌,蒋云峰,王海萌,董新月,李安琪,张 旭
(吉林师范大学地理科学与旅游学院,吉林 四平 136000)

摘 要：采用室内培养试验,研究蚯蚓对玉米秸秆叶鞘、茎髓、茎皮、根分解和养分元素释放动态的影响,运用傅里叶红外光谱技术分析秸秆分解过程中有机物结构变化,为农田秸秆覆盖系统中有机物质转化提供支持。结果表明,玉米秸秆各部位分解速率差异显著,叶鞘分解最快,茎髓和根次之,茎皮最慢。相比对照处理,蚯蚓的存在促进了秸秆分解,其中对根促进作用最强。伴随秸秆分解,养分元素含量也发生变化,蚯蚓提高了秸秆各部位碳释放率,对根作用最强,显著增加了秸秆各部位氮富集。由于茎皮初始C/N和醇酚类化合物含量较高,使其在试验期间表现出较高的氮富集,其次为茎髓和根,叶鞘最低并在试验后期有少量氮净释放。秸秆分解过程红外光谱的变化与碳释放特征基本吻合,蚯蚓作用使秸秆各部位脂肪族-CH、多糖 C-O等吸收峰相对强度减弱,酚醇类-OH、芳香族C=C吸收峰相对强度增强,特别是叶鞘和根表现明显。

关键词：玉米;秸秆分解;蚯蚓;红外光谱
中图分类号：S513.01 **文献标识码**：A

Effects of Earthworms on Decomposition of Different Parts of Corn Stover and Their Fourier Transform Infrared Spectral Characteristics

DOU Xiao-meng, JIANG Yun-feng, WANG Hai-meng, DONG Xin-yue, LI An-qi, ZHANG Xu
(*College of Geography Sciences and Tourism, Jilin Normal University, Siping* 136000, China)

Abstract: To support the transformation of organic matter in agricultural corn stover mulching systems, an indoor culture experiment was carried out to investigate the effects of earthworms on the decomposition and nutrient release dynamics of corn stover leaf sheaths, stem pith, stem bark, and roots. Additionally, Fourier transform infrared spectroscopy(FTIR) was used to analyze changes in the structure of organic matter during stover decomposition. The results showed that the rates at which the different parts of corn stover broke down varied significantly; the fastest rates were recorded for the leaf sheaths, followed by the stem pith and roots, and the slowest rates for the stem bark. The earthworms´ presence enhanced the breakdown of different corn stover components, particularly the root. Nutrient content also changed along with stover decomposition. The rate of C release from all parts of the stover gradually increased with decomposition, and it was higher in the treatment with earthworms than in the treatment without earthworms, suggesting that earthworms promoted the release of C from all parts of the stover, with a stronger effect on root. Due to the high initial C/N ratio and alcohol-phenolic compound content in stem bark, it exhibited the highest N enrichment during the experiment, followed by stem pith and roots; leaf sheaths showed the lowest N enrichment and a small amount of net N release in the later stage. The changes in FTIR spectra during stover decomposition were basically consistent with the characteristics of carbon release. Earthworm activity weakened the relative intensity of absorption peaks of aliphatic -CH and polysaccharide C-O in all stover parts, while enhancing the relative intensity of absorption peaks of alcohol-phenolic -OH and aromatic C=C, with the most obvious effects in leaf sheaths and roots.

Key words: Corn; Stover decomposition; Earthworm; Fourier transform infrared spectroscopy

录用日期：2024-11-15
基金项目：吉林省科技发展计划项目(YDZJ202401381ZYTS)
作者简介：窦笑萌(2000-),女,河北邢台人,硕士,主要从事土壤生物生态学研究。E-mail:dxm920907@163.com
蒋云峰为本文通信作者。E-mail:jiangyf427@126.com

作物秸秆是一项重要的农业资源，富含碳、氮、磷、钾及各种微量营养元素，经分解归还土壤，补充土壤肥力的同时维持农田系统物质与能量平衡[1-2]。但其分解过程比较复杂，受生物和非生物因素影响[3]。土壤动物作为重要的生物因素之一，以其自身活动直接或间接地参与分解过程[4-5]。蚯蚓是重要的大型土壤动物之一，通过取食、排泄、掘穴等活动对土壤过程的物质循环和能量流动作贡献，并且其肠道内存在多种酶，可将一些复杂有机物转化为简单的有机物，便于微生物利用，从而提高分解速率[6-7]。因此，蚯蚓的分解作用仅次于土壤微生物而居于其他土壤动物之上[8]。研究表明，免耕秸秆覆盖显著提高了土壤中蚯蚓的密度[9]。有关秸秆分解的研究多集中在秸秆种类[10]、还田方式[11]、耕作模式[12]等，针对土壤动物特别是蚯蚓对其影响的研究鲜有报道。此外，秸秆分解过程的中间产物比较复杂，难于分离。红外光谱技术可区分个体结构，操作简单，检测快速，已被用于分析土壤和植物养分等复杂有机物方面[13-14]。因此，本文以玉米秸秆为研究对象，通过室内培养试验探讨蚯蚓对秸秆各部位分解和养分释放规律的影响，同时运用红外光谱技术分析秸秆分解过程有机物结构变化，为农田秸秆覆盖系统土壤生物-有机物质转化-土壤养分累积提供支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用玉米秸秆取自中国科学院设在吉林省梨树县的保护性研发基地。秋季在试验基地收集当年整株玉米秸秆带回实验室，按叶鞘、茎髓、茎皮和根4部分进行分离、清洗、风干，之后截成1～2 cm小段。取定量风干后玉米秸秆各部分小段于65 ℃烘箱中烘干至恒重，测定各部分含水率。蚯蚓在该试验地优势类群为正蚓科(Lumbricidae)，购置正蚓科赤子爱胜蚓(Eisenia foetida)用于试验。

1.2 试验设计

试验设置玉米秸秆叶鞘、茎髓、茎皮和根有蚯蚓处理及对应的无蚯蚓对照处理。将风干玉米秸秆叶鞘10 g、茎皮10 g、茎髓8 g和根8 g分别装入网孔为0.01 mm、大小为15 cm×20 cm的尼龙网袋中，共144个，之后放入加水的托盘中，移入智能人工气候箱(HLI450C)进行微生物前期分解，温度设定为35 ℃，每天定时喷水，保持湿润状态。秸秆茎皮和根前期分解85 d，茎髓和叶鞘前期分解30 d。前期分解后，每种秸秆部位取4次重复样品进行风干，风干后放入65 ℃烘箱中烘干至恒重，用于获取剩余秸秆质量。每个网袋内的秸秆全部对应转移到口径8.2 cm、底径5.3 cm、高12.0 cm的塑料样品杯中。每种秸秆部位有蚯蚓处理样品杯中投放4～5条质量基本相等、出现环带、生长状态良好的蚯蚓，合计重约2.0 g，放置后将中间带有直径约2 cm孔的杯盖盖好以防蚯蚓逃逸。将上述样品置于智能人工气候箱(HLI450C)无光条件下进行蚯蚓分解试验。蚯蚓适宜生存温度是20～27 ℃、湿度是60%左右的环境中。因此，人工气候箱设定25 ℃恒温，箱内湿度保持在65%。

放置蚯蚓后，分解时长80 d。在10、30、50和70 d观察各蚯蚓处理样品中蚯蚓生长情况，20、40、60和80 d进行测定。每个处理4次重复，将各秸秆部位有、无蚯蚓处理的样品杯从气候箱中移出。有蚯蚓处理，蚯蚓从杯中取出不再放回，蚓粪和剩余秸秆分离，之后去除蚓粪的剩余秸秆在室内风干；对应无蚯蚓处理秸秆样品也放置室内风干，风干后的剩余秸秆放入65 ℃烘箱中烘干至恒重，用电子天平称重。

1.3 样品分析

每隔20 d烘干称重后的秸秆各部位进行研磨后过100目网筛，使用H_2SO_4-$K_2Cr_2O_7$外加热法测定全碳含量；使用H_2SO_4-H_2O_2消解-凯氏定氮法测定全氮含量；采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-650)测定秸秆各部位的光谱特征(波数范围为400～4 000 cm^{-1}，分辨率为4 cm，扫描次数为64次)。秸秆的主要吸收峰包括位于3 400 cm^{-1}附近O-H伸缩振动和N-H伸缩振动；2 915 cm^{-1}处的-CH_2伸缩振动；1 635 cm^{-1}处的芳香族碳组分或酰胺化合物的特征吸收谱带；1 396 cm^{-1}处的C-H弯曲振动和1 053 cm^{-1}处的C=O伸缩振动[15-17]。

1.4 数据处理与分析

秸秆累计分解率计算公式[18]：

$$D=\frac{W_0-W_t}{W_0}\times 100\%$$

其中，D为秸秆累计分解率，W_0为秸秆初始干重，W_t为t时取样时秸秆干重。

秸秆养分元素释放率计算公式[19]：

$$E=\frac{(C_0\times M_0)-(C_t\times M_t)}{(C_0\times M_0)}\times 100\%$$

其中，E为秸秆养分元素释放率，M_t为时t取样时秸秆干重，M_0为秸秆初始干重，C_0为养分元素的初始浓度，C_t为t时取样时养分元素浓度。

利用Microsoft Office Excel 2019对数据进行汇

总整理;利用 SPSS Statistics25.0 软件中 One-way ANOVA 和 Lest Significant Difference (LSD)分析秸秆各部分以及相同秸秆部位有、无蚯蚓处理分解速率、C 和 N 释放率的差异;重复测定方差分析分解时间、秸秆部位、蚯蚓对分解率和元素释放率的影响;利用 Origin 8.5 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　秸秆各部位初始化学性质及红外光谱特征

玉米秸秆各部位的初始化学成分显著不同(表 1)。碳含量,茎髓和茎皮接近,分别为 43.63%、45.02%;其次为叶鞘;根最低,仅为 39.21%。氮含量,根显著高于其他部分(1.36%);其次为叶鞘、茎髓;茎皮最低,仅为 0.43%。C:N 茎皮高达 104.51,显著高于其他秸秆部分;根最低,仅为 28.89。

玉米秸秆各部位初始红外光谱如图 1 所示。茎髓、茎皮和根的红外光谱相似,在 3 396、3 133、1 635、1 396 和 1 053 cm^{-1} 等出现明显的吸收峰,在某些特征吸收峰的强度上存在差异。茎髓和茎皮在 1 635 cm^{-1} 和 1 053 cm^{-1} 处的吸收峰强于根。叶鞘在 3 133 cm^{-1} 和 1 396 cm^{-1} 没有出现强吸收峰,在 2 915 cm^{-1} 吸收峰较明显。

表 1　玉米秸秆各部分初始化学性质

Table 1　Initial quality characteristics of corn stover at the start of the experiment

秸秆部位 Corn stover parts	初始化学性质 Initial chemical properties		
	碳含量(%) C content	氮含量(%) N content	C:N
叶 鞘	41.23±0.46 b	1.01±0.07 b	41.38±2.55 c
茎 髓	43.63±0.70 a	0.76±0.02 c	57.43±1.57 b
茎 皮	45.02±0.35 a	0.43±0.02 d	104.51±3.78 a
根	39.21±0.55 c	1.36±0.06 a	28.89±0.99 d

注:不同小写字母表示不同部位间差异性(P<0.05)

Note: Different letters indicate significant differences among different parts(P<0.05)

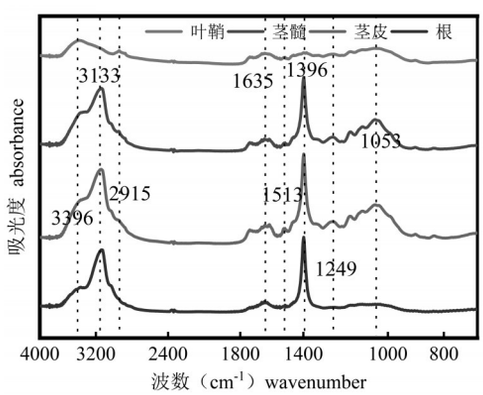


图 1　玉米秸秆各部位初始红外吸收光谱

Fig.1　Infrared absorption spectrum of various parts of initial corn stover

2.2　蚯蚓对玉米秸秆各部位分解率的影响

蚯蚓、秸秆部位、分解时间以及各因素间的交互作用对分解率均具有显著影响(表 2)。玉米秸秆各部位以叶鞘分解率最高,其次是茎髓和根,茎皮最低。随分解时间延长,蚯蚓对秸秆分解的促进作用显现。分解 20 d,茎髓有蚯蚓处理分解率显著高于无蚯蚓处理,高出 8.6%;40 d,叶鞘、茎髓、茎皮和根有蚯蚓处理均显著高于无蚯蚓处理,分别高出 12.9%、11.7%、3.06%和 12.1%;60 d,茎髓、茎皮和根有蚯蚓处理显著高于无蚯蚓处理,分别高出 14.6%、10.5%和 25.6%;80 d,叶鞘、茎髓、茎皮和根有蚯蚓处理显著高于无蚯蚓处理,分别高出 10.7%、19.2%、14.2%和 28.6%(图 2)。

2.3　蚯蚓对玉米秸秆各部位碳、氮释放率的影响

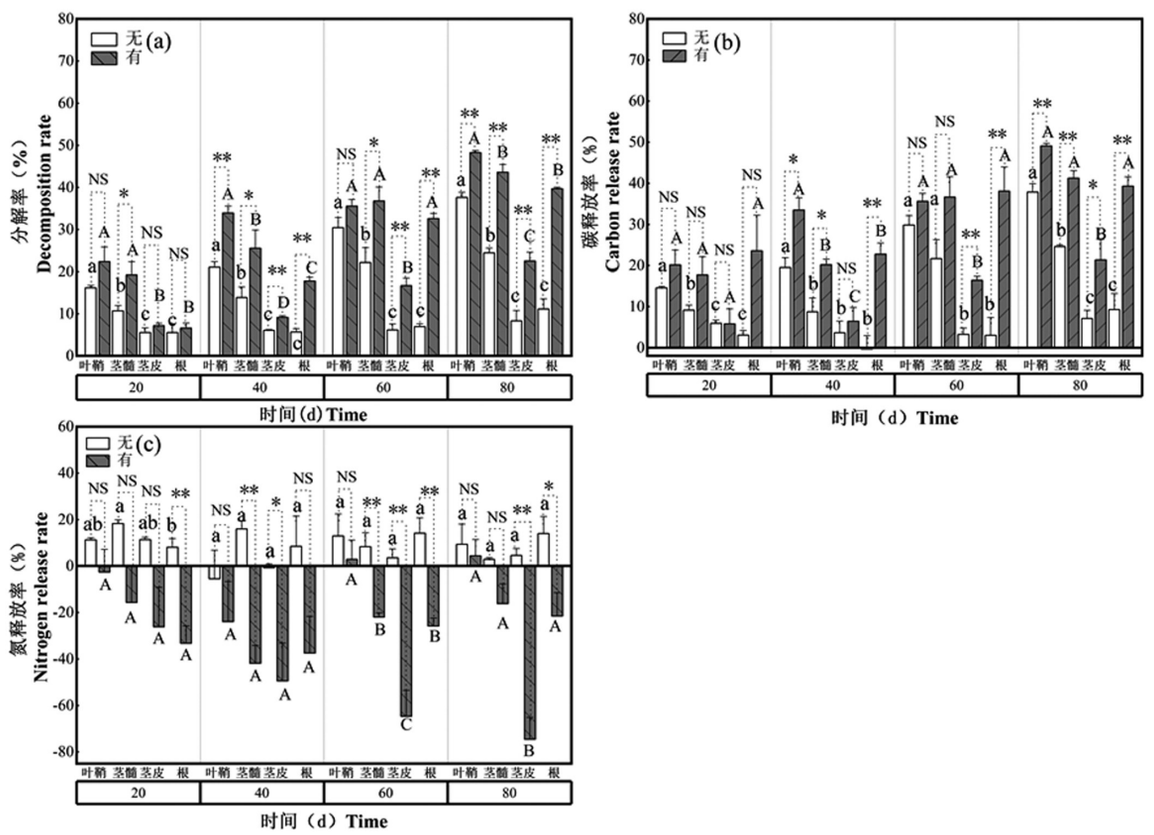
蚯蚓、秸秆部位、分解时间、蚯蚓和秸秆部位、蚯蚓和分解时间、分解时间和秸秆部位间的交互作用对碳释放率都有显著影响(表 2)。至试验结束,有蚯蚓处理碳释放率叶鞘、茎髓和根显著高于茎皮;无蚯蚓处理以叶鞘最高,其次是茎髓,最低为根和茎皮。蚯蚓对秸秆碳释放的促进作用在分解 40 d 及之后显

现。分解40 d,叶鞘、茎髓和根有蚯蚓处理碳释放率显著高于无蚯蚓处理,分别高出14.0%、11.5%和23.1%;60 d,茎皮和根有蚯蚓处理碳释放率显著高于无蚯蚓处理,分别高出13.2%和35.1%;80 d,叶鞘、茎髓、茎皮和根有蚯蚓处理碳释放率显著高于无蚯蚓处理,分别高出11.2%、16.7%、14.3%和30.1%。

表2 重复测量方差分析秸秆部位和有无蚯蚓作用对分解率、碳与氮释放率的影响

Table 2 Results of repeated measures ANOVA of the effects of stover part, earthworm activities and their interaction on the decomposition rate of corn stover and the C, N release rate

项 目 Item	分解率 Decomposition rate			碳释放率 C release rate			氮释放率 N release rate		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
蚯 蚓(E)	1	176.798	0.000	1	73.602	0.000	1	62.035	0.000
秸秆部位(C)	3	287.257	0.000	3	29.209	0.000	3	5.393	0.009
分解时间(T)	3	192.970	0.000	3	60.936	0.000	3	2.101	0.146
蚯蚓×秸秆部位(E×C)	9	10.211	0.000	9	7.328	0.003	9	4.278	0.021
蚯蚓×时间(T×E)	9	27.411	0.000	9	4.994	0.004	9	0.377	0.771
秸秆部位×时间(T×C)	9	3.148	0.003	9	3.832	0.001	9	2.207	0.038
蚯蚓×秸秆部位×时段(T×E×C)	9	2.690	0.009	9	1.121	0.367	9	1.820	0.089



注:不同小写字母表示同一时间无蚯蚓处理的秸秆不同部位间具有显著差异;不同大写字母表示同一时间有蚯蚓处理的秸秆不同部位间具有显著差异;"*、**"表示同一时间同一秸秆部位有、无蚯蚓处理间差异水平。"*"表示$P<0.05$,"**"表示$P<0.01$

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments without earthworm at the same time; capital letters indicate significant differences between treatments with earthworm at the same time($P<0.05$); * and ** represent values between with and without earthworm treatments in the same stover part at same time differ significant at $P<0.05$ and $P<0.01$

图2 玉米秸秆各部位分解率、碳释放率和氮释放率有蚯蚓与无蚯蚓处理对比(平均值±标准误)

Fig.2 Comparison of decomposition rates, carbon release rate and nitrogen rate of corn stover between treatments with and without earthworm(Mean±SE)

蚯蚓、秸秆部位及两者的交互作用、秸秆部位和分解时间的交互作用对氮释放率有显著影响(表2)。试验期间,有蚯蚓处理仅叶鞘在60 d和80 d有少量氮释放,茎髓、茎皮和根则始终表现为富集,以茎皮富集最高。无蚯蚓处理秸秆各部位氮有少量释放,但各部位间无显著差异。蚯蚓对氮富集有显著的促进作用,分解20 d,根氮释放率有蚯蚓处理显著低于无蚯蚓处理41.3%;40 d,茎皮和茎髓氮释放率有蚯蚓处理显著低于无蚯蚓处理,分别低48.6%和57.8%;60 d,茎髓、茎皮和根氮释放率有蚯蚓处理分别低于无蚯蚓处理,分别低30.3%、68.2%和39.9%;80 d,茎皮和根氮释放率有蚯蚓处理显著低于无蚯蚓处理,分别低79.2%和35.4%。

2.4　分解过程中秸秆各部位红外光谱变化

玉米秸秆各部位在分解过程中有蚯蚓处理与无蚯蚓处理的红外光谱变化存在一定差异(图3)。叶鞘分解40 d,有蚯蚓处理在2 915 cm^{-1}吸收峰减弱至消失,在3 133 cm^{-1}和1 396 cm^{-1}出现明显吸收峰,其无蚯蚓处理至试验结束红外光谱仍与初始相似。茎髓分解20 d,有蚯蚓处理在2 915 cm^{-1}吸收峰增强,在3 133 cm^{-1}和1 396 cm^{-1}吸收峰减弱;20 d之后茎髓在1 053 cm^{-1}吸收峰逐渐减弱。茎皮分解20 d,有蚯蚓处理在3 396~3 133 cm^{-1}形成宽吸收峰,在2 915 cm^{-1}吸收峰增强,1 396 cm^{-1}处吸收峰减弱但强于无蚯蚓处理;分解40 d,茎皮有蚯蚓处理在3 396~3 133 cm^{-1}仍为一宽吸收峰;60 d和80 d有蚯蚓处理在1 396 cm^{-1}吸收峰减弱。根随分解进行有蚯蚓处理在3 396、3 133、2 915、1 396和1 053 cm^{-1}吸收峰减弱,且在3 396、2 915、1 053 cm^{-1}吸收峰强度弱于无蚯蚓处理。

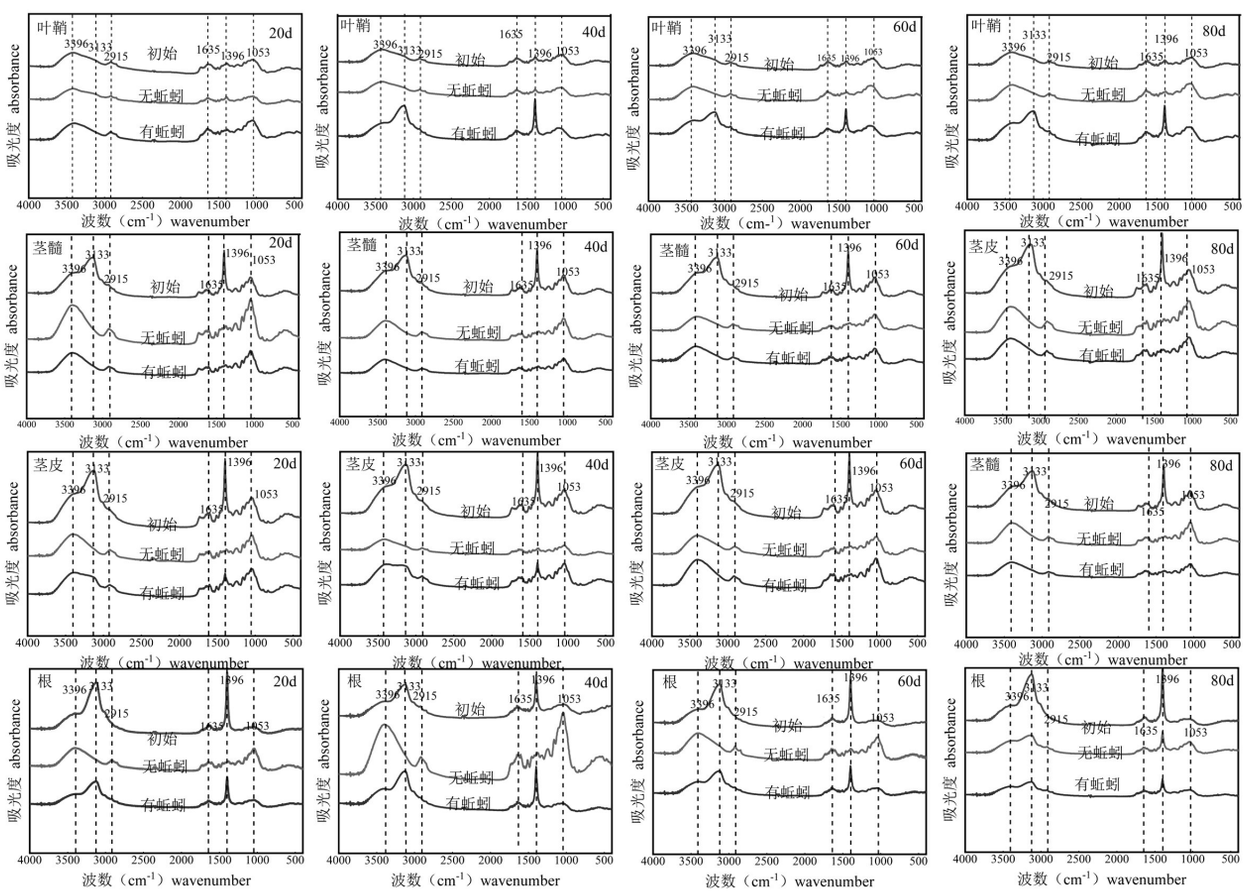


图3　玉米秸秆不同部位有无蚯蚓作用红外吸收光谱对比

Fig. 3　Comparison of infrared absorption spectra of different parts of corn stover with and without earthworm

3　结论与讨论

3.1　秸秆初始化学组成对蚯蚓分解的影响

蚯蚓为腐食性大型土壤动物,是重要的分解者,通过吞食大量有机残落物,利用砂囊机械研磨和肠道内的生化过程,促进物质分解与矿化,释放能量,分解的养分元素可被植物再利用,从而参与生态系统的物质循环和能量流动[20]。本研究中,蚯蚓对玉米秸秆各部位分解均具有促进作用,但程度不同。以往研究显示,蚯蚓分解与基质初始化学组成有关,

通常蚯蚓对氮含量高而木质素和C/N低的有机物分解较高[21-23]。茎皮氮含量显著低于其他部分而C/N显著高于其他部分,根与其相反。茎髓、茎皮和根初始红外光谱谱形相似,但各特征峰吸收强度有差异,说明这些峰所对应的物质含量不同。茎髓和茎皮在1 635 cm^{-1}和1 053 cm^{-1}吸收峰强于根。1 635 cm^{-1}为芳香环相连的C=O伸缩振动或酰胺化合物的特征吸收谱带,1 053 cm^{-1}为多糖C-O伸缩振动。所以,茎髓和茎皮的芳香族和多糖类化合物高于根。叶鞘在3 133 cm^{-1}和1 396 cm^{-1}未出现较强吸收峰,在3 396 cm^{-1}和1 053 cm^{-1}吸收峰也弱于茎髓和茎皮,但在2 915 cm^{-1}出现吸收峰。3 396、3 133 cm^{-1}来自碳水化合物(纤维素、半纤维素、淀粉和单糖等)、酚类、醇类等O-H伸缩振动或肽分枝N-H伸缩振动;2 915 cm^{-1}来自脂肪族化合物中甲基及亚甲基中C-H对称或反对称伸缩振动[24];1 396 cm^{-1}为烷烃C-H弯曲振动。所以,叶鞘醇酚类化合物低于其他部位,多糖类低于茎髓和茎皮。综合秸秆各部位初始化学组成,叶鞘分解率较高而茎皮较低。蚯蚓对根分解促进作用较高,叶鞘和茎髓次之,茎皮最低。

3.2 秸秆分解过程的养分释放动态和FTIR变化

在分解过程中,秸秆养分元素逐步被释放。碳和氮分别是构成碳水化合物和蛋白质的主要成分,是植物重要的营养元素。碳元素矿化为分解者提供了可利用的能源,其释放速率可反映凋落物分解的快慢及凋落物中的生物活性[25]。本研究中,蚯蚓对秸秆各部位碳释放有促进作用。蚯蚓促进碳释放,一方面来自蚯蚓自身代谢直接影响碳循环;另一方面,蚯蚓通过代谢过程,增加微生物与有机质的接触面积,促进微生物对有机物质的矿化,间接促进碳释放[26]。蚯蚓主要是利用一些简单、易分解的有机质,如脂肪族、糖类,这与红外光谱特征相吻合。叶鞘和根分解过程有蚯蚓处理红外光谱变化与无蚯蚓处理明显不同。分解40 d及之后,叶鞘有蚯蚓处理在3 133 cm^{-1}和1 396 cm^{-1}吸收峰强于无蚯蚓处理,而2 915 cm^{-1}和1 053 cm^{-1}吸收峰减弱,表明蚯蚓促进了脂肪族类和多糖类分解,其分解最终产物为CO_2和水,而醇类、酚类、芳香族等难分解化合物含量增加。赵光等[27]研究分析,植物残体内随易分解物质被分解掉,较难分解的结构残留下来,使较难分解化合物的吸收峰比例增大。根在分解过程中有蚯蚓处理3 396、1 635和1 053 cm^{-1}处吸收峰弱于无蚯蚓处理,即蚯蚓促进了根的碳水化合物(纤维素)、芳香族和多糖类化合物分解。茎髓和茎皮分解过程有蚯蚓处理和无蚯蚓处理红外光谱谱形差异不明显。茎髓和茎皮在3 400~3 100 cm^{-1}随分解形成一个平缓的吸收峰,1 053 cm^{-1}处的吸收峰强度减弱,1 396 cm^{-1}吸收峰被多个弱的吸收峰取代,表明茎髓和茎皮碳水化合物(纤维素)、脂肪族类、多糖类化合物部分分解。

氮元素矿化通常与凋落物氮含量呈正相关,与C/N和木质素含量呈负相关[28-29]。木质素主要由对香豆醇、松柏醇、芥子醇3种醇单体组成[30],其含量越高、结构越复杂,分解速率越缓慢、进程越长[31],而且木质素还会通过化学结合或物理隔离等方式限制氮矿化[32]。另外,在分解过程中,若分解者所需要的氮含量大于凋落物中所含的氮,在分解过程中,会出现氮富集以增加凋落物氮含量,直到一个临界值后,才发生氮释放[33]。本研究中,秸秆各部位有蚯蚓处理比无蚯蚓处理表现出明显氮富集,表明蚯蚓的存在增加了对氮的需要。茎皮、茎髓和根初始红外光谱在3 396、3 133和1 396 cm^{-1}吸收峰较强,即其醇类、酚类等难分解化合物含量较高,并且茎皮初始氮含量低,C/N高。因此,在分解过程中茎皮始终表现为较强的氮富集,其次为根和茎髓,叶鞘仅在初始有少量氮富集,60 d后出现氮净释放。

本研究通过室内培养试验研究了蚯蚓对玉米秸秆各部位分解和碳、氮养分元素释放的影响,并运用红外光谱技术分析秸秆分解过程有机物结构的变化。由于玉米秸秆各部位初始化学组成不同,分解率存在差异。叶鞘分解率最高,茎髓和根次之,茎皮最低。蚯蚓对玉米秸秆各部位分解均具有促进作用,其中对根分解的促进作用相对较强。伴随秸秆分解其养分元素含量也发生了变化。蚯蚓促进了玉米秸秆各部位碳释放,其中对根的促进较强。蚯蚓的作用增加了秸秆各部位氮富集,其中茎皮在试验期间富集量最高,叶鞘富集量最低,并在试验第60 d及之后有少量氮净释放。玉米秸秆各部位在分解过程中红外光谱谱形也发生了变化。相对茎髓和茎皮,叶鞘和根有蚯蚓处理的红外光谱谱形与无蚯蚓处理差异较明显。

参考文献:

[1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21. (in Chinese)

[2] 柴如山,王擎运,叶新新,等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报,2019,38(11):2583-2593.
CHAI R S, WANG Q Y, YE X X, et al. Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitro-

gen substitution under straw returning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(11): 2583-2593. (in Chinese)

[3] GARCÍ-PALACIOS P, SHAW E A, WALL D H, et al. Temporal dynamics of biotic and abiotic drivers of litter decomposition[J]. Ecology Letters, 2016, 19: 554-563.

[4] BENDER S F, WAGG C, HEIJDEN D V G M. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultrual sustainability[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2016, 31: 440-452.

[5] 傅声雷，刘满强，张卫信，等．土壤动物多样性的地理分布及其生态功能研究进展[J]．生物多样性，2022，30：22435．
FU S L, LIU M Q, ZHANG W X, et al. A review of recent advances in the study of geographical distribution and ecological functions of soil fauna diversity[J]. Biodiversity Science, 2022, 30: 22435.

[6] JIANG Y B, WANG J, MUHAMMAD S, et al. How do earthworms affect decomposition of residues with different quality apart from fragmentation and incorporation?[J]. Geoderma, 2018, 326: 68-75.

[7] 张卫信，陈迪马，赵灿灿．蚯蚓在生态系统中的作用[J]．生物多样性，2007，15 (2)：142-153．
ZHANG W X, CHEN D M, ZHAO C C. Functions of earthworm in ecosystem[J]. Biodiversity Science, 2007, 15 (2): 142-153. (in Chinese)

[8] BLOUIN M, HODSON M E, DELGADO E A, et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64: 161-182.

[9] 张士秀，贾淑霞，常亮，等．保护性耕作改善东北农田黑土土壤生物多样性及其生态功能[J]．地理科学，2022，42(8)：1360-1369．
ZHANG S X, JIA S X, CHANG L, et al. Conservation tillage improves soil biodiversity and its ecological function in the black soil region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42 (8):1360-1369. (in Chinese)

[10] 代文才，高明，兰木羚，等．不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]．中国生态农业学报，2017，25(2)：188-199．
DAI W C, GAO M, LAN M L, et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25 (2): 188-199. (in Chinese)

[11] 田平，姜英，孙悦，等．不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]．中国生态农业学报，2019，27(1)：100-108．
TIAN P, JIANG Y, SUN Y, et al. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrient contents[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 100-108. (in Chinese)

[12] 张志毅，何剑，范先鹏，等．稻麦轮作制还田秸秆腐解和养分释放特征[J]．中国土壤与肥料，2022，(8)：221-230．
ZHANG Z Y, HE J, FAN X P, et al. Characteristics of straw decomposition and nutrient release in rice and wheat rotation system[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (8): 221-230. (in Chinese)

[13] 郭涛，黄右琴，兰贵生，等．利用近红外光谱技术分析玉米秸秆和小麦秸秆的营养成分[J]．草业科学，2020，37(6)：1204-1214．
GUO T, HUANG Y Q, LAN G S, et al. Quantitative analysis of nutrients in corn straw and wheat straw using nearinfrared spectroscopy[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(6): 1204-1214. (in Chinese)

[14] 朱雪峰，张春雨，郝艳杰，等．玉米秸秆覆盖还田量对免耕土壤有机碳中红外光谱特征的影响[J]．应用生态学报，2021，32(8)：2685-2692．
ZHU X F, ZHANG C Y, HAO Y J, et al. Effects of corn stover mulch quantity on mid-infrared spectroscopy of soil organic carbon in a no-tillage agricultural ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2685-2692. (in Chinese)

[15] 翁诗甫，徐怡庄．傅里叶变换红外光谱分析[M]．北京：化学工业出版社，2016：315-317．

[16] 曹莹菲，张红，赵聪，等．秸秆腐解过程中结构的变化特征[J]．农业环境科学学报，2016，35(5)：976-984．
CAO Y F, ZHANG H, ZHAO C, et al. Changes of organic structures of crop residues during decomposition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(5): 976-984. (in Chinese)

[17] DEMYAN M, RASCHE F, SCHULZ E, et al. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transformmid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63: 189-199.

[18] 马志良，高顺，杨万勤，等．亚热带常绿阔叶林6个常见树种凋落叶在不同降雨期的分解特征[J]．生态学报，2015，35(22)：7553-7561．
MA Z L, GAO S, YANG W Q, et al. Litter decomposition of six common tree species at different rainy periods in the subtropical region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7553-7561. (in Chinese)

[19] 张頔，满秀玲，刘思琪，等．寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放[J]．北京林业大学学报，2022，44(3)：65-74．
ZHANG D, MAN X L, LIU S Q, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 65-74. (in Chinese)

[20] 邱江平．蚯蚓及其在环境保护上的应用I. 蚯蚓及其在自然生态系统中的作用[J]．上海农学院学报，1999，17(3)：227-232．
QIU J P. Earthworms and their application in environment protection I. Earthworms and their functions in ecosystem[J]. Journal of Shanghai Agricultural College, 1999, 17(3): 227-232. (in Chinese)

[21] 董炜华，殷秀琴．蚯蚓对不同阔叶落叶的摄食作用[J]．动物学报，2007，53(1)：69-75．
DONG W H, YIN X Q. Earthworms ingestion on different broad-leafed litters[J]. Acta Zoologica Sinica, 2007, 53(1): 69-75. (in Chinese)

[21] 张雪萍，黄初龙，李景科．赤子爱胜蚓对森林凋落物的分解率[J]．生态学报，2005，25(9)：2427-2433．
ZHANG X P, HUANG C L, LI J K. Efficiencies of earthworms (*Eisenia foetida*) decomposing forest litters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2427-2433. (in Chinese)

[23] TIAN G, BRUSSAARD L, KANG B T. Breakdown of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects of earthworms and millipedes[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(3) : 277-280.

[24] 吴景贵,席时权,曾广赋,等 . 玉米秸秆腐解过程中的红外光谱研究[J] . 土壤学报,1999,36(1):91-100 .
WU J G, XI S Q, ZENG G F, et al. Study on decomposed corn straw residue by fourier transform infrared spectroscopy[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(1): 91-100. (in Chinese)

[25] 邵玉琴,赵吉,杨劼 . 内蒙古皇甫川流域凋落物分解过程中营养元素的变化特征[J] . 水土保持学报,2004,18(3):81-84 .
SHAO Y Q, ZHAO J, YANG J. Studies on decomposing of litters and characteristic of nutritious elements in Inner Mongolia Huangfuchuan Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 81-84. (in Chinese)

[26] 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. (in Chinese)

[27] 赵光,唐晓红,吕家恪,等 . 紫色水稻土胡敏酸的形成--稻草腐解试验[J] . 农业环境科学学报,2009,28(12):2596-2602 .
ZHAO G, TANG X H, LÜ J K, et al. The formation of humic acids in purple paddy soil-based on decomposition of rice straw[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2596-2602. (in Chinese)

[28] GOVAERTS B, SAYRE K D, CEBALLOS-RAMIREZ J M, et al. Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue management: effects on soil C and N dynamics[J]. Plant and Soil, 2006, 280: 143-155.

[29] STEWART C E, MOTURI P, FOLLETT R F, et al. Lignin biochemistry and soil N determine crop residue decomposition and soil priming[J]. Biogeochemistry, 2015, 124: 335-351.

[30] 张悦,张艺凡,马一怡,等 . 森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展[J] . 环境生态学,2023,5(4):45-56 .
ZHANG Y, ZHANG Y F, MA Y Y, et al. Research progress on influencing factors of litter decomposition in forest ecosystem[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(4): 45-56. (in Chinese)

[31] YANNI S F, WHALEN J K, SIMPSON M J, et al. Plant lignin and nitrogen contents control carbon dioxide production and nitrogen mineralization in soils incubated with Bt and non-Bt corn residues [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43: 63-69.

[32] TALBOT J M, YELLE D J, NOWICK J, et al. Litter decay rates are determined by lignin chemistry[J]. Biogeochemistry, 2012, 108: 279-295.

[33] 李志安,邹碧,丁永祯,等 . 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展[J] . 生态学杂志,2004,23(6):77-86 .
LI Z A, ZOU B, DING Y Z, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 77-86. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)