

DOI: 10.5846/stxb201809031880

杨迪, 林琳, 杨旭, [张雪萍], 沙迪, 高梅香, 张利敏. 黑龙江不同玉米秸秆还田方式下土壤动物群落结构及其对秸秆降解的影响. 生态学报, 2020, 40(1): 356-366.

Yang D, Lin L, Yang X, [Zhang X P], Sha D, Gao M X, Zhang L M. Community structure of soil animals and its effect on straw degradation under different maize straw returning patterns in Heilongjiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 356-366.

黑龙江不同玉米秸秆还田方式下土壤动物群落结构及其对秸秆降解的影响

杨 迪, 林 琳*, 杨 旭, [张雪萍], 沙 迪, 高梅香, 张利敏

哈尔滨师范大学地理科学学院/寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025

摘要:以黑龙江省海伦市典型黑土耕地为试验样区, 研究黑土区不同秸秆还田方式下土壤动物群落结构特征及其在秸秆降解中的作用。实验选取 6 目、30 目、260 目降解袋, 设置 5 个处理: 17kg 玉米秸秆+2kg 水还田+含微生物 100% 浓度催腐剂(样方 A)、8.5kg 玉米秸秆+1kg 水还田+含微生物 50% 浓度催腐剂(样方 B)、原始样方(样方 C)、8.5kg 玉米秸秆+1kg 水还田(样方 D)、17kg 玉米秸秆+2kg 水还田(样方 E), 并于 2009—2011 每年 9 月份测定不同样方的玉米秸秆降解率和微生物数量。结果表明: 所有样方累积秸秆降解率都达 55% 以上, 秸秆降解率从高到低排序依次为: 样方 A>样方 B>样方 C>样方 D>样方 E; 对秸秆降解起主要作用的动物类群为中小型土壤动物中的甲螨亚目、中气门亚目和节跳虫科, 约占土壤动物个体数的 86.70%; 不同处理样方中, 土壤动物群落结构相似; 相同处理样方中, 不同规格的降解袋中土壤动物个数与类群差异显著 ($P<0.001$); 不同孔径降解袋中土壤动物的个数、类群数、多样性基本都与秸秆降解率呈正相关, 进一步表明土壤动物对秸秆降解具有促进作用。

关键词:耕作黑土; 秸秆降解; 土壤动物; 响应特征; 群落结构

Community structure of soil animals and its effect on straw degradation under different maize straw returning patterns in Heilongjiang Province

YANG Di, LIN Lin*, YANG Xu, [ZHANG Xueping], SHA Di, GAO Meixiang, ZHANG Limin

Key Laboratory of Remotes Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province/College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025 China

Abstract: Taking the typical black soil farmland in Hailun City, Heilongjiang Province as an experimental sample area, the characteristics of soil animal community structure and its role in straw degradation under different straw returning methods in black soil area were studied. The degradation bags of 6, 30, and 260 meshes were selected and five treatments were set up including 17kg corn straw+2kg paddy returning+100% microbial concentration accelerator (sample A), 8.5kg corn straw+1kg paddy returning+50.0% microbial concentration accelerator (sample B), original sample (sample C), 8.5kg corn straw+1kg paddy returning (sample D), and 17kg corn straw+2kg paddy returning (sample E), respectively. The degradation rate of corn straw and the number of microorganisms were determined in each September from 2009 to 2011. The results showed that the cumulative straw degradation rate of all samples was more than 55.0%. The order of straw degradation rate was A > B > C > D > E. The main animal groups that played a major role in straw degradation were

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371072, 41471037); 哈尔滨师范大学校青年学术骨干项目(10XQXG08)

收稿日期: 2018-09-03; 网络出版日期: 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13836141230@163.com

Oribatidae, Mesostigmata, and Arthropodiaceae, which accounted for 86.7% of the total number of soil animals. In the same treatment sample, the number and diversity of soil fauna in different size degradation bags were significantly different ($P < 0.001$), while the number, type and diversity of soil fauna in different aperture degradation bags were positively correlated with the degradation rate of straw, which further indicated that soil fauna could promote the degradation of straw.

Key Words: cultivated black soil; straw degradation; soil animal; response characteristics; community structure

农作物秸秆含有丰富的氮、磷、钾和微量元素等多种成分,是农业生产中的重要肥料来源^[1]。农作物秸秆还田作为我国秸秆再利用的主要方式之一^[2]。它不仅能够减少大气污染,改善农村卫生条件,而且能够提高耕地的营养成分含量和改善土壤生态系统结构及功能,对中国现代农业的可持续发展起重要的作用^[3-5]。在农作物秸秆的分解过程,土壤动物不仅有利于提高有机质的分解速率和养分的周转量,而且能够促进植物对养分的吸收。因此,近年来一些学者对土壤动物与秸秆还田之间关系进行了不断深入的研究^[6-13]。朱强根等^[6]研究了黄淮海平原土壤节肢动物对耕作和施肥的响应,表明秸秆还田不仅可以提高群落优势度和群落丰富度,而且可以降低群落的均匀度;董承旭等^[7]研究了不同浓度 EM 堆肥对中小型土壤动物群落组成、垂直结构、季节性动态和多样性的影响;杨旭等^[8]研究了松嫩平原黑土耕作区中小型土壤动物时空分布特征;李泽兴等^[9]研究表明不同玉米秸秆覆盖量对农田土壤动物群落结构和动物群落的多样性都有显著影响;杨佩等^[10]研究了免耕农田不同的玉米秸秆覆盖率下中小型土壤动物的生态分布特征;李淑梅^[11]探讨了施用不同肥料对农田土壤动物的影响;Barajas-Guzman^[12]认为土壤动物不仅可以促进粉碎的枯枝落叶的淋溶和下渗,而且能够增加土壤中细菌和真菌的接触面积,加速养分的流动;Zhang 等^[13]研究了无机肥对土壤线虫群落结构的影响;通过以上研究内容可以看出,尽管有关耕作生态中土壤动物的研究已经取得了较多成果,但关于典型耕作黑土的土壤动物对秸秆还田的响应还没有进行较系统研究。为此,本研究拟以黑龙江海伦市典型耕作黑土区作为研究对象,考察不同还田方式下玉米秸秆分解特征与土壤动物的响应,为黑土耕作区域土壤动物群落的保护和完善耕地生态系统可持续利用管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 秸秆的采集、处理和样方布设

本文选取黑龙江省典型粮食产区海伦市黑土耕地作为研究对象。海伦市地理位置为 $46^{\circ}58'—47^{\circ}52'N$, $126^{\circ}14'—127^{\circ}45'E$,位于黑龙江省中部松嫩平原黑土地带,耕地面积为 $27.7 \times 10^4 \text{hm}^2$,年平均气温 1.5°C ,年降水量为 $500—600\text{mm}$,年日照 $2600—2800\text{h}$,积温 $2400—2600^{\circ}\text{C}$,无霜期为 120d 左右,主栽作物为玉米、大豆和水稻。2009 年 10 月采集海伦市黑土耕地试验区成熟的玉米秸秆作为初始秸秆材料,室内对其进行风干、粉碎、混合均匀(叶和茎,粉碎长度不超过 8cm)处理。2009 年 11 月将分别取自相同位置的 30g 干玉米秸秆放入 3.35mm (6 目,大孔,所有土壤动物都能进入)、 0.6mm (30 目,中孔,通常只能部分中小型土壤动物进入)和 0.053mm (260 目,小孔,通常土壤动物不能进入)的降解袋中,降解袋选用的规格为 $15\text{cm} \times 20\text{cm}$ ^[14]。在土壤深度 20cm 处平铺、固定、掩埋,采用金属锚钉将降解袋固定在其生长样方的土壤表层^[15]。翻耕后分别放置在事先选取的 5 个面积为 $10\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方中,样方间距为 0.5m 。首先是进行粉碎秸秆,然后把粉碎好的秸秆按照不同处理浸泡在含有水或含微生物催腐剂的溶液里,最后将处理后的秸秆均匀喷洒在事先选取的样方里。催腐剂采用的是瑞莱特微生物催腐剂。进行实验期间,所有处理样方除了进行不同形式的秸秆处理外,都是正常翻耕。每年采样时,同时对秸秆降解率进行了监测^[16]。每个样方同时进行了不同方式处理,以对比不同处理条件下的影响。不同秸秆处理具体方式如表 1 所示。

1.2 秸秆样品、土壤动物样品的采集与处理

各样方各网孔降解袋于 2009 年 9 月、2010 年 9 月和 2011 年 9 月份别进行取样,各网孔降解袋的处理分

为翻压处理方式,并设 4 个重复。取出网袋后,迅速装入塑料袋中带回室内,以防止物质损失和尽量避免土壤动物的逃逸。利用手拣法来收集大型土壤动物,并用 75% 浓度的酒精固定,24—48h 分离。利用 Tullgren 漏斗中经过 24h 分离后提取中小型土壤动物,主要参考《中国土壤动物检索图鉴》来进行土壤动物的分类鉴定^[17]。每次取样获得的网袋秸秆,分离动物和去除杂质后在 65℃ 恒温下烘至恒重,作为用于计算秸秆分解率的秸秆干重质量。

表 1 不同处理方式的样方

Table 1 Sample plots of different treatments

| 样方名称 Sample names | 样方 A Sample A | 样方 B Sample B | 样方 C Sample C | 样方 D Sample D | 样方 E Sample E |
|--------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| 处理方式 Treatment method | 17kg 玉米秸秆 + 含 有微生物 100% 浓度 催腐剂 + 2kg 水还田 | 8.5kg 玉米秸秆 + 含 有微生物 50% 浓度 催腐剂 + 1kg 水还田 | 原始对照样方 | 8.5kg 玉米秸秆 + 1kg 水还田 | 17kg 玉米秸秆 + 2kg 水 还田 |

1.3 数据统计处理与分析

(1) 秸秆降解率计算

$$L_n(\%) = L_{ct} - L_{ct(t-1)} \quad (1)$$

式中, $L_n(\%)$ 为秸秆在该时段内的净降解率, L_{ct} 是 t 时间内的累计降解率, $L_{ct(t-1)}$ 为 $t-1$ 时间的累计降解率^[18]。

$$L_c(\%) = (W_0 - W_t) \times 100/W_0 \quad (2)$$

式中, $L_c(\%)$ 为秸秆累计降解率, W_0 为秸秆降解前初始干重, W_t 为 t 时间后的秸秆残留量,取干重, t 单位为年。

(2) 土壤动物特征指数计算

对土壤动物群落特征进行分析时,主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (E)、Margalef 丰富度指数 (D)、Simpson 优势度指数 (C) 和 Jaccard 相似性指数 (J)。

计算公式如下^[19]:

$$\begin{aligned} H &= - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N); \\ E &= H/H_{\max}; \\ D &= (S-1)/L_n N; C = 1 - \sum n_i(n_i-1)/(N(N-1)); \\ H_{\max} &= L_n; J = c/(a+b-c) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, n_i 为第 i 个物种的个体数量; N 为群落中所有物种的个体总数; H 为实际观察的物种多样性指数; H_{\max} 为最大的物种多样性指数; S 为群落中的总物种数; a 、 b 为两群落的物种数、 c 为两群落共有的物种数。

(3) 土壤动物对秸秆降解的贡献率计算^[20]:

$$C_f = L_{fauna}/L_{total}; C_{ma} = L_{macrofauna}/L_{total}; C_{me} = L_{meso-microfauna}/L_{total} \quad (4)$$

式中, C_f 为全体土壤动物对秸秆降解的贡献率, C_{ma} 为大型土壤动物对秸秆降解的贡献率, C_{me} 为中小型土壤动物对秸秆降解的贡献率, L_{fauna} 为全部土壤动物引起的秸秆质量损失, $L_{macrofauna}$ 为大型土壤动物引起的秸秆质量损失, $L_{meso-microfauna}$ 为中小型土壤动物引起的秸秆质量损失, L_{total} 为总共秸秆质量损失。

(4) 统计分析方法:

本文采用单因变量多因素方差分析 (GLM Univariate) 研究秸秆处理、网孔和取样时间对秸秆降解率的作用及其交互影响。用单因素方差分析 (ANOVA) 分别分析不同网孔内的秸秆降解率之间的差异,不同网孔、不同样方之间土壤动物的差异,不同年份、不同网孔中的土壤动物对秸秆降解贡献率的差异。采用 Pearson 相关系数分析土壤动物特征指标与秸秆净分解率的关系。土壤动物特征数据在统计分析时进行 $\log(x+$

1)转换,以满足数据的方差齐性检验。所有数据分析采用 SPSS 17.0 软件处理。

2 研究结果

2.1 秸秆降解率变化

在设置的 5 种样方中研究不同网孔的秸秆净分解率,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,5 种样方中不同网孔的秸秆净分解率从大到小依次为 2009 年>2010 年>2011 年。说明所有选取样方中秸秆分解率呈现逐年递减趋势。此外,5 种不同秸秆处理中秸秆的净分解率在 6 目分解袋中($P<0.01, F=293.686$),30 目分解袋中($P<0.01, F=192.950$)和 260 目分解袋中($P<0.01, F=160.741$)差异极其显著。6 目分解袋中秸秆净分解率最快,6 目分解袋中秸秆分解率优于 260 目分解袋。5 种不同样方中的秸秆累积分解率: $A>B>E>D>C$,样方 A 秸秆分解率远高于对照样方 C,这表明经过适当处理后,可以明显提高秸秆降解率。

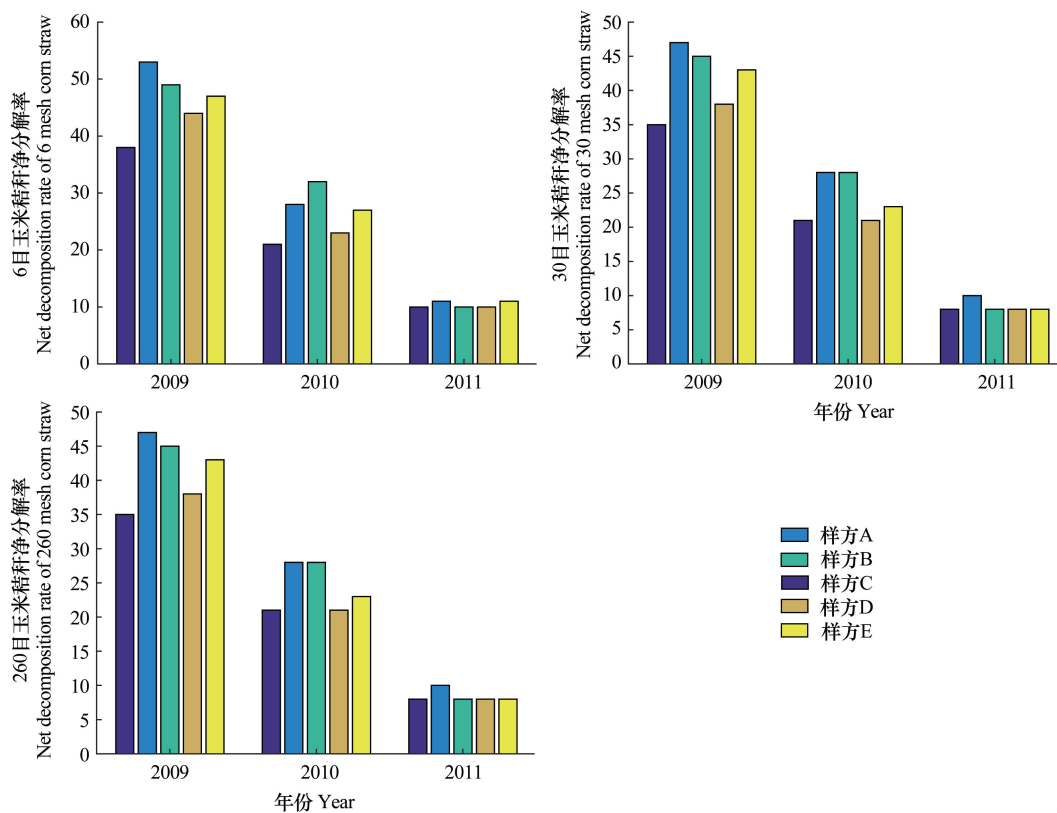


图 1 不同网孔中不同处理玉米秸秆净分解率(平均值±标准差)

Fig.1 Net decomposition rate of corn stalk in 6,30, and 260 mesh (mean±standard deviation)

不同网袋处理对秸秆降解的影响比较复杂,这种影响在不同的样方和不同的采样时间中表现不同。因此可以推断出,在秸秆降解过程中不仅土壤动物作为分解者对凋落物分解速率有所影响,而且在样方处理的方式、不同的分解时间等情况下都对秸秆降解产生影响。为此,通过多因素方差分析来讨论样方处理的方式、网孔大小、取样时间等因子对秸秆净降解率影响及其交互作用,结果具体见表 2。从表 2 中可以看出,样方处理方式、不同网孔的分解袋和取样时间对秸秆净分解率都具有显著的影响。

2.2 土壤动物动态变化

在 3 年试验期间,5 种不同样方、3 种规格的降解袋中共收集土壤动物 25370 只,45 个类群。其中大型土壤动物 7 个类群,占总类群数目的 15.56%。中小型土壤动物 38 个类群,占总类群数目的 84.44%。由于降解袋孔径的不同,不同的孔径对不同体型土壤动物起到控制的作用,对秸秆降解起主要作用的优势动物类群为中小型土壤动物中的甲螨亚目、中气节亚目和节跳虫科,占土壤动物个体数的 86.70%。常见的土壤动物类群

是前气门亚目与棘跳虫科,占土壤动物类群的 10.03%。其余 40 个类群为稀有类群。大型土壤动物样方 A 中最多(16 个),样方 D 中则没有。而中小型土壤动物在样方 E 中最多(6198 个),在样方 B 中最少(3417 个)。5 个不同样方中土壤动物类群结构如下图 2 所示。

表 2 玉米秸秆净降解率影响因素分析

Table 2 Analysis of influencing factors of variance of Net decomposition rate of corn stalk

| 影响因素 Factors | 年净分解率 Net decomposition rate | | | |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|----|
| | 显著水平 Significant level | 均方差 Mean square deviation | F 检验 F test | df |
| 样方 Plots | <0.001 | 217.8589 | 64.6363 | 4 |
| 网孔 Mesh | <0.001 | 343.9542 | 102.0473 | 2 |
| 取样时间 Sampling time | <0.001 | 14042.3411 | 4166.2030 | 2 |
| 样方×网孔 Sample×mesh | 0.5205 | 3.0319 | 0.8995 | 8 |
| 样方×取样时间 Sample×sampling time | <0.001 | 57.5237 | 17.0666 | 8 |
| 网孔×取样时间 Mesh ×sampling time | <0.001 | 34.3521 | 10.1919 | 4 |
| 样方×网孔×取样时间 Sample × mesh × sampling time | 0.9545 | 1.5910 | 0.4720 | 16 |

不同样方 3 年取样累积的大型土壤动物结构特征数据可以看出,不同处理样方,土壤动物特征差异明显,土壤动物个体数来看:A>B>C>D>E;从土壤动物类群数来看:A>B>E>C>D。从土壤动物多样性来看,A>E>B>C>D。从土壤动物均匀性指数来看,E>C>D>A>B。从土壤动物丰富度指数来看,A>B>E>C>D。从土壤优势度指数来看,D>C>B>A>E。不同处理样方中小型土壤动物结构特征如表 3 所示,可以看出土壤动物个体数来看:C>A>E>B>D;从土壤动物类群数来看:C>E>A=C>B。从土壤动物多样性来看,A>E>D>B>C。从土壤动物均匀性指数来看,B>A>E>D>C。从土壤动物丰富度指数来看,C>E>D>A>B。从土壤优势度指数来看,C>D>A=E>B。

表 3 不同处理样方大型土壤动物群落特征(平均值±标准误)

Table 3 Community structure of soil macrofauna in the different Sample plots (Mean±SE)

| 指标 Index | 样方 A Sample A | 样方 B Sample B | 样方 C Sample C | 样方 D Sample D | 样方 E Sample E |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 密度 Density(只/m ²) | 247.33±61.28a | 224.00±53.81a | 220.67±90.57a | 212.00±73.22a | 166.67±36.85a |
| 个体 Individual | 61.83±15.32a | 56.00±13.45a | 55.16±22.64a | 53.00±18.31a | 41.67±9.21a |
| 类群数 Group number | 13.25±1.51a | 12.51±0.88ab | 10.42±1.34ab | 9.17±1.31b | 10.83±0.98ab |
| 多样性(H') Diversity | 2.04±0.12a | 2.00±0.11a | 1.89±0.10a | 1.72±0.10a | 2.03±0.09a |
| 均匀度(E) Evenness | 0.81±0.03a | 0.80±0.04a | 0.85±0.03a | 0.82±0.03a | 0.88±0.01a |
| 丰富度(D) Richness | 3.13±0.30a | 3.08±0.22a | 2.70±0.23ab | 2.33±0.16b | 2.74±0.18ab |
| 优势度(C) Dominance | 0.19±0.03a | 0.20±0.03a | 0.21±0.03a | 0.25±0.03a | 0.17±0.01a |

均值差的显著性水平为 0.05, H': shannon-wiener 多样性指数; E: pielou 均匀性指数; D: margalef 丰富度指数; C: simpson 优势度指数

不同处理样方中小型土壤动物群落特征如表 4 所示,由表 4 可以出:秸秆处理后的样方对中小型土壤动物群落影响是较大的,与对照样方有较大差异。在中小型土壤动物个数上,对照样方 C 明显优于其他样方;从土壤动物类群来看,样方 C 中土壤动物类群数最多,但与样方 A、样方 D、样方 E 差异不显著;从土壤动物多样性来看,样方 A 显著高于对照样方 C;此外,采用 ANOVA 对不同处理样方分析,结果表明不同样方间中小型土壤动物个数、均匀性指数、密度差异显著。样方 E 中的中小型土壤动物特征指标与对照样方 C 差异最大,样方 E 秸秆还田方式对中小型土壤动物群落影响最大。

不同样方土壤动物群落相似性分析如表 5 所示,由表 5 可以看出:若只考虑群落组成的类群,则样方 A 与样方 B、样方 B 与样方 C、样方 E 相似度不高。样方 D 与样方 E 相似度最高(0.72)。总的来说,不同处理样方

土壤动物类群比较接近。

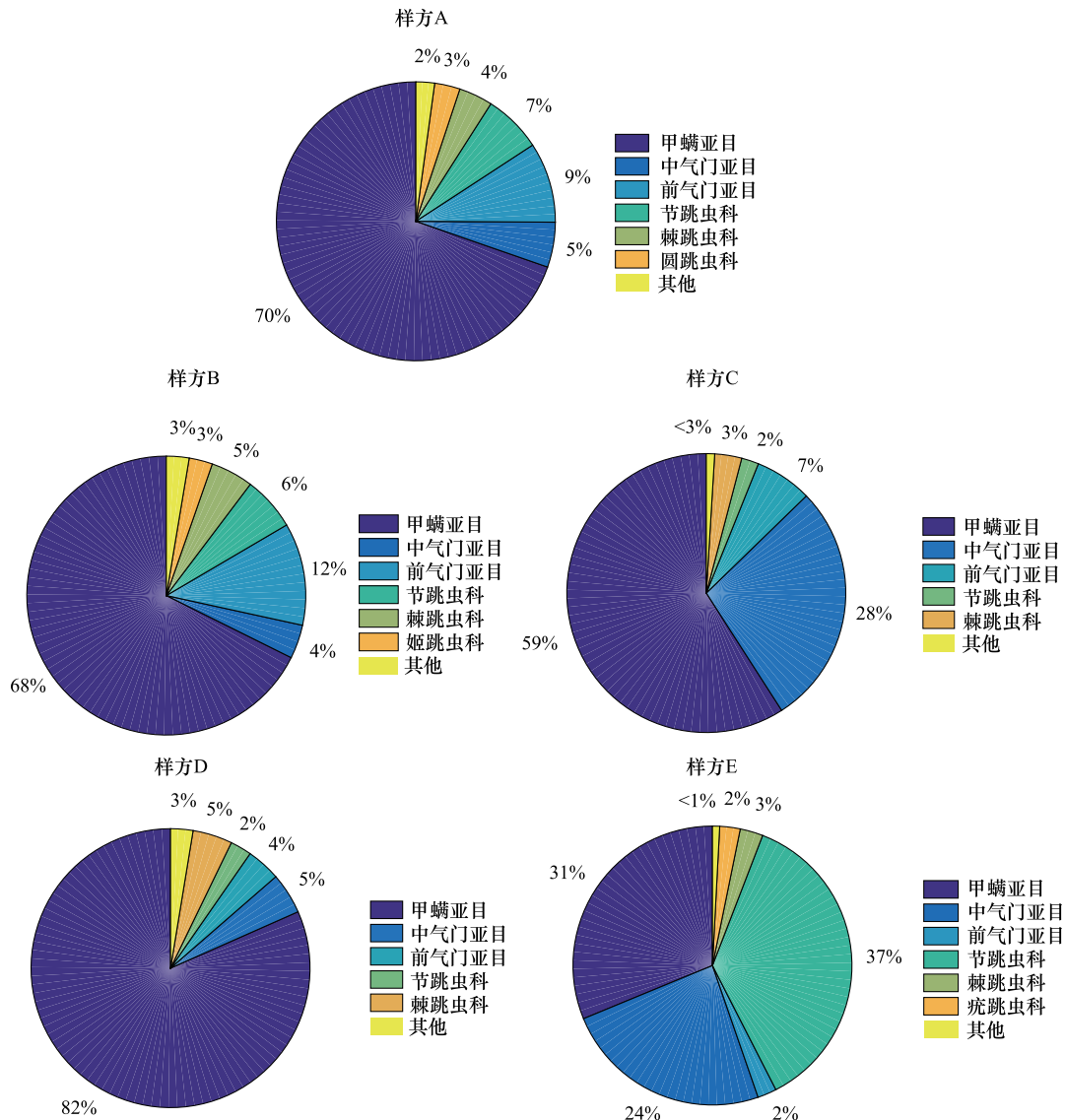


图 2 不同样方中土壤动物类群结构

Fig.2 Net decomposition rate of corn stalk in 6,30, and 260 mesh (mean±standard deviation)

表 4 不同处理样方中小型土壤动物群落特征(平均值±标准误)

Table 4 Community structure of small-middle size soil fauna in the different sample plots (Mean±SE)

| 指标 Index | 样方 A Sample A | 样方 B Sample B | 样方 C Sample C | 样方 D Sample D | 样方 E Sample E |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 密度 Density/(只/m ²) | 37425.00±3305.55a | 33325.00±5121.73a | 46591.67±1529.88b | 31575.00±554.48a | 32575.00±868.48a |
| 个体 Individual | 374.25±33.06a | 333.25±51.22a | 465.92±15.30b | 315.75±5.55a | 325.75±8.68a |
| 类群数 Group number | 15.92±1.12ab | 13.67±1.26a | 17.17±0.92b | 15.92±0.84ab | 16.08±0.57ab |
| 多样性(H') Diversity | 1.72±0.08a | 1.63±0.06a | 1.46±0.09a | 1.67±0.09a | 1.69±0.09a |
| 均匀度(E) Evenness | 0.63±0.03a | 0.64±0.02a | 0.51±0.02b | 0.60±0.03a | 0.61±0.03a |
| 丰富度(D) Richness | 2.51±0.15a | 2.21±0.16a | 2.63±0.14a | 2.59±0.14a | 2.61±0.09a |
| 优势度(C) Dominance | 0.30±0.03a | 0.28±0.01a | 0.37±0.05a | 0.31±0.03a | 0.30±0.03a |

均值差的显著性水平为 0.05, H': Shannon-wiener 多样性指数; E: Pielou 均匀性指数; D: Margalef 丰富度指数; C: Simpson 优势度指数

表 5 不同处理样方土壤动物群落相似性

Table 5 Similarities of soil fauna in the different sample plots

| 样方名称 Sample names | 样方 A Sample A | 样方 B Sample B | 样方 C Sample C | 样方 D Sample D | 样方 E Sample E |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 样方 A Sample A | 1 | 0.4687 | 0.5 | 0.5862 | 0.5 |
| 样方 B Sample B | | 1 | 0.4687 | 0.5 | 0.4667 |
| 样方 C Sample C | | | 1 | 0.5333 | 0.5 |
| 样方 D Sample D | | | | 1 | 0.7 |
| 样方 E Sample E | | | | | 1 |

由于不同的土壤动物类群在秸秆分解过程中的作用各不相同,不同网孔中五种处理样方的秸秆分解过程中土壤动物类群动态分析。选取玉米秸秆净降解率影响因素进行多因素方差分析如表 6 所示,研究结果表明,不同网孔之间,土壤动物类群差异显著($P < 0.01, F = 24.29$),土壤动物个数差异显著($P < 0.01, F = 18.42$)。不同孔径的网袋有效的分离了不同体型的土壤动物。不同采样时间土壤动物类群差异显著($P < 0.01, F = 7.32$),不同采样时间土壤动物个数差异显著($P < 0.01, F = 10.09$)。这表明每一年自然环境的变化明显影响了土壤动物类群与个数的变化,各个不同样方中的土壤动物在 6 目降解袋中类群差异不显著($P = 1.00, F = 0.02$),个数差异也不显著($P = 0.99, F = 0.08$)。各个不同样方中的土壤动物在 30 目降解袋中类群差异不显著($P = 0.99, F = 0.08$),个数差异也不显著($P = 0.98, F = 0.12$)。各个不同样方中的土壤动物在 260 目降解袋中类群差异不显著($P = 0.57, F = 0.77$),个数差异也不显著($P = 0.93, F = 0.20$)。这说明在不同样方中,同样网孔内土壤动物类群与个数尽管每年变化有差异,但从整个 3 年研究期内看,不同样方之间土壤环境相近,土壤动物差异不是很明显。

表 6 不同样方的不同网孔网袋秸秆降解过程中土壤动物动态

Table 6 Dynamics of soil fauna in different mesh decomposition bags of straw in the different Sample plots

| 降解袋孔径/mm The aperture of degradation bag | 年份 Year | 类型 Type | 样方 Sample | | | | |
|------------------------------------------------|------------|------------|-----------|------|------|------|------|
| | | | A | B | C | D | E |
| 3.35 | 2009 | 个体 | 1860 | 1084 | 2288 | 969 | 2225 |
| | | 类群 | 16 | 20 | 18 | 17 | 13 |
| | 2010 | 个体 | 756 | 430 | 456 | 1228 | 483 |
| | | 类群 | 17 | 10 | 11 | 11 | 11 |
| | 2011 | 个体 | 193 | 185 | 193 | 199 | 313 |
| | | 类群 | 10 | 7 | 8 | 8 | 13 |
| 0.6 | 2009 | 个体 | 1380 | 932 | 2053 | 738 | 2120 |
| | | 类群 | 12 | 14 | 12 | 11 | 6 |
| | 2010 | 个体 | 617 | 335 | 430 | 1080 | 349 |
| | | 类群 | 9 | 7 | 6 | 6 | 9 |
| | 2011 | 个体 | 128 | 116 | 166 | 176 | 296 |
| | | 类群 | 5 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| 0.035 | 2009 | 个体 | 325 | 192 | 78 | 88 | 309 |
| | | 类群 | 8 | 7 | 6 | 7 | 2 |
| | 2010 | 个体 | 77 | 87 | 179 | 11 | 104 |
| | | 类群 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 2011 | 个体 | 13 | 59 | 2 | 68 | 0 |
| | | 类群 | 2 | 1 | 1 | 3 | 0 |

2.3 土壤动物对秸秆分解过程中的作用

本研究对 3 年实验期间网袋土壤动物对玉米秸秆降解贡献率动态分析如表 7 所示。

表 7 网袋土壤动物对玉米秸秆降解贡献率动态分析

Table 7 Dynamic analysis of soil fauna bag of corn stalk degradation rate of contribution

| 样方名称 Sample names | 降解时间 Degradation times 年 Year | 土壤动物贡献率/% Contribution rate of soil animals | | |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | | 大型土壤动物 Soil macrofauna | 中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna | 全部土壤动物 All soil fauna |
| 样方 A Sample A | 1 | 10.70±1.41 | 8.71±1.11 | 19.40±1.59 |
| | 2 | 8.27±1.39 | 14.23±1.46 | 22.49±2.00 |
| | 3 | 7.99±3.76 | 13.88±7.79 | 21.87±4.05 |
| 样方 B Sample B | 1 | 9.67±1.77 | 7.18±1.57 | 16.85±3.00 |
| | 2 | 11.96±2.53 | 10.97±1.33 | 22.93±3.64 |
| | 3 | 18.12±7.06 | 8.88±6.68 | 27.00±3.45 |
| 样方 C Sample C | 1 | 10.84±3.15 | 6.81±2.42 | 17.66±5.45 |
| | 2 | 8.14±1.92 | 2.85±1.18 | 10.99±2.70 |
| | 3 | 16.47±5.05 | 7.61±7.46 | 24.08±2.46 |
| 样方 D Sample D | 1 | 10.93±6.09 | 4.80±0.95 | 15.73±7.02 |
| | 2 | 18.93±1.77 | 15.85±4.11 | 34.78±3.39 |
| | 3 | 21.52±6.65 | 1.61±1.58 | 23.13±7.95 |
| 样方 E Sample E | 1 | 10.70±5.76 | 5.17±0.85 | 15.87±5.01 |
| | 2 | 16.86±8.20 | 15.05±10.26 | 31.91±3.84 |
| | 3 | 24.18±7.01 | 12.33±1.49 | 36.51±8.27 |
| 所有样方平均值 Average value of all Samples | 1 | 10.57±3.54 | 6.53±1.96 | 17.10±4.32 |
| | 2 | 12.83±5.72 | 11.79±6.54 | 24.62±9.08 |
| | 3 | 17.66±7.73 | 8.86±6.90 | 26.52±7.39 |

从表 7 可以看出:总体上土壤动物对秸秆分解起到明显的促进作用。网袋土壤动物对玉米秸秆降解贡献率动态变化趋势分析如图 3 所示,通过图 3 对所有样方平均值进行可视化分析可以看出,整个来说大型土壤动物对秸秆降解的贡献率大于中小型土壤动物。第一年大型土壤动物与中小型土壤动物贡献率差异显著 ($P < 0.01$, $F = 14.8852$)。第二年大型土壤动物与中小型土壤动物贡献率差异不显著 ($P < 0.6450$, $F = 0.2169$)。第三年大型土壤动物与中小型土壤动物贡献率差异显著 ($P < 0.01$, $F = 10.8043$)。不同样方之间比较发现:第一年不同样方间大型土壤动物贡献率差异不显著 ($P = 0.9953$, $F = 0.0458$) 而不同样方间中小型土壤动物贡献率差异比较显著 ($P = 0.0612$, $F = 3.2120$),中小型土壤动物在样方 A 中贡献率最大,为 8.71%。在样方 D 中贡献率最小,为 4.80%。第二年不同样方间大型土壤动物贡献率差异显著 ($P = 0.02688$, $F = 4.3588$),在样方 D 中贡献率最大,为 18.93%。在样方 C 中贡献率最小,为 8.14%。不同样方间中小型土壤动物贡献率差异比较显著 ($P = 0.0565$, $F = 3.3152$)。在样方 D 中贡献率最大,为 15.85%,在样方 C 中贡献率最小,为 2.85%。第三年不同样方间大型土壤动物贡献率差异不显著 ($P = 0.2158$, $F = 1.7480$),不同样方间中小型土壤动物贡献率差异比较显著 ($P = 0.0729$, $F = 2.9908$)。在样方 A 中贡献率最大,为 13.88%,在样方 D 中贡献率最小,为 1.61%。

为了考察土壤动物特征指标与秸秆净降解率之间的关系,本文采用 Pearson 进行相关分析,从结论正负关系上得出表 8。由表 8 可以看出:在所有样方中,不同孔径降解袋中土壤动物的个数、类群数、多样性基本都与秸秆降解率呈正值,显示为正相关,进一步证明土壤动物对秸秆降解具有促进作用。土壤动物特征指标与秸秆降解率之间的相关性在不同的处理样方中表现不同,这说明土壤动物对秸秆降解作用受到土壤环境的调节,而且由于不同网袋处理对选取土壤动物的种类与数量有差别,使不同体型动物受到控制,因此不同孔径网袋中有的相关性表现的很显著,而在样方 E 中孔网袋中,土壤动物类群数与秸秆降解率呈负值,且相关性不显著。总的来看,秸秆降解受很多因素的影响,例如自然环境的影响、土壤动物特性的影响。样方 A 小孔网袋的群类数、样方 C 小孔网袋的多样性、样方 D 小孔网袋的群类数、样方 E 中孔网袋的多样性均显示在

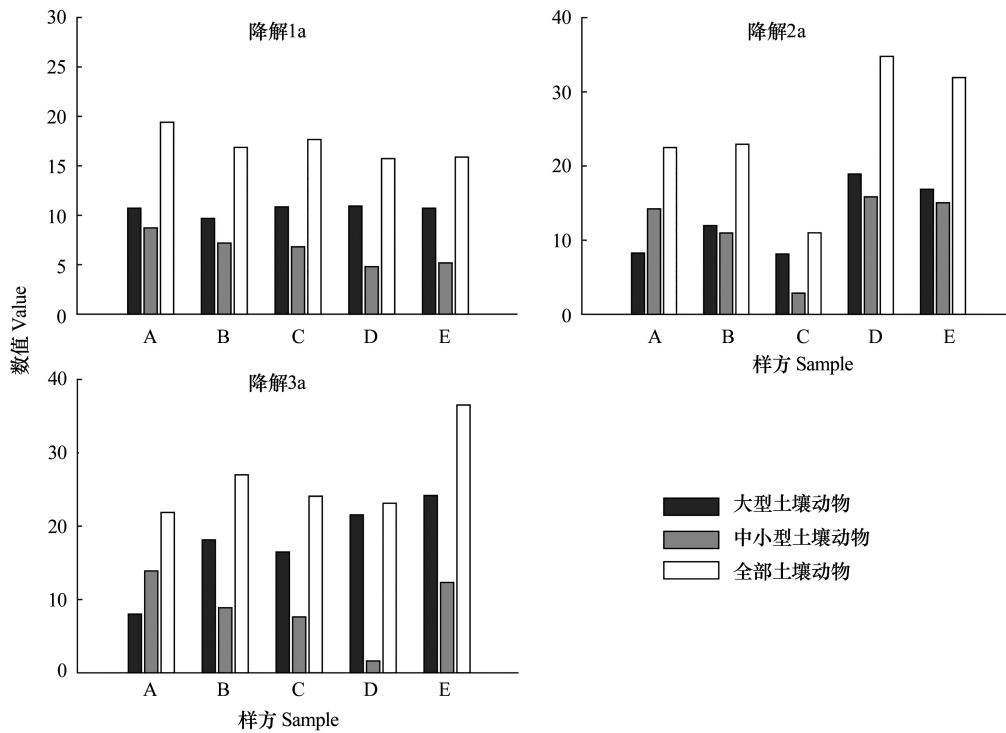


图3 网袋土壤动物对玉米秸秆降解贡献率动态分析

Fig.3 Dynamic analysis of soil fauna bag of corn stalk degradation rate of contribution

表8 土壤动物特征指标与秸秆净分解率(动物取对数计算结果)

Table 8 Characteristics of soil fauna and net decomposition rate of stalk (Calculated results of fauna)

| 样方 Sample plots | | 土壤动物个数 Soil fauna number | | 类群数 Group number | | 多样性 Diversity | |
|--------------------|----|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| | | 相关系数 Correlation coefficient | 显著水平 (Sig) | 相关系数 Correlation coefficient | 显著水平 (Sig) | 相关系数 Correlation coefficient | 显著水平 (Sig) |
| 样方 A | 大孔 | 0.988 | 0.097 | 0.772 | 0.439 | 0.985 | 0.112 |
| Sample A | 中孔 | 0.994 | 0.070 | 0.995 | 0.062 | 0.987 | 0.102 |
| | 小孔 | 0.964 | 0.171 | 0.998 * | 0.038 | 0.879 | 0.317 |
| | 大孔 | 0.949 | 0.203 | 0.934 | 0.232 | 0.950 | 0.202 |
| Sample B | 中孔 | 0.952 | 0.199 | 0.979 | 0.132 | 0.951 | 0.200 |
| | 小孔 | 0.944 | 0.213 | 1.000 ** | 0.008 | 0.992 | 0.083 |
| | 大孔 | 0.954 | 0.194 | 0.992 | 0.079 | 0.863 | 0.337 |
| Sample C | 中孔 | 0.948 | 0.205 | 0.978 | 0.133 | 0.798 | 0.412 |
| | 小孔 | 0.399 | 0.739 | 0.989 | 0.094 | 0.998 * | 0.043 |
| | 大孔 | 0.639 | 0.559 | 0.997 | 0.051 | 0.384 | 0.749 |
| Sample D | 中孔 | 0.488 | 0.675 | 0.932 | 0.236 | 0.200 | 0.872 |
| | 小孔 | 0.482 | 0.680 | 1.000 * | 0.020 | 0.862 | 0.339 |
| | 大孔 | 0.943 | 0.216 | 0.103 | 0.934 | 0.994 | 0.070 |
| Sample E | 中孔 | 0.934 | 0.233 | -0.449 | 0.704 | 1.000 * | 0.06 |
| | 小孔 | 1.000 ** | 0.006 | 0.321 | 0.792 | 0.543 | 0.634 |

** 1%差异水平, * 5%差异水平

1%水平上显著。样方 B 小孔网袋的群类数、样方 E 小孔网袋的土壤动物个数均显示在 5%的置信水平上显著。玉米还田土壤动物时空分布多因素方差分析如表 9 所示,由表 9 可以看出:玉米秸秆还田的处理样方因

素仅与各要素之间有正相关关系,并没有显著的影响关系($P < 0.05$)。玉米秸秆还田的样方与网孔的交互作用对土壤动物类群数和丰富度有极显著影响($P < 0.001$),对土壤动物个体数和密度也有较显著的影响($P < 0.05$)。玉米还田的样方与年份的交互作用对土壤动物类群数和丰富度有极显著影响($P < 0.001$),对土壤动物个体数、密度和优势度也有较显著影响($P < 0.01$)。

表 9 玉米还田土壤动物时空分布影响因素分析

Table 9 Analysis of influencing factors of variance of soil fauna in the decomposition bags of corn stalk

| | 个体数 Individual number | 类群数 Group number | 密度 Density | 多样性(H') Diversity | 丰富度(D) Richness | 均匀度(E) Evenness | 优势度(C) Dominance |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 处理样方 Treatment plot | 0.741 | 2.029 | 0.967 | 0.208 | 2.478 | 0.422 | 0.846 |
| 样方×网孔 Sample × mesh | 2.761 * | 22.301 *** | 2.629 * | 0.959 | 19.128 *** | 1.964 | 0.665 |
| 样方×年份 Sample × year | 5.149 ** | 14.067 *** | 5.044 ** | 6.902 *** | 13.575 *** | 1.562 | 3.536 ** |

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

3 结论和讨论

3.1 不同秸秆还田方式下秸秆降解率及降解过程

农业生产过程常需采用不同施肥措施对耕地进行处理,通过改变土壤的部分理化性质的方式来提高作物产量。本研究旨在揭示样方在不同处理方式下,秸秆还田降解过程中的土壤动物响应特征及与土壤动物的关系,对采用最优的秸秆还田方式提供科学依据。不同的样方处理方式对秸秆降解率有显著影响。玉米秸秆+微生物催腐剂的样方秸秆降解率明显优于其他对照样方,这表明土壤动物与微生物结合能够加快秸秆的降解速度。由于不同的降解袋网孔限制了参与秸秆降解的土壤动物种类与数量,大中型土壤动物能进入大孔网袋,大型土壤动物不能进入中孔网袋,而小孔网袋限制大中小型土壤动物进入。因此,大孔网袋是各种体型土壤动物与微生物对秸秆降解起作用,中孔网袋主要是中小型土壤动物与微生物秸秆降解起作用,小孔网袋主要是微生物秸秆降解起作用。在不同秸秆还田处理下,随着网袋网孔尺寸的变小,秸秆分解时间的延长,秸秆分解速率逐渐降低,这表明较小网孔的网袋在对土壤动物的体型进行限制时,由于参与分解的土壤动物类群减少会导致秸秆分解速率有一定的降低^[17]。同时,秸秆裸露于地表,初期温湿条件变化大,物理机械风化明显,秸秆分解速率较高;但随着易分解物质分解完成,剩余不易分解的木质素、纤维素等难分解的物质^[21],所以秸秆降解速率减缓。此外,不同网孔的降解袋对秸秆净降解率影响显著,另外,不同取样时间内未降解的秸秆的质量也不同。因此,取样时间对秸秆净降解率影响显著。

3.2 不同秸秆还田方式下土壤动物不同类群对秸秆降解的贡献

在秸秆降解过程中,大型土壤动物主要是粉碎秸秆,并在分解者生境中进行重新分配;而中小型土壤动物的主要作用是对大型土壤动物的排泄物进行再次作用以及控制微生物种群^[22]。因此,大型土壤动物和中小型土壤动物在凋落物分解中的作用时间以及作用强度等都各有差别。结合不同类群土壤动物对秸秆降解率影响说明,大型土壤动物贡献率逐渐增强,而中小型土壤动物贡献率较为稳定;大型土壤动物贡献率高于土壤动物贡献率和中小型土壤动物贡献率。主要是因为大型土壤动物活动迅速,在降解袋中停滞时间短,故在降解袋中采集到的较少,在样方 D 中甚至没检测到,但通过对样方土壤动物的研究发现,在样方土壤中,有大型土壤动物的存在。此外,研究发现样方 A 土壤动物贡献率不是最高的,但秸秆累积分解率是最高的。这表明在样方 A 中微生物作用效果更明显。主要是土壤微生物参与有机质的分解、腐殖质的形成、及养分循环转化过程,秸秆还田能够提高土壤耕层微生物的数量,随着农作物残体的不断分解为土壤提供了丰富的碳、氮源,土壤微生物的活性则显著加强。因此,土壤动物与微生物共同作用对秸秆降解更有效。

3.3 不同秸秆还田方式下土壤动物与秸秆降解的关系

秸秆还田不仅能有效增加土壤有机质含量、加速生土熟化,提高土壤肥力,而且能够增加土壤表层腐殖质含量,提高土壤含水量,有利于腐食性类群生存^[23]。不同秸秆还田方式会影响秸秆降解速率与土壤作用强度,因此,土壤理化性质的差异会影响土壤群落结构。秸秆还田加入一定的微生物催腐剂可以加快秸秆分解速度,提升土壤腐殖质含量,从而更有利于中小型土壤动物生存;然而秸秆还田后,位于土壤上层的秸秆提供的食物较多,土壤动物则表现一定的集聚性;不同的秸秆还田方式会造成秸秆分解程度的不同,进而造成了土壤动物具有一定差异性。连年作物残体还田能为土壤提供大量的可溶性有机碳、氮,从而为土壤微生物提高活性提供了丰富的碳、氮源,促进微生物活性的不断加强,使土壤中难溶态物质的活化与分解,有效增加耕层有机质含量,提高土壤养分含量

综上所述,实验表明土壤动物的个数、类群都与秸秆降解率呈现正相关,因此,土壤动物对秸秆降解具有明显的促进作用。今后在秸秆还田中应加入适量微生物催腐剂,有利于提高土壤动物的数量与丰富度。此外,也要针对秸秆还田过程中土壤动物与微生物的相互作用以及对秸秆降解的共同作用展开深入研究,以明晰二者作用的机理,为提高秸秆降解速率提供理论与技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 隋鹏祥, 张心昱, 温学发, 有德宝, 田平, 齐华. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2038-2045.
- [2] 王鲁佳. 对农村秸秆还田现状的调查与分析——以烟台市莱州为例. 农业与技术, 2016, 36(14): 36-37.
- [3] 李瑞琴, 于安芬, 赵有彪等. 河西走廊绿洲灌区循环模式农田-食用菌生产系统氮素流动特征. 生态学报, 2013, 33(4): 1292-1299.
- [4] Lavelle P, Decaens T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossi J P. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(S1): S3-S15.
- [5] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [6] 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 张焕朝, 钦绳武, 信秀丽. 长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响. 生态学杂志, 2010, 29(1): 69-74.
- [7] 董承旭, 翟清明, 林琳, 张雪萍, 高梅香. EM堆肥对黑土耕作区中小型土壤动物群落的影响. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1975-1983.
- [8] 杨旭, 林琳, 张雪萍, 张利敏, 沙迪. 松嫩平原典型黑土耕作区中小型土壤动物时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(11): 3253-3260.
- [9] 李泽兴, 孙光芝, 王洋, 吴东辉. 玉米秸秆覆盖量对农田土壤动物群落结构的影响. 中国农学通报, 2010, 26(16): 296-300.
- [10] 杨佩, 王海霞, 岳佳. 秸秆覆盖免耕条件下中小型土壤动物的生态分布特征. 水土保持研究, 2013, 20(2): 145-150.
- [11] 李淑梅, 樊淑华. 施用不同肥料对农田土壤动物群落结构的影响. 河南农业科学, 2008, 37(2): 57-59.
- [12] Barajas-Guzmán G, Alvarez-Sánchez J. The relationships between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 91-100.
- [13] Zhang X K, Jiang Y, Liang L, Zhao X F, Li Q. Response of soil nematode communities to long-term application of inorganic fertilizers in the black soil of Northeast China. *Frontiers of Biology in China*, 2009, 4(1): 111-116.
- [14] 林启美, 张书美, 赵小蓉, 李贵桐. 孔径大小对三种土壤原生动物运动的影响. 水生生物学报, 2008, 32(S1): 121-123.
- [15] 连旭, 隋玉柱, 武海涛, 刘冬, 郝敏, 管强. 秸秆还田对黑土农田土壤甲螨群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 134-142.
- [16] 杨旭, 高梅香, 张雪萍, 林琳, 沙迪, 张利敏. 秸秆还田对耕作黑土中小型土壤动物群落的影响. 生态学报, 2017, 37(7): 2206-2216.
- [17] 卢萍, 徐演鹏, 谭飞, 杨忠岐, 林英华. 黑土区农田土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1848-1856.
- [18] 汪冠收. 兰考县玉米秸秆还田分解中土壤动物群落特征及其作用研究[D]. 开封: 河南大学, 2012: 5.
- [19] 李艳红, 罗承德, 杨万勤, 胡杰, 吴福忠. 桉-栉混合凋落物分解及其土壤动物群落动态. 应用生态学报, 2011, 22(4): 851-856.
- [20] 安洋. 松辽平原玉米带土壤动物多样性特征研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- [21] 王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性. 生态学报, 2014, 34(3): 755-765.
- [22] 师宏魁. 玉米秸秆整株还田秸秆分解速率及还田效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [23] 蒋云峰, 马南, 张爽, 陈智文, 解宏图. 黑土区免耕秸秆不同覆盖频率下大型土壤动物群落结构特征. 生态学杂志, 2017, 36(2): 452-459.