

免耕玉米秸秆还田频率与还田量 对中型土壤动物群落的影响

蒋云峰,李安琪,刘俊男,严婷,窦笑萌,王海萌

(吉林师范大学地理科学与旅游学院,吉林四平 136000)

摘要:为探究中型土壤动物群落对秸秆还田量和还田频率的响应机制,设置免耕高频低量秸秆还田(HF-1/3)、免耕高频高量秸秆还田(HF-2/3)、免耕低频低量秸秆还田(LF-1/3)、免耕低频高量秸秆还田(LF-2/3)和作为对照的常规垄作无秸秆还田(CT)5种处理。结果表明:秸秆还田相比常规垄作显著提高了中型土壤动物密度。春季LF-2/3处理中型土壤动物总密度显著高于其他处理,分别是CT处理4.6倍、HF-1/3处理2.6倍、HF-2/3处理2.7倍和LF-1/3处理2.4倍。夏季相同秸秆还田量下,HF-1/3处理显著高于LF-1/3处理,是其3.8倍,HF-2/3处理是LF-2/3处理1.6倍,但相同还田频率下,还田量处理间无显著差异。秋季HF-2/3处理显著高于其他处理,分别是CT处理8.2倍、HF-1/2处理2.5倍、LF-1/3处理2.3倍和LF-2/3处理3.4倍。夏季LF-1/3处理中型土壤动物群落多样性指数显著高于HF-2/3处理,其余季节各处理均无显著性差异。春季HF-2/3处理中型土壤动物群落均匀度指数显著高于LF-2/3处理,夏季HF-2/3处理显著低于CT和LF-1/3处理,秋季HF-2/3处理显著低于HF-1/3、LF-1/3和LF-2/3处理。主要中型土壤动物类群个体密度夏秋季整体表现为在相同还田量下,高频处理高于低频处理。蜚蠊目及其中占比较高的甲螨亚目密度对还田频率和还田量响应与总体密度一致。弹尾目春季LF-2/3处理显著高于CT和LF-1/3处理,夏季HF-1/3处理显著高于CT处理,秋季HF-2/3处理显著高于其他处理。春季LF-2/3处理球角跳科个体密度显著高于CT处理,夏季HF-1/3处理显著高于CT和LF-1/3处理;秋季相同还田量下,高频处理显著高于低频处理。秋季HF-2/3处理等节跳科个体密度显著高于CT、HL-1/3和LF-2/3处理。夏季高频还田处理的长角跳科个体密度显著高于低频还田处理。春季LF-2/3处理的双翅目幼虫个体密度显著高于CT;夏秋季均以HF-1/3处理最高。对于蜚蠊目与弹尾目密度比,春季LF-2/3处理远大于1并显著高于HF-2/3处理;秋季HF-1/3、HF-2/3和LF-2/3处理趋近于1并显著低于LF-1/3和CT处理。总体来看,相同秸秆还田量下,高频秸秆还田相比低频秸秆还田利于中型土壤动物生存,但在一定的还田频率下还需考虑还田量。

关键词:秸秆还田频率;秸秆还田量;中型土壤动物;群落结构

中图分类号:S154.5 文献标志码:A

Effects of maize straw mulching frequency and amount on soil mesofauna in a no-tillage system

JIANG Yunfeng, LI Anqi, LIU Junnan, YAN Ting, DOU Xiaomeng, WANG Haimeng

(College of Geography Sciences and Tourism, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

Abstract: To understand the response of soil mesofauna to the straw mulching amount and frequency, this study was carried out at the Conservation Tillage Research and Development Base of the Chinese Academy of Sciences in Jilin Province. The study included five treatments: high frequency and low amount straw mulching (HF-1/3), high frequency and high amount straw mulching (HF-2/3), low frequency and low amount straw mulching (LF-1/3), low frequency and high amount straw mulching (LF-2/3), and conventional tillage with no straw mulching (CT) as the control. The results showed that straw mulching significantly increased the density of soil mesofauna compared to CT. In spring, the total density of soil mesofauna in LF-2/3 was significantly higher than the other treatments, being 4.6 times higher than the CT, 2.6 times higher than the HF-1/3, 2.7 times higher than the

HF-2/3, and 2.4 times higher than the LF-1/3, respectively. In summer, the total density of soil mesofauna in HF-1/3 was significantly higher than that in LF-1/3, being 3.8 times higher than the LF-1/3, while the HF-2/3 was 1.6 times higher than the LF-2/3 under the same amount of straw mulching. However, there was no significant difference between the different amount straw mulching treatments under the same straw mulching frequency. In autumn, the total density of soil mesofauna in HF-2/3 was significantly higher than the other treatments, being 8.2 times higher than the CT, 2.5 times higher than the HF-1/2, 2.3 times higher than the LF-1/3, and 3.4 times higher than the LF-2/3, respectively. The community diversity index was significantly higher in LF-1/3 than that in HF-2/3 in summer, and there were no significant differences among the treatments throughout the rest of the season. The community evenness index in HF-2/3 was significantly higher than that in LF-2/3 in spring; HF-2/3 was significantly lower than that in CT and LF-1/3 in summer. HF-2/3 was significantly lower than that in HF-1/3, LF-1/3 and LF-2/3 in autumn. Individual densities of the major soil mesofauna taxa groups generally were higher in high frequency treatments than low frequency treatments under the same amount of straw mulching in summer and autumn. The response of the density of Acari and their high proportion suborder of Oribatida to the mulching frequency and amount was consistent with the total density of mesofauna. The density of Collembola in LF-2/3 was significantly higher than CT and LF-1/3 in spring; HF-1/3 was significantly higher than CT in summer; and HF-2/3 was significantly higher than the other treatments in autumn. The density of Hypogastruridae in LF-2/3 was significantly higher than CT in spring; HF-1/3 was significantly higher than CT and LF-1/3 in summer; HF-2/3 was significantly higher than LF-2/3; and HF-1/3 was significantly higher than LF-1/3 in autumn. The density of Isotomidae in HF-2/3 was significantly higher than CT, HF-1/3, and LF-2/3. The density of Entomobryidae in the high frequency straw mulching treatments was higher than that in the low frequency straw mulching treatments. The density of Diptera larvae in spring was significantly higher in LF-2/3 than in CT; the HF-1/3 was the highest in both summer and autumn. For the density ratio of Acari to Collembola, the LF-2/3 treatment was much higher than HF-2/3 and much greater than 1 in spring, whereas it was in LF-2/3, HF-2/3, and HF-1/3 were significantly lower than LF-1/3 and CT in autumn. Overall, under the same amount of straw returning, high-frequency straw returning is better for the survival of medium-sized soil animals than low-frequency straw returning. However, at a certain returning frequency, the amount of returning needs to be considered.

Keywords: straw mulching frequency; straw mulching amount; soil mesofauna; community structure

农田土壤健康是实现农业可持续生产的重要保障,其不仅在于良好的土壤理化性状,更在于土壤的生物活性,体现于土壤生物种类的多样性,食物网结构的合理性,能有效维持土壤生态系统的能量流动、物质循环和信息交换^[1-2]。近年来,秸秆还田以及减少翻耕等保护性耕作措施显著提高了土壤生态系统稳定^[3-4],其中,秸秆还田是农田有机物料输入的重要方式,在提升土壤理化性状的同时也为土壤生物提供了大量碳源,改善了土壤生物群落结构^[5-6]。

中型土壤动物是土壤生物不可或缺的组分,螨类和跳虫是其中的典型代表^[7]。中型土壤动物不仅种类丰富,而且生存密度高。它们参与土壤有机物质的分解、矿化,促进土壤腐殖质和团粒结构的形成,影响土壤多种生态过程,并且对土壤环境变化反应敏感,常被视为土壤质量变化的早期评价指标^[8-10]。耕作方式与秸秆管理方式的转变引起土壤

环境的变化,也必然会对中型土壤动物群落产生影响^[11],一些学者对此进行了研究^[12-14]。前人研究发现免耕秸秆还田为中型土壤动物提供了相对稳定的生存环境,有利于提高其个体密度、多样性,改善其群落结构^[15]。连旭等^[16]研究显示免耕秸秆还田对土壤甲螨具有重要的保育作用;杨佩等^[17]研究发现秸秆覆盖免耕下土壤动物个体密度、类群数量和多样性较常规耕作有显著增加;刘鹏飞等^[18]研究表明秸秆还田量对农田土壤动物群落结构及其多样性都有显著影响。尽管关于秸秆还田条件土壤动物的研究已取得较多成果,但多集中在秸秆还田量的变化上。在实际生产中,秸秆还田量和还田频率能够对土壤动物产生交互影响,但前人研究较少。因此,在中国科学院设在黑土区的吉林省梨树县保护性耕作研发基地开展相应的研究,探究中型土壤动物群落对不同秸秆还田量和还田频率的响应机制,不仅有利于完善保护性耕作中作物秸秆管

理体系,更有利于保护黑土农田土壤动物群落。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于中国科学院设在吉林省梨树县的保护性耕作研发基地(43°19'N, 123°14'E;海拔 28.4 m),基地于 2007 年建立,在此之前一直采用传统耕作方式种植玉米。该区域属于温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均气温约 6.9℃,年均降水量约 614 mm,土壤类型为黑土,土质为壤质黏土。

1.2 试验设计

试验在免耕秸秆覆盖还田样区进行,即秋季收割后将玉米秸秆整株沿与垄向垂直的方向均匀覆盖于地表,播种前不再整地。秸秆全量覆盖还田为风干重 7 500 kg·hm⁻²(含水率为 15.46%±1.15%),记作 100%秸秆还田。设两种秸秆还田量处理和两种还田频率处理,包括免耕高频低量秸秆还田,即免耕+每年 33%秸秆还田(HF-1/3);免耕高频高量秸秆还田,即免耕+每年 67%秸秆还田(HF-2/3);免耕低频低量秸秆还田(LF-1/3),即免耕+第 1 年 100%秸秆还田,第 2、3 年不还田;免耕低频高量秸秆还田,即免耕+第 1、2 年 100%秸秆还田,第 3 年不还田(LF-2/3);并以常规垄作无秸秆还田作为对照(CT)(表 1)。从 2008—2016 年,试验区内完成了三个为期三年的秸秆覆盖周期。在每个三年周期中, HF-1/3 和 LF-1/3 处理样地秸秆总覆盖还田量基本相同; HF-2/3 和 LF-2/3 处理样地秸秆总覆盖还田量基本相同。

试验采用随机区组设计,各处理设 4 次重复,各小区面积 261 m²(8.7 m×30 m)。以常规连年垄作为对照处理,其秋季玉米收获后,将秸秆全部移除出小区,春季旋耕灭茬起垄播种,垄高 15 cm,垄距 60 cm,除播种、施肥外,不再扰动土壤。免耕秸秆覆盖还田小区在播种前不再整地,春季播种采用免耕

机,一次性完成秸秆切割、精确播种和施肥作业,全年不再扰动土壤。试验小区玉米播种和收获分别在每年的 5 月上旬和 10 月上旬。各处理均施用稳定性复合肥(N-P₂O₅-K₂O:26-12-12),施肥量相同,相当于 N 240 kg·hm⁻²、P₂O₅ 110 kg·hm⁻²、K₂O 110 kg·hm⁻²,作物生育期内不进行灌水。

1.3 样品采集及处理

2016 年春季(4 月底)、夏季(7 月中旬)和秋季(9 月底)分别对应该地区玉米的播种期、拔节期和成熟期,采集土壤动物样品。每次采样在每个小区内对角线上随机抽采三个采样点,采样面积 100 cm²(10 cm×10 cm),分 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 三个土层采集,而后将土壤样品分别装入对应编号的布袋内,置于样品箱中,尽快带回室内用 Tullgren 法分离。分离得到的中型土壤动物样品保存于 75% 酒精溶液中,之后利用体视显微镜(SMZ800, NIKON, 日本),依据有关文献和分类专著^[19-20],鉴定至科或亚目并统计数量。

各次采样将每个小区各采样点得到的土壤动物样品数量相加,之后求得各小区平均中型土壤动物密度(只·m⁻²),并计算群落中的优势类群(相对多度>10%)、常见类群(相对多度在 1~10%之间)和稀有类群(相对多度<1%)。利用总个体密度、Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*)和 Pielou 均匀度指数(*E*)分析群落特征。

1.4 数据处理

采用方差分析比较采样季节、还田量和还田频率对中型土壤动物群落和主要类群密度的影响,利用主成分分析和多元方差分析对不同采样季节 5 种处理样地中型土壤动物群落差异进行分析,然后利用相似性百分比分析 5 种处理中型土壤动物群落平均相异性和主要动物类群的贡献率。采用 Excel 2021 软件记录并整理数据,应用 Origin 2021 软件完成数据制图和整合,使用 Past 4. 01 和 SPSS 21. 0 软件进行数据统计分析。

表 1 秸秆不同还田量和还田频率的试验处理

Table 1 Experimental treatments with different amounts of maize straw mulching and frequency of mulching

处理 Treatment	第 1 个周期 First three-year cycle/%			第 2 个周期 Second three-year cycle/%			第 3 个周期 Third three-year cycle/%		
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HF-1/3	33	33	33	33	33	33	33	33	33
LF-1/3	100			100			100		
HF-2/3	67	67	67	67	67	67	67	67	67
LF-2/3	100	100		100	100		100	100	

注:表中数字代表玉米秸秆覆盖还田量比例。

Note: The numbers in the table represent the mulching proportion of maize straw.

2 结果与分析

2.1 群落组成与数量特征

研究期间共收集到 28 类中型土壤动物, 隶属 1 门 4 纲 13 目。蜱螨目(Acari)和弹尾目(Collembola)在各季节都是优势类群(> 10%)。蜱螨目中以甲螨亚目(Oribatida)数量最高, 可占到螨类总数的 80%以上; 弹尾目中以等节跳科(Isotomidae)和球角跳科(Hypogastruridae)数量较高, 均可占到弹尾目总数的 20%以上。其他类群占比较低, 多为稀有类群(< 1%)。从春季到秋季, 螨类占总中型土壤动物个体密度的比例下降, 弹尾目占比上升, 常规耕作样地变化幅度低于其他处理(图 1)。

2.2 群落结构比较

多元方差分析表明, 秸秆处理和采样季节对中型土壤动物群落组成均有显著影响($F = 6.38, P < 0.001$; $F = 14.09, P < 0.001$), 且对中型土壤动物群落具有显著的交互影响($F = 3.75, P < 0.001$)。春季 LF-2/3 处理与 CT、HF-1/3、HF-2/3 和 LF-1/3 处理中型土壤动物群落组成均显著不同(表 2), 平均相异度分别为 66.96、49.15、51.04 和 45.58, 甲螨亚目、等节跳科、球角跳科和革螨亚目累积解释了它们之间群落差异的 93.41%、92.46%、92.34% 和 91.65%。夏季 CT 处理与 HF-1/3、HF-2/3 处理的中型土壤动物群落组成显著不同, 平均相异度分别为 59.75 和 56.61, 甲螨亚目、等节跳科、球角跳科和革螨亚目累积解释了它们之间群落差异的 90.24% 和 90.29%; LF-1/3 与 HF-1/3、HF-2/3 中型土壤动物群落组成显著不同(表 2), 平均相异度分别为 60.08 和 55.59, 甲螨亚目、等节跳科、球角跳科和革螨亚目累积解释了它们之间群落差异的 89.32% 和 89.67%。秋季 HF-2/3 处理与 CT、HF-1/3、LF-1/3 和 LF-2/3 处理的样地中型土壤动物群落组成均显著不同(表 2), 平均相异度分别为 79.02、48.38、50.77 和 58.61, 甲螨亚目、球角跳科和等节跳科累积解释了它们之间群落差异的 94.68%、91.92%、91.11% 和 92.99%。CT 处理与 HF-1/3 和 LF-2/3 处理的中型土壤动物群落组成显著不同, 平均相异度分别为 54.76 和 44.90, 甲螨亚目、革螨亚目、球角跳科、等节跳科和拟亚跳科累积解释它们之间群落差异的 96.13% 和 93.38%。

主成分分析表明, 不同季节各处理间中型土壤动物群落存在一定差异。春季 CT 和 LF-1/3 相接近, 被 Component 1 与 HF-2/3 分开, 同时 CT、LF-1/3、HF-1/3 和 HF-2/3 被排序轴 Component 2 与

LF-2/3 区分开, 显示出高量秸秆还田对中型土壤动物群落影响明显。夏季 CT 和 LF-1/3 相接近并同 LF-2/3 被排序轴 Component 2 与 HF-1/3、HF-2/3 区分开, 表明低频与高频秸秆还田处理中型土壤动物群落明显不同。秋季 CT、LF-1/3 被 Component 1 与 HF-1/3 分开, 同时三者连同 LF-2/3 被排序轴 Component 2 与 HF-2/3 区分开, 显示出高频高量秸秆还田对土壤群落影响明显。排序轴 Component 1 和 Component 2 在春、夏、秋分别解释了 94.34% 和 3.82%、90.48% 和 6.85%、88.74% 和 8.23% 的中型土壤动物群落的变化(图 2)。

三因素方差分析表明, 还田量、还田频率和采样季节及它们之间的交互作用对中型土壤动物总个体密度均有显著影响(表 3)。春季 LF-2/3 处理的中型土壤动物总个体密度显著高于其他处理, 分别是 CT 处理 4.6 倍、HF-1/3 处理 2.6 倍、HF-2/3 处理 2.7 倍和 LF-1/3 处理 2.4 倍。夏季中在相同还田量下, 高频还田处理中型土壤动物总个体密度高于低频还田处理(HF-1/3 > LF-1/3; HF-2/3 > LF-2/3), HF-1/3 处理显著高于 LF-1/3 处理, 是其 3.8 倍, HF-2/3 处理是 LF-2/3 处理 1.6 倍; 但相同还田频率下, 还田量处理间无显著差异。秋季高频高量秸秆还田处理的中型土壤动物总个体密度最高, HF-2/3 处理显著高于其他处理, 分别是 CT 处理 8.2 倍、HF-1/2 处理 2.5 倍、LF-1/3 处理 2.3 倍和 LF-2/3 处理 3.4 倍。此外, 各处理的中型土壤动物总个体密度在秋季达到最高值。采样季节及其与还田频率的交互作用对群落多样性指数有显著影响。夏季 LF-1/3 处理中型土壤动物群落多样性指数显著高于 HF-2/3 处理。还田频率与采样季节的交互作用对均匀度指数有显著影响。春季 HF-2/3 处理中型土壤动物群落均匀度指数显著高于 LF-2/3 处理, 夏季 CT 和 LF-1/3 处理的中型土壤动物群落均匀度指数显著高于 HF-2/3 处理, 秋季 HF-1/3、LF-1/3 和 LF-2/3 处理的中型土壤动物群落均匀度指数显著高于 HF-2/3 处理。此外, CT、LF-1/3 和 LF-2/3 处理在春季的群落多样性和均匀度指数显著低于夏季或秋季(图 3)。

2.3 主要类群比较

三因素方差分析结果表明, 还田量、还田频率、采样季节及它们之间的交互作用对蜱螨目和弹尾目个体密度均有显著影响(表 3)。春季 LF-2/3 处理的蜱螨目个体密度显著高于其它处理; 夏季中, 在相同还田量下, 高频还田显著高于低频还田处理(HF-1/3 > LF-1/3; HF-2/3 > LF-2/3); 秋季 HF-2/3

3 处理显著高于其它处理。春季 LF-2/3 处理的弹尾目个体密度显著高于 LF-1/3 和 CT 处理;夏季中相同还田量下不同还田频率间,以及相同还田频率下不同还田量间无显著差异;秋季 HF-2/3 处理均显著高于其它处理(图 4a、b)。采样季节及其与还田频率的交互作用对蜱螨目和弹尾目密度之比

(A/C) 同样有显著影响(表 3)。春季 LF-2/3 与 CT 处理的 A/C 相近且远大于 1,并显著高于 HF-2/3 处理;夏季各处理间 A/C 无显著差异;秋季 CT 和 LF-1/3 处理的 A/C 相近,且均显著高于 HF-1/3、HF-2/3 和 LF-2/3(图 5)。除 HF-1/3,其他 5 种处理春季的 A/C 值显著高于夏秋季。

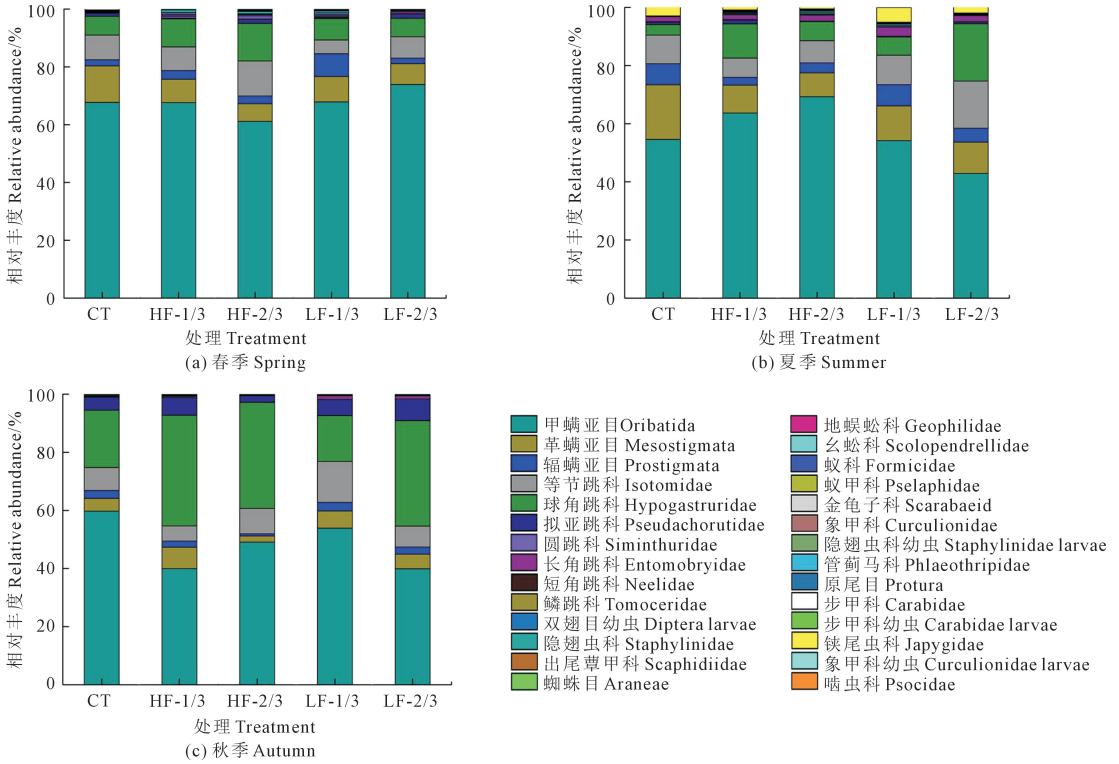


图 1 不同季节各处理样地中型土壤动物群落组成

Fig.1 Percentage of soil mesofauna collected from different treatments in three seasons

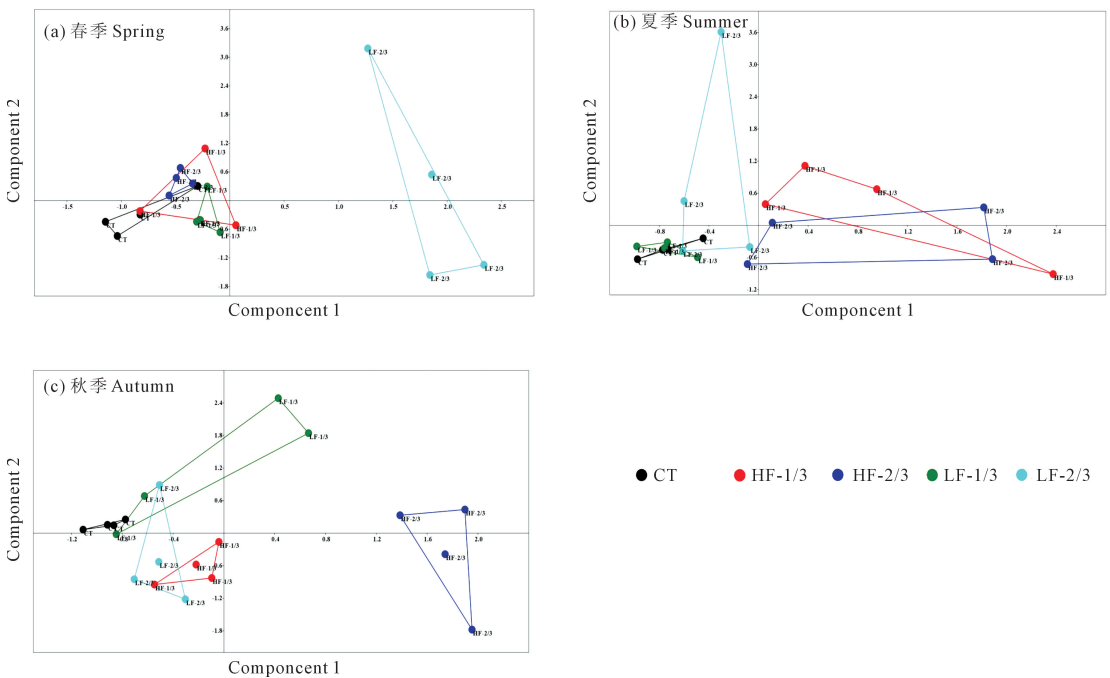


图 2 不同处理中型土壤动物群落的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of soil mesofauna communities across the treatments at the three sampling times

表 2 基于 Bray-Curtis 不同季节秸秆还田量和还田频率对中型土壤动物群落影响的多元方差分析
Table 2 Permutational multivariate analysis of variance based on Bray-Curtis distance measurement of the community composition of mesofauna between treatments in three seasons

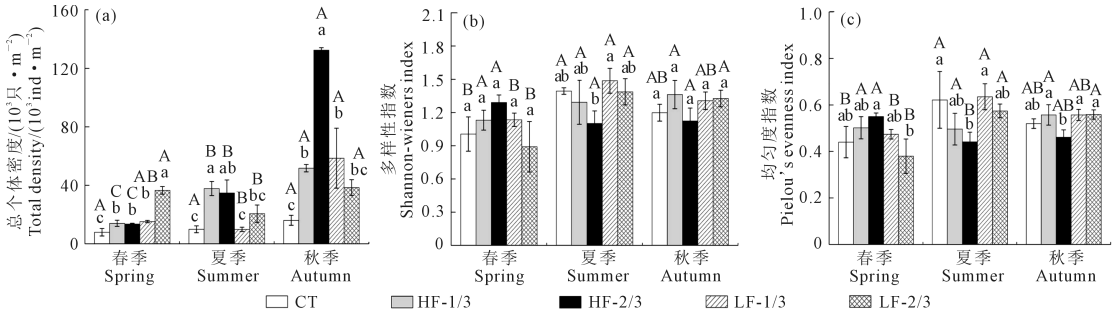
处理 Treatment	多元方差分析 Permutational multivariate analysis of variance											
	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn					
	HF-1/3	HF-2/3	LF-1/3	LF-2/3	HF-1/3	HF-2/3	LF-1/3	LF-2/3	HF-1/3	HF-2/3	LF-1/3	LF-2/3
CT	1.665	2.106	2.331	3.871*	3.189*	2.746*	0.539	1.549	3.564*	5.647*	1.852	2.136*
HF-1/3		1.123	0.768	3.558*		0.395	3.310*	1.781		5.292*	1.163	0.914
HF-2/3			1.819	5.712*		2.814*		1.622			2.355*	4.171*
LF-1/3				4.693*				1.499				0.937

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。下同

Note: * indicates significant level at $P < 0.05$, ** indicates significant level at $P < 0.01$. The same below.

表 3 中型土壤动物群落指数和主要类群密度的三因素方差分析
Table 3 Three-way ANOVA on the effect of straw mulching frequency, amount and season on community indices and dominant groups of soil mesofauna

项 Item	群落指数 Community index			主要类群 Dominant group of soil mesofauna							密度比 Density ratio	
	总个体密度 Total density	多样性指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	甲螨亚目 Oribatida	球节跳科 Hypogastridae	等节跳科 Isotomidae	长角跳科 Entomobryidae	双翅目幼虫 Diptera larvae	弹尾目 Collembola	弹尾目/弹尾目 Acari/Collembola (A/C)		
量 Amount (A)	13.056**	1.861	2.893	10.521**	25.645**	1.699	0.001	2.223	0.029			
频率 Frequency (F)	18.105**	0.283	1.296	13.391**	42.260**	0.284	0.273	2.199	2.375			
季节 Season (S)	59.878**	3.390*	2.446	26.021**	131.830**	7.699**	5.255**	0.288	10.896**			
A×F	6.991*	0.015	0.119	7.295**	6.031*	2.795	0.006	3.584*	0.409			
A×S	3.735*	0.173	0.165	2.145	19.869**	0.018	0.647	0.350	0.099			
F×S	15.471**	3.100*	7.482**	14.942**	37.803**	0.276	3.596*	4.750*	4.113*			
A×F×S	23.167**	1.877	1.927	24.797**	14.734**	6.431**	0.472	0.519	2.350			



注:不同大写字母表示同一处理不同季节间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一季节不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different seasons at $P<0.05$, and different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$. The same below.

图 3 不同处理样地中型土壤动物个体密度、多样性和均匀度比较 (平均值±标准误)

Fig.3 Variations of the density, shannon-wiener diversity and evenness indices of soil mesofauna in the treatments across the three seasons (mean ± SE)

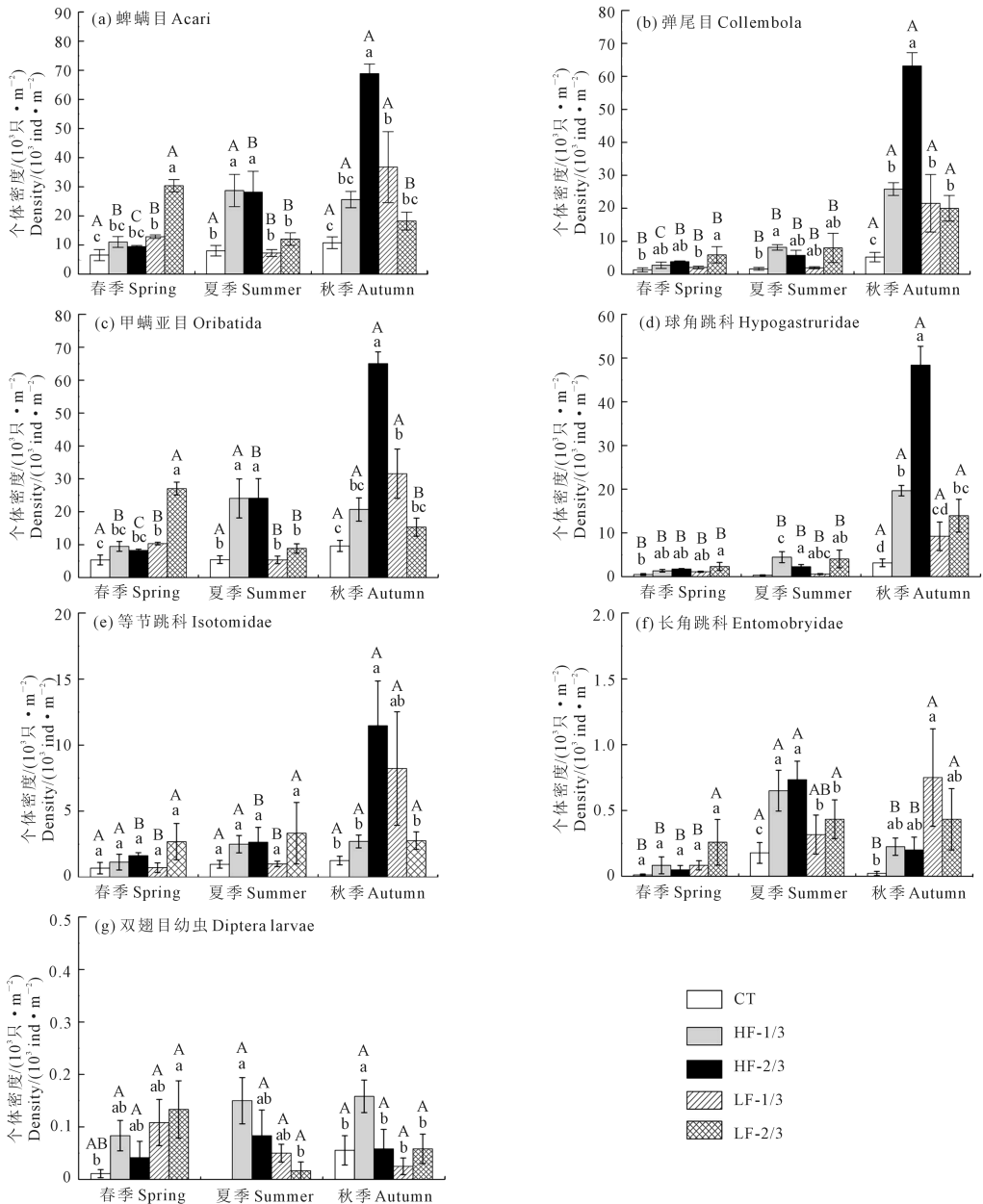


图 4 处理间主要中型土壤动物个体密度比较 (平均值±标准误)

Fig.4 Variations of density of the different taxonomic groups in the treatments across the three seasons (mean ± SE)

不同中型土壤动物类群对还田量和还田频率的响应模式不同。还田量、还田频率、采样季节及它们之间的交互作用对甲螨亚目和球角跳科密度都有显著影响(表3)。各采样季节甲螨亚目密度处理间差异与蜚蠊目一致,但球角跳科略有不同。球角跳科个体密度在春季相同还田量处理和相同还田频率处理间无显著差异,夏季 HF-1/3 处理显著高于 CT 和 LF-1/3 处理,秋季 HF-2/3 处理显著高于其它处理(图4d)。采样季节及其与还田频率、还田量的交互作用对等节跳科有显著影响。秋季 HF-2/3 处理的等节跳科个体密度显著高于 CT、HF-1/3 和 LF-2/3 处理(图4e)。采样季节以及其与还田频率的交互作用对长角跳科个体密度产生显著影响。在相同还田量处理中,夏季高频处理的长角跳科个体密度显著高于低频处理(HF-1/3>LF-1/3; HF-2/3>LF-2/3),秋季 LF-1/3 处理显著高于 CT 处理(图4f)。还田频率与还田量的交互作用,还田量和采样季节的交互作用均对双翅目幼虫密度有显著影响。春季 LF-2/3 处理的双翅目幼虫个体密度显著高于 CT 处理,夏季 HF-1/3 处理显著高于 LF-2/3 处理,秋季 HF-1/3 处理显著高于其他处理(图4g)。此外,以上中型土壤动物密度除双翅目幼虫和长角跳科外,多表现在秋季数量高。

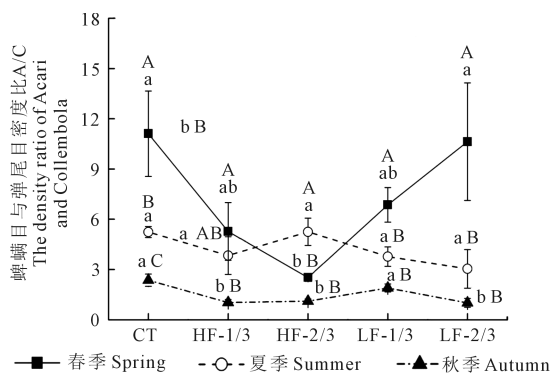


图5 处理间中型土壤动物螨类和弹尾类密度的比较(平均值±标准误)

Fig.5 Comparison of the density ratio of Acari and Collembola in the treatments across the three seasons (mean ± SE)

3 讨论

秸秆是农田生态系统中重要的生物资源,其经过淋溶、破碎、生物分解等过程可由复杂的有机化合物转变为简单的有机/无机化合物回归土壤,对增加土壤碳固存和维持土壤养分循环至关重要^[21]。免耕秸秆还田在降低土壤扰动的同时也对土壤环境产生一定的调控作用,如改善土壤水分、减缓地

表温度波动、降低土壤侵蚀、增加土壤有机质含量等^[22-23],为土壤动物生存提供了有利条件。本研究发现,相对常规耕作,秸秆还田显著提高了中型土壤动物个体密度,这与以往研究结果一致,如徐演鹏等^[24]研究发现秸秆还田增加了中小型土壤节肢动物个体数、类群数以及生物量;刘鹏飞等^[25]研究也表明,秸秆还田后中小型土壤动物密度相对常规耕作处理显著增加。因此,秸秆还田可提高黑土农田中型土壤动物密度。

本研究发现,还田频率较还田量更有利于中型土壤动物生存。尽管春季 LF-2/3 处理中型土壤动物密度最高,但主要是因为螨类显著高于其他处理,弹尾目并未与其他处理存在显著差异,因此 LF-2/3 处理的 A/C 远大于 1,且显著高于 HF-2/3 处理。A/C 是衡量土壤动物群落结构的一个常用指标,当 A/C 接近于 1 时,表征土壤动物群落结构较稳定;当 A/C 大于或小于 1 时,表征土壤动物群落结构不稳定^[26]。夏季中相同秸秆还田量下,高频处理中型土壤动物总个体密度高于低频处理, HF-1/3 处理显著高于 LF-1/3 处理, HF-2/3 处理高于 LF-2/3 处理,但未达到显著性水平;相同还田频率下,不同还田量处理间无显著差异。秋季 HF-2/3 处理中型土壤动物总个体密度显著高于其他处理且 A/C 接近 1; HF-1/3 处理的 A/C (1.02) 也显著低于 LF-1/3 处理 (1.89)。主要中型土壤动物类群个体密度在夏秋季整体表现为高频处理高于低频处理。秸秆作为输入土壤系统的外源有机物料,其输入量和输入频率不同会导致土壤动物可利用资源基质的差异。还田频率是秸秆补充的连续程度,频率越高补充的有机物料越连续,既影响秸秆数量,也影响秸秆本身的质量,进而影响土壤动物群落。分析认为,秸秆输入土壤后,可溶性易分解的物质(如可溶性糖)快速淋溶,而难分解物质(如木质素、纤维素等)需要在非生物和生物特别是微生物作用下缓慢分解^[27-28]。高频秸秆还田不断向土壤系统输入有机物料,为土壤动物提供了相对较多且易利用的养分。低频秸秆还田是在还田周期中少次多量输入,这样在分解后期不仅秸秆数量减少,而且存在较多的 C/N 较高的难分解物质,不易被土壤动物利用^[29]。因此,高频率秸秆还田相比低频率还田为土壤动物提供了更多的可利用物质,利于中型土壤动物生存,但在一定的还田频率下也需考虑还田量的多少。

各处理中型土壤动物群落受采样季节影响显著。水热条件是影响土壤生物的关键因素^[30]。本

研究地处于温带季风区,春季低温干旱多风导致各处理中型土壤动物个体密度偏低。此季节高量秸秆覆盖还田相对低量秸秆还田为土壤动物起到了较好的保护作用。夏季降水充沛、气温较高,有利于地上作物、杂草生长,生境异质性较高利于多种生物生存;该季节中 LF-1/3 处理多样性指数显著高于 HF-2/3 处理,同时其与 CT 处理的均匀度指数也显著高于 HF-2/3 处理,主要在于地表秸秆量较多会影响土壤的光照、温度和水分,通过影响环境条件而限制地面杂草生长^[5,31],导致其与裸地或低频低量秸秆还田样地生境异质性低。秋季降水量减少但气温低于夏季、蒸发量减少、土壤湿润,利于一些中型土壤动物生存。因此,不同季节气温和降水差异导致环境改变均会引起中型土壤动物群落对秸秆还田频率和还田量响应的变化。

4 结 论

秸秆还田相对常规耕作显著提高了中型土壤动物的个体密度。综合比较秸秆还田量和还田频率发现,春季 LF-2/3 处理中型土壤动物总个体密度显著高于其他处理但群落 A/C 较高,夏季中相同秸秆还田量下,高频还田处理中型土壤动物总个体密度高于低频还田处理, HF-1/3 处理是 LF-1/3 处理 3.8 倍, HF-2/3 处理是 LF-2/3 处理 1.6 倍;相同还田频率下,不同还田量处理间无显著差异。秋季 HF-2/3 处理显著高于其他处理且 A/C 接近 1。主要中型土壤动物类群个体密度夏秋季整体表现为高频处理高于低频处理。不同季节中型动物群落对秸秆还田频率和还田量的响应受气温和降水的影响。整体来看,高频秸秆还田相比低频秸秆还田利于中型土壤动物生存,但在一定的还田频率下还需考虑还田量。

参 考 文 献:

- [1] 张卫信,申智锋,邵元虎,等.土壤生物与可持续农业研究进展[J].生态学报,2020,40(10):3183-3206.
ZHANG W X, SHEN Z F, SHAO Y H, et al. Soil biota and sustainable agriculture: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3183-3206.
- [2] BRUSSAARD L, DE RUITER P C, BROWN G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 121: 233-244.
- [3] HOBBS P R, SAYRE K, GUPTA R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1491): 543-555.
- [4] 鲁向晖,隋艳艳,王飞,等.保护性耕作技术对农田环境的影响研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):66-72.
LU X H, SUI Y Y, WANG F, et al. The conservation tillage technique and its influences on farmland environment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(3): 66-72.
- [5] RANAIVOSON L, NAUDIN K, RIPOCHE A, et al. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2017, 37(4): 26.
- [6] SHARMA P, SINGH A, KAHLON C S, et al. The role of cover crops towards sustainable soil health and agriculture-a review paper[J]. American Journal of Plant Sciences, 2018, 9: 1935-1951.
- [7] 邵元虎,张卫信,刘胜杰,等.土壤动物多样性及其生态功能[J].生态学报,2015,35(20):6614-6625.
SHAO Y H, ZHANG W X, LIU S J, et al. Diversity and function of soil fauna[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [8] 林英华,张夫道,杨学云,等.农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究[J].中国农业科学,2004,37(6):871-877.
LIN Y H, ZHANG F D, YANG X Y, et al. Study on the relationship between agricultural soil fauna and soil physicochemical properties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(6): 871-877.
- [9] 孙新,李琪,姚海凤,等.土壤动物与土壤健康[J].土壤学报,2021,58(5):1073-1083.
SUN X, LI Q, YAO H F, et al. Soil fauna and soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1073-1083.
- [10] YAN S K, SINGH A N, FU S L, et al. A soil fauna index for assessing soil quality [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47: 158-165.
- [11] STUBBS T L, KENNEDY A C, SCHILLINGER W F. Soil ecosystem changes during the transition to no-till cropping[J]. Journal of Crop Improvement, 2004, 11: 105-135.
- [12] BRENNAN A, FORTUNE T, BOLGER T. Collembola abundances and assemblage structures in conventionally tilled and conservation tillage arable systems[J]. Pedobiologia, 2006, 50(2): 135-145.
- [13] 杨旭,高梅香,张雪萍,等.秸秆还田对耕作黑土中小型土壤动物群落的影响[J].生态学报,2017,37(7):2206-2216.
YANG X, GAO M X, ZHANG X P, et al. Effect of straw-returning management on meso-micro soil fauna in a cultivated black soil area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2206-2216.
- [14] 朱强根,朱安宁,张佳宝,等.黄淮海平原小麦保护性耕作对土壤动物总量和多样性的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(8):1766-1772.
ZHU Q G, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Effect of conservation tillage on soil fauna in wheat field of Huang-Huai-Hai plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(8): 1766-1772.
- [15] 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.
- [16] 连旭,隋玉柱,武海涛,等.秸秆还田对黑土农田土壤甲螨群落结构的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(1):134-142.
LIAN X, SUI Y Z, WU H T, et al. Effect of on-site recycling of straw on community structure of soil oribatida in black soil farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(1): 134-142.
- [17] 杨枫,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[J].水土保持研究,2013,20(2):145-150.
YANG P, WANG H X, YUE J. Ecological distribution of middle-small-size soil faunas under conservation tillage and straw mulch con-

- ditions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2): 145-150.
- [18] 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 等. 玉米秸秆还田量对黑土区农田地面节肢动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 235-243.
LIU P F, HONG M, MEI L, et al. Impact of quantity of returned corn straw on the cropland ground arthropod community in a black soil area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 235-243.
- [19] 钟觉民. 幼虫分类学[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
ZHONG J M. Larval taxonomy [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1990.
- [20] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
YIN W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [21] CARVALHO J L N, HUDIBURG T W, FRANCO H C J, et al. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9: 1333-1343.
- [22] 郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 226-236.
ZHENG H B, LUO Y, SUI P X, et al. Effects of straw returning on soil water characteristics and physical properties of black soil in Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 42(1): 235-245.
- [23] CLEMENTE J S, SIMPSON M J, SIMPSON A J, et al. Comparison of soil organic matter composition after incubation with maize leaves, roots, and stems[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 86-96.
- [24] 徐演鹏, 谭飞, 胡彦鹏, 等. 秸秆还田对黑土区农田中小型土壤节肢动物群落的影响[J]. *动物学杂志*, 2015, 50(2): 262-271.
XU Y P, TAN F, HU Y P, et al. Effect of straw returning on cropland soil meso- and micro-arthropods community in the black soil area [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2015, 50(2): 262-271.
- [25] 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 等. 秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 139-146.
LIU P F, HONG M, CHANG F, et al. Impact of straw returning on cropland soil mesofauna community in the western part of black soil area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 139-146.
- [26] 叶水送, 夏灵丹, 方燕, 等. 上海临港新城土壤动物群落结构时空格局研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2011, 50(3): 282-287, 295.
YE S S, XIA L D, FANG Y, et al. Study on the spatiotemporal pattern of soil animal community structure in Lingang New City, Shanghai [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2011, 50(3): 282-287, 295.
- [27] XU Y H, CHEN Z M, FONTAINE S, et al. Dominant effects of organic carbon chemistry on decomposition dynamics of crop residues in a mollisol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 221-232.
- [28] 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(1): 335-351.
- [29] SAWYER J E, WOLI K P, BARKER D W, et al. Straw removal impact on corn plant biomass, nitrogen, and use efficiency[J]. *Agronomy, Soils & Environmental Quality*, 2017, 109(3): 802-810.
- [30] WIWATWITAYA D, TAKEDA H. Seasonal changes in soil arthropod abundance in the dry evergreen forest of Northeast Thailand, with special reference to collembola communities[J]. *Ecological Research*, 2005, 20: 59-70.
- [31] DORN B, JOSSI W, HEIJDEN M G A. Weed suppression by cover crops: comparative on-farm experiments under integrated and organic conservation tillage[J]. *Weed Research*, 2015, 55: 586-597.

(上接第233页)

- [32] 朱小梅, 王建红, 温祝桂, 等. 不同绿肥品种提升滩涂生地土壤养分及酶活性效应的比较[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(12): 307-310.
ZHU X M, WANG J H, WEN Z G, et al. Comparison of effects of different green manure varieties on improving soil nutrients and enzyme activities in mudflat green land[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 307-310.
- [33] 马嵩科, 霍克, 张冬霞, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(6): 120-133.
MA S K, HUO K, ZHANG D X, et al. Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 120-133.
- [34] 王晓春, 杨伟迪, 高婷. 盐碱地紫花苜蓿根际土壤细菌群落多样性分析[J]. *北方园艺*, 2023, (23): 75-82.
WANG X C, YANG W D, GAO T. Analysis on bacterial diversity of alfalfa rhizosphere soil in saline-alkali land [J]. *Northern Horticulture*, 2023, (23): 75-82.
- [35] 刘颖, 李继伟, 刘杉, 等. 芸薹属绿肥对烤烟根系及土壤酶活性的影响[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(3): 74-79.
LIU L, LI J W, LIU S, et al. The effect of *Brassica* green manure on the root system and soil enzyme activity of tobacco[J]. *Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science)*, 2017, 38(3): 74-79.
- [36] 谭杰辉, 付双军, 南丽丽, 等. 轮作绿肥对黄土高原半干旱区土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(5): 116-123.
TAN J H, FU S J, NAN L L, et al. Effects of green manure crop rotation on soil microbial quantity and enzyme activity in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(5): 116-123.
- [37] 彭映平, 和文祥, 王紫泉, 等. 黄土高原旱区绿肥定位试验土壤化学性质及酶活性特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 131-138, 149.
PENG Y P, HE W X, WANG Z Q, et al. Soil chemical properties and enzyme activities in long-term green manure plot in Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(9): 131-138, 149.
- [38] YUNKE Q, JIE T, ZHAOYANG L, et al. Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of Northeast China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(23): 10095.
- [39] GARCIA C, ROLDAN A, HERNANDEZ T. Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 193-202.