

DOI: 10.5846/stxb201910302293

张蕊, 李佳, 高梅香. 玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜱螨目和弹尾目群落结构的影响. 生态学报, 2020, 40(22): 8315-8325.

Zhang R, Li J, Gao M X. Effects of corn stalk treatments on community structure of acarina and collembola in cropland in the black soil region in winter. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8315-8325.

玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜱螨目和弹尾目群落结构的影响

张 蕊^{1,2}, 李 佳^{1,2}, 高梅香^{3,*}

1 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2 哈尔滨师范大学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

3 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211

摘要:为探讨 3 种不同的玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜱螨目和弹尾目群落结构的影响,于 2018 年冬季分别对机收秸秆还田(MH)、人工收获秸秆移出(AH)、人工收获秸秆未移出(NR)3 种不同的玉米秸秆处理方式下,土壤中蜱螨目和弹尾目的群落结构进行调查。共捕获蜱螨目和弹尾目 1713 只 22 种, MH、AH 和 NR 分别捕获 739 只 16 种、401 只 17 种、573 只 16 种。MH 中蜱螨目和弹尾目的个体数量最高, AH 的物种数最高, NR 具有最高的 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀性指数和 Simpson 优势度指数。3 种不同的玉米秸秆处理方式对蜱螨目和弹尾目个体数、物种数和群落多样性指数均无显著影响, CCA 分析结果表明, 不同的土壤因子对蜱螨目和弹尾目的个体数和物种数影响不同, 优势种和常见种的分布与土壤全磷、含水量和全氮显著相关。研究结果表明, 蜱螨目是冬季研究区内的优势类群, NR 更有利于提高蜱螨目和弹尾目群落结构的多样性, 对蜱螨目和弹尾目的群落结构和多样性有一定的保护作用, 本研究为冬季黑土农田土壤动物多样性研究与保护提供理论依据。

关键词:冬季; 玉米秸秆; 处理方式; 蜱螨目; 弹尾目; 群落结构

Effects of corn stalk treatments on community structure of acarina and collembola in cropland in the black soil region in winter

ZHANG Rui^{1,2}, LI Jia^{1,2}, GAO Meixiang^{3,*}

1 College of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

3 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: This experiment aims to investigate the effects of three different harvesting methods of corn stalks on acarina and collembola community structures in cropland in the black soil region in winter. In 2018, we investigated the community structures of soil acarina and collembola in three plots with three different harvesting methods of corn stalks: machine-harvested corn stalks returning to the field (MH), artificially harvested corn stalks removing (AH), and artificially harvested corn stalks not removing (NR). A total of 1713 individuals belonging to 22 species were captured, of which 739 belonging to 16 species were in the MH plot, 401 belonging to 17 species were in the AH plot, 573 belonging to 16 species were in the NH plot. The highest individuals and species numbers of acarina and collembola were detected in the MH and AH plot, respectively. The highest values of Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index, and Simpson

基金项目:国家自然科学基金项目(41871042, 41430857); 国家科技基础资源调查专项(2018FY100300)

收稿日期:2019-10-30; **网络出版日期:**2020-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gmx102@hotmail.com

dominance index were all in the NR plot. Three harvesting methods of corn stalks had no significant effects on individuals, species numbers and diversity indices of acarina and collembola communities. The results of Canonical Correspondence Analysis (CCA) showed that soil factors had different effects on individuals and species numbers of acarina and collembola communities. The distributions of dominant and common species were significantly correlated with soil total phosphorus, water content, and total nitrogen content. This study suggests that acarina is the dominant group in the winter in the study area. NR is helpful to improving the diversity of the acarina and collembola community, and it has a positive effect on the protection of the structure and diversity of acarina and collembola community. This study provides a theoretical basis for the research and conservation of soil animal diversity in black soil cropland in winter.

Key Words: winter; corn straw; treatment method; acarina; collembola; community structure

秸秆是农田生态系统物质循环的重要物质基础^[1],是农业生产中重要的生物质资源,秸秆分解后,能有效增加土壤有机质含量,改变土壤物理结构,进而影响土壤肥力和土壤质量^[2-4]。中小型土壤动物是农田生态系统物质循环的重要组成部分^[5],蜚蠊目和弹尾目是分布广、种类和数量极为丰富的中小型土壤动物,是土壤动物和土壤生态系统的重要组成部分,在改善土壤理化性质、提高土壤肥力、促进植物对养分的吸收等方面发挥关键的作用^[6-9],并且能够对环境的变化迅速做出反应^[10-11]。近年来,随着对秸秆在农田生态系统的重要性认知的不断提高,秸秆对土壤动物群落的影响日益受到关注,但国内外的研究主要关注生长季秸秆对土壤动物群落结构、多样性、分布格局等方面的影响^[12-19],有关冬季秸秆对土壤动物影响的研究鲜见报道。而冬季的气温变化是东北地区气温变化中最为明显的季节^[20-21]。因而,对东北黑土区冬季蜚蠊目和弹尾目群落的研究,有利于进一步揭示中高纬度生物多样性对全球变化的响应。东北黑土农田玉米秸秆处理方式主要为机收秸秆还田、人工收获秸秆移出和人工收获秸秆未移出,不同的玉米秸秆处理方式可能会对农田土壤动物群落结构和多样性产生影响,继而对其生态系统功能产生潜在影响。本研究在典型的东北黑土农田分布区,通过调查 3 种不同的玉米秸秆处理样地的蜚蠊目和弹尾目,来揭示冬季玉米秸秆对土壤动物群落的影响。

本研究基于黑龙江省哈尔滨市呼兰区黑土农田生态系统,以土壤中的蜚蠊目和弹尾目为研究对象,阐明以下科学问题:冬季黑土农田 3 种不同的玉米秸秆处理方式(1)对蜚蠊目和弹尾目群落个体数和物种数的影响;(2)对蜚蠊目和弹尾目的群落结构组成特征的影响;(3)对蜚蠊目和弹尾目群落多样性的影响;并说明冬季土壤因子对蜚蠊目和弹尾目群落的影响。旨在揭示冬季 3 种不同的玉米秸秆处理方式对蜚蠊目和弹尾目群落的影响,促进黑土农田土壤动物群落生态学的进展。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市呼兰区石山镇石人村的黑土农田(46°17'N,126°51'E),属北温带大陆性季风气候,年平均气温 3.3℃,降水多集中在 7—9 月,历年平均降雨量 500.4 mm,平均年无霜期 142.7 d。研究区属松嫩平原,海拔 115—150 m。截至 2016 年,呼兰区共有土地资源总面积 21.4 万 hm²,已开垦耕地 15.5 万 hm²,占总面积 72.4%,可耕地中土质养分含量高,宜耕性良好的黑土、黑钙土居多,占耕地面积的 70%以上,呼兰境内以玉米为主要作物,是重要商品粮基地。

2 研究方法

2.1 实验设计

实验样地设置在具有 30 年以上开发历史的黑土农田,且连续 10 年种植作物均为玉米,实验当年种植品种为正泰 1 号。将实验样地设置在农田的核心区域,与边缘的田间小路、林带、沟渠至少保持 50 m 以上的距离,与村庄保持 500 m 以上的距离。2018 年黑龙江省人民政府办公厅禁止秸秆露天焚烧政策出台后,当地绝大多数农民对秸秆的处理方式主要有 3 种,分别为机收秸秆还田(MH, machine-harvested corn stalks returning

to the field), 人工收获秸秆移出 (AH, artificially harvested corn stalks removing) 和人工收获秸秆未移出 (NR, artificially harvested corn stalks not removing)。MH 是秋收时使用玉米联合收割机将秸秆粉碎后直接覆盖地表; AH 是秋收时使用镰刀在秸秆距离地面约 15 厘米处收割, 并将秸秆移出田间, 留茬过冬; NR 的收割方式同 AH, 但秸秆不移出田间也不粉碎, 直接做成秸秆垛覆盖在地表, 每垛玉米秸秆之间至少间隔 50 cm。本实验选择这 3 种不同的玉米秸秆处理方式的农田作为样地(图 1), 3 种不同的玉米秸秆处理时间为 2018 年 10 月 1 日到 8 日之间, 每种玉米秸秆处理方式设置 3 个重复样地, 每个样地的面积至少为 6.5 m×200 m。9 个样地随机排列, 同种玉米秸秆处理方式之间不相邻, 且至少间隔 10 m 以上。

2.2 野外样品采集与室内实验分析

本研究于 2018 年 12 月 8 日进行土壤动物取样, 当日为研究区入冬以来最寒冷的一天, 日平均气温 -18.5℃, 低于当月均温 -13.5℃。在每个样地内随机选取不相邻的 3 垄, 在每垄的垄台上随机选取 1 个采样点, 每个样地设置 3 个采样点, 每个采样点之间至少间隔 50 m。MH、AH 样地分别在每个采样点挖取 1 个 20 cm×20 cm×20 cm 的土柱; 在 NR 样地将覆盖垄台的秸秆垛拨开, 然后在每个采样点挖取 1 个 20 cm×20 cm×20 cm 的土柱。将每个采集的样品放在面积约 9 m² 的台布上, 弄碎并充分混匀后称取 1 kg 土样作为一个样品。本实验分别采集土壤动物和土壤分析样品 27 个, 即 3 种玉米秸秆处理样地×3 重复样地×3 采样点。回到室内采用烘干法进行土壤含水量的测定; 采用 Tullgren 漏斗法进行蜚蠊目和弹尾目分离, 将样品置于室内 10d 自然风干。分离得到的蜚蠊目和弹尾目于 95% 酒精中保存。在显微镜下观察、分离和鉴定, 并统计个体数量和物种数量, 蜚蠊目和弹尾目分别鉴定到种^[22-25], 成虫和若虫分开计数, 仅将成体用于后续分析^[26-27]。土壤有机质、全氮、全磷由中国科学院东北地理与农业生态研究所公共技术服务中心测定 (<http://service.iga.cas.cn/>)。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 土壤动物群落基本特征

以每个采样点获取的数据作为一个样本, 3 种不同的玉米秸秆处理方式的数据分别作为 3 个群落, 计算蜚蠊目和弹尾目群落(蜚蠊目和弹尾目群落的总和, 后统称为中小型土壤动物群落)、蜚蠊目群落和弹尾目群落的个体数、物种数和划分多度等级。按照个体数占总捕获量的百分比来划分多度等级, 个体数占总捕获量 10% 以上为优势种(+++)、个体数占总捕获量 1%—10% 为常见种(++)、个体数占总捕获量 1% 以下为稀有种(+)

本研究使用 Shapiro-Wilk 检验方法对土壤动物的个体数和物种数进行正态分布检验, 对不符合正态分布的数据进行 $\ln(x+1)$ 转换, 使其符合或近似符合正态分布。3 种不同的玉米秸秆处理方式下土壤动物群落个体数和物种数等数据间的差异显著性, 利用单因素方差分析 (Oneway-ANOVA) 和多重比较 (Tukey HSD 方法) 来进行检验。

2.3.2 群落多样性

采用以下方法^[28-29] 计算土壤动物群落的多样性:

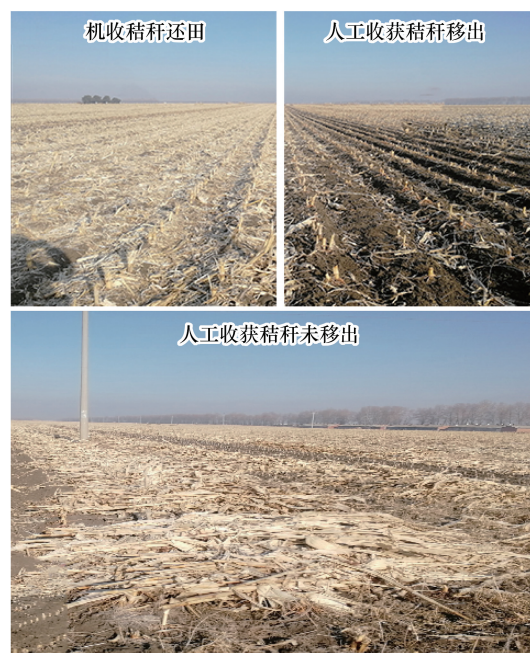


图 1 3 种不同的玉米秸秆处理方式

Fig.1 Three different harvesting methods of corn stalks

(1) Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

(2) Pielou 均匀性指数:

$$J = H' / \ln S$$

(3) Simpson 优势度指数:

$$C = \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

(4) Margalef 丰富度指数:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中, P_i 为群落第 i 个物种的个体数占总个体数的比例; S 为群落所有物种数; n_i 为该群落内第 i 个物种的个体数; N 为全部物种的总个体数。

2.3.3 典范对应分析

典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 是基于对应分析发展而来的一种排序方法, 将对应分析与多元回归分析相结合, 每一步计算均与环境因子进行回归, 又称多元直接梯度分析^[20]。在典范对应分析中, 稀有种 (<1%) 的存在会影响结果, 使最终解释与实际有所偏差。因此在进行典范对应分析时, 先将稀有种 (<1%) 剔除再对其他物种与土壤因子进行相关性分析, 分析每个土壤环境因子对物种分布的解释量是否具有显著性。

2.3.4 通径分析

通径分析是由 Sewall Wright 在 1921 年提出的分析变量间因果关系的一种多元统计分析方法, 可研究自变量对因变量的直接重要性和间接重要性^[30]。本文采用通径分析方法确定在种的分类阶元上, 土壤动物优势种和常见种对土壤动物群落多样性指数的直接和间接影响及综合效应。

在 Microsoft Excel 2010 中对原始数据进行基本的分析和预处理。使用 R 3.5.1 软件中的 *vegan* 软件包中的 *shapiro.test* 函数进行正态分布检验; *aov* 函数进行单因素方差分析; *diversity* 函数计算物种多样性指数; *cca* 函数进行典范对应分析; *permutest* 函数进行蒙特卡罗置换检验; 使用 Multcomp 软件包中的 *glht* 函数进行多重比较分析。通径分析采用 SPSS 23.0 软件完成。

3 结果与分析

3.1 3 种不同的玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落组成特征

共采集中小型土壤动物 1713 只 22 种 (表 1), 捕获蜱螨目的个体数 ($P < 0.001$) 和物种数 ($P < 0.001$) 均显著的多于弹尾目。其中, 优势种为 *Ramusella sengbuschi* 和 *Polyaspinus* sp., 优势种共占捕获总个体数的 75.72%; 常见种为 *Epilohmannia ovata*、*Pachylaelaps* sp.、*Scheloribates laevigatus*、*Mesostigmata* sp.、*Thalassaphorura encarpata* 和 *Isotomiella minor*, 常见种占捕获总个体数的 19.74%; 其余 14 种为稀有物种, 占捕获总个体数的 4.56%。3 种不同的玉米秸秆处理方式间, AH 的个体数最少, 仅有 401 只, 占总个体数的 23.41%, MH 的个体数最多, 有 739 只, 占总个体数的 43.14%; 物种数以 AH 最多, 为 17 种, MH 和 NR 最少, 均为 16 种 (表 1)。

3.1.1 3 种不同的玉米秸秆处理方式下蜱螨目群落组成特征

共捕获蜱螨目 1624 只 12 种。蜱螨目个体数表现为 $MH > NR > AH$; 物种数表现为 $AH = NR > MH$ 。MH 的优势种为 *Ramusella sengbuschi* 和 *Polyaspinus* sp., 常见种为 *Epilohmannia ovata*、*Pachylaelaps* sp.、*Scheloribates laevigatus* 和 *Mesostigmata* sp., 其余 3 种为稀有种。AH 的优势种为 *Ramusella sengbuschi*、*Polyaspinus* sp. 和 *Scheloribates laevigatus*, 常见种为 *Epilohmannia ovata*、*Haplozetes* sp.、*Scheloribates laevigatus*、*Tectocepheus velatus* 和 *Mesostigmata* sp., 其余 2 种为稀有种。NR 优势种为 *Ramusella sengbuschi*、*Polyaspinus* sp. 和 *Mesostigmata* sp., 常见种为 *Epilohmannia ovata* 和 *Scheloribates laevigatus*, 其余 5 种为稀有种。*Ramusella sengbuschi* 和 *Polyaspinus*

sp.在3种不同的玉米秸秆处理方式下,均为优势种,占捕获蜚螨目个体数的79.87%。单因素方差分析显示,3种不同的玉米秸秆处理方式下,蜚螨目的个体数、物种数差异不显著(表2)。

表1 3种不同玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落组成及优势度

Table 1 Dominance and composition of meso-micro soil fauna community under three different harvesting methods of corn stalks

物种 Species		机收秸秆还田 MH		人工收获秸秆移出 AH		人工收获秸秆未移出 NR		个体数/只 Individuals	百分比/% (优势度) Dominance
		个体数/只 Individuals	百分比/% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比/% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比/% (优势度) Dominance		
蜚螨目 Acarina	M1	29	3.92(++)	6	1.50(++)	15	2.62(++)	50	2.92(++)
	M2	—	—	—	—	1	0.17(+)	1	0.06(+)
	M3	3	0.41(+)	8	2.00(++)	—	—	11	0.64(+)
	M4	229	30.99(+++)	142	35.41(+++)	178	31.06(+++)	549	32.05(+++)
	M5	—	—	4	1.00(++)	2	0.35(+)	6	0.35(+)
	M6	380	51.42(+++)	156	38.90(+++)	212	37.00(+++)	748	43.67(+++)
	M7	13	1.76(++)	3	0.75(+)	4	0.70(+)	20	1.17(++)
	M8	1	0.14(+)	2	0.50(+)	1	0.17(+)	4	0.23(+)
	M9	1	0.14(+)	—	—	—	—	1	0.06(+)
	M10	34	4.60(++)	42	10.47(+++)	49	8.55(++)	125	7.30(++)
	M11	—	—	6	1.50(++)	4	0.70(+)	10	0.58(+)
	M12	11	1.49(++)	17	4.24(++)	71	12.39(+++)	99	5.78(++)
弹尾目 Collembola	T1	2	0.27(+)	2	0.50(+)	6	1.05(++)	10	0.58(+)
	T2	8	1.08(++)	—	—	13	2.27(++)	21	1.23(++)
	T3	14	1.89(++)	2	0.50(+)	7	1.22(++)	23	1.34(++)
	T4	—	—	2	0.50(+)	—	—	2	0.12(+)
	T5	1	0.14(+)	—	—	—	—	1	0.06(+)
	T6	—	—	1	0.25(+)	1	0.17(+)	2	0.12(+)
	T7	5	0.68(+)	4	1.00(++)	2	0.35(+)	11	0.64(+)
	T8	6	0.81(+)	—	—	—	—	6	0.35(+)
	T9	—	—	1	0.25(+)	—	—	1	0.06(+)
	T10	2	0.27(+)	3	0.75(+)	7	1.22(++)	12	0.70(+)
总个体数 Individual		739		401		573		1713	
物种数 Species		16		17		16		22	

M1: *Epilohmannia ovata*; M2: *Galumna cuneata*; M3: *Haplozetes* sp.; M4: *Ramusella sengbuschi*; M5: *Scheloribates laevigatus*; M6: *Polyaspinus* sp.; M7: *Pachylaelaps* sp.; M8: *Trachytes* sp.; M9: *Ololaelaps* sp.; M10: *Scheloribates laevigatus*; M11: *Tectocepheus velatus*; M12: *Mesostigmata* sp.; T1: *Orchesellides sinensis*; T2: *Thalassaphorura encarpata*; T3: *Isotomiella minor*; T4: *Folsomides parvulus*; T5: *Metisotoma grandiceps*; T6: *Pseudisotoma sensibilis*; T7: *Desoria* sp.; T8: *Parisotoma cf ekmani*; T9: 弹尾目未定种1; T10: 弹尾目未定种2; MH: Machine-harvested corn stalks returning to the field; AH: Artificially harvested corn stalks removing; NR: Artificially harvested corn stalks not removing

3.1.2 3种不同的玉米秸秆处理方式下弹尾目群落组成特征

共捕获弹尾目89只10种。MH、AH和NR分别捕获38、15和36只,分别隶属于7、7和6种。MH的优势种为 *Thalassaphorura encarpata*、*Isotomiella minor*、*Desoria* sp.和 *Parisotoma cf ekmani*,占MH个体数的86.84%,其余3种为常见种,占个体数13.16%。AH的优势种为 *Orchesellides sinensis*、*Isotomiella minor*、*Folsomides parvulus*、*Desoria* sp.和弹尾目未定种2,占AH个体数的86.66%,其余2种为常见种,占个体数13.34%。NR的优势种为 *Orchesellides sinensis*、*Thalassaphorura encarpata*、*Isotomiella minor*和弹尾目未定种2,占NR个体数的86.52%,其余2种为常见种占个体数13.48%。MH、AH和NR均无稀有种,*Isotomiella minor*在MH、AH和NR均为优势种。3种不同的玉米秸秆处理方式下,弹尾目的个体数和物种数存在一定的差异,但单因素方差结果表明差异不显著(表3)。

表 2 3 种不同玉米秸秆处理方式下蜱螨目群落组成及优势度

Table 2 Dominance and composition of acarina community under three different harvesting methods of corn stalks									
物种 Species		机收秸秆还田 MH		人工收获秸秆移出 AH		人工收获秸秆未移出 NR		个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance
		个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance		
蜱螨目	M1	29	4.14(++)	6	1.55(++)	15	2.79(++)	50	3.08(++)
Acarina	M2	—	—	—	—	1	0.19(+)	1	0.06(+)
	M3	3	0.43(+)	8	2.07(++)	—	—	11	0.68(+)
	M4	229	32.67(+++)	142	36.79(+++)	178	33.15(+++)	549	33.81(+++)
	M5	—	—	4	1.04(++)	2	0.37(+)	6	0.37(+)
	M6	380	54.21(+++)	156	40.41(+++)	212	39.48(+++)	748	46.06(+++)
	M7	13	1.85(++)	3	0.78(+)	4	0.74(+)	20	1.23(++)
	M8	1	0.14(+)	2	0.52(+)	1	0.19(+)	4	0.25(+)
	M9	1	0.14(+)	—	—	—	—	1	0.06(+)
	M10	34	4.85(++)	42	10.88(+++)	49	9.12(++)	125	7.70(++)
	M11	—	—	6	1.55(++)	4	0.74(+)	10	0.62(+)
	M12	11	1.57(++)	17	4.40(++)	71	13.22(+++)	99	6.10(++)
个体数 Individual		701		386		537		1624	
物种数 Species		9		10		10		12	

表 3 3 种不同玉米秸秆处理方式下弹尾目群落组成及优势度

Table 3 Dominance and composition of collembola community under three different harvesting methods of corn stalks									
物种 Species		机收秸秆还田 MH		人工收获秸秆移出 AH		人工收获秸秆未移出 NR		个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance
		个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance	个体数/只 Individuals	百分比% (优势度) Dominance		
弹尾目	T1	2	5.26(++)	2	13.33(+++)	6	16.67(+++)	10	11.24(+++)
Collembola	T2	8	21.05(+++)	—	—	13	36.11(+++)	21	23.60(+++)
	T3	14	36.84(+++)	2	13.33(+++)	7	19.44(+++)	23	25.84(+++)
	T4	—	—	2	13.33(+++)	—	—	2	2.25(++)
	T5	1	2.63(++)	—	—	—	—	1	1.12(++)
	T6	—	—	1	6.67(++)	1	2.78(++)	2	2.25(++)
	T7	5	13.16(+++)	4	26.67(+++)	2	5.56(++)	11	12.36(+++)
	T8	6	15.79(+++)	—	—	—	—	6	6.74(++)
	T9	—	—	1	6.67(++)	—	—	1	1.12(++)
	T10	2	5.26(++)	3	20.00(+++)	7	19.44(+++)	12	13.48(+++)
个体数 Individual		38		15		36		89	
物种数 Species		7		7		6		10	

3.2 3 种不同的玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落多样性变化特征

从表 4 可以得知,NR 的 Shannon-Wiener 多样性指数高于 MH 和 AH,说明 NR 促进了冬季黑土农田中小型土壤动物群落的多样性。Pielou 均匀性指数和 Simpson 优势度指数依次是 NR>AH>MH,说明 NR 具有最高的均匀性,此样地中各物种分配的最均匀,NR 的 Simpson 优势度指数高于 MH 和 AH,说明 NR 中某个物种的个体数占该生境总个体数的比例较高,这是蜱螨目物种 *Polyaspinus* sp.,其个体数占 NR 总个体数的 37.00%。Margalef 丰富度指数为 AH> NR> MH,说明 AH 样地中小型土壤动物群落的丰富程度最高,生物种类最多。

表 4 3 种不同的玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落的多样性

Table 4 Diversity of meso-micro soil fauna community under three different harvesting methods of corn stalks												
中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	多样性指数 Shannon-Wiener			均匀性指数 Pielou			优势度指数 Simpson			丰富度指数 Margalef		
	蜚蠊目 Acarina	弹尾目 Collembola		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	蜚蠊目 Acarina	弹尾目 Collembola	中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	蜚蠊目 Acarina	弹尾目 Collembola	中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	蜚蠊目 Acarina	弹尾目 Collembola
MH	1.38	1.15	1.65	0.49	0.52	0.85	2.73	2.46	4.37	2.27	1.22	1.64
AH	1.60	1.43	1.84	0.56	0.62	0.94	3.43	3.18	5.76	2.66	1.51	2.21
NR	1.67	1.44	1.56	0.60	0.63	0.87	3.87	3.41	4.20	2.36	1.43	1.39

3 种不同的玉米秸秆处理方式下,优势种和常见种对中小型土壤动物群落多样性指数的通径分析表明,*Thalassaphorura encarpata* 对群落多样性指数的总效应最大,其次是 *Mesostigmata* sp.和 *Scheloribates laevigatus*;与蜚蠊目物种相比弹尾目的两个物种对群落多样性指数的直接效应较小,但总效应却相对提高;弹尾目 *Thalassaphorura encarpata* 与其他物种共生环境中有助于提升群落的多样性水平,并且弹尾目 *Thalassaphorura encarpata* 通过蜚蠊目对提高群落多样性的间接贡献率要大于其直接贡献率(表 5)。

表 5 3 种不同的玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落对多样性指数影响的通径分析

Table 5 Path analysis of the influence of meso-micro soil fauna community on diversity index under three different harvesting methods of corn stalks

物种 Species	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect								总效应 Total effect
		通过 M1	通过 M4	通过 M6	通过 M7	通过 M10	通过 M12	通过 T2	通过 T3	
M1	0.133	—	0.0239	0.0273	−0.0160	0.0127	−0.0390	−0.0186	−0.0195	1.1037
M4	−0.111	−0.0286	—	−0.1127	0.0048	−0.0137	0.0567	0.0753	0.0203	0.8911
M6	−0.581	−0.0063	−0.0215	—	0.0587	0.0016	0.0486	0.0338	0.0610	0.5950
M7	0.232	−0.0092	−0.0023	−0.1470	—	−0.0228	−0.0497	−0.0154	0.0544	1.0400
M10	0.132	0.0128	0.0115	−0.0070	−0.0401	—	0.0255	0.0411	−0.0181	1.1577
M12	0.26	−0.0200	−0.0242	−0.1086	−0.0443	0.0129	—	0.1188	0.0601	1.2547
T2	0.214	−0.0116	−0.0391	−0.0918	−0.0167	0.0253	0.1443	—	0.0554	1.2799
T3	0.131	−0.0198	−0.0172	−0.2707	0.0963	−0.0182	0.1193	0.0905	—	1.1112

3.2.1 3 种不同的玉米秸秆处理方式下蜚蠊目群落多样性变化特征

蜚蠊目 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀性指数和 Simpson 优势度指数均为 NR>AH>MH;而 Margalef 丰富度指数为 AH>NR>MH。蜚蠊目群落多样性指数变化趋势和中小型土壤动物群落多样性指数的变化趋势一致,即 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀性指数和 Simpson 优势度指数最大值均出现在 NR,其次是 AH,最小值出现在 MH; Margalef 丰富度指数的最大值出现在 AH,其次是 NR,最小值出现在 MH (表 4)。

3.2.2 3 种不同的玉米秸秆处理方式下弹尾目群落多样性变化特征

3 种不同的玉米秸秆处理方式下,弹尾目的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Margalef 丰富度指数均为 AH>MH>NR,而 Pielou 均匀性指数为 AH>NR>MH。弹尾目群落各多样性指数和中小型土壤动物群落多样性指数的变化趋势不同,中小型土壤动物群落 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数最大值出现在 NR,而弹尾目群落的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数的最小值出现在 NR(表 4)。

3.3 3 种不同的玉米秸秆处理方式下中小型土壤动物群落与土壤因子间的关系

通过 CCA 分析(图 2)可以看出:在 MH 处理方式下,对中小型土壤动物物种分布影响最大的是全磷,4 个土壤因子的解释量为 62.80%,*Polyaspinus* sp.与全磷存在显著正相关关系;*Ramusella sengbuschi* 与全磷存在显

著负相关关系; *Mesostigmata* sp. 和 *Thalassaphorura encarpata* 与含水量存在正相关关系; *Pachylaelaps* sp. 和 *Isotomiella minor* 与全氮、有机质存在正相关关系。在 AH 处理方式下, 对中小型土壤动物物种分布影响最大的是全氮, 4 个土壤因子的解释量为 64.03%, *Ramusella sengbuschi* 与含水量存在显著正相关关系; *Scheloribates laevigatus* 与全氮存在正相关关系; *Haplozetes* sp.、*Polyaspinus* sp. 和 *Mesostigmata* sp. 与全氮存在负相关关系; *Ramusella sengbuschi* 和 *Tectocephus velatus* 与有机质、全磷存在负相关关系。在 NR 处理方式下, 对中小型土壤动物物种分布影响最大的是全磷, 4 个土壤因子的解释量为 53.70%, *Epilohmannia ovata*、*Ramusella sengbuschi* 和弹尾目未定种 2 与有机质存在正相关关系; *Polyaspinus* sp.、*Orchesellides sinensis* 和 *Thalassaphorura encarpata* 和 *Mesostigmata* sp. 与全氮存在显著正相关关系; *Isotomiella minor* 与有机质存在负相关关系; *Isotomiella minor* 与含水量、全磷存在正相关关系。

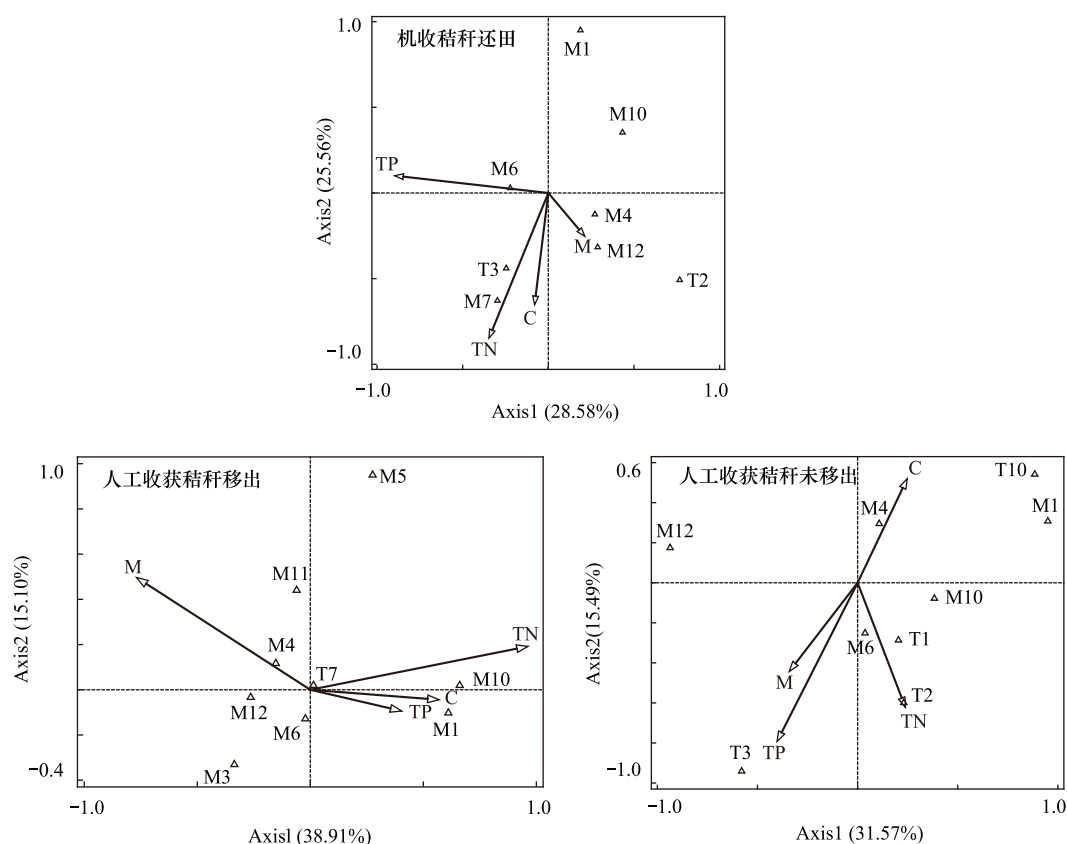


图2 中小型土壤动物与土壤因子典范对应分析排序图

Fig.2 Canonical correspondence analysis ordination of meso-micro soil fauna and soil environment

M1: *Epilohmannia ovata*; M3: *Haplozetes* sp.; M4: *Ramusella sengbuschi*; M5: *Scheloribates laevigatus*; M6: *Polyaspinus* sp.; M7: *Pachylaelaps* sp.; M10: *Scheloribates laevigatus*; M11: *Tectocephus velatus*; M12: *Mesostigmata* sp.; T1: *Orchesellides sinensis*; T2: *Thalassaphorura encarpata*; T3: *Isotomiella minor*; T7: *Desoria* sp.; T10: 弹尾目未定种 2; M: 含水量; C: 有机质; TP: 全磷; TN: 全氮

4 讨论

4.1 3 种不同的玉米秸秆处理方式对中小型土壤动物群落组成的影响

不同的玉米秸秆处理方式对土壤环境具有不同的影响, 进而会引起中小型土壤动物群落结构和组成发生变化。农田土壤动物群落结构主要受到土壤有机质含量、土壤含水量和土壤温度等因子的影响^[31]。3 种不同的玉米秸秆处理方式下, 土壤动物的物种数没有达到显著差异。刘鹏飞^[1]等研究秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响时发现, 秸秆还田后土壤动物的物种数高于对照组, 但没有达到显著差异。

在本研究中,有秸秆覆盖的 MH 和 NR 土壤动物的个体数与没有秸秆覆盖的 AH 土壤动物相比个体数较多,原因可能是玉米秸秆覆盖在地表,能有效的减少土壤水分的散失,减缓土壤温度的变化,为土壤动物提供了更优良的栖息环境^[32]。而 AH 样地农田地表裸露,没有秸秆覆盖,含水量^[33]会相对降低,地表温度变化大。Eaton 等^[34]指出地表凋落物被移走将减少生境中弹尾目的个体数量,李泽兴^[15]等指出随玉米秸秆覆盖量增加农田土壤动物数量增加,裸露的农田土壤动物的个体数逐渐减少,但没有显著变化。虽然二者的研究季节与本研究季节不同,但这一发现与本研究结果具有一致性,即裸露的农田地表较有覆盖物的农田地表相比,土壤动物的个体数较少,且变化差异不显著。

土壤动物对温度响应敏感,在温度较低或土壤冻结状态下表现出较低的活性甚至进入休眠状态^[35-36]。冬季气温寒冷致使土壤冻结极大地限制了土壤动物的存活,因此土壤动物在冬季维持着较低的个体数和物种数。在本次调查取样过程中,除了用来分析的蜉蝣目和弹尾目的成虫以外,还捕获到 14550 只幼体,远远高于本实验捕获的 1713 只成体,其中以蜉蝣占优势,其个体达到 12866 只,占全部幼体的 88.43%。这可能是本实验在室内分离样品的过程中,温暖的室内环境使土壤解冻,大量蜉蝣目和弹尾目苏醒或孵化,从而导致收集较多的幼体。这种现象在其他研究也有发现,对极地地区的土壤动物研究表明,蜉蝣目和弹尾目可以在冻结的土壤中共存,当将自然条件下冻结的土壤放在 10℃ 温度下 7d 后,土壤解冻后大量的土壤动物即可苏醒(recover activity),并成功的被分离提取出来^[37]。根据邵元虎^[38]和 Lavelle P^[39]的研究结果表明,蜉蝣目和弹尾目耐极端温度的特性使它们适应各种类型的土壤,包括南极寒冷沙漠到热带沙漠,寒冷苔原到温暖草地都有蜉蝣目和弹尾目的分布。部分蜉蝣目和弹尾目甚至可以在-22℃ 冻结的土壤中共存四年^[40]。但是从本次调查结果来看,在 3 种不同的玉米秸秆处理方式下,无论是成体还是幼体,蜉蝣目的个体数和物种数均大于弹尾目,说明在蜉蝣目是研究区冬季占优势的中小型土壤动物。

4.2 3 种不同的玉米秸秆处理方式对中小型土壤动物群落多样性的影响

物种多样性是群落生物组成结构的重要指标,反映群落内物种的多少和生态系统食物网络的复杂程度,从而比较各群落间的相似性及差异性^[41]。本文采取了 4 个在多样性研究中常用的指数来分析冬季黑土农田蜉蝣目和弹尾目的群落多样性特征。通常 Simpson 优势度指数能够反映群落中各物种数量的变化情况,Simpson 优势度指数越大,说明群落内物种数量分布不均匀,优势物种地位越突出^[42]。从中小型土壤动物群落和蜉蝣目群落来看,NR 的 Simpson 优势度指数最高,这主要是蜉蝣目物种 *Polyaspinus* sp. 的数量较高造成的,说明相对于 MH 和 AH,NR 的环境更适合 *Polyaspinus* sp. 存活。在本研究中,NR 样地中小型土壤动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Pielou 均匀性指数都高于 MH 和 AH。这是由于 NR 样地中秸秆堆除了为土壤动物提供食源外,还能够影响土壤动物生存的微环境,如较厚的秸秆堆能够保持土壤温度、降低近地表风速、改善土壤水分、降低土壤容重、增加土壤透气性、提供多样化的生境,这些因素可能促进土壤动物的活动、并增加了其多样性^[43]。而同样有秸秆覆盖的 MH 的 Shannon-Wiener 多样性指数与 Pielou 均匀性指数却低于没有秸秆覆盖的 AH,这可能与组成 MH 群落中一些物种优势现象明显有关。本研究结果显示 3 种不同的玉米秸秆处理方式对中小型土壤动物群落、蜉蝣目群落和弹尾目群落的 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数没有显著影响($P>0.1$),徐演鹏等^[44]在生长季研究秸秆还田对黑土农田中小型土壤节肢动物群落的影响时发现,秸秆处理对中小型土壤节肢动物群落多样性指数没有显著性影响。虽然与本实验的研究季节有所不同,但结果都显示秸秆处理对中小型土壤动物群落多样性指数没有显著影响。

基于种分类阶元的通径分析进一步表明,3 种不同的玉米秸秆处理方式下,中小型土壤动物个体数量最多的物种(*Ramusella sengbuschi* 和 *Polyaspinus* sp.) 对中小型土壤动物群落多样性指数的直接效应和总效应贡献率最小,而个体数量较少的物种(*Scheloribates laevigatus*、*Mesostigmata* sp. 和 *Thalassaphorura encarpata*) 对土壤动物群落多样性指数的综合效应贡献率较大。其中,弹尾目 *Thalassaphorura encarpata* 和 *Isotomiella minor* 通过其他类群对提高群落多样性的间接贡献率要大于其直接贡献率,而蜉蝣目与弹尾目正好相反,可见土壤

中弹尾目与蛱螨目的共生有助于提升群落的多样性水平^[45]。

4.3 3 种不同的玉米秸秆处理方式下土壤因子对中小型土壤动物的影响

土壤动物群落分布与土壤理化性质关系复杂^[46]。杨佩^[16]在生长季节调查秸秆覆盖免耕条件下中小型土壤动物与土壤因子的关系时发现,土壤因子对中小型土壤动物物种分布变化的影响不显著。但也有研究表明,在生长季节中小型土壤动物类群密度与土壤因子呈显著相关性^[4]。本实验发现在 3 种不同的玉米秸秆处理方式下,不同的土壤因子对中小型土壤动物物种分布变化影响不同,全磷、含水量和全氮分别在 MH、AH 和 NR 样地对中小型土壤动物物种分布有显著影响。但在这样一个低温的寒冷季节,仍不清楚全磷、含水量和全氮到底如何影响中小型土壤动物的分布,相关问题还需要深入的研究。另外,研究表明土壤温度的微弱变化会对土壤动物造成显著影响^[10],人为增加土壤温度导致苏格兰温带草地、挪威森林和亚北极地区的土壤动物群落结构和多样性发生显著性变化^[47-49]。不同秸秆处理方式下土壤温度的微变化可能对土壤动物有重要影响,但受到野外实验条件的限制,本次实验没有调查土壤温度数据,建议今后冬季研究要注重土壤温度的监测和调查。

5 结论

本研究以土壤中的蛱螨目和弹尾目为研究对象,对 3 种不同的玉米秸秆处理方式下冬季蛱螨目和弹尾目群落结构进行研究。结果表明在 3 种不同的玉米秸秆处理方式下,蛱螨目和弹尾目群落的个体数、物种数和群落多样性指数均无显著差异,但蛱螨目的个体数和物种数均显著高于弹尾目,说明蛱螨目是冬季黑土农田占优势的中小型土壤动物。人工收获秸秆未移出有利于提高蛱螨目和弹尾目群落结构的多样性,对蛱螨目和弹尾目具有一定的保护作用。土壤全磷、含水量和全氮与蛱螨目和弹尾目的个体数和物种数密切相关,本研究为农田土壤动物多样性的保护以及冬季黑土区土壤动物多样性研究提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 高海燕, 李志新, 马玺. 秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响. 生态学杂志, 2018, 37(1): 139-146.
- [2] 朱金霞, 孔德杰, 尹志荣. 农作物秸秆主要化学组成及还田后对土壤质量提升影响的研究进展. 北方园艺, 2020, (5): 146-153.
- [3] 刘继明, 卢萍, 徐演鹏, 林英华. 秸秆还田对吉林黑土区土壤有机碳、氮的影响. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 96-99.
- [4] 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.
- [5] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利顶, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448.
- [6] 曹阳, 高梅香, 张雪萍, 董承旭. 黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征. 生态学报, 2017, 37(5): 1677-1687.
- [7] Carrillo Y, Ball B A, Bradford M A, Jordan C F, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(7): 1440-1449.
- [8] 林英华, 张夫道, 杨学云, 宝德俊, 石孝均, 王胜佳, 王伯仁. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究. 中国农业科学, 2004, 37(6): 871-877.
- [9] 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.
- [10] 吴廷娟. 全球变化对土壤动物多样性的影响. 应用生态学报, 2013, 24(2): 581-588.
- [11] 伍一宁, 王贺, 钟海秀, 许楠, 李金博, 王继丰, 倪红伟, 邹红菲. 三江平原土壤动物群落多样性对 CO₂ 浓度升高的响应. 生物多样性, 2018, 26(10): 1127-1132.
- [12] 战丽莉, 许艳丽, 张兴义, 裴希超, 赵刚, 王建华. 耕作方式对土壤蛱螨类群落结构的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 598-605.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Zhang X K, Jiang Y, Liang L, Zhao X F, Liu 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.

- [18] Spedding T A, Hamel C, Mehuys G R, Madramootoo C A. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(3): 499-512.
- [19] 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.
- [20] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951-2010 年中国气温变化分区及其区域特征. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 887-896.
- [21] 孙文, 范昊明. 全球变暖背景下松花江流域气温最新变化特征. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 97-104.
- [22] Krantz G W, Walter D E. A manual of acarology. 3rd ed. Lubbock, Texas: Texas Tech University Press, 2009.
- [23] Walter D E, Proctor H C. Mites in soil. CD-rom. Collingswood, Australia: CSIRO Publishing, 2001.
- [24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 163-242.
- [25] Balogh J, Balogh P. The Oribatid Mites Genera of the World. Budapest: Hungarian Natural History Museum, 1992.
- [26] Ingimarsdóttir M, Caruso T, Ripa J, Magnúsdóttir Ó B, Migliorini M, Hedlund K. Primary assembly of soil communities: disentangling the effect of dispersal and local environment. *Oecologia*, 2012, 170(3): 745-754.
- [27] Minor M A. Spatial patterns and local diversity in soil oribatid mites (Acari: Oribatida) in three pine plantation forests. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(2): 122-128.
- [28] 廖崇惠, 李健雄. 华南热带和南亚热带地区森林土壤动物群落生态. 广州: 广东科技出版社, 2009.
- [29] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 王丹, 王兵, 戴伟, 李萍. 杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响. *生态学报*, 2011, 31(3): 680-688.
- [31] 林英华, 黄庆海, 刘骅, 彭畅, 朱平, 张树清, 张夫道. 长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2261-2269.
- [32] 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.
- [33] 孙海国, 任图生, Lindwall C W, Larney F J. 直立作物残茬和整株秸秆覆盖对麦田土壤湿度及温度的影响. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(2): 1-4.
- [34] Eaton R J, Barbercheck M, Buford M, Smith W. Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on collembolan populations. *Pedobiologia*, 2004, 48(2): 121-128.
- [35] 谭波. 长江上游不同海拔代表性森林土壤动物对凋落叶分解的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [36] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.
- [37] Coulson S J, Hodkinson I D, Wooley C, Webb N R, Block W, Worland M R, Bale J S, Strathdee A T. Effects of experimental temperature elevation on high-arctic soil microarthropod populations. *Polar Biology*, 1996, 16(2): 147-153.
- [38] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [39] Wolf I, Spain A. *Soil Ecology*. Berlin: Springer, 2001.
- [40] Coulson S J, Birkemoe T. Long-term cold tolerance in Arctic invertebrates: recovery after 4 years at below -20°C. *Canadian Journal of Zoology*, 2000, 78(11): 2055-2058.
- [41] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.
- [42] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 55-60.
- [43] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [44] 徐演鹏, 谭飞, 胡彦鹏, 卢萍, 吴建平, 林英华. 秸秆还田对黑土区农田中小型土壤节肢动物群落的影响. *动物学杂志*, 2015, 50(2): 262-271.
- [45] 沙迪, 翟清明, 张雪萍, 高梅香. 氨基阿维菌素苯甲酸盐对黑土区农田土壤动物群落的影响. *地理研究*, 2015, 34(5): 872-882.
- [46] 李伟, 崔丽娟, 王小文, 赵欣胜, 张曼胤, 高常军, 张岩. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与土壤理化性质的关系. *林业科学*, 2013, 49(7): 106-113.
- [47] Briones M J I, Ostle N J, Mcnamara N P, Poskitt J. Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 315-322.
- [48] Makkonen M, Berg M P, van Hal J R, Callaghan T V, Press M C. Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 377-384.
- [49] Dollery R, Hodkinson I D, Jónsdóttir I S. Impact of warming and timing of snow melt on soil microarthropod assemblages associated with *Dryas*-dominated plant communities on Svalbard. *Ecography*, 2006, 29(1): 111-119.