

DOI: 10.5846/stxb201709221712

朱新玉, 刘洁, 贺振, 吴东辉. 耕作方式对玉-豆轮作地表节肢动物多样性及其营养结构的影响. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Zhu X Y, Liu J, He Z, Wu D H. Response of ground-dwelling arthropod community diversity and its trophic structure in relation tillage regimes under maize-soybean rotation. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

耕作方式对玉-豆轮作地表节肢动物多样性及其营养结构的影响

朱新玉^{1,2}, 刘 洁³, 贺 振², 吴东辉^{1,*}

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102

2 商丘师范学院, 测绘与规划学院, 商丘 476000

3 吉林大学, 地球科学学院, 长春 130102

摘要:为阐明长期不同耕作方式对轮作种植模式黑土农田地表节肢动物多样性及其营养结构的影响, 2015 年 5 月至 9 月间, 利用陷阱法对连续 13 年玉米大豆轮作模式的定位试验站三种耕作方式(免耕、垄作、秋翻)的地表节肢动物群落进行了调查。共捕获动物 1002 只, 隶属于 3 纲 11 目 29 科 37 个类群, 凹唇蚁、玉米毛蚁和直角通缘步甲为优势类群。免耕(NT, no tillage)有利于增加蜘蛛类群密度, 垄作(RT, ridge tillage)和秋翻(MP, mould board plough)显著增加了玉米毛蚁密度。耕作方式仅对群落密度有显著影响显著影响($P < 0.05$), 而大豆不同生育阶段显著或极显著的影响地表节肢动物群落组成特征($P < 0.05$; $P < 0.001$)。长期玉米大豆轮作种植的地表节肢动物群落营养功能群在不同耕作方式中所占比例不同, 保护性耕作方式(NT、RT)更有利于捕食性和植食性动物的生存和繁殖, 常规耕作(MP)则是杂食性动物占据优势, 明显呈现对不稳定环境的适应。大豆不同生育期, 各功能群的个体数与类群数的动态变化不尽一致, 不具有明显的规律性。研究结果表明, 免耕轮作对维持地表节肢动物群落内部物种间的关系及其营养结构有着较为重要的作用, 保护性耕作和轮作种植模式相结合可维持农田生态系统平衡。

关键词:功能类群; 保护性耕作; 地表节肢动物; 轮作; 黑土

Response of ground-dwelling arthropod community diversity and its trophic structure in relation tillage regimes under maize-soybean rotation

ZHU Xinyu^{1,2}, LIU Jie³, HE Zhen², WU Donghui^{1,*}

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102, China

2 College of Surveying and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China

3 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130102, China

Abstract: Conservation tillage, such as reduced tillage or no-tillage, may play an important role in increasing soil organic matter, reducing soil erosion, and providing a more complex and favorable habitat for soil-dwelling organisms. Aboveground arthropods are important components of ecosystems, promoting a number of key functions, such as decomposition of organic matter and some herbivorous pest control. The abundance and diversity of food web components depends highly on the rotation system and soil management. To reveal the effect of tillage regimes on the diversity and trophic structure of ground-dwelling arthropods under maize-soybean rotation in the black soil of Northeast China, five field investigations were conducted with three tillage regimes (no tillage, NT; ridge tillage, RT; mould board plough, MP) at a 13-year tillage

基金项目:国家自然科学基金项目(41501263; 41430857); 中国博士后科学基金面上项目(2016M590269); 河南省科技厅科技攻关项目(172102410054); 商丘师范学院骨干教师项目(2015GGJS15); 2014 年河南省哲学社会科学规划项目(2014CJJ087)

收稿日期: 2017-09-22; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wudonghui@iga.ac.cn

regime experiment station. A total of 1002 arthropod individuals belonging to 3 classes, 11 orders, 29 families, and 37 groups were collected. *Formica sanguinea* Letreille, *Lasius alienus* Foerster, and *Poecilus gebleri* Dejean were the dominant species and accounted for 60.58% of the total individuals. The results showed that NT was beneficial to the spider population resulting in increased densities, and RT and MP significantly increased the density of *Lasius alienus*. Tillage regimes only significantly affected the density of arthropod communities in different growth stages ($P < 0.05$), whereas different growth stages of soybeans significantly or highly significantly affected the density, groups, and diversity of the arthropod community under different tillage regimes ($P < 0.05$; $P < 0.001$). In the long-term, under the maize and soybean rotation system, the proportion of trophic functional groups was different under the different tillage practices. The results indicated that the long-term conservation tillage (NT and RT) was more conducive to the survival of predators and herbivorous arthropods. Omnivores were dominant in the MP system, showing obvious adaptation to the unstable environment. In the different growth stages of the soybeans, the variation in all functional groups was not consistent, and there was no obvious pattern. It is obvious that no-tillage with rotation play an important role in maintaining the relationship between the species within the community and the trophic structure of the food web.

Key Words: functional groups; conservation tillage; ground-dwelling arthropods; rotation; black soil

农田不同耕作方式不仅可以影响土壤肥力、生产力,还可以改变生存在其中的土壤动物和营养物质之间的关系,影响整个土壤食物网的结构和农田生态系统的功能^[1-2]。地表节肢动物是农田生态系统重要的组成部分,促进了有机物分解和一些植食性害虫控制等关键功能的发挥^[3]。在土壤碎屑食物链中,地表节肢动物中的部分捕食者(如步甲科和蜘蛛类群)处于整个土壤食物链的顶端,是农田生态系统重要的分解者,在碎裂植物残体、改变生物群落组成,促进土壤养分循环等方面起着重要的作用^[4-6]。蜘蛛和地表甲虫等捕食者常活跃于上层土壤和地表,它们通常会通过食物网的级联效应对土壤生态系统产生较大的影响^[3]。保护性耕作方式,如少耕或免耕,可以减少土壤侵蚀、增加土壤有机质、提升和稳定产量等方面发挥着重要的作用,同时可为地上和地下土壤生物提供一个稳定的生存环境^[7-9]。研究长期轮作模式下不同耕作方式农田地表节肢动物群落组成,分析其营养功能类群特征,有助于弄清耕作方式对地表节肢动物群落多样性的影响,同时对食物网各营养功能类群在农田生态系统中的作用以及减少农药化肥使用、增施有机肥为特征的有机农业发展模式提供重要依据。

农田管理方式对土壤动物方面的研究,目前主要集中在地表动物群落组成及结构^[10-11]、土壤理化性质与土壤动物关系^[12-13]、施肥方式与动物群落^[14-17]、外源物质添加对动物的影响^[18-19]和动物群落空间格局与环境因子^[20-21]等方面。其中,土壤动物功能类群及其食物网方面的研究是国内外生态研究的焦点之一^[22-23]。为了便于研究,陈鹏提出对生态系统中的土壤动物按功能进行分类^[24]。随后的一些研究根据此方法对土壤动物功能类群进行了研究^[25];但土壤动物食性复杂,某些种类兼具几种食性,后者在前人的研究基础之上对分类方法进一步完善,形成了较为完整的功能类群。此外,在不同种植模式下,耕作方式对地上和地下动物群落的影响仍存争议,有研究表明,保护性耕作方式对节肢动物群落组成及特征无显著影响^[26];而其他研究发现保护性耕作有利于捕食者类群的生存,同时也提升了植食类群的密度^[27-29]。目前,长期轮作与不同耕作方式相结合的地表节肢动物群落组成、多样性及其功能类群特征方面的研究仍不十分清晰,尤其是我国土壤类型和农田管理方式多样。缺乏此方面的研究,很难全面分析农田土壤生态系统各组分之间的关系及理解农田管理措施对土壤肥力和生产力的影响。

东北黑土农田是中国最大的粮食主产区,由于不合理的开垦、高强度的开发,致使黑土地地区土壤层变薄,有机质含量降低且退化严重^[30]。适当的农业管理措施,能增强农田土壤肥力和固碳能力^[3]。保护性耕作由于降低了对土壤的扰动,可以有效的减少表层土壤的流失,更有利于形成良好的土壤结构;同时,作物秸秆等以有机质的形式输入到土壤,增加了土壤的肥力。本研究选择东北黑土长期玉米大豆轮作种植模式下不同耕

作方式农田为研究样地,查明不同耕作方式地表节肢动物群落组成及多样性,分析其营养功能类群特征,以期正确评估轮作种植模式下不同耕作方式对地表节肢动物群落的影响,维持和提高土壤肥力及保持土壤资源可持续利用和生物多样性保护等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省德惠市米沙子乡中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业示范基地($44^{\circ}12'N$, $125^{\circ}33'E$),耕作试验开始于 2001 年秋季。研究区域属于温带大陆性季风气候,年均温在 $4.4^{\circ}C$,年降雨量为 520 mm,降雨主要集中在 6—8 月份。研究区土壤属于壤质黏土,中层典型黑土,相应于美国土壤分类系统中的典型发育湿润软土(Typic Hapudolls),土壤表层 pH 值为 6.5 左右,呈中性或酸性。

1.2 样地设置

各试验小区采取单因素裂区设计,4 个重复的随机区组,各区组之间有 3 m 的间距,中间无任何作物,区组内小区面积为 $5.2\text{ m}\times 20\text{ m}$,各小区之间均有 1 m 的保护行,以避免处理之间的影响。耕作方式主要包括免耕(no-tillage, NT)、秋翻(moldboard plow, MP)和垄作(ridge tillage, RT)三种,种植方式有玉米连作、玉米-大豆轮作和玉米-玉米-大豆轮作,本研究选取的种植方式为玉米-大豆轮作。NT 除播种所用美国产的免耕播种机(KINZE-3000)外,全年不再扰动土壤,作物残留体覆盖在地表;MP 为秋季收获后进行的耕作,翻地深度约为 18—20 cm,春季再进行整体的深度为 7.5—10 cm,随后播种、中耕和起垄作业等;RT 耕作方式除播种和 6 月份左右进行的起垄和中耕外,收获后到播种前不再扰动。NT 和 RT 耕作方式作物残留体均覆盖于地表,MP 耕作方式则在秋翻时将作物残留体翻于地表之下。所有耕作方式施用底肥(氮肥, $100\text{ kg}/\text{hm}^2$;磷肥, $45.5\text{ kg}/\text{hm}^2$;钾肥, $80\text{ kg}/\text{hm}^2$)和追肥(氮肥, $50\text{ kg}/\text{hm}^2$)的时间和用量相同,追肥是 RT 和 MP 耕作方式,在 6 月下旬或第二次中耕时施入,而 NT 方式则在相近时间的雨后或雨前施入^[31]。

1.3 样品采集与鉴定

本研究中所有的地表节肢动物获取方式采取陷阱法(PVC 材质的诱捕杯,高约 130 mm,内径约 750 mm)。按照轮作方式,2015 年样地生长的作物为大豆,因此于 2015 年 5 月至 2015 年 9 月间,按大豆生育期对德惠黑土农田定位样地进行了 5 次调查(苗期、花芽分化期、开花结荚期、鼓粒灌浆期和成熟期)。诱捕杯内放置 2/3 饱和食盐水溶液用于诱捕地表节肢动物。每个样地内放置 3 个陷阱,沿着中心线每隔 5 m 放置一个陷阱,位于中间的陷阱距边缘的距离均为 2.6 m,位于样地两头的陷阱距样地宽边缘 5 m,距样地长边缘为 2.6 m;陷阱在野外放置约 96 h 后取回,带回实验室进行鉴定和计数,并放入 75%酒精溶液内保存。

实验室内根据《土壤动物检索图鉴》^[32]、《昆虫分类属种检索表》^[33]和《幼虫分类学》^[34]在体视显微镜下对节肢动物进行鉴定,除少数类群外,大多数土壤动物鉴定到属或种。

1.4 数据处理

(1)群落多样性特征,主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和均匀度指数 E 来分析群落多样性,用 R 统计语言的 Vegan 程序包来完成^[35],其中以节肢动物类群数来代表丰富度。

对于地表节肢动物功能类群的划分,本文按较为常见的捕食性(P, Predators)、植食性(H, Herbivore)、腐食性(D, Detrivore)和杂食性(O, Omnivore)对黑土农田地表节肢动物进行功能类群的划分。

(2)利用对应分析(correspondence analysis, CA)分析不同耕作方式地表节肢动物群落结构特征,分析过程中对数据进行 $\log(x+1)$ 转换,用于排序分析的地表节肢动物为多度大于 0.5% 的类群。

(3)采用非度量多维度尺度(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析预期生育期内地表节肢动物群落分布和物种组成^[35],采用 Stress 系数检验结果的可信度,各生育期内节肢动物动物统计数据,由于苗期的物种数量极少,因此在进行 NMDS 分析的时候没有将苗期纳入到分析中,物种多度小于 0.5% 则不包含在本分析内。

(4) 统计分析, 采用重复测量方差分析不同耕作方式和不同生育期的节肢动物群落组成和多样性的差异显著性, 多重比较利用最小显著差异法 (least-significant different, LSD)。对于不服从正态分布的数据, 采用 $\log(x+1)$ 转换。

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 22 软件进行整理, Origin 8.5 软件作图; NMDS 和 CA 分析则利用 R 统计语言的 Vegan 程序包来完成统计分析和作图^[35]。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式地表节肢动物群落组成

共捕获地表节肢动物 1002 只, 隶属于 3 纲 11 目 29 科 37 个类群 (表 1)。其中, 凹唇蚁 (*Formica sanguinea* Letreille)、玉米毛蚁 (*Lasius alienus* Foerster) 和直角通缘步甲 (*Poecilus gebleri* Dejean) 等 3 类为优势类群, 共占总捕获量的 60.58%。14 类常见类群包括点沟青步甲 (*Chlaenius proefectus* Bates)、中华金星步甲 (*Calosoma chinense* Kirby)、棕褐蕈隐翅虫 (*Lordithon semirufus* Sharp)、伞形柱锹甲 (*Prismognathus dauricus* Motschulsky)、黑脸油葫芦 (*Teleogryllus occipitalis* Serville)、短翅灶蟋 (*Gryllobates sigillatus* Walker)、银川油葫芦 (*Teleogryllus infernalis* Saussure)、蟋蟀科未知 (*Unkown Gryllidae*)、利氏舞蛛 (*Alopecosa licenti* Schenkel)、豹蛛属 (*Pardosa* C.L. Koch)、壁钱属 (*Uroctea* Dufour)、鞍形花蟹蛛 (*Xysticus ephippiatus* Simon)、近管蛛科 (*Amaurobioidinae* Hickman) 和双刺拉基盲蛛 (*Lacinius bidens* Simon), 共占总捕获量的 34.63%。剩余的 20 个类群为稀有类群, 仅占总捕获量的 4.79%。优势类群和常见类群共同构成了黑土农田大型土壤动物的主体 (共占总捕获量的 95.21%)。

RT 耕作方式更利于优势类群的生存, 如, 直角通缘步甲个体数量在 RT 中最高, MP 耕作方式中的凹唇蚁和玉米毛蚁个体数量高于其他两种耕作方式, 且显著高于 NT 耕作方式 ($F = 3.946, P < 0.05$) (表 1, 图 1)。NT 耕作方式更有利于蜘蛛类群的生存, 蜘蛛类群的个体数量及类群均高于其他两种耕作方式, 且 NT 耕作方式蜘蛛类群的个体密度显著高于 MP ($F = 8.600, P < 0.05$)。此外, 物种在 RT 和 MP 两种耕作方式中的分布较为集中, 而在 NT 中的分布则较为分散 (图 1)。

2.2 节肢动物群落动态

不同耕作方式地表节肢动物群落多样性变化一致, 随着生育期呈现出先上升随后下降的趋势 (图 2 I)。除 MP 耕作方式的均匀度随着生育期呈现上升的趋势外, NT 和 RT 两种耕作方式群落的均匀度变化趋势与群落多样性变化趋势一致 (图 2 II)。方差分析表明, 大豆不同生育期对节肢动物群落多样性 ($F = 11.520, P < 0.001$) 和均匀度 ($F = 4.548, P < 0.05$) 有显著影响。

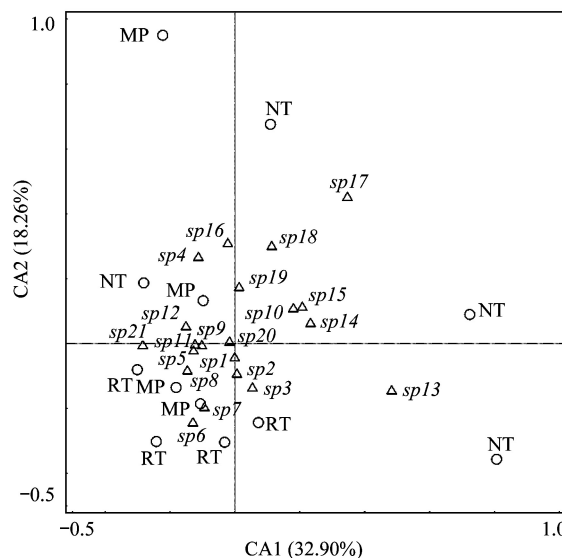


图 1 不同耕作方式地表节肢动物群落 CA (对应分析 correspondence analysis) 排序

Fig. 1 Correspondence analysis (CA) ordination diagram of ground-dwelling arthropod communities

NT: 免耕, no tillage; RT: 垄作, ridge tillage; MP: 秋翻, mould board plough; sp1: 凹唇蚁, *Formica sanguinea*; sp2: 玉米毛蚁, *Lasius alienus*; sp3: 直角通缘步甲, *Poecilus gebleri*; sp4: 点沟青步甲, *Chlaenius praefectus*; sp5: 中华金星步甲, *Calosoma chinense*; sp6: 伪叶甲属, *Lagri*; sp7: 棕褐蕈隐翅虫, *Lordithon semirufus*; sp8: 伞形柱锹甲, *Prismognathus dauricus*; sp9: 出尾蕈甲科, *Scaphidiidae*; sp10: 齿球蝽, *Forficula mikado*; sp11: 黑脸油葫芦, *Teleogryllus occipitalis*; sp12: 短翅灶蟋, *Gryllobates sigillatus*; sp13: 蟋蟀科未知种, *Unkown Gryllidae*; sp14: 银川油葫芦, *Teleogryllus infernalis*; sp15: 利氏舞蛛, *Alopecosa licenti*; sp16: 豹蛛属, *Pardosa*; sp17: 金比罗平腹蛛, *Gnaphosa kompirensis*; sp18: 壁钱属, *Uroctea*; sp19: 鞍形花蟹蛛, *Xysticus ephippiatus*; sp20: 近管蛛科, *Amaurobioidinae*; sp21: 双刺拉基盲蛛, *Lacinius bidens*

表 1 不同耕作方式下地表节肢动物群落组成

Table 1 Composition of ground-dwelling arthropod community under different tillage regimes

昆虫纲 Insecta	类群 Groups	NT		RT		MP		总 Total Individuals/trap	功能类群 Functional groups		
		个体数/陷阱 Individuals/trap	%	个体数/陷阱 Individuals/trap	%	个体数/陷阱 Individuals/trap	%				
Insecta	膜翅目 Hymenoptera	凹唇蚁 <i>Formica sanguinea</i> Letreille	43	16.73	67	16.88	66	18.97	176	O	
		玉米毛蚁 <i>Lasius alienus</i> Foerster	26	10.12	144	36.27	160	45.98	330	O	
		鞘翅目 Coleoptera	直角通缘步甲 <i>Poecilus gebleri</i> Dejean	25	9.73	49	12.34	27	7.76	101	P
			点沟青步甲 <i>Chlaenius praefectus</i> Bates	25	9.73	4	1.01	13	3.74	42	P
			中华金星步甲 <i>Calosoma chinense</i> Kirby	4	1.56	13	3.27	7	2.01	24	P
			双斑青步甲 <i>Chlaenius bioculatus</i> Chaudoir	1	0.39					1	P
			玉米双斑萤叶甲 <i>Monolepta hieroglyphica</i> Jacoby	1	0.39	1	0.25	1	0.29	3	H
			白星花金龟 <i>Protaetia brevitarsis</i> Lewis			1	0.25			1	H
			伪叶甲属 <i>Lagria</i> Fabricius			4	1.01	2	0.57	6	P
			异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> Pallas			1	0.25			1	P
	半翅目 Hemiptera	棕褐草隐翅虫 <i>Lordithon seminifus</i> Sharp			8	2.02	2	0.57	10	P	
		细虎甲 <i>Cylindera gracilis</i> Pallas			1	0.25			1	P	
		盘甲科 Discolomatidae Horn	1	0.39	1	0.25	1	0.29	3	D	
		伞形柱锹甲 <i>Prismognathus dauricus</i> Motschulsky	3	1.17	4	1.01	8	2.30	15	H	
		蚊甲科 Pselaphidae Latreille	2	0.78					2	P	
		苔甲科 Scydmaenidae Leach			1	0.25	2	0.57	3	O	
		出尾蕈甲科 Scaphidiidae Latreille					5	1.44	5	O	
		日负葬甲 <i>Nicrophorus japonicus</i> Harold					1	0.29	1	D	
		寡居喙蛭螂 <i>Onthophagus viduus</i> Harold	1	0.39	1	0.25			2	D	
		齿球螋 <i>Forficula mikado</i> Burr	4	1.56	1	0.25	2	0.57	7	H	
		黑脸油葫芦 <i>Teleogryllus occipitalis</i> Serville	26	10.12	45	11.34	18	5.17	89	H	
		短翅灶蟋 <i>Gryllodes sigillatus</i> Walker	8	3.11	9	2.27	8	2.30	25	H	
		蟋蟀科未知 Unkown Gryllidae	16	6.23	15	3.78	1	0.29	32	H	
		银川油葫芦 <i>Teleogryllus infernalis</i> Saussure	26	10.12	6	1.51	1	0.29	33	H	
先地红蜡 <i>Pyrrhocoris sibiricus</i> Kuschakevich	1	0.39	1	0.25			2	H			

续表

类群 Groups	NT		RT		MP		总 Total 个体数/陷阱 Individuals/trap	功能类群 Functional groups
	个体数/陷阱 Individuals/trap	%	个体数/陷阱 Individuals/trap	%	个体数/陷阱 Individuals/trap	%		
鳞翅目幼虫	扁蛾属幼虫 <i>Opogona</i> Zeller larva	1	0.39				1	H
Lepidoptera larva	螟蛾科幼虫 Pyralidae Latreille larva	1	0.39				1	H
	叶色草蛉若虫 <i>Chrysopa phyllochroa</i> Wesmael nymph	2	0.78				2	P
同翅目 Homoptera	玉米蚜若虫 <i>Rhopalosiphum maidis</i> Fitch nymph		0.00	1	0.25		1	H
蛛形纲 Arachnida	利氏舞蛛 <i>Alopecosa licentii</i> Schenkel	7	2.72		0.00		7	P
	豹蛛属 <i>Pardosa</i> C.L. Koch	2	0.78	3	0.76		5	P
	金比罗平腹蛛 <i>Gnaphosa kompirensis</i> Bösenberg & Strand	3	1.17				3	P
	壁钱属 <i>Uroctea</i> Dufour	11	4.28				3	P
	鞍形花蟹蛛 <i>Xysticus ephippiatus</i> Simon	8	3.11	3	0.76		2	P
	近管蛛科 Amaurobioidinae Hickman	3	1.17	6	1.51		5	P
盲蛛目 Opiliones	双刺拉基盲蛛 <i>Lacinius bidens</i> Simon	5	1.95	7	1.76			P
倍足纲 Diplopoda	东 北 石 蜈 蚣 <i>Lithobius mandschrensis</i> Takakuwa	1	0.39	1	16.88		1	P
个体总数 Total individuals		257		397			348	1002
类群数 Groups		28		27			24	37
Shannon-Wiener 多样性指数 (H') Shannon-Wiener index (H')		2.60 (0.10) a		2.48 (0.23) a			2.18 (0.47) a	
均匀度 Evenness		0.88 (0.05) a		0.84 (0.04) a			0.87 (0.04) a	
丰富度 Abundance		16 (1.26) a		15 (2.65) a			11 (3.54) a	

NT: 免耕, no tillage; RT: 垄作, ridge tillage; MP: 秋翻, mould board plough; 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 括号中数字为标准差

节肢动物类群数在不同耕作方式与大豆不同生育期内的变化不同(图 2Ⅲ),不同耕作方式下,均以开花结荚期和鼓粒灌浆期最高;且生育期对节肢动物群落类群数有显著影响($F=8.932, P<0.001$)。节肢动物群落密度在不同耕作方式、大豆不同生育阶段均呈现明显的变化(图 2Ⅳ)。除 NT 外,群落密度在花芽分化期至开花结荚期均呈现增加的趋势,鼓粒灌浆期至成熟期呈下降趋势;群落密度易受不同生育阶段($F=6.050, P<0.05$)和耕作方式×生育期($F=3.634, P<0.05$)的影响。

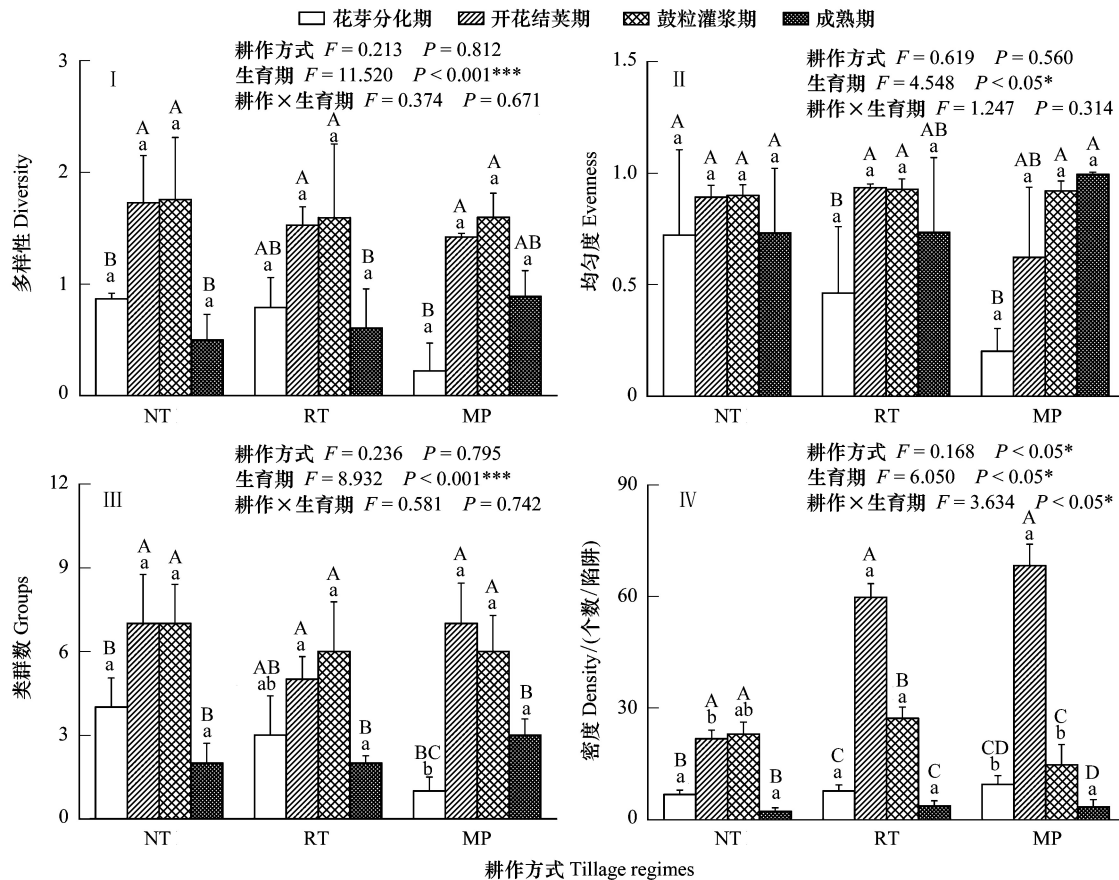


图 2 不同耕作方式地表节肢动物群落多样性(平均值 $\pm$ 标准误)

Fig.2 Diversity of dwelling-arthropod communities under different tillage regimes (Mean $\pm$ SE)

不同大写字母表示同一耕作方式不同生育期的差异显著($P<0.05$),不同小写字母相同生育期不同耕作方式间差异显著($P<0.05$)

NMDS 分析表明,地表节肢动物类群在大豆不同生育阶段呈现不同的分布特征,且不同耕作方式对其分布特征有影响(图 3)。在大豆花芽分化期、鼓粒灌浆期和成熟期,保护性耕作方式(NT 和 RT)中地表捕食性甲虫(如步甲科类群)和捕食性蜘蛛类群(如狼蛛科、盲蛛科、蟹蛛科等)的密度占优势。但在开花结荚期,MP 耕作方式下的地表甲虫、蚁属类群和蟋蟀科类群的密度均显著高于其他两种耕作方式。蟋蟀科类群的密度在不同生育期受耕作方式的影响,在大豆开花结荚期及鼓粒灌浆期,其密度与 RT 耕作方式关系密切;而在成熟期则与 NT 耕作方式相关性较强。NT 和 RT 耕作方式在大豆不同生育期地表节肢动物群落组成较为相似,且与 MP 的群落组成存在一定差异;此外,耕作方式($P<0.05$)和生育期($P<0.01$)对地表节肢动物类群的密度有显著差异。

2.3 不同耕作方式地表节肢动物功能类群组成特征

三种耕作方式地表节肢动物功能群类群数均以植食性和捕食性为主;NT 和 RT 耕作方式中腐食性和杂食性最低,而在 MP 耕作方式中腐食性功能群类群数最低(表 2)。各功能群个体数均以腐食性最低,NT 耕作方式中捕食性功能群个体数量最高,RT 和 MP 中则以杂食性功能群个体数最高。

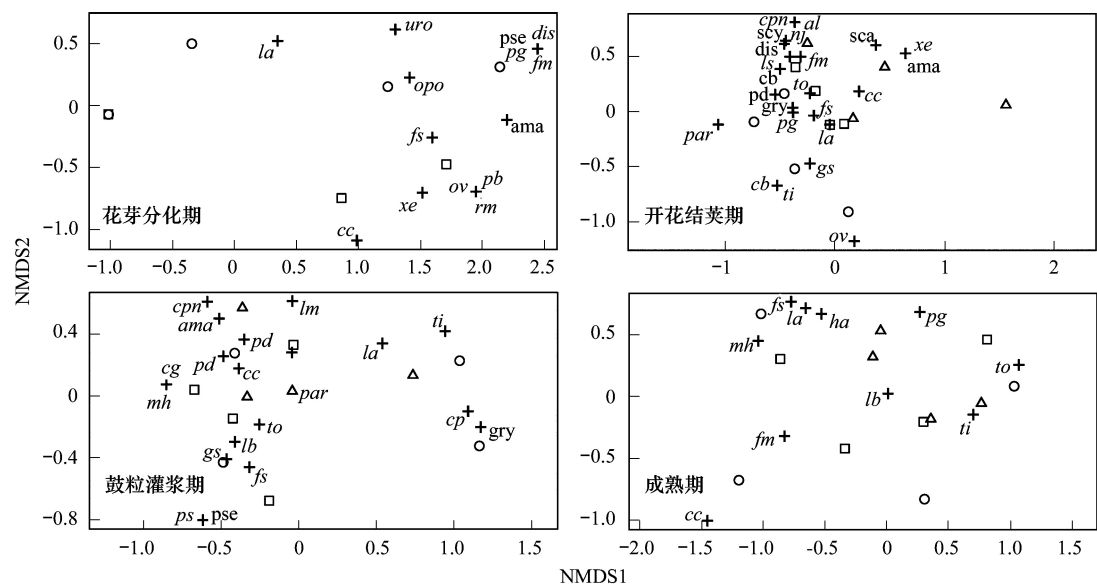


图3 不同耕作方式地表节肢动物群落非度量多维度尺度分析

Fig.3 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis of ground-dwelling arthropod community under different tillage regimes

a: 花芽分化期, flower budding; b: 开花结荚期, podding; c: 鼓粒灌浆期, filling; d: 成熟期, maturity; ○: 免耕, no tillage; □: 垄作, ridge tillage; △: 秋翻, mould board plough; +: 物种, species; fs: 凹唇蚁, *Formica sanguinea*; la: 玉米毛蚁, *Lasius alienus*; pg: 直角通缘步甲, *Poecilus gebleri*; cp: 点沟青步甲, *Chlaenius praefectus*; cc: 中华金星步甲, *Calosoma chinense*; cb: 双斑青步甲, *Chlaenius bioculatus*; mh: 白星花金龟, *Protaetia brevitarsis*; ha: 异色瓢虫, *Harmonia axyridis*; ls: 棕褐草隐翅虫, *Lordithon semirufus*; cg: 细虎甲, *Cylindera gracilis*; pd: 伞形柱锹甲, *Prismognathus dauricus*; pse: 蚁甲科, Pselaphidae; scy: 苔甲科, Scydmaenidae; sca: 出尾蕈甲科, Scaphidiidae; nj: 日负葬甲, *Nicrophorus japonicus*; fm: 齿球螋, *Forficula mikado*; to: 黑脸油葫芦, *Teleogryllus occipitalis*; gs: 短翅灶蟋, *Gryllobates sigillatus*; gry: 蟋蟀科未知, Unkown Gryllidae; ti: 银川油葫芦, *Teleogryllus infernalis*; ps: 先地红蟋, *Pyrhocoris sibiricus*; opo: 扁蛾属幼虫, *Opogona* larva; cpn: 叶色草蛉若虫, *Chrysopa phyllochroma* nymph; rm: 玉米蚜虫若虫, *Rhopalosiphum maidis* nymph; al: 利氏舞蛛, *Alopecosa licenti*; par: 豹蛛属, *Pardosa*; uro: 壁钱属, *Uroctea*; xe: 鞍形花蟹蛛, *Xysticus ephippiatus*; ama: 近管蛛科, Amaurobioidinae; lb: 双刺拉基盲蛛, *Lacinius bidens*; lm: 东北石蜈蚣, *Lithobius mandschreiensis*

表2 不同耕作方式下地表节肢动物营养功能群及其所占比例

Table 2 Number of functional groups of ground-dwelling arthropods and their proportion under different tillage regimes

功能群 Functional groups	NT		RT		MP	
	类群数 Groups	比例/% Proportion	类群数 Groups	比例/% Proportion	类群数 Groups	比例/% Proportion
P	14	50.00	13	48.15	11	45.84
H	10	35.72	10	37.03	8	33.33
D	2	7.14	2	7.41	2	8.33
O	2	7.14	2	7.41	3	12.50

功能群 Functional groups	NT		RT		MP	
	个体数/陷阱 Individuals/trap	比例/% Proportion	个体数/陷阱 Individuals/trap	比例/% Proportion	个体数/陷阱 Individuals/trap	比例/% Proportion
P	99	38.52	100	25.19	75	21.55
H	87	33.85	84	21.16	40	11.49
D	2	0.78	2	0.50	2	0.58
O	69	26.85	211	53.15	231	66.38

NT: 免耕, no tillage; RT: 垄作, ridge tillage; MP: 秋翻, mould board plough; P: 捕食性, predators; H: 植食性, herbivore; D: 腐食性, detritivore; O: 杂食性, omnivore

不同耕作方式地表节肢动物捕食性和植食性功能群呈现出相似的规律,开花结荚期和鼓粒灌浆期的个体数量高于其他生育期的个体数量,且生育期显著地影响了捕食性和植食性功能群的个体数量($P<0.01$, $P<$

0.001)(图 4 I 和 4 II)。结合表 2 可知,捕食性功能群个体数量在 RT 中最高,MP 中最低,植食性功能群个体数 NT 中最高,MP 中最低;但均无显著差异。腐食性功能群个体数量在不同生育期和不同耕作方式间并无显著差异(图 4 III)。生育期对杂食性功能群个体数量影响较为显著($P<0.05$),3 种耕作方式中均以开花结荚期个体数量最高;除 NT 外,RT 和 MP 中杂食性功能群个体数量在开花结荚期均显著高于其他生育期(图 4 IV)。此外,RT 和 MP 中杂食性功能群个体数量显著高于 NT(表 2)。

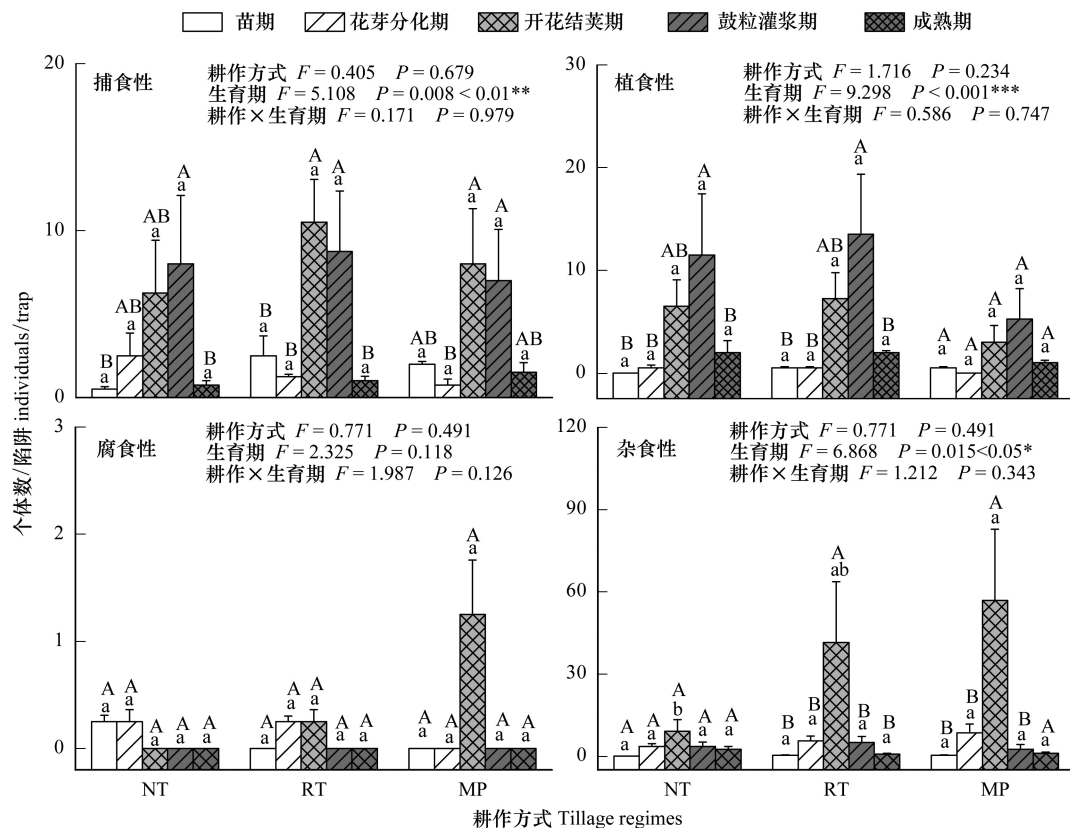


图 4 不同耕作方式地表节肢动物功能类群个体数量特征(平均值±标准误)

Fig.4 Individual characteristics of functional groups of ground-dwelling arthropod community under different tillage regimes (Mean ±SE)

图中不同大写字母表示同一耕作方式不同生育期间的差异($P<0.05$),不同小写字母表示同一生育期不同耕作方式间的差异性($P<0.05$)

地表节肢动物功能群的类群数呈现出与个体数量相似的规律性。捕食性功能群类群数在生育中期较高,植食性功能的类群数在生育期的中晚期高于生育早期(图 5 I 和 5 II)。耕作方式和生育期对腐食性功能群的类群数无显著影响(图 5 III)。虽然 RT 和 MP 的杂食性功能群个体数量显著高于 NT,但 RT 和 MP 中杂食性功能群的类群数与 NT 中杂食性功能群的类群数并无显著差异(图 5 IV,表 2)。

3 讨论

长期轮作种植模式下,黑土农田不同耕作方式间地表节肢动物群落组成存在较大差异。尽管 NT 耕作方式的地表节肢动物群落多样性及均匀性均未显著高于其他两种耕作方式,但可以看出保护性耕作方式对地表节肢动物群落多样性及丰富度仍有一定的促进作用(表 1)。不同耕作方式地表节肢动物优势类群较为相似,但常见类群和稀有类群差异较大,NT 耕作方式下蜘蛛目的类群较多,同时稀有类群的种类和密度存在明显的差异,RT 耕作方式下鞘翅目类群较多;这与其他研究结果较为一致^[2,29]。孙涛等^[10]研究海伦黑土农田地表节肢动物群落多样性中,步甲科为优势类群,鞘翅目和蜘蛛目相对多度较高,与本研究中的优势类群不完全一致;但其研究表明,鞘翅目和蜘蛛目所含科最多,与本研究一致。这说明在不同维度,农田生态系统中物种分

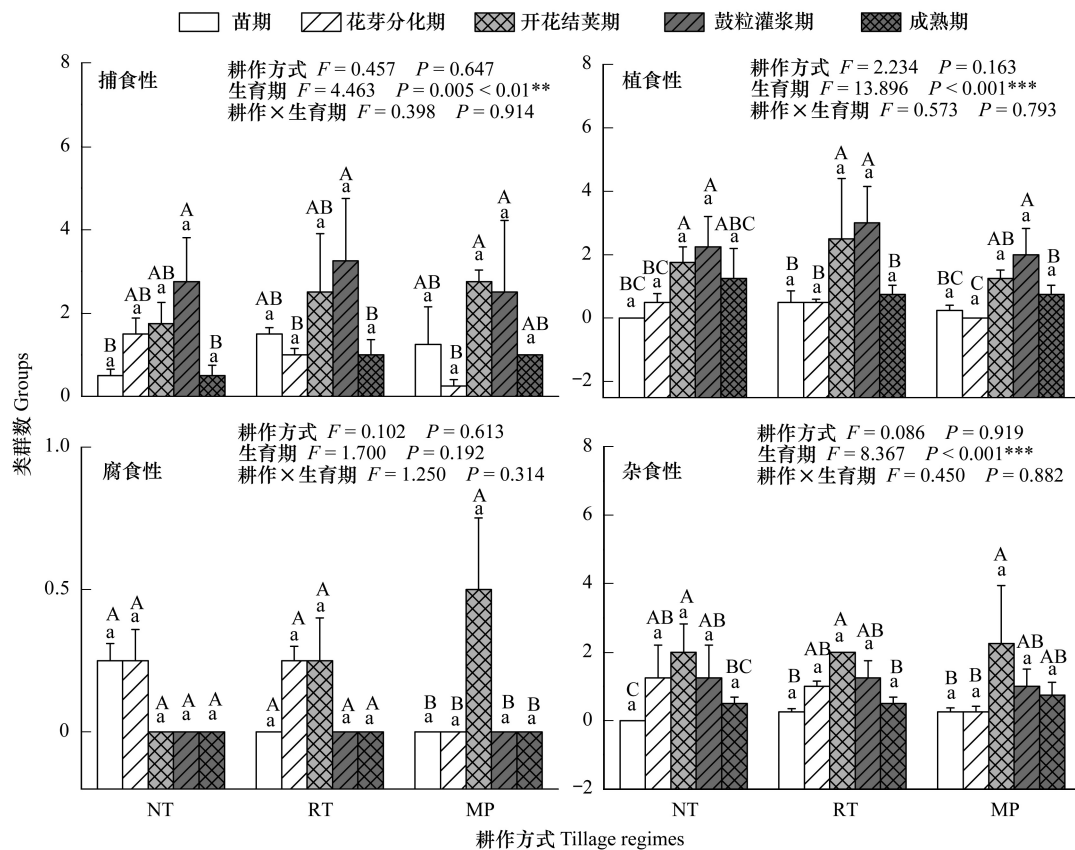


图5 不同耕作方式地表节肢动物功能类群类群数(平均值±标准误)

Fig.5 Groups of functional groups of ground-dwelling arthropod community under different tillage regimes (Mean ±SE)

图中不同大写字母表示同一耕作方式不同生育期间的差异($P < 0.05$),不同小写字母表示同一生育期不同耕作方式间的差异性($P < 0.05$)

布有差异,但也存在一定的相似性。有研究表明,免耕有利于土壤水分的保持^[11,30]、土壤保温,能增加土壤有机质的含量^[36-37]。保护性耕作方式(NT和RT)将作物秸秆直接还田到土壤表层且无耕作的扰动,这种相对稳定的环境有利于地表节肢动物的生存和繁殖^[28,38]。上述结果表明耕作方式影响动物群落物种组成,而群落特有类群和优势类群的差异也反应了农田不同耕作方式下土壤环境的异质性。此外,大豆不同生育阶段与地表节肢动物群落组成密切相关(图1、图2),特别是与地表甲虫和蜘蛛目类群的丰富度。Wyckhuys等^[39]研究发现,地表甲虫在作物生育后期的丰富度较高,蜘蛛类群的丰富度则在作物早期发育阶段相关。这一发现与本文的研究结果是一致的,即地表甲虫和蜘蛛类群受到作物不同生长阶段的显著影响。本研究中不同耕作方式下地表节肢动物群落组成存在差异也是对秸秆还田方式、作物不同生育阶段和土壤肥力变化的一种响应。

营养结构是物种群落类群间和物种间相互关系的外在体现,其结构决定着群落功能的发挥。已有研究表明,耕作方式可影响土壤不同生物、营养物质数量及循环,进而影响土壤整个食物网结构^[3]。本研究中,相对于MP耕作方式,NT和RT中的捕食性类群数和个体数量分别增加了21.43%和15.38%与24.24%和25.00%。农田地表杂草、凋落物及残存的秸秆等显著影响地表节肢动物群落,不仅可以为节肢动物提供食物和栖息场所,同时也是其躲避天敌的有力庇护^[40]。免耕和少耕措施受外界扰动较少,其为杂草种子提供了良好存活条件,加之其上覆盖的秸秆,是地表节肢动物丰富优质的食物源和繁殖场所;这可能造成NT和RT中地表节肢动物群落类群、多样性及其捕食性功能群高于MP耕作方式的原因之一。杂食性动物个体数量在RT和MP耕作方式中较高,主要是玉米毛蚁和凹唇蚁等两类物种在花芽分化期的显著增加所造成的,也可能是为了增强对某些植食性功能群的控制力^[41-43]。相关研究表明,蚁科类群更喜欢生存在土壤较为疏松的表面^[44];且觅

食范围较大,能够承受环境的一些扰动(如:耕作)^[45],这可能是为什么蚂蚁类群在 RT 和 MP 耕作方式中更为丰富的原因之一;同时也表明,杂食性是动物对不稳定环境适应的表现。

此外,体型较大的捕食者(如蜘蛛、步甲类等),通过捕食作用抑制碎屑食物网中生物的种类和数量,直接或间接的影响地表凋落物分解和土壤养分循环等过程^[46]。地表大型节肢动物主要作用一般为碎裂凋落物,增加中小型动物对凋落物的接触面,进而影响其分解速率^[3,46]。但学术界对于捕食者在碎屑食物网中级联效应的研究结果,还未形成较为统一的结论,如捕食者通过级联效应是否会影响地上植物的生产力等^[47]。Zhang 等^[7]对本研究地的作物产量进行了研究,保护性耕作方式的作物产量显著高于常规耕作方式,这可能与保护性耕作方式的捕食性功能群丰富,通过级联效应及其他非取食作用影响了地上植物的生产力。以上结果说明,保护性耕作方式(NT、RT)更有利于捕食者的生存和繁殖;同时也说明,在节肢动物群落中处于食物链顶端的物种对环境变化的响应较为敏感;也体现了轮作与保护性耕作方式的结合更有利于农田生态系统功能的维持。

本文建议未来可进一步研究农田优势类群之间的关系,地表节肢动物捕食与被食间的关系,尝试构建农田地表节肢动物的食物网(链),为农田生物多样性的保护和生态系统功能的维持提供更好的理论依据。

4 结论

长期不同耕作方式下,玉米大豆轮作黑土农田地表节肢动物共采集 1002 只,隶属于 3 纲 11 目 29 科 37 个类群,凹唇蚁、玉米毛蚁和直角通缘步甲为优势类群。NT 耕作方式更有利于蜘蛛类群的生存和繁殖,RT 和 MP 两种耕作方式则更有利于凹唇蚁和玉米毛蚁两类群的生存。大豆不同生育阶段显著影响地表节肢动物群落组成,而耕作方式仅对群落密度有显著影响。捕食和植食性动物在相对稳定的环境(NT、RT)占优势,处于地表节肢动物群落食物链顶端的物种对环境变化的响应更为敏感;而杂食性动物则在不稳定环境(MP)占优势,明显表现出对不稳定环境的适应。本文初步认为采用保护性耕作方式和轮作种植模式可以保护农田生态平衡及提升土壤环境的有益措施。

参考文献 (References):

- [1] Kladiivko E J. Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(1/2): 61-76.
- [2] Rivers A, Barbercheck A, Govaerts B, Verhulst N. Conservation agriculture affects arthropod community composition in a rainfed maize-wheat system in central Mexico. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 81-90.
- [3] 陈国康, 曹志平. 土壤食物网及其生态功能研究进展. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 126-130.
- [4] Zhu X Y, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 39-46.
- [5] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, 515(7528): 505-511.
- [6] 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.
- [7] Zhang S X, Chen X W, Jia S X, Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Wei S C, Sun B J, Huang D D, Zhou G Y. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 154: 84-90.
- [8] Zhang S X, Li Q, Lü Y, Zhang X P, Liang W J. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147-156.
- [9] 黄诚, 郭建英, 孟文新, 陈建秀, 李运东, 杨林章. 水旱轮作条件下免耕农田土壤动物群落与施肥措施的关系. *南京大学学报*, 1996, 32(2): 354-359.
- [10] 孙涛, 陈强, 张兴义. 东北黑土区耕作措施对地表节肢动物多样性的影响. *昆虫学报*, 2014, 57(1): 74-80.
- [11] Zhang S X, Li Q, Zhang X P, Wei K, Chen L J, Liang W J. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of northeast china. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 196-202.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 朱新玉, 董志新, 况福虹, 朱波. 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响. *生态学报*, 2013, 33(2): 464-474.
- [15] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 911-920.

- [16] 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.
- [17] 战丽莉, 许艳丽, 韩晓增. 长期施肥对东北黑土玉米田土壤动物影响. 土壤与作物, 2012, 1(2): 94-99.
- [18] 徐演鹏, 卢萍, 谭飞, 邹振峰, 吴建平, 林英华. 外源 C、N 干扰下吉林黑土区农田土壤动物组成与结构. 土壤学报, 2013, 50(4): 800-809.
- [19] 李久佳, 常亮, 朱新玉, 刘洁, 孙新, 吴东辉. 东北黑土农田跳虫对植物叶片还田的响应. 生态学杂志, 2017, 36(1): 110-117.
- [20] 高梅香, 孙新, 吴东辉, 张雪萍. 三江平原农田土壤跳虫多尺度空间自相关性. 生态学报, 2014, 34(17): 4980-4990.
- [21] 高梅香, 刘冬, 张雪萍, 吴东辉. 三江平原农田地表和地下土壤螨类丰富度与环境因子的空间关联性. 生态学报, 2016, 36(6): 1782-1792.
- [22] Emmerling C, Schlöter M, Hartmann A, Kandeler E. Functional diversity of soil organisms — A review of recent research activities in Germany. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 165(4): 408-420.
- [23] Walter D E, Hunt H W, Elliott E T. Guilds or functional groups? An analysis of predatory arthropods from a shortgrass steppe soil. Pedobiologia, 1988, 31(3): 247-260.
- [24] 陈鹏. 帽儿山地区土壤动物群结构特征//李景科, 陈鹏. 土壤动物生态地理研究. 长春: 东北师范大学出版社, 1993: 169-184.
- [25] 张雪萍, 黄丽蓉, 姜丽秋. 大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征. 地理研究, 2008, 27(3): 509-518.
- [26] Manetti P L, López A N, Clemente N L, Faberi A J. Tillage system does not affect soil macrofauna in southeastern Buenos Aires province, Argentina. Spanish Journal of Agricultural Research, 2010, 8(2): 377-384.
- [27] Rendon D, Whitehouse M E A, Hulugalle N R, Taylor P W. Influence of crop management and environmental factors on wolf spider assemblages (Araneae: Lycosidae) in an Australian cotton cropping system. Environmental Entomology, 2015, 44(1): 174-185.
- [28] Brévault T, Bikay S, Maldès J M, Naudin K. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 140-149.
- [29] Henneron L, Bernard L, Hedde M, Pelosi C, Villenave C, Chenu C, Bertrand M, Girardin C, Blanchart E. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(1): 169-181.
- [30] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 时秀焕, 贾淑霞, 陈学文. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响. 土壤学报, 2011, 48(4): 788-796.
- [31] 贾淑霞, 孙冰洁, 梁爱珍, 陈学文, 张士秀, 魏守才, 刘四义, 陈升龙, 张晓平. 耕作措施对东北黑土微生物呼吸的影响. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1764-1773.
- [32] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [33] 湖南省林业科学研究所. 昆虫分类属种检索表(上、下册). 长沙: 湖南省林业科学研究所, 1981.
- [34] 钟觉民. 幼虫分类学. 北京: 农业出版社, 1990.
- [35] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: Foundation for Statistical Computing, 2013.
- [36] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 229-236.
- [37] 张兴义, 陈强, 陈渊, 刘爽, 李续峰, 李浩. 东北北部冷凉区免耕土壤的特性及作物效应. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2271-2277.
- [38] Blanchart E, Villenave C, Viallatoux A, Barthès B, Girardin C, Azontonde A, Feller C. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(S1): S136-S144.
- [39] Wyckhuys K A G, O'Neil R J. Population dynamics of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) and associated arthropod natural enemies in Honduran subsistence maize. Crop Protection, 2006, 25(11): 1180-1190.
- [40] Belovsky G E, Slade J B. Dynamics of two Montana grasshopper populations: relationships among weather, food abundance and intraspecific competition. Oecologia, 1995, 101(3): 383-396.
- [41] 林琳, 邬天媛, 李景科, 张雪萍. 大庆草甸草原区大型土壤动物功能类群. 地理研究, 2013, 32(1): 41-54.
- [42] Briand F, Cohen J E. Environmental correlates of food chain length. Science, 1987, 238(4829): 956-960.
- [43] van Capelle C, Schrader S, Brunotte J. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota—A review with a focus on German data. European Journal of Soil Biology, 2012, 50: 165-181.
- [44] Andersen A N. Global ecology of rainforest ants. Functional groups in relation to environmental stress and disturbance//Agosti D, Majer J D, Alonso L E, Schultz T R, eds. Ants: Standard Methods for Measuring and Monitoring Biodiversity. Washington DC: Smithsonian Institution, 2000: 25-44.
- [45] Benckiser G. Ants and sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2000, 30(2): 191-199.
- [46] Zhu X Y, Chang L, Liu J, Zhou M H, Li J J, Gao B, Wu D H. Exploring the relationships between soil fauna, different tillage regimes and CO₂ and N₂O emissions from black soil in China. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 106-116.
- [47] 时培建, 惠荖, 门兴元, 赵紫华, 欧阳芳, 戈峰, 金显仕, 曹海峰, Larry L B. 作物多样性对害虫及其天敌多样性的级联效应. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(1): 75-84.