

转 *cry1Ac* 基因抗虫玉米 Bt-799 种植 对土壤动物群落结构的影响

王柏凤¹ 范春苗^{1,2} 尹俊琦¹ 武奉慈¹ 王大铭¹ 宋新元^{1*}

(1. 吉林省农业科学院, 吉林省农业生物技术重点实验室, 长春 130033;

2. 吉林农业大学生命科学学院, 长春 130118)

摘要: 为调查转基因抗虫玉米种植对非靶标土壤动物群落结构的影响, 以转 *cry1Ac* 基因抗虫玉米 Bt-799 及其对应的非转基因对照玉米郑 58 为试验材料, 于 2014—2015 连续 2 年在东北黑土区采用手捡法和干漏斗法分别调查大型和中小型土壤动物的类群和数量, 比较分析转基因与非转基因玉米田中土壤动物群落组成和多样性, 并利用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 各环境因子在土壤动物群落结构形成中的作用。结果表明, 郑 58 和转基因玉米 Bt-799 田中大型土壤动物总体群落组成相同, 各类群多度无显著差异; 2 种玉米田间所有类群总体多度、物种丰富度、Simpson 优势度指数、Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均无显著差异, 2014 年其 *P* 值分别为 0.949、0.867、0.751、0.998、0.985, 2015 年其 *P* 值分别为 0.869、0.406、0.532、0.115、0.410; RDA 分析表明玉米品种 (系) 在大型、中小型土壤动物群落结构形成中几乎没有作用。表明中短期内转基因玉米种植对非靶标土壤动物无显著影响。

关键词: 转基因玉米; 土壤动物; 群落结构; 冗余分析

Effects of planting transgenic insect-resistant maize with *cry1Ac* gene Bt-799 on the composition structure of soil fauna

Wang Baifeng¹ Fan Chunmiao^{1,2} Yin Junqi¹ Wu Fengci¹ Wang Daming¹ Song Xinyuan^{1*}

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Jilin Academy of Agricultural Sciences,

Changchun 130033, Jilin Province, China; 2. College of Life Sciences, Jilin Agricultural University,

Changchun 130118, Jilin Province, China)

Abstract: The transgenic insect-resistant maize with *cry1Ac* gene Bt-799 and its non-transgenic control Zheng 58 were selected to investigate the effects of transgenic insect-resistant maize on the community structure of non-target soil fauna. Hand picking and Macfadyen funnel methods were used to investigate the groups and individual numbers of macro, meso and micro soil fauna in the transgenic and non-transgenic maize fields, and the composition and diversity of soil faunas were compared in Bt-799 and Zheng 58 maize fields from 2014 to 2015. RDA analysis was also used to analyze the effects of soil environmental factors on soil community structure. The results showed that the composition of macro faunas was not significantly changed in transgenic Bt-799 compared with that in the non-transgenic maize; total abundance, species richness and community diversity index including Simpson index, Shannon-Weiner index and Pielou index in Bt-799 were not significantly changed. The *P* values of total abun-

基金项目: 吉林省农业科学院创新工程(人才基金)资助项目(C7208000309), 国家自然科学基金(31500345), 转基因生物新品种培育重大专项(2016ZX08011-003)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: songxinyuan1980@163.com

收稿日期: 2017-08-21

dance, species richness and the three diversity indexes in 2014 were 0.949, 0.867, 0.751, 0.998 and 0.985, respectively, and the *P* values of those in 2015 were 0.869, 0.406, 0.532, 0.115 and 0.410, respectively. RDA analysis showed that the transgenic varieties had no effect on community structure of macro soil faunas, meso and micro soil faunas, suggesting that transgenic maize cultivation had no significant influence on community structure of soil faunas in the short and medium terms.

Key words: transgenic maize; soil fauna; community structure; redundancy analysis

转基因抗虫玉米是通过转入外源基因使之具有抗虫性状。种植转基因抗虫玉米可以大量减少农药的使用和劳动力的投入。但是,种植转基因抗虫玉米后,Bt杀虫蛋白可以通过根际分泌物(Saxena et al., 1999, 2002; Baumgarte & Tebbe, 2005)、花粉飘落(Mendelsohn et al., 2003)和凋落物残体(Flores et al., 2005; 王建武等, 2005)等进入土壤,这部分进入土壤的Bt蛋白可以快速吸附在土壤活性颗粒表面,与之紧密结合而避免降解(Zwahlen et al., 2007; Icoz & Stotzky, 2008)。Bt蛋白可以通过非靶标土壤动物取食直接进入其体内(Obrist et al., 2006; Álvarez-Alfageme et al., 2009),甚至在其体内产生累积(Arias-Martín et al., 2016)。土壤动物作为土壤生态系统的重要组成部分(Wardle et al., 2004),对土壤生态系统物质循环和能量流动具有重要促进作用(董炜华等, 2016)。

关于转基因抗虫玉米种植对非靶标生物影响的研究多集中于地上部节肢动物(郭井菲等, 2014; Guo et al., 2016; 任振涛等, 2017)。由于鉴定和监测困难,转基因抗虫玉米种植后对非靶标土壤动物影响的研究相对较少,王柏凤等(2014)和刘新颖等(2016a, b)研究结果表明转基因抗虫玉米种植对土壤动物无显著影响;其它转基因作物种植对土壤动物几乎没有或只有很小的影响(Zwahlen et al., 2007; Chang et al., 2013; Yang et al., 2014);但也有些研究表明,转基因作物种植会对个别土壤动物类群产生影响(白耀宇等, 2006; 祝向钰等, 2012; Arias-Martín et al., 2016);同时Chang et al. (2011)和Höss et al. (2013)研究表明导入外源基因会影响植物本身特性,进而可能会对土壤动物产生影响。

为明确中短期内转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-799 种植对非靶标土壤动物群落的影响,本研究于 2014—2015 连续 2 年在东北黑土区采用手捡法和干漏斗法对转基因和非转基因玉米田内大型和中小型土壤动物进行采样,并对 2 种玉米田间土壤动物群落组成和物种丰富度、总体多度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数等群落特征参数进

行差异显著性分析,进而分析转基因玉米品种(系)对土壤动物群落组成和多样性的影响;将玉米品种(系)、生长期、年份、根部生物量、含水量和 pH 作为环境因子,利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)方法研究不同环境因子对土壤动物结构的影响,进一步解析玉米品种(系)在土壤动物结构形成中的作用,明确转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-799 种植对土壤生态系统的安全性,以期对转 *cry1Ac* 基因抗虫玉米的推广提供参考或者依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物:转 *cry1Ac* 基因抗虫玉米品种为 Bt-799, Bt 蛋白表达量高,田间抗螟性良好(王月琴等, 2014),非转基因对照玉米品种为 Bt-799 的亲本郑 58,均由中国农业大学提供。分别于 2014 年 5 月 7 日和 2015 年 5 月 7 日播种于吉林省公主岭市吉林省农业科学院国家转基因玉米、大豆中试与产业化基地的转基因植物环境安全研究试验圃场(124°49' E, 43°30' N)内,采用点播器人工播种,行距 60 cm,株距 25 cm,利用常规耕作方式进行管理,不施用杀虫剂,转基因与非转基因玉米,各种植 3 个小区,每个小区面积 150 m²,长 10 m×宽 15 m,小区随机区组分布,小区间布置 2 m 隔离带。于 2014 年 10 月 8 日和 2015 年 10 月 8 日收获。

试剂及仪器:试验所用试剂均为国产分析纯。SZX16 体视显微镜,日本 Olympus 公司;PH-25 pH 计,澳大利亚 Dynamica 公司。

1.2 方法

1.2.1 土壤动物调查与数量等级划分

大型土壤动物调查方法:针对大型土壤动物个体大、密度低、活动能力强等特点,采用手捡法采集。分别于 2014 年和 2015 年的 5—9 月对玉米田进行调查,每月取样 1 次。每个小区随机选取 3 点,每点用铁铲挖取长、宽、深各为 0.5 m 的样方,分拣出土样中肉眼可直接观察到的土壤动物,置于 10 mL 离心管中用 95% 酒精保存,带回实验室。根据尹文英

(1998)、钟觉民(1990)、李元胜和张巍巍(2011)等方法,在解剖镜下对土壤动物标本进行分类鉴定和统计。由于土壤动物的幼虫和成虫在土壤中的作用不同,将幼虫和成虫分开统计。

中小型土壤动物调查方法:针对中小型土壤动物个体小、密度高、活动能力强等特点,采用干漏斗法采集。分别于2014年5—9月和2015年6—10月进行,每月取样1次。每个小区随机选取5点,每点用高为15 cm、直径为8 cm的取土器取土,将取到的约200 cm³土样放入自封袋带回实验室。采用改良的干漏斗分离法进行土壤动物分离,分离出的标本置于装有75%乙醇溶液的收集瓶中,4℃冰箱内保存,鉴定和统计方式同手检法。

土壤动物数量等级划分:根据各类群分布频率(每个类群个体数量占有所有土壤动物个体数量的百分比)进行动物数量等级划分,10%以上为优势类群;1%~10%为常见类群;小于1%为稀有类群(王尚等,2014)。

1.2.2 土壤动物群落特征参数计算与分析

群落多样性是群落功能复杂性和稳定性的重要量度指标,采用物种丰富度指数即群落中的类群数、总体多度(群落中所有类群的总个体数)、Simpson优势度指数(用于评估某些最常见类群的优势度)、Shannon-Wiener多样性指数(用于评估类群的丰富度)和Pielou均匀度指数(用于评估类群分布的均匀度)等群落特征参数来综合评价转基因玉米种植对土壤动物群落多样性的影响。Simpson优势度指数 $=1 - \sum N_i(N_i - 1) / (N(N - 1))$,式中 N_i 为*i*类群的个体数;Shannon-Wiener多样性指数 $H = -\sum P_i \ln(P_i)$,式中 P_i 为*i*类群占总个体数的概率;Pielou均匀度指数 $=H / \ln S$,式中 S 为群落中的类群数。以不同玉米品种(系)作为组间因素,采样时间作为重复水平,对各群落特征参数进行重复方差分析。

1.2.3 环境因子调查方法及对动物群落结构的影响

在调查土壤动物的同时,在其各对应的采样点内随机取土20 cm³,并将玉米植株根系部分切下,一并带回实验室用于各环境因子的测定。土壤含水量的测定:取5 g土样,放入重量为 W 的铝盒,称其重量为 W_1 ,去盖于105~110℃烘箱中烘8 h,加盖后在干燥器中冷却到室温,取出盖,称其重为 W_2 ,根据公式 $(W_1 - W_2) / (W_1 - W) \times 100\%$ 计算土壤质量含水量。土壤pH的测定:取5 g土样,室温下干燥12 h,用25 mL的0.01 mol/L CaCl₂制成悬浮液,然后振荡5 min,再静置2~24 h,用pH计测定。土壤根部生物量的测

定:用水将玉米植株根系泥沙等杂物冲洗掉,室温风干后称重。

应用CANOCO 4.5软件,采用RDA方法研究各环境因子对土壤动物群落结构的影响,所有原始数据均进行log转换,变量的显著性经过499次的MonteCarlo检验,环境因子包括玉米材料、pH、含水量、根部生物量、采样年份和生长期。

1.3 数据分析

应用Excel 2010和DPS 2002对数据进行整理和计算,利用SPSS 22.0软件进行数据统计分析,采用最小显著差数(LSD)法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 玉米种植对土壤动物群落组成的影响

2.1.1 对大型土壤动物群落组成的影响

2014年,转基因和非转基因玉米田共分别采集大型土壤动物453头和448头,均隶属于5纲13目。2014年,2种玉米田的优势类群相同,均为线蚓科、单向蚓目和鞘翅目幼虫;常见类群也基本相同,均包括蜘蛛目、地蜈蚣目、鞘翅目成虫、膜翅目、等足目和石蜈蚣目,只有鳞翅目幼虫在转基因玉米田中为常见类群,在非转基因玉米田中为稀有类群;稀有类群均包括革翅目、半翅目、直翅目和啮虫目。2015年,转基因和非转基因玉米田共分别采集大型土壤动物230头和216头,分别隶属于5纲10目和5纲9目。2015年,2种玉米田的优势类群仍相同,均为膜翅目、鞘翅目成虫、线蚓科、单向蚓目和鞘翅目幼虫;常见类群亦基本相同,均包括地蜈蚣目和蜘蛛目,只有革翅目在转基因玉米田中为常见类群,在非转基因玉米田中为稀有类群;稀有类群均包括半翅目,而直翅目和等足目只出现在转基因玉米田中,鳞翅目幼虫则只出现在非转基因玉米田中(表1)。同年2种玉米田的大型土壤动物类群多度均无显著差异(表1)。

2.1.2 对中小型土壤动物群落组成的影响

2014年,转基因和非转基因玉米田共分别采集中小型土壤动物3 814头和5 371头,均隶属于6纲10目。2015年,转基因玉米田和非转基因玉米田共分别采集大型土壤动物3 735头和3 978头,隶属于7纲9目和6纲9目。2014年和2015年2种玉米田的绝对优势类群均为蛴螬目和弹尾目,并分别达到其个体总数的64.98%和24.13%以上,其余基本均为稀有类群,其中部分稀有类群只在1年或1种玉米田中出现。同年2种玉米田的中小型土壤动物类群个体数均无显著差异(表2)。

表 1 2014—2015 年转基因与非转基因玉米田各大型土壤动物类群多度及分布频率
Table 1 Abundances and frequencies of each macro soil fauna group in the transgenic maize and non-transgenic maize fields in 2014 and 2015

类群 Group	2014				2015			
	多度		分布频率 (%)		多度		分布频率 (%)	
	Abundance		Frequency distribution		Abundance		Frequency distribution	
	转基因玉米 Transgenic maize	非转基因玉米 Non-transgenic maize						
膜翅目 Hymenoptera	0.38±0.21 a	0.36±0.13 a	3.75	3.57	0.76±0.30 a	1.04±0.70 a	17.83	25.93
鞘翅目成虫 Coleoptera adults	0.69±0.16 a	0.78±0.20 a	6.84	7.81	0.91±0.20 a	0.65±0.13 a	21.30	16.20
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	1.69±0.29 a	1.80±0.29 a	16.78	18.08	0.61±0.13 a	0.65±0.12 a	14.35	16.20
革翅目 Dermaptera	0.02±0.02 a	0.04±0.03 a	0.22	0.45	0.06±0.03 a	0.04±0.03 a	1.30	0.93
半翅目 Hemiptera	0.07±0.04 a	0.07±0.04 a	0.66	0.67	0.04±0.03 a	0.02±0.02 a	0.87	0.46
直翅目 Orthoptera	0.09±0.04 a	0.09±0.04 a	0.88	0.89	0.02±0.02 a	0.00±0.00 a	0.43	0.00
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	0.11±0.05 a	0.07±0.04 a	1.10	0.67	0.00±0.00 a	0.04±0.03 a	0.00	0.93
线蚓科 Enchytraeidae	2.82±0.61 a	2.87±0.69 a	28.04	28.79	0.81±0.26 a	0.63±0.15 a	19.13	15.74
单向蚓目 Haplotaxida	2.27±0.32 a	2.02±0.35 a	22.52	20.31	0.78±0.16 a	0.67±0.13 a	18.26	16.67
地蜈蚣目 Geophilomorpha	0.71±0.18 a	0.71±0.14 a	7.06	7.14	0.11±0.05 a	0.19±0.07 a	2.61	4.63
蜘蛛目 Araneae	0.82±0.24 a	0.69±0.18 a	8.17	6.92	0.15±0.06 a	0.19±0.07 a	3.48	2.31
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	0.11±0.05 a	0.13±0.06 a	1.10	1.34	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00	0.00
等足目 Lsopoda	0.24±0.13 a	0.27±0.27 a	2.43	2.68	0.02±0.02 a	0.00±0.00 a	0.43	0.00
啮虫目 Corrodentia	0.04±0.03 a	0.07±0.04 a	0.44	0.67	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00	0.00

表中数据为平均数±标准误。同年同行不同字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same row in the same year indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

表 2 2014—2015 年转基因与非转基因玉米田各中小型土壤动物类群多度及分布频率
Table 2 Abundances and frequencies of each meso and micro soil fauna group in the transgenic maize and non-transgenic maize fields in 2014 and 2015

类群 Group	2014				2015			
	多度		分布频率 (%)		多度		分布频率 (%)	
	Abundance		Frequency distribution		Abundance		Frequency distribution	
	转基因玉米 Transgenic maize	非转基因玉米 Non-transgenic maize						
蜱螨目 Acarina	39.86±5.82 a	37.99±5.00 a	72.10	72.18	32.36±4.13 a	34.71±5.73 a	64.98	65.43
弹尾目 Collembola	13.46±1.54 a	12.70±1.60 a	24.36	24.13	15.72±2.65 a	16.76±3.00 a	31.57	31.60
鞘翅目成虫 Coleoptera adults	0.22±0.06 a	0.20±0.06 a	0.39	0.39	0.07±0.03 a	0.05±0.03 a	0.13	0.10
膜翅目 Hymenoptera	0.54±0.26 a	0.58±0.26 a	0.97	1.10	0.35±0.17 a	0.08±0.06 a	0.70	0.15
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	0.16±0.04 a	0.16±0.04 a	0.29	0.30	0.01±0.01 a	0.03±0.02 a	0.03	0.05
双尾目 Entotrophi	0.24±0.08 a	0.17±0.07 a	0.37	0.25	0.17±0.06 a	0.29±0.08 a	0.35	0.55
啮虫目 Psocoptera	0.35±0.07 a	0.38±0.07 a	0.63	0.72	0.15±0.04 a	0.08±0.04 a	0.29	0.15
地蜈蚣目 Geophilomorpha	0.06±0.04 a	0.04±0.02 a	0.10	0.08	0.11±0.04 a	0.15±0.05 a	0.21	0.28
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	0.01±0.01 a	0.01±0.01 a	0.03	0.03	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00	0.00
单向蚓目 Haplotaxida	0.09±0.04 a	0.09±0.04 a	0.16	0.17	0.43±0.17 a	0.51±0.14 a	0.86	0.96
线蚓科 Enchytraeidae	0.29±0.11 a	0.30±0.14 a	0.52	0.58	0.40±0.09 a	0.37±0.10 a	0.80	0.70
幺蚰科 Scutigerellida	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00	0.00	0.04±0.03 a	0.00±0.00 a	0.08	0.00
蜘蛛目 Araneae	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00	0.00	0.00±0.00 a	0.01±0.01 a	0.00	0.03

表中数据为平均数±标准误。同年同行不同字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平显著差异。Data are mean±SE. Different letters in the same row in the same year indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

2.2 玉米种植对土壤动物群落特征参数的影响

2.2.1 对大型土壤动物群落特征参数的影响

经重复方差分析,2014年转基因玉米田和非转基因玉米田之间大型土壤动物物种丰富度、总体多度、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的 P 值分别为 0.949、0.867、0.751、0.998 和 0.985,2 种玉米田间各群落特征参数均无显著差异;2015年,2 种玉米田间各指数 P 值分别为 0.869、0.406、0.532、0.115、0.410,结果与 2014 年一致,也无显著差异。说明转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-799 种植未对田间大型土壤动物群落特征参数产生

显著影响(表 3)。

2.2.2 对中小型土壤动物群落特征参数的影响

经重复方差分析,2014年 2 种玉米田中小型土壤动物物种丰富度、总体多度、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的 P 值分别为 0.841、0.617、0.428、0.903 和 0.533,2 种玉米田间各群落特征参数均无显著差异;2015年 2 种玉米田间各指数 P 值分别为 0.279、0.308、0.624、0.511、0.836,结果与 2014 年一致,均无显著差异。说明转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-799 种植未对田间中小型土壤动物群落特征参数产生显著影响(表 3)。

表 3 2014—2015 年转基因玉米 Bt-799 种植对土壤动物群落特征参数的影响

Table 3 Effects of planting Bt-99 transgenic maize on the parameters of soil faunas in 2014 and 2015

参数 Parameter	大型土壤动物 Macro soil fauna				中小型土壤动物 Meso and micro soil fauna			
	2014		2015		2014		2015	
	F	P	F	P	F	P	F	P
物种丰富度 Species richness	0.26	0.949	0.03	0.869	0.04	0.841	1.22	0.279
总体多度 Total abundance	0.01	0.867	0.73	0.406	0.26	0.617	1.08	0.308
Simpson 指数 Simpson index	0.34	0.751	0.41	0.532	0.66	0.428	0.25	0.624
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	0.07	0.998	2.78	0.115	0.02	0.903	0.44	0.511
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.04	0.985	0.71	0.410	4.66	0.533	0.04	0.836

2.3 环境因子对土壤动物群落影响的 RDA 分析

2.3.1 对大型土壤动物群落结构的影响

所有已测定环境因子对大型土壤动物群落结构影响的变异解释量为 38%。影响大型土壤动物群落结构的主要环境因子为生长期(变异解释量为 20%, $P=0.002$)和年份(变异解释量为 13%, $P=0.002$),影

响达到极显著水平;其次为根部生物量(变异解释量为 3%, $P=0.03$),影响达到显著水平;含水量(变异解释量为 1%, $P=0.57$)和 pH(变异解释量为 1%, $P=0.66$)次之,有影响但未达到显著水平;玉米品种(系)影响最小(变异解释量 <1%, $P=0.94$),几乎没有影响(表 4)。

表 4 2014—2015 年不同环境因子对土壤动物群落结构影响的冗余分析

Table 4 Redundancy analysis of the effects of different environmental variables on soil faunas in 2014 to 2015

变量 Variable	大型土壤动物 Macro soil fauna			中小型土壤动物 Meso and micro soil fauna		
	变异解释量 (%) Variance explained	F	P	变异解释量 (%) Variance explained	F	P
	生长期 Sampling period	20	14.60	0.002	6	3.12
年份 Year	13	11.05	0.002	6	3.00	0.020
根部生物量 Root biomass	3	2.37	0.030	4	2.16	0.080
含水量 Water content	1	0.80	0.570	3	1.51	0.190
pH	1	0.75	0.660	2	1.15	0.280
品种(系) Variety	<1	0.34	0.940	<1	0.26	0.960
总变异解释量 Total variance explained (%)	38			21		

2.3.2 对中小型土壤动物群落结构的影响

所有已测定环境因子对中小型土壤动物群落结

构影响的变异解释量为 21%。影响中小型土壤动物群落结构的主要环境因子为生长期(变异解释量为

6%, $P=0.02$)和年份(变异解释量为6%, $P=0.02$),影响均达到显著水平;其次为根部生物量(变异解释量为4%, $P=0.08$)、含水量(变异解释量为3%, $P=0.19$)和pH(变异解释量为2%, $P=0.28$),影响未达到显著水平;而不同玉米品种(系)影响最小(变异解释量<1%, $P=0.96$),几乎没有影响(表4)。

3 讨论

土壤是生态系统中物质循环和能量转化的重要场所,土壤动物作为土壤生态系统的重要组成部分,是土壤质量评价的重要生物指标(陈建秀等,2007;邵元虎等,2015)。种植抗虫转基因玉米是否会对非靶标土壤动物造成影响,一些学者对此进行了研究。但已有的研究中,调查方法比较单一,研究类群不全面,如王柏凤等(2014)利用干漏斗法研究了转 *cry1Ac* 基因玉米种植对土壤跳虫的影响,刘新颖等(2016a)利用手捡法和巴氏罐诱捕法研究了转 *cry1Ie* 基因玉米种植对大型土壤动物群落的影响,刘新颖等(2016b)利用埋掉落物分解袋法研究了转 *cry1Ac* 基因玉米残体对中小型土壤动物群落的影响。为全面研究转基因玉米种植对土壤动物群落影响,本研究以转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-799 为试验材料,利用手捡法和干漏斗法2种调查方法,对大型和中小型土壤动物进行全面调查。在已有的研究中,大多只进行了群落组成和物种丰富度、个体数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数等群落特征参数的比较分析,本研究除分析群落组成和群落特征参数外,还利用RDA分析研究了不同环境因子在土壤动物群落组成中所起作用,更明确了转基因玉米品种(系)在土壤动物群落结构形成中的作用。

本研究结果表明转基因与非转基因玉米之间无论是大型土壤动物类群,还是中小型土壤动物,群落组成均相似,各土壤动物类群多度均无显著差异。王柏凤等(2014)、刘新颖等(2016a, b)研究结果表明,抗虫转基因玉米种植或玉米残体对土壤跳虫等土壤动物群落组成无显著影响,与本研究结果一致;但已有研究也表明转基因作物种植对个别稀有土壤动物类群会产生或多或少的的影响,如王柏凤等(2014)研究表明转基因玉米 Bt-38 种植导致某些稀有符跳类群 *Folsomia bisetosa* 消失,祝向钰等(2012)研究亦表明转基因水稻种植导致土壤跳虫个别稀有类群的消失,并显著影响半土生和真土生类群以及土壤跳虫总量。本研究中同样发现个别稀有

土壤动物类群只出现在某一年份或某一品种(系)中,但个别稀有类群的消失并非只在转基因中,如大型土壤动物石蜈蚣目和啮虫目只在2014年出现,2015年直翅目和等足目只出现在转基因玉米田中,而鳞翅目幼虫只出现在非转基因玉米田中;中小型土壤动物中,石蜈蚣目只在2014年出现,而蜘蛛目只在2015年非转基因玉米田中出现,么蚰科只在2015年转基因玉米田中出现,可见个别稀有类群的消失与转基因品种(系)并无直接关系。转基因玉米 Bt-799 中短期种植对土壤动物群落组成无显著影响。

物种多样性是群落功能复杂性和稳定性的重要度量指标。本研究结果表明,转基因玉米 Bt-799 与其对照玉米郑58田间各群落特征参数均无显著差异。王柏凤(2014)和王柏凤等(2014)研究结果表明,转 *cry1Ac* 基因玉米 Bt-38 和转植酸酶基因玉米 C63-1 种植对土壤跳虫物种丰富度、多度、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数群落特征参数均无显著影响;刘新颖等(2016a)研究结果表明,转 *cry1Ie* 基因玉米种植对大型土壤动物类群群落特征参数无显著影响;姜莹等(2017)研究结果同样表明,转 *EPSPS* 基因玉米 CC-2 的种植对各土壤动物类群群落特征参数无显著影响,与本研究结果一致。说明转基因玉米中短期种植对土壤动物群落多样性无显著影响。

影响土壤动物群落结构的土壤环境因素很多,如温度、湿度、土壤内有机质含量、土壤容重、pH 等(武海涛等,2008;杨旭等,2016)。本研究结果表明,各环境因子中生长期和年份为主要影响因子,这可能是由于不同生长期土壤温度、湿度和有机质含量差异显著,不同年份间由于气候变化大,含水量和有机质含量也会明显不同。而在各因素中,转基因玉米品种(系)是对土壤动物群落组成影响最小的因素,甚至无影响(大型土壤动物变异解释量为0, $P=0.94$;中小型土壤动物变异解释量<1%, $P=0.96$),进一步证明了中短期内种植抗虫转基因玉米 Bt-799 不会对土壤动物群落造成影响。但本试验研究数据仅是在试验小区中进行的2年试验结果,有其时间和空间的局限性,下一步需进行多年定点、较大面积的生态风险监测试验。

参 考 文 献 (References)

- Álvarez-Alfageme F, Ortego F, Castañera P. 2009. Bt maize fed-prey mediated effect on fitness and digestive physiology of the

- ground predator *Poecilus cupreus* L. (Coleoptera: Carabidae). *Journal of Insect Physiology*, 55(2): 143–149
- Arias-Martín M, García M, Lucíañez MJ, Ortego F, Castañera P, Farinós GP. 2016. Effects of three-year cultivation of *Cry1Ab*-expressing Bt maize on soil microarthropod communities. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 220: 125–134
- Bai YY, Jiang MX, Cheng JA, Wang D. 2006. Effects of transgenic Bt *cry1Ab* rice on Collembola population in paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(5): 903–906 (in Chinese) [白耀宇, 蒋明星, 程家安, 王敦. 2006. 转 Bt *cry1Ab* 基因水稻对稻田弹尾虫种群数量的影响. *应用生态学报*, 17(5): 903–906]
- Baumgarte S, Tebbe CC. 2005. Field studies on the environmental fate of the Cry1Ab Bt-toxin produced by transgenic maize (MON810) and its effect on bacterial communities in the maize rhizosphere. *Molecular Ecology*, 14(8): 2539–2551
- Chang L, Liu XH, Ge F. 2011. Effect of elevated O₃ associated with Bt cotton on the abundance, diversity and community structure of soil Collembola. *Applied Soil Ecology*, 47(1): 45–50
- Chang L, Wang BF, Liu XH, Ge F. 2013. Ecological consequences of elevated CO₂ and Bt cotton on soil Collembola. *Journal of Agricultural Science and Technology*, A3: 737–744
- Chen JX, Ma ZC, Yan HJ, Zhang F. 2007. Roles of springtails in soil ecosystem. *Biodiversity Science*, 15(2): 154–161 (in Chinese) [陈建秀, 麻智春, 严海娟, 张峰. 2007. 跳虫在土壤生态系统中的作用. *生物多样性*, 15(2): 154–161]
- Dong WH, Li XQ, Song Y. 2016. Role of soil fauna on soil organic matter formation. *Soils*, 48(2): 211–218 (in Chinese) [董炜华, 李晓强, 宋扬. 2016. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用. *土壤*, 48(2): 211–218]
- Flores S, Saxena D, Stotzky G. 2005. Transgenic Bt plants decompose less in soil than non-Bt plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(6): 1073–1082
- Guo JF, He KL, Bai SX, Zhang TT, Liu YJ, Wang FX, Wang ZY. 2016. Effects of transgenic *cry1Ie* maize on non-lepidopteran pest abundance, diversity and community composition. *Transgenic Research*, 25(6): 761–772
- Guo JF, Zhang C, Yuan ZH, He KL, Wang ZY. 2014. Impacts of transgenic maize with *cry1Ie* gene on arthropod biodiversity in the fields. *Journal of Plant Protection*, 41(4): 482–489 (in Chinese) [郭井菲, 张聪, 袁志华, 何康来, 王振营. 2014. 转 *cry1Ie* 基因抗虫玉米对田间节肢动物群落多样性的影响. *植物保护学报*, 41(4): 482–489]
- Höss S, Menzel R, Gessler F, Nguyen HT, Jehle JA, Traunspurger W. 2013. Effects of insecticidal crystal proteins (Cry proteins) produced by genetically modified maize (Bt maize) on the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Environmental Pollution*, 178: 147–151
- Icoz I, Stotzky G. 2008. Fate and effects of insect-resistant Bt crops in soil ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(3): 559–586
- Jiang Y, Wang BF, Zhou L, Jia B, Feng SD, Song XY. 2017. Impacts of transgenic herbicide-resistant maize with *EPSPS* gene on soil fauna community. *Plant Protection*, 43(1): 34–39 (in Chinese) [姜莹, 王柏凤, 周琳, 贾博, 冯树丹, 宋新元. 2017. 转 *EPSPS* 基因抗除草剂玉米 'CC-2' 对土壤动物群落的短期影响. *植物保护*, 43(1): 34–39]
- Li YS, Zhang WW. 2011. *Chinese insects illustrated*. Chongqing: Chongqing University Press (in Chinese) [李元胜, 张巍巍. 2011. *中国昆虫生态大图鉴*. 重庆: 重庆大学出版社]
- Liu XY, Wang BF, Wang J, Feng SD, Song XY. 2016b. Effects of leaf residue decomposition of *cry1Ac*-transgenic insect-resistant maize on community structure of soil animals. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 384–390 (in Chinese) [刘新颖, 王柏凤, 王江, 冯树丹, 宋新元. 2016b. 转 *cry1Ac* 基因抗虫玉米叶片残体降解对土壤动物群落结构的影响. *植物保护学报*, 43(3): 384–390]
- Liu XY, Wang BF, Zhou L, Feng SD, Song XY. 2016a. Effects of *cry1Ie* on soil macro-fauna diversity in transgenic maize IE09S034 fields. *Crops*, (1): 62–68 (in Chinese) [刘新颖, 王柏凤, 周琳, 冯树丹, 宋新元. 2016a. 转 *cry1Ie* 基因抗虫玉米 IE09S034 种植对田间大型土壤动物多样性的影响. *作物杂志*, (1): 62–68]
- Mendelsohn M, Kough J, Vaituzis Z, Matthews K. 2003. Are Bt crops safe? *Nature Biotechnology*, 21(9): 1003–1009
- Obrist LB, Dutton A, Albajes R, Bigler F. 2006. Exposure of arthropod predators to Cry1Ab toxin in Bt maize fields. *Ecological Entomology*, 31: 143–154
- Ren ZT, Shen WJ, Liu B, Xue K. 2017. Effects of transgenic maize on biodiversity of arthropod communities in the fields. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(12): 2315–2325 (in Chinese) [任振涛, 沈文静, 刘标, 薛堃. 2017. 转基因玉米对田间节肢动物群落多样性的影响. *中国农业科学*, 50(12): 2315–2325]
- Saxena D, Flores S, Stotzky G. 1999. Insecticidal toxin in root exudates from Bt corn. *Nature*, 402(6761): 480
- Saxena D, Flores S, Stotzky G. 2002. Bt toxin is released in root exudates from 12 transgenic corn hybrids representing three transformation events. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(1): 133–137
- Shao YH, Zhang WX, Liu SJ, Wang XL, Fu SL. 2015. Diversity and function of soil fauna. *Acta Ecologica Sinica*, 35(20): 6614–6625 (in Chinese) [邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 2015. 土壤动物多样性及其生态功能. *生态学报*, 35(20): 6614–6625]
- Wang BF. 2014. Effect of transgenic maize on Collembola. Ph. D Thesis. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese) [王柏凤. 2014. 转基因玉米对跳虫的影响. 博士学位论文. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所]
- Wang BF, Song XY, Chang L, Wu DH. 2014. Effect of transgenic corn (C63-1) cultivation on soil Collembola. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1215–1221 (in Chinese) [王柏凤, 宋新元, 常亮, 吴东辉. 2014. 转基因玉米 C63-1 种植对土壤跳虫的影响. *应用昆虫学报*, 51(5): 1215–1221]
- Wang JW, Feng YJ, Luo SM. 2005. Effects of Bt corn straw decomposi-

- tion on soil enzyme activities and soil fertility. Chinese Journal of Applied Ecology, 16(3): 524–528 (in Chinese) [王建武, 冯远娇, 骆世明. 2005. Bt玉米秸秆分解对土壤酶活性和土壤肥力的影响. 应用生态学报, 16(3): 524–528]
- Wang S, Wang BF, Yan DS, Wang J, Wu FC, Xi JH, Song XY. 2014. Impacts of transgenic herbicide-resistant maize with *EPSPS* gene on arthropod biodiversity in the fields. Journal of Biosafety, 23(4): 271–277 (in Chinese) [王尚, 王柏凤, 严杜升, 王军, 武奉慈, 席景会, 宋新元. 2014. 转*EPSPS*基因抗除草剂玉米CC-2对田间节肢动物多样性的影响. 生物安全学报, 23(4): 271–277]
- Wang YQ, He KL, Jiang F, Wang YD, Zhang TT, Wang ZY, Bai SX. Resistance of transgenic Bt corn variety BT99 to the Asian corn borer. Chinese Journal of Applied Entomology, 51(3): 636–642 (in Chinese) [王月琴, 何康来, 江帆, 王依冬, 张天涛, 王振营, 白树雄. 2014. BT99玉米对亚洲玉米螟抗性研究. 应用昆虫学报, 51(3): 636–642]
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall DH. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 304(5677): 1629–1633
- Wu HT, Lü XG, Yang Q, Jiang M, Tong SZ. 2008. Characteristics and influencing factors of soil fauna community structure in an island forest in wetland, Sanjiang Plain. Journal of Beijing Forestry University, 30(2): 50–58 (in Chinese) [武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明, 佟守正. 2008. 三江平原湿地岛状林土壤动物群落结构特征及影响因素. 北京林业大学学报, 30(2): 50–58]
- Yang B, Chen H, Liu XH, Ge F, Chen QY. 2014. Bt cotton planting does not affect the community characteristics of rhizosphere soil nematodes. Applied Soil Ecology, 73: 156–164
- Yang X, Lin L, Zhang XP, Zhang LM, Sha D. 2016. Spatio-temporal distribution characteristics of meso-micro soil fauna in typical cultivated black soil in the Song-nen plain area. Acta Ecologica Sinica, 36(11): 3253–3260 (in Chinese) [杨旭, 林琳, 张雪萍, 张利敏, 沙迪. 2016. 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, 36(11): 3253–3260]
- Yin WY. 1998. Pictorial keys to soil animals of China. Beijing: Science Press (in Chinese) [尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社]
- Zhong JM. 1990. Larvae taxonomy. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [钟觉民. 1990. 幼虫分类学. 北京: 中国农业出版社]
- Zhu XY, Li ZY, Chang L, Yuan YY, Ge F, Wu G, Chen FJ. 2012. Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddy fields. Acta Ecologica Sinica, 32(11): 3546–3554 (in Chinese) [祝向钰, 李志毅, 常亮, 袁一扬, 戈峰, 吴刚, 陈法军. 2012. 转Bt水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化. 生态学报, 32(11): 3546–3554]
- Zwahlen C, Hilbeck A, Nentwig W. 2007. Field decomposition of transgenic Bt maize residue and the impact on non-target soil invertebrates. Plant and Soil, 300(1/2): 245–257

(责任编辑:张俊芳)