应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2014, 51(5): 1222−1229. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2014.145

臭氧处理下转基因棉花凋落物分解对土壤跳虫的影响*

常 亮[1,2] 王柏凤[3] 刘向辉[1] 戈 峰[1**]

（1. 中国科学院动物研究所 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室，北京 100101；
2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所，长春 130102；3. 吉林省农业科学院农业生物技术研究所，长春 130033）

摘 要 **【目的】** 转基因棉花已经在我国大量种植，未来气候变化下转基因作物分解与养分循环及作物产量密切相关，但是这种交互作用对凋落物分解及土壤动物的影响并不知道。**【方法】** 本文通过野外凋落物分解实验，研究了臭氧升高和转基因品种处理下棉花凋落物分解对跳虫的影响。**【结果】** 结果发现，无论是 3 次调查的总体分析还是在不同棉花生长期，不同棉花品种和臭氧浓度通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数均没有显著影响。但是有一些类群如棘跳和长跳在转基因棉花凋落物中显著减少，说明转基因棉花凋落物对跳虫某些类群存在一定影响，可能与转基因棉花凋落物中的高纤维素和木质素有关，因为这些可以影响跳虫的食物质量。**【结论】** 转基因品种和臭氧升高对跳虫总体并未产生显著影响，但是对一些敏感类群产生了显著影响，未来还需要对这些敏感类群进行长期的监测以保证土壤生态系统中多样性和功能的安全性。

关键词 殖转基因棉花，跳虫，臭氧升高，凋落物，分解

Effect of transgenic cotton litter decomposition under elevated ozone concentration on soil Collembola

CHANG Liang[1,2] WANG Bai-Feng[3] LIU Xiang-Hui[1] GE Feng[1**]

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. Agro-Biotechnology Research Institute, Jilin Academy of Agriculture Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract **[Objectives]** Transgenic Bt cotton has been widely cultivated in China. Decomposition of transgenic plant litter under different climate scenarios should be closely correlated with nutrient cycling and plant productivity. However, the interactive effect of transgenic cotton and elevated ozone on soil fauna has not been previously studied. **[Methods]** A field litterbag experiment including two cotton varieties (GK12 and its control SM3) and two ozone concentrations (ambient air and elevated ozone) was designed to investigate the effects of transgenic cotton litter and ozone on soil Collembola in 2009. **[Results]** Our results show that, both overall and in different cotton growth stages, density, species richness, diversity and community structure of Collembola in litterbags were not impacted by transgenic cotton varieties and elevated ozone concentration. Some groups such as *Onychiurus* spp.and *Entomobrya* spp. did, however, significantly decrease in transgenic cotton litterbags. This might have be caused by poor litter quality (higher cellulose and lignin content) in the transgenic cotton treatment. **[Conclusion]** Litter decomposition of transgenic cotton and elevated ozone concentration did not have a significant effect on soil Collembola over the course of a one year experiment, however, some sensitive groups significantly

* 资助项目：中国科学院知识创新工程重要方向项目（KSCX2-EW-Z-6、2010-Biols-CAS-01）；转基因生物新品种培育重大专项（2012ZX08011002）；国家自然科学青年基金（31200331）

**通讯作者，E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期：2014-08-21，接受日期：2014-09-02

decreased in the transgenic cotton litter treatment. Future experiments should focus on these sensitive groups..

Key words　transgenic cotton, Collembola, elevated ozone, litter, decomposition

转 Bt 棉就是将源自苏云金杆菌 （*Bacillus thuringiensis*，Bt）的基因转入棉花中用以防治棉田内的主要害虫棉铃虫。由于 Bt 棉可以减轻杀虫剂的使用，减少棉农在杀虫剂方面的花费。转 Bt 棉已经在中国大量种植，但以往关于转 Bt 棉的研究大部分都集中在它的杀虫效力和产量方面，极少有人关注转 Bt 棉对非靶标土壤动物的影响 （Huang *et al.*，2003；Wang *et al.*，2009；Chang *et al.*，2013）。

而转 Bt 作物与亲本之间的不同除了体现在分泌 Bt 毒蛋白之外，Bt 作物中其他化合物也与其亲本有明显的不同（Hönemann and Zurbrügg，2008）。这些棉花在收割后，残体会再随着翻耕而进入土壤中。随着未来面临的近地表 O_3 升高，又将进一步改变 Bt 作物与亲本间的差异，但是这种差异如何？由此引起的未来 O_3 升高下转 Bt 及其亲本作物对非靶标土壤动物的影响如何？目前仍不清楚。

跳虫作为三大土壤动物之一，栖息环境多样，食性广泛，而且与菌类有直接的取食关系，因此是转 Bt 作物对土壤动物影响研究的合适代表类群（陈建秀，2007）。

通过本研究，拟解决两个问题：1）转 Bt 棉凋落物对非靶标生物土壤跳虫和螨类有何影响？2）这种影响在未来大气 O_3 升高条件下会有怎样的改变？

1　材料与方法

1.1　开顶式气室

本试验棉花凋落物材料的处理在开顶式气室（OTC）中进行，气室位于北京昌平区香屯试验基地院内（40º11' N，116º24' E）。模拟大气 O_3 升高的装置包括鼓气系统、O_3 发生和加入系统和熏气室组成。开顶式气室主体为最大直径 2 m、高为 2.2 m 的正八面柱体，横截面正八边形的边长为 0.77 m；为减少外部气体对室内气体的影响，正八面柱体顶端增加 45º 收缩口，收缩口高为 0.3 m，顶边长为 0.51 m。O_3 产生用北京同林科技有限公司的 O_3 发生器（3S-A15，Tonglin Technology Beijing，China）。以洁净的压缩空气为气源，用以产生 O_3，接着将 O_3 通入鼓风机的进气口，将 O_3 与空气混合均匀后，通入 4 个用于模拟 O_3 升高的气室中；对照处理除了不通 O_3 之外，其余所有实验条件均相同。O_3 浓度在进气口和气室出口两端同时进行监测，1 次/h，通过调节 O_3 发生器的功率，来保证升高处理气室中 O_3 浓度为对照的 2 倍，大气 O_3 浓度为：ambient air “AA” = 37.3 nmol•mol^{-1}，处理 O_3 浓度为： elevated O_3 “EO” = 72.2 nmol•mol^{-1}。每个 O_3 浓度处理分别在 4 个 OTC 内进行，相当于 4 个重复。详细参见 Chang 等（2011）。

1.2　棉花凋落物材料

包括两个棉花品种，转 Bt 棉 GK-12（表达 Cry1A&C 蛋白）和亲本常规棉泗棉三号。2008 年 5 月 9 日，将棉籽洒在预先挖好的坑中，每半个 OTC 的面积挖出 3 条垄，按垄的不同长度，各种植 3，4，5 不等数量的棉花。棉花在 2008 年 5 月 13 日出芽。除不使用农药外，农事操作与正常种植棉花相同。在 2008 年 10 月 25 日，采摘各个气室中的棉叶（去除叶柄），–20ºC 保存，实验开始前一个月，将 4 个处理的棉叶烘干（50ºC，4 d），分装到 4 mm 孔径的尼龙网袋中，每袋 4 g。

1.3　棉花凋落物化学成分测定

实验所用棉叶的非结构性糖含量采用 Tissue 和 Wright（1995）的 DNS 法测定，即 3,5-二硝基水杨酸比色法的英文简称。其原理是 3,5-二硝基水杨酸在中性或偏碱性条件下与多糖水解的还原糖共热后被还原成棕红色的氨基化

合物——3-氨基-5-硝基水杨酸，在一定范围内，还原糖的量和反应液的颜色呈正比。

实验所用棉叶的总氮含量用凯氏定氮仪进行测定，蛋白质是含氮的有机化合物。样品与硫酸和催化剂一同加热消化，使蛋白质分解，分解的氨与硫酸结合生成硫酸铵。然后碱化蒸馏使氨游离，用硼酸吸收后再以硫酸或盐酸标准溶液滴定，根据酸的消耗量乘以换算系数，即为蛋白质含量，然后再换算成氮含量。

1.4 实验地处理

实验样地位于中国农业科学院转基因作物中试基地（39º18' N，116º24' E），样地土壤性质如下：pH：8.11±0.02；有机质含量：（17.36±0.94）g/kg；氮含量：(0.45±0.04) g/kg；水解性磷：(29.54±4.71) mg/kg；水解性钾：（323.67±21.81）mg/kg。

棉花凋落物总共 4 个处理，分别是对照大气中的泗棉三号，记为 SMAA；对照大气中的 GK-12，记为 GKAA；高 O_3 中的泗棉三号，记为 SMEO；高 O_3 中的 GK-12，记为 GKEO；按照完全随机区组设计，每个处理 8 次重复。总共 16 块样地。每个样地面积为 20 m × 20 m，每块样地之间间隔 10 m。棉花凋落物总计 96 袋（2 个品种 × 8 个样地 × 2 个 O_3 处理 × 3 次取样）。2009 年 4 月 15 日，在样地内常规棉和转 Bt 棉开始播种，2009 年 4 月 23 日出苗。除不使用农药和杀虫剂外，其余农事操作与棉花正常管理相同。

2009 年 5 月 15 日，所有实验用棉叶按照品种划分（转 Bt 棉棉叶埋入转 Bt 棉棉田中，常规棉棉叶埋入常规棉棉田中），水平埋入样地土壤内 5 cm。自 2009 年 6 月 15 日开始取样，到 2009 年 8 月 15 日结束，每月取每个处理的棉叶 1 袋。棉叶取出后，带回实验室，用 Macfadyen（1961）改进干漏斗法分离棉叶中的跳虫。分离出的标本用 75%乙醇保存，解剖镜下制成玻片后，按照尹文英《中国土壤动物检索图鉴》和 Christiansen and Bellinger（1980）进行鉴定。

1.5 统计分析

群落多样性指数用香浓威纳指数（Shannon-Wiener index），如下式：

$$H' = -\sum p_i \log_e p_i$$

p_i 第 i 个个体所占总体取样数量的比例。

SPSS 13.0.1（SPSS Inc. Chicago，IL，USA）统计分析软件分析，跳虫数量数据分析前用对数转换，以满足方差分析的要求（即数据符合正态分布）。利用重复方差分析方法来分析棉花品种和 O_3 对跳虫多度、类群丰富度和跳虫群落多样性指数的影响，3 次取样时间作为重复水平，棉花品种和 O_3 作为组间因素（“Between subject” factors）。

利用 CANOCO-version 4.5（ter Braak and Šmilauer，2002）软件对调查数据进行典范对应分析，采用经典对应分析（Classical correspondence analysis，CCA）不同环境因子对跳虫群落结构的影响。

2 结果与分析

2.1 O_3 和棉花品种对棉叶化学成分的影响

通过对不同大气 O_3 浓度和棉花品种对棉叶化学成分的分析表明，不同大气 O_3 浓度和棉花品种间（转 Bt 和常规棉）对棉叶碳含量、氮含量和碳氮比都没有显著差异（表 1）。

2.2 群落组成

2009 年不同 O_3 浓度和棉花品种处理棉花凋落物中共采集土壤跳虫标本 3 504 头，包括 6 科，17 属（表 2）。其中 5 个主要属的数量占跳虫总数量的 90%以上，分别是：1）长角跳属（*Entomobrya*，7.8%）；2）棘跳属（*Onychiurus*，27.9%）；3）原棘跳属（*Probolaphorura*，8.7%）；4）裔符跳属（*Folsomides*，18.7%）；5）原等跳属（*Proisotoma*，27.2%）。

CCA 分析表明 O_3 浓度（n = 96，CCA，P= 0.060）和棉花品种（n = 96，CCA，P = 0.058）通过棉花凋落物对跳虫群落结构都没有显著影响。CCA 分析中，棉花品种和 O_3 浓度均解释了小于 3%的总体变异度。棉花品种和 O_3 浓度通过棉花凋落物的交互作用对跳虫群落组成也没有显著影响（图 1，n = 96，CCA，P = 0.131）。

表 1　不同大气 O_3 浓度对不同棉花品种棉叶组织中化学成分的影响（平均值±标准误）

Table 1　Chemical components of cotton leaves in different cotton varieties and different concentrations of O_3 (mean±SE)

化学成分 Chemical components	大气对照 Ambient air		臭氧升高 Elevated O_3	
	泗棉三号（非 Bt） SM (Non-Bt)	国抗 12（Bt） GK (Bt)	泗棉三号（非 Bt） SM (Non-Bt)	国抗 12（Bt） GK (Bt)
叶碳 (mg/g)	53.0±5.89 a,A	47.2±3.92 a,A	42.3±4.24 a,A	49.0±5.76 a，A
叶氮 (mg/g)	15.1±0.86 a.A	15.4±1.05 a,A	14.8±0.83 aA	15.0±0.45 a，A
叶碳/氮	3.63±0.50 a.A	3.18±0.33 a,A	2.96±0.39 a，A	3.34±0.46 a，A

每个值表示 4 个 OTC 的平均值，不同小写字母表示棉花品种间的差异，不同大写字母表示不同 O_3 浓度间的差异。

Each number indicates mean value of four OTC treatments, different lowercase letters indicates a significant effect between different cotton varieties, different uppercase letters indicates a significant effect between different ozone concentrations.

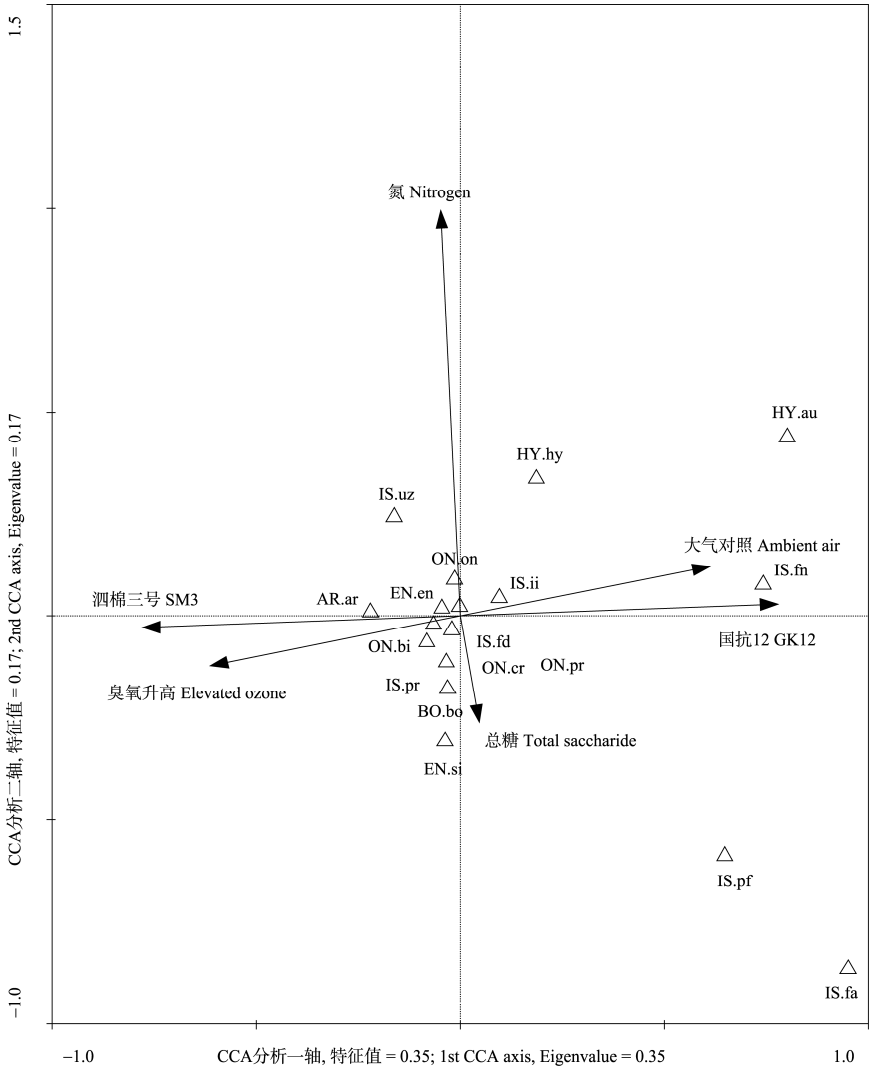

图 1　典范对应分析不同臭氧浓度（大气对照和臭氧升高）和棉花品种（转基因棉国抗 12 和亲本对照泗棉三号）凋落物中跳虫平均数与环境因子之间的关系

Fig. 1　Ordination biplot of canonical correspondence analysis (CCA), with the mean abundances of soil Collembola in the litters of different ozone concentration (ambient air and elevated ozone) and cotton variety (transgenic Bt cotton GK12 and its near-isolines SM 3)

跳虫的全名参见表 1。The binomial nomenclature of the soil Collembola is given in Table 1.

表 2 2009 年 5—7 月暴露大田实验中 4 个处理水平棉花凋落物内跳虫各属个体数

Table 2 Total individual number of collembolans in cotton litterbags with four treatments exposed in ten fields from May to July in 2009

跳虫 Collembola		对照 Ambient air (AA)		O_3 升高 Elevated O_3 (EO)	
		泗棉三号（非 Bt） SM (Non-Bt)	国抗 12（Bt） GK (Bt)	泗棉三号（非 Bt） SM (Non-Bt)	国抗 12（Bt） GK (Bt)
科 Family	属 Genus （缩写 Abbreviation）				
齿棘圆跳科 Arrhopalitidae	齿棘圆跳属 *Arrhopalites* (AR.ar)	1	2	5	0
钩圆跳科 Bourletiellidae	钩圆跳属 *Bourletiella* (BO.bo)	20	6	8	19
长角跳科 Entomobryidae	长角跳属 *Entomobrya* (EN.en)	80	56	89	47
	裸长角跳属 *Sinella* (EN.si)	1	0	0	1
球角跳科 Hypogastruridae	奥氏跳属 *Austrogastrura* (HY.au)	0	24	0	0
	球角跳属 *Hypogastrura* (HY.hy)	1	1	0	2
等节跳科 Isotomidae	符跳属 *Folsomia* (IS.fa)	0	16	0	0
	裔符跳属 *Folsomides* (IS.fd)	179	150	182	143
	类符跳属 *Folsomina* (IS.fo)	0	8	0	1
	似等跳属 *Isotomodes* (IS.is)	7	12	7	18
	原等跳属 *Proisotoma* (IS.pr)	230	97	183	444
	拟符跳属 *Pseudofolsomia* (IS.pf)	0	38	1	0
	未命名跳属 *Uzelia* (IS.uz)	8	0	1	3
棘跳科 Onychiuridae	双毛跳属 *Bionychiurus* (ON.bi)	51	12	26	35
	未命名跳属 *Cribrochiurus* (ON.cr)	2	1	1	2
	棘跳属 *Onychiurus* (ON.on)	290	364	216	108
	原棘跳属 *Probolaphorura* (ON.pr)	89	82	85	49
共计 Total		959	869	804	872

2.3　O_3 处理下棉花凋落物中的跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数

2.3.1　不同棉花生长期　O_3 升高通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数（香浓威纳指数）都没有显著影响（LSD test: df = 1, 28；P > 0.05，表 3）。在棉花不同生长期，不同 O_3 浓度通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数也没有显著影响（LSD test: df = 1, 28；P > 0.05）。

2.3.2　对主要类群的影响　不同 O_3 浓度通过棉花凋落物对跳虫 4 个主要属多度没有显著影响（LSD test: df= 1, 28；P > 0.05，表 4）。

2.4　不同棉花品种凋落物中跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数

2.4.1　总体和不同棉花生长期　不同棉花品种通过棉花凋落物（转 Bt 和常规）对跳虫多度和群落多样性指数（香浓威纳指数）都没有显著影响（LSD test: df = 1, 28；P > 0.05）。不同棉花生长期，品种（转 Bt 和常规）通过棉花凋落物对跳虫多度和群落多样性指数（香浓威纳指数）都没有显著影响（LSD test: df= 1, 28；P > 0.05）。

2.4.2　对主要类群的影响　Bt 品种棉叶袋中棘跳属（$F_{1, 28}$ = 6.939，P = 0.014）和长角跳属（$F_{1, 28}$ = 8.305，P = 0.008）多度显著低于非 Bt 品种，不同棉花品种对跳虫其余 3 个主要属的多度没有显著影响（LSD test: df= 1, 28；P > 0.05，表 4）。

2.5　不同 O_3 浓度和棉花品种交互作用对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数的影响

不同 O_3 浓度和棉花品种交互作用对跳虫总体多度、类群丰富度和群落多样性指数（香浓威纳指数）都没有显著影响，对各个生长期的跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数也没有显著影响（LSD test: df= 1, 28；P > 0.05，表 3）。不同 O_3 浓度和棉花品种交互作用对跳虫各主要属多度无显著影响（LSD test: df= 1, 28；P > 0.05，表 4）。

表 3　方差分析中不同 O_3 浓度和棉花品种对跳虫多度、类群丰富度和香浓威纳指数影响的 P 值

Table 3　*P*-values from ANOVAs for the effect of O_3 level and cotton varieties on abundance, genera richness and Shannon-Wiener index of Collembola in field litterbags

跳虫 Collembola	时间 Time	臭氧 O_3	品种 Variety	交互 O×V
多度 AoC[1]	总体 Total	0.117	0.063	0.373
类群丰富度 SR[2]	总体 Total	0.326	0.217	0.845
香浓指数 SoC[3]	总体 Total	0.761	0.150	0.800
多度 AoC[1]	六月 June	0.341	0.792	0.937
类群丰富度 SR[2]	苗期 Seeding stage	0.274	0.358	0.479
香浓指数 SoC[3]	苗期 Seeding stage	0.792	0.144	0.459
多度 AoC[1]	七月 July	0.519	0.318	0.823
类群丰富度 SR[2]	现蕾期 Squaring stage	0.863	0.827	0.534
香浓指数 SoC[3]	现蕾期 Squaring stage	0.840	0.930	0.465
多度 AoC[1]	八月 August	0.512	0.141	0.412
类群丰富度 SR[2]	花铃期 Flowering and boll-setting stage	0.887	0.245	0.632
香浓指数 SoC[3]	花铃期 Flowering and boll-setting stage	0.883	0.412	0.259

[1] 跳虫多度；[2] 跳虫类群丰富度；[3] 跳虫香浓指数。下表同。

[1]Abundance of Collembola; [2] Species richness of Collembola; [3] Shannon-Wienner index of Collembola. The same below.

表 4 方差分析中不同 O_3 浓度和棉花品种对跳虫各主要属多度影响的 *P* 值

Table 4 *P*-values from ANOVAs for the effect of O_3 level and cotton varieties on abundance of Collembola's main genera in field litterbags

跳虫 Collembola	主要属 Main genera	臭氧 O_3	品种 Variety	交互 O×V
多度 AoC[1]	长角跳属 *Entomobrya*	0.641	0.008**	0.323
多度 AoC[1]	裔符跳属 *Folsomides*	0.977	0.752	0.521
多度 AoC[1]	原等跳属 *Proisotoma*	0.620	0.396	0.299
多度 AoC[1]	棘跳属 *Onychiurus*	0.153	0.014*	0.442
多度 AoC[1]	原棘跳属 *Probolaphorura*	0.115	0.272	0.388

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

3 结论与讨论

3.1 转 Bt 棉花凋落物的影响

我们的研究表明，不同棉花品种通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数均没有显著影响。不同棉花生长期，品种（转 Bt 和常规）通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数（香浓威纳指数）也没有显著影响。与我们研究结果类似，Hönemann 等（2008）也发现 9 个月的大田调查中，转 Bt 玉米与常规玉米棉花凋落物中，中、小型土壤动物无显著差异。Vaufleury 等（2007）调查转 Bt 玉米和常规玉米中部分土壤动物，发现转 Bt 玉米对腹足动物和小型节肢动物均无显著影响。Corte 等（2007）也发现转 Bt 玉米和常规玉米间土壤小型节肢动物差异非常小，远远小于不同土地利用方式间土壤动物的不同。这主要是由于 Bt 毒蛋白的专一性非常强，对非靶标动物无直接影响。

另外，Bakonyi 等（2006）也发现，在转 Bt 玉米和常规玉米凋落物中，某些跳虫种类更喜欢取食常规玉米的凋落物。主要原因可能有两个，一是由于 Bt 基因的转入，转 Bt 作物在生长过程中，地上部分会比非 Bt 作物利用更多的氮，自由氨基酸和可溶性蛋白等营养物质，会使某些营养物质的地下分配减少（Breen *et al.*，1999；Chen *et al.*，2005）。第二，Bt 作物与非 Bt 作物的不同不止表现在 Bt 作物含有 Bt 毒蛋白，植物组织内化学成分也有差异（Hönemann *et al.*，2008）。有研究认为，转 Bt 作物凋落物中纤维素含量高于常规作物（Saxena and Stotzky，2000；Flores *et al.*，2005；Poerschmann *et al.*，2005），而纤维素为不可利用的碳，虽然 Bt 与常规棉叶中总糖含量没有显著差异，但 Bt 棉叶中可利用的碳源物质低于常规棉叶；同时，纤维素含量高，会使叶片质地变硬，不易取食。同样，我们发现转 Bt 棉花凋落物中棘跳属和长角跳属多度显著低于常规棉花凋落物。说明这两个类群跳虫对转 Bt 与常规棉之间纤维素等物质的差异更为敏感。棘跳属在功能团的划分上，属于真土生跳虫（Sticht *et al.*，2006），真土生跳虫由于终年生活在土中，足及弹器等运动器官退化，活动能力较差，土壤中食物相对单一，所以真土生土壤跳虫比半土生和土上生跳虫食性更简单，也更容易受到环境因子变化的影响。同时，棘跳属占跳虫总数的 27.9%，是数量最大的类群，而且对转 Bt 棉非常敏感，可以作为转 Bt 作物种植的指示类群。

3.2 不同 O_3 浓度的影响

本研究表明，O_3 升高通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和跳虫群落多样性指数都没有显著影响。在棉花不同生长期，不同 O_3 浓度通过棉花凋落物对跳虫多度、类群丰富度和群落多样性指数也没有显著影响。不同 O_3 浓度通过棉花凋落物对跳虫 4 个主要属多度没有显著影响。无论是常规棉还是转 Bt 棉凋落物中，O_3 浓度升高通过棉花凋落物对跳虫各属相对密度都没有显著影响。说明 O_3 因子通过棉花凋落物对跳虫没有任何影响。

3.3　不同O_3浓度和棉花品种通过棉花凋落物对棉田内跳虫总体多度影响

Cragg 和 Bardgett（2001）认为，土壤过程主要由土地中现有土壤动物的优势种的生理特性所决定，而我们发现，无论是棉花品种还是 O_3 浓度通过棉花凋落物对跳虫总体多度和群落多样性指数均没有显著影响。主要是由于跳虫主要属的数量比较平均，而对棉花品种敏感的棘跳属和长角跳属都不是绝对的优势属，这就是为什么虽然有些属的跳虫对棉花品种敏感，却对跳虫总体没有显著影响。

我们发现不同棉花品种凋落物对跳虫总体多度和群落多样性指数没有显著影响，验证了 Bt 棉凋落物对非靶标土壤小型节肢动物的安全性。但是，由于棉花品种不同所造成的棉花凋落物中的化学物质差异，却对跳虫某些敏感属（如棘跳属和长角跳属）的多度产生了间接影响。根据上述研究，我们推测在未来臭氧升高条件下，棉花通过凋落物的途径对土壤跳虫的作用较小，但是随着不同作物区系中跳虫类群的组成不同，这种影响可能会发生变化。

参考文献 (References)

Bakonyi G, Szira F, Kiss I, Villányi I, Seres A, Székacs A, 2006. Preference tests with collembolas on isogenic and Bt-maize. *Eur. J. Soil Biol.*, 42 (1): S132–S135.

Breen PJ, Flynn R, Ellers KC, French C, Dugger P, Richter D, 1999. Effect of nitrogen and vegetative growth on plant resistance to bollworm, *Helicoverpa zea*, in selected Bt cotton varieties // Dugger P (ed.). American Proceedings Beltwide Cotton Conferences. 1234–1236.

Chang L, Liu XH, Ge F, 2011. Effect of elevated O_3 associated with Bt cotton on the abundance, diversity and community structure of soil Collembola. *Appl. Soil Ecol.*, 47(1): 45–50.

Chang L, Wang BF, Liu XH, Ge F, 2013. Ecological consequences of elevated CO_2 and Bt cotton on soil Collembola. *J. Agr. Sci. Tech. A*, 3(9): 737–744.

Chen FJ, Wu G, Ge F, Parajulee MN, Shrestha RB, 2005. Effects of elevated CO_2 and transgenic Bt cotton on plant chemistry, performance and feeding of an insect herbivore, the cotton bollworm. *Entomol. Exp. Appl.*, 115(2): 341–350.

Christiansen K, Bellinger P, 1980. The Collembola of North America north of the Rio Grand. Grinnell College, Grinnell, Iowa. 1–299.

Cortet J, Griffiths BS, Bohanec M, Demsar D, Andersen MN, Caul S, Birch AN, Pernin C, Tabone E, Vaufleury AD, Ke X, Krogh PH, 2007. Evaluation of effects of transgenic Bt maize on microarthropods in a European multi-site experiment. *Pedobiologia*, 51(3): 207–218.

Cragg RG, Bardgett RD, 2001. How changes in soil fauna diversity and composition within a trophic group influence decomposition progress. *Soil Biol. Biochem.*, 33(15): 2073–2081.

Flores S, Saxena D, Stotzky G, 2005. Transgenic Bt plants decompose less in soil than non-Bt plants. *Soil Biol. Biochem.*, 37(6): 1073–1082.

Hönemann CL, Zurbrügg WN, 2008. Effects of Bt-corn decomposition on the composition of the soil meso- and macrofauna. *Appl. Soil Ecol.*, 40(2): 203–209.

Huang JK, Hu RF, Carl P, Qiao FB, Scott R, 2003. Biotechnology as an alternative to chemical pesticides: a case study of Bt cotton in China. *Agr. Econ.*, 29 (1): 55–67.

Macfadyen A, 1961. Improved funnel-type extractors for soil arthropods. *J. Anim. Ecol.*, 30(1): 171–184.

Moore PD, 2002. Biogeography: springboards for springtails. *Nature a-z Index*, 418: 381.

Poerschmann J, Gathmann A, Augustin J, Langer U, Górecki T, 2005. Molecular composition of leaves and stems of genetically modified Bt and near-isogenic non-Bt maize-characterisation of lignin patterns. *J. Environ. Qual.*, 34(5): 1508–1518.

Saxena D, Stotzky G, 2000. Insecticidal toxin from *Bacillus thuringiensis* is released from roots of transgenic Bt corn in vitro and in situ. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 33(1): 35–39.

Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel HJ, 2006. Effects of elevated atmospheric CO_2 and N fertilization on abundance, diversity and C-isotopic signature of Collembolan communities in arable soil. *Appl. Soil Ecol.*, 34(2/3): 219–229.

ter Braak CJF, Šmilauer P, 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, NY. 1–14.

Tissue DT, Wright SJ, 1995. Effects of seasonal water availability on phenology and the annual shoot carbohydrate cycle of tropical forest shrubs. *Funct. Ecol.*, 9(3): 518–527.

Wang ZJ, Lin H, Huang JK, Hu RF, Scott R, Carl P, 2009. Bt cotton in China: Are secondary insect infestations offsetting the benefits in farmer fields? *Agr. Sci. Chin.*, 8 (1): 83–90.

Vaufleury AD, Kramarz PE, Binet P, Cortet J, Caul S, Andersen MN, Plumey E, Coeurdassier M, Krogh PH, 2007. Exposure and effects assessments of Bt-maize on non-target organisms (gastropods, microarthropods, mycorrhizal fungi) in microcosms. *Pedobiologia*, 51(3): 185–194.

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.