

温室气体 (CO₂ 和 O₃) 升高下转 Bt 棉凋落物对土壤甲螨种群数量的影响*

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】 Bt 棉已在我国种植广泛。而温室气体 (CO₂ 和 O₃) 浓度升高会进一步改变植物的化学成分, 从而通过凋落物可能会引起土壤动物(甲螨)种群数量的变化。【方法】本文应用开顶式气室(OTC), 研究了 CO₂ 和 O₃ 浓度升高下转 Bt 棉花凋落物对土壤甲螨种群数量的影响。【结果】研究结果发现, 不同取样时间对甲螨种群数量有显著影响, 甲螨种群数量的最高值出现在 7 月份的采样中。CO₂ 浓度升高通过棉花凋落物显著降低了甲螨的种群数量。O₃ 浓度升高通过棉花凋落物降低了常规棉凋落物中的甲螨种群数量, 对转 Bt 作物凋落物中甲螨种群数量无显著影响。【结论】不同温室气体 (CO₂ 和 O₃) 浓度升高对土壤甲螨作用不同, 其中 CO₂ 浓度升高通过棉花凋落物可以显著降低土壤动物的种群数量, 而 O₃ 浓度升高作用较小。转 Bt 作物可以缓冲温室气体 (CO₂ 和 O₃) 浓度升高通过作物凋落物对土壤动物(甲螨)的影响。

关键词 臭氧, 二氧化碳, 转 Bt 棉, 开顶式气室, 甲螨

Effect of Bt cotton leaves under elevated greenhouse gases (CO₂ and O₃) on soil Oribatida populations

CHANG Liang^{1,2} WANG Bai-Feng³ LIU Xiang-Hui¹ 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 was modified to express a gene derived from the bacterium *Bacillus thuringiensis* (Bt) to combat lepidopteran pests. Elevated CO₂ and O₃ are expected to further alter the chemical composition of cotton, and may thus affect the role that soil fauna plays in the decomposition of Bt plants. [Methods] A three month litterbag field study, consisting of eight treatments using leaves from Bt cotton and near-isolines of non-Bt cotton grown under normal control, OTC control, elevated O₃ and CO₂ levels, was conducted to investigate the abundance of soil Acari that developed on the decaying leaf materials. [Results] The abundance of Acari was significantly impacted by sampling times. Acari abundance was highest in July and significantly decreased in elevated CO₂ treatments. Moreover, only the common Simian3 significantly decreased in elevated CO₂ levels. Acari abundance was significantly reduced in Bt cotton litter in the OTC control but not in the normal control, elevated CO₂ and O₃ treatments. [Conclusion] Soil fauna were not affected by elevated O₃ cotton litter but cotton litter grown under elevated CO₂ levels could significantly reduce the abundance of Acari compared to those found under the normal control, OTC control and elevated O₃ treatments.

Key words CO₂, O₃, transgenic Bt cotton, open-top chamber, Acari

* 资助项目: 转基因生物新品种培育重大专项 (2012ZX08011002); 国家自然科学基金青年基金 (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

由于人类活动的加剧,尤其是化石燃料的过度使用和土地利用的改变,导致温室气体 (CO₂ 和 O₃) 浓度不断升高。研究资料显示,全球大气 CO₂ 浓度由工业革命前的 280 μL/L 上升到 2009 年的 387 μL/L,预计在本世纪末将达到 540 ~ 970 μL/L (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007); 臭氧浓度由工业化革命前大气为 10 μL/L 已上升到至今的 30~40 μL/L (Vinzargan, 2004; Jaffe and Ray, 2007), 预计到 21 世纪中叶, 大气臭氧浓度将在现有的基础上增加到 68 μL/L 左右 (Wilkinson and Davies, 2010)。温室气体 (CO₂ 和 O₃) 浓度升高不仅加速了全球变暖的进程,还改变了动植物的生长发育过程,并对整个生态系统产生深远影响 (戈峰等, 2010)。

土壤生物在生态系统循环和可持续利用中起着非常重要的作用。其中,土壤螨类占动物总数的 28.74% ~ 77.83%, 与线虫和跳虫并称三大土壤动物。甲螨作为土壤分解者的重要组成部分,占螨类总数的 62% ~ 94% (吾玛尔·阿布力孜等, 2003), 在生态系统能量流动、物质循环以及土壤形成与熟化过程中均起着重要作用,被认为是最重要的评价土壤质量变化的敏感性指示生物之一 (柯欣等, 2004)。

转 Bt 作物已成为防治棉铃虫等鳞翅目害虫的一个重要手段。欧美等地关于转 Bt 玉米对非靶标土壤动物的研究已经相当深入。一般认为,由于 Bt 毒蛋白的专一性, Bt 作物对非靶标土壤动物无显著影响 (Cortet *et al.*, 2007; Vaufléury *et al.*, 2007; Hönemann and Zurbügg, 2008)。而且, Chen 等 (2005) 发现大气 CO₂ 浓度升高降低了转 Bt 棉的 Bt 毒素。虽然转 Bt 棉已经在中国大量种植,但极少有人关注转 Bt 棉对非靶标土壤动物的影响 (Huang *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2009), 尤其是 Bt 棉与臭氧和二氧化碳等温室气体因素结合研究目前尚未有报道。随着 Bt 棉的种植以及全球温室气体浓度的升高,对 Bt 棉花凋落物的分解及土壤动物将会产生怎样的影响值得关注 (刘万学等, 2002; 郭建英等,

2009)。

本研究利用甲螨的种群数量变化,评价转 Bt 棉和臭氧、二氧化碳升高处理过的棉花落叶的分解对甲螨的作用,以评估温室气体升高和转 Bt 作物种植通过凋落物途径对地下生态系统产生的影响。

1 材料与方法

1.1 温室气体控制的开顶式气室

1.1.1 臭氧控制的开顶式气室 气室位于北京昌平区香屯试验基地院内 (40°11' N, 116°24' E)。该装置包括鼓气系统、臭氧发生、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 45° 收缩口,收缩口高为 0.3 m,顶边长为 0.51 m。具体设计见 Chang 等 (2011)。臭氧产生用北京同林科技有限公司的臭氧发生器 (3S-A15, Tonglin Technology Beijing, China), 以洁净的压缩空气为气源,用以产生臭氧,接着将臭氧通入鼓风机的进气口,将臭氧与空气混合均匀后,通入 4 个用于模拟臭氧升高的气室中; 对照处理除了不通臭氧之外,其余所有实验条件均相同。臭氧浓度在进气口和气室出口两端同时进行监测, 1 次/h, 通过调节臭氧发生器的功率,来保证升高处理气室中臭氧浓度为对照的 2 倍,大气臭氧浓度为: ambient air “AA” = 37.3 nmol·mol⁻¹, 处理臭氧浓度为: elevated 臭氧 “EO” = 72.2 nmol·mol⁻¹。每个臭氧浓度处理分别在 4 个 OTC 内进行,相当于 4 个重复。2008 年保证臭氧通气 60 d 以上。通气时间为: 2008 年 6 月 14 日至 8 月 27 日 (中间有 11 d 下雨)。

1.1.2 二氧化碳控制的开顶式气室 气室位于北京昌平区香屯试验基地院内 (40°11' N, 116°24' E)。模拟大气 CO₂ 升高的装置由 CO₂ 气源、CO₂ 浓度控制系统和开顶式气室三大部分组成。其中,开顶式气室由换气扇,框架、室壁和底座四部分组成。根据国际研究惯例,试验设置

两个 CO₂ 浓度水平,即目前的 CO₂ 浓度 (AC, 370 μL/L, Ambient CO₂) 和高出目前近 1 倍的 CO₂ 浓度 (EC, 750 μL/L, Doubled-ambient CO₂)。每个 CO₂ 浓度处理分别在 4 个 OTC 内进行,相当于 4 个重复。详细介绍见戈峰等 (2010)。

1.2 棉花凋落物材料

使用转 Bt 棉 GK-12 (表达 CryIA&C 蛋白) 和亲本常规棉泗棉三号两个棉花品种。2008 年 5 月 25 日,将两个品种棉花种植在盆 (直径 25 cm, 高: 30 cm) 中,共计 320 盆,其中 80 盆放入对照 (直接放置在室外,作为对 OTC 处理的对照) 中,每个品种 40 盆;240 盆分别平均放在对照 OTC (二氧化碳和臭氧升高的对照)、升高臭氧、升高二氧化碳等 12 个开顶式气室中 (每个处理 4 个 OTC),每个气室中每个品种 10 盆,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), -20 °C 保存,实验开始前一个月,将 8 个处理的棉叶烘干 (50 °C, 4 d),分装到 4 mm 孔径的尼龙网袋中,每袋 4 g。

1.3 实验地处理

凋落物处理实验样地位于河北廊坊市中国农业科学院转基因作物中试基地 (39°18'N, 116°24'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。

棉叶总共 8 个处理,分别是对照 CO₂ 和 O₃ 中的亲本棉泗棉三号,记为 QBCK; 对照 CO₂ 和 O₃ 中的转 Bt 棉 GK-12,记为 BtCK; 高 CO₂ 中的亲本棉泗棉三号,记为 QBEC; 高 CO₂ 中的转 Bt 棉 GK-12,记为 BtEC。高 O₃ 中的亲本棉泗棉三号,记为 QBEO; 高 O₃ 中的转 Bt 棉 GK-12,记为 BtEO; 开顶式气室 (OTC) 外种植亲本棉泗棉三号 (OTC 对照),记为 QBCK'; 开顶式气室 (OTC) 外种植的转 Bt 棉 GK-12,记为 BtCK'。按照完全随机区组设计,每个处理

8 个重复,总共 16 块样地 (亲本棉和转 Bt 棉各 8 块)。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 192 袋 (2 个品种 × 4 个气体处理 × 8 个样地 × 3 次取样)。2009 年 4 月 15 日,在样地内播种亲本棉和转 Bt 棉,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,亲本棉棉叶埋入亲本棉棉田中),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 9 月 15 日结束,每月取每个处理的棉叶一袋。由于 2009 年 9 月 15 日最后一次取样时,棉叶已全部分解干净,因此本研究中只采用了 2009 年 6 月 15 日,7 月 15 日和 8 月 15 日的这 3 次的螨类数据结果。棉叶取出后,带回实验室,用 Macfadyen (1961) 改进干漏斗法分离棉叶中甲螨。分离出的标本用 75% 乙醇保存。然后计算其中甲螨的数量。

1.4 统计分析

SPSS 13.0.1 (SPSS Inc. Chicago, IL, USA) 统计分析软件分析,甲螨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)。

利用重复测量方差分析方法来分析棉花品种和气体处理对甲螨种群数量的影响,取样时间作为重复水平,棉花品种和气体处理作为组间因素 ("Between subject" factors)。用单因素方差分析来分析取样时间和样地对土壤甲螨种群数量的影响。

2 结果与分析

2.1 凋落物中甲螨种群动态

本次采样共从 8 个重复样地的 8 个棉花凋落物处理中捕获螨类 8 696 头。凋落物中甲螨种群在不同取样时间明显不同 ($F_{2,189} = 44.33$, $P < 0.001$), 呈一个单峰折线,它们的最高值出现在 7 月 (图 1)。说明凋落物分解并不完全受凋落物

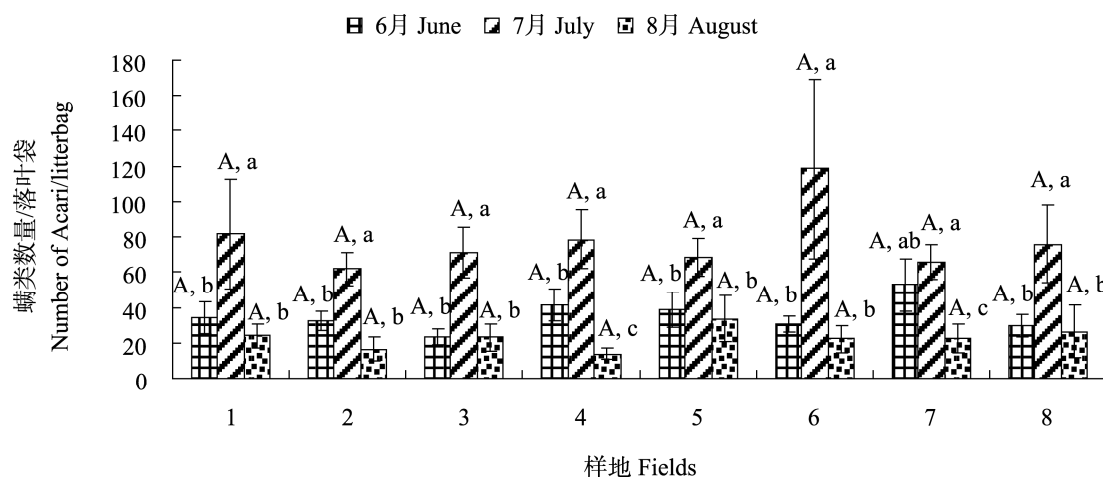


图 1 8 块重复样地中棉花凋落物内螨类在不同棉花生长期平 (2 个品种, 二氧化碳升高、臭氧升高、大气对照浓度和开顶式气室对照的平均值)

Fig. 1 Number of soil Acari (mean of two cotton varieties elevated CO₂, elevated O₃, atmospheric atmosphere and open-top chamber control levels) per field ($n = 8$) of the litterbag study

图中数字为均数量±标准误, 柱上标有不同大写字母表示样地之间的差异, 不同小写字母表示取样月份之间的显著性差异 (LSD 检验, $P < 0.05$)。下图同。

Data are mean ±SE. Histograms with different uppercase letters indicate significant differences among the sampling fields, and different lowercase letters indicate significant differences among the sampling months (LSD test, $P < 0.05$). The same below.

总质量控制。一方面可能是受土壤跳虫本身的消长动态影响, 即土壤跳虫本身在 7 月份温湿度条件最好时达到种群最大值, 另一方面可能是在凋落物分解初期的 6 月份, 微生物并未全部占据凋落物, 因此部分以微生物为食的跳虫并未大量出现在凋落物袋中。不同样地之间在 6 月、7 月和 8 月对棉花凋落物中甲螨种群数量均无显著差异 ($df = 7, 56$; $P = 0.78$), 说明本实验所选择的不同实验样地对温室气体变化 (CO₂ 和 O₃) 下 Bt 棉凋落物处理所引起甲螨种群数量变化的方差分析结果并无影响。

2.2 CO₂ 和 O₃ 处理通过棉花凋落物的影响

CO₂ 和 O₃ 处理通过棉花凋落物对甲螨的种群数量有显著影响 (表 1, $df = 3, 56$, $P = 0.014$), 表现为 OTC 对照 > 对照 > 臭氧升高 > 二氧化碳升高特征。多重比较结果显示, 棉花凋落物中甲螨种群数量 CO₂ 处理显著低于臭氧处理、对照和 OTC 对照处理 (图 2)。说明大气 CO₂ 升高处理可以通过降低了棉花凋落物中的质量 (氮

含量下降和碳氮比的升高) 而影响土壤动物及其参与地下生态过程。亲本棉中, 温室气体处理通过棉花凋落物有显著影响, 同样表现为 OTC 对照 > 对照 > 臭氧升高 > 二氧化碳升高 (表 1, $df = 3, 28$, $P = 0.046$); 但在转 Bt 棉中, 温室气体处理通过棉花凋落物对甲螨种群数量没有明显影响 (表 1, $df = 3, 28$, $P = 0.42$)。说明 Bt 棉凋落物可以缓冲气候变化对土壤动物 (甲螨) 的影响。

2.3 转 Bt 棉种植的影响

转 Bt 种植通过棉花凋落物使土壤甲螨种群数量显著降低 (表 1, $df = 3, 56$, $P = 0.037$)。但是, 臭氧升高、二氧化碳升高和对照处理中, 转 Bt 棉通过棉花凋落物对甲螨种群数量均没有显著影响, 只是 OTC 对照中, 转 Bt 棉凋落物中的甲螨种群数量显著低于亲本棉 ($df = 1, 14$, $P = 0.022$)。说明用开顶式气室培养棉花时, 所产生的作物凋落物性质变化可能会改变土壤动物对转 Bt 作物凋落物分解的影响。

表 1 2009 年方差分析中 CO₂, O₃ 和棉花品种处理对螨类多度影响的 P 值
Table 1 P-values from ANOVAs for the effect of CO₂ and O₃ concentrations and cotton varieties on abundance of Acari

总体对比 Total contrast	不同处理 Different treatments	P 值 (对比) P value (contrast)
二氧化碳和臭氧 CO ₂ and O ₃		0.014* (OTC 对照>对照>臭氧升高>二氧化碳升高) (CK'> CK > EO > EC)
不同品种 Varieties		0.037* (亲本棉>Bt 棉) (QB>Bt)
二氧化碳和臭氧×品种 CO ₂ and O ₃ ×varieties		0.325
单因素对比 One-factor contrast		
二氧化碳和臭氧 CO ₂ and O ₃	亲本棉 QB	0.046* (OTC 对照>对照>臭氧升高>二氧化碳升高) (CK'> CK > EO > EC)
	Bt 棉 Bt	0.424
不同品种 Varieties	对照 CK	0.25
	OTC 对照 CK'	0.022* (亲本棉>Bt 棉) (QB>Bt)
	臭氧升高 EO	0.146
	二氧化碳升高 EC	0.541

*表示处理间具有显著影响 ($P < 0.05$)

* indicates a significant effect among treatments ($P < 0.05$).

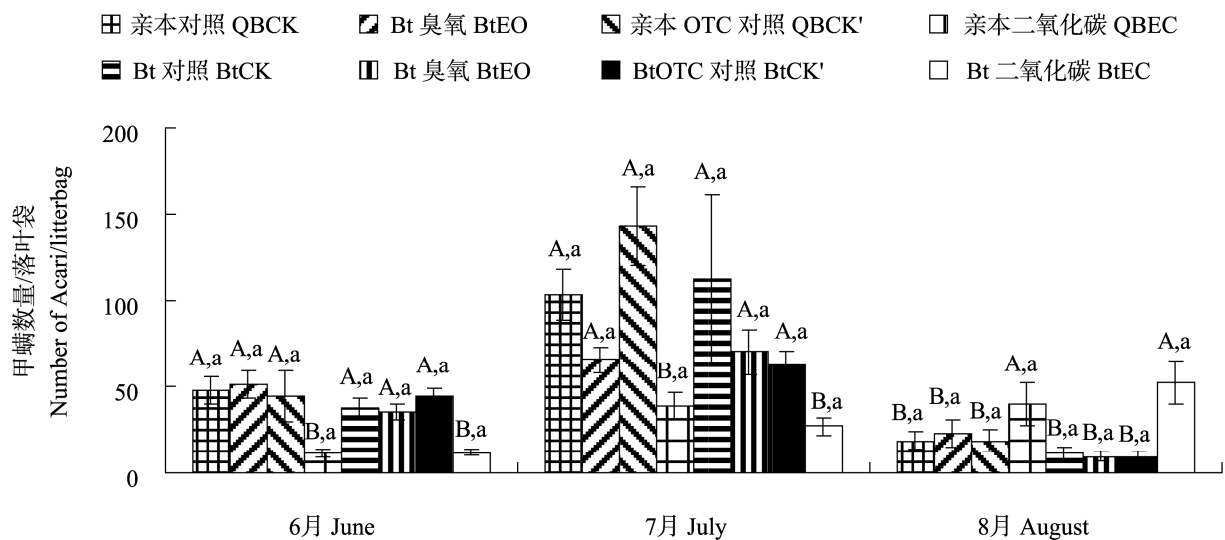


图 2 棉花凋落物内螨类在不同棉花生长期 (8 个样地中的平均值)
Fig. 2 Number of soil Acari (mean of two cotton varieties, elevated CO₂, elevated O₃, atmospheric atmosphere and open-top chamber control levels) per field ($n = 8$) of the litterbag study

2.4 CO₂ 和 O₃ 处理与转 Bt 棉种植的交互作用的影响

气体处理与转 Bt 棉种植通过棉花凋落物的

交互作用对土壤甲螨种群数量均无显著影响。说明温室气体 (CO₂ 和 O₃) 升高并未改变 Bt 棉凋落物对土壤甲螨的影响。

3 结论与讨论

甲螨是土壤分解者的重要组成部分,被认为是最重要的评价土壤质量变化的敏感性指示生物之一(柯欣等, 2004; Yin *et al.*, 2010)。从棉花凋落物中甲螨种群数量来看,甲螨并不是在棉花凋落物最多时达到最高的数量,而是在实验开始到一个月左右,甲螨的种群数量才达到最大值。这可能是由于凋落物刚开始分解时,没有微生物的参与有关,或者是甲螨在 6 月取样时本身种群数量就比较小。

在所有的温室气体处理中,二氧化碳升高可通过影响棉花凋落物显著降低了甲螨的种群数量。而臭氧升高通过棉花凋落物则没有显著影响。其主要原因可能是二氧化碳升高显著降低了棉花凋落物中的氮含量(Chang *et al.*, 2013),氮含量下降和碳氮比的升高会阻碍微生物对于棉花凋落物的分解(Enoki and Kawaguchi, 2000),使棉花凋落物中的微生物和甲螨种群数量都会降低。大气 CO₂ 升高可以通过增加植物的净初级生产力(NPP)来增加土壤动物的种群数量(Sticht *et al.*, 2006);但我们的研究表明,这种作用可能会被凋落物质量降低所造成的分解时期土壤动物降低所减缓甚至抵消。通过二氧化碳处理对转 Bt 和常规棉凋落物中的甲螨种群数量分析,我们发现二氧化碳升高处理通过棉花凋落物只是降低了常规棉凋落物中的甲螨种群数量。同样,我们在对于其他温室气体升高的研究也发现,转 Bt 棉对环境因子的变化有一定的缓冲作用(Chang *et al.*, 2011)。

之前的研究普遍认为,由于 Bt 蛋白对于靶标棉铃虫的特异性,转 Bt 棉种植对于土壤动物的直接影响几乎不可能发生(Hönemann and Zurbrugg, 2008)。但也有研究表明,转 Bt 作物与常规作物相比,木质素含量较高,土壤动物取食口感较硬,不易消化(Flores *et al.*, 2005; Poerschmann *et al.*, 2005);这可能会造成转 Bt 作物对于土壤动物的间接影响。譬如,Bakonyi 等(2006)和 Chang 等(2011)发现,转 Bt 作物种植通过原位和凋落物途径都会显著降低跳虫

的种群数量。同样地,本研究发现,转 Bt 棉种植通过棉花凋落物显著降低了甲螨的种群数量。

但是,在对照、二氧化碳和臭氧升高的处理凋落物中,转 Bt 作物凋落物并没有使甲螨的种群数量有显著性下降;只是在 OTC 对照处理中,转 Bt 棉花凋落物中甲螨的种群数量显著低于常规棉凋落物中。目前,国外有些关于 Bt 玉米等凋落物实验倾向于在气室中处理过程中收获棉叶,然后室外进行分解研究(Hönemann and Zurbrugg, 2008);而我们研究发现,OTC 处理可能会改变转 Bt 作物分解对土壤动物影响的结果,因此用温室培育 Bt 作物凋落物来评价 Bt 凋落物分解的影响这种方法是可能会改变转 Bt 作物通过凋落物对土壤动物的影响。未来将通过系统的测定转 Bt 作物和亲本作物在 OTC 对照和室外条件下,阐明棉花凋落物中各种化学成分的差异。

综上所述,我们的研究表明,Bt 种植通过凋落物对于土壤动物存在一定的影响,但是这种影响可能是由于在获取凋落物过程中,不同的栽培条件所引起的。臭氧升高处理通过棉花凋落物对土壤动物几乎没有影响,但是二氧化碳升高通过棉花凋落物可以显著降低土壤动物的种群数量。

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.
- 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. *Appl. Soil Ecol.*, 47(1): 45-50.
- Chang L, Wang BF, Liu XH, Ge F, 2013. Ecological consequences of elevated CO₂ and Bt cotton on soil Collembola. *J. Agric. Sci. Tech.*, 3(9): 737-744.
- Chen FJ, Wu G, Ge F, Parajulee MN, Shrestha RB, 2005. Effects of elevated CO₂ and transgenic Bt cotton on plant chemistry, performance and feeding of an insect herbivore, the cotton bollworm. *Entomol. Exp. Appl.*, 115(2): 341-350.
- Cortet J, Griffiths BS, Bohanec M, Demsar D, Andersen MN, Caul S, Birch AN, Pernin C, Tabone E, Vaufléury 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.

- Enoki T, Kawaguchi H, 2000. Initial nitrogen content and topographic moisture on the decomposition of pine needles. *Ecol. Res.*, 15(4): 425–434.
- 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, Zurbrugg 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Climate change the physical science basis. Summary for policy makers. Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/pub/spm18-02.pdf>.
- Jaffe DA, Ray J, 2007. Increase in surface ozone at rural sites in the western US. *Atmos. Environ.*, 41(26): 5452–5463.
- Macfadyen A, 1961. Improved funnel-type extractors for soil arthropods. *J. Anim. Ecol.*, 30(1): 171–184.
- 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.
- Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel HJ, 2006. Effects of elevated atmospheric CO₂ and N fertilization on abundance, diversity and C-isotopic signature of Collembolan communities in arable soil. *Appl. Soil Ecol.*, 34(2/3): 219–229.
- 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.
- Vingarzan R, 2004. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmos. Environ.*, 38(21): 3431–3442.
- Wang ZJ, Lin H, Huang JK, 2009. Bt cotton in China: Are secondary insect infestations offsetting the benefits in farmer fields? *Agr. Sci. Chin.*, 8(1): 83–90.
- Wilkinson S, Davies WJ, 2010. Drought, ozone, ABA and ethylene: new insights from cell to plant to community. *Plant Cell Environ.*, 33(4): 510–525.
- Yin X, Song B, Dong W, Xin W, Wang Y, 2010. A review on the eco-geography of soil fauna in China. *J. Geogr. Sci.*, 20(3): 333–346.
- 戈峰, 陈法军, 吴刚, 孙玉诚, 2010. 昆虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应. 北京: 科学出版社. 1–47.
- 郭建英, 万方浩, 吴岷, 2009. 转 Bt 基因棉对土壤无脊椎动物群落结构的影响. 中国农业生态学报, 17(6): 1221–1228.
- 柯欣, 梁文举, 宇万太, 2004. 下辽河平原不同土地利用方式下土壤微节肢动物群落结构研究. 应用生态学报, 15(4): 600–604.
- 刘万学, 万方浩, 郭建英, 2002. 转 Bt 基因棉田节肢动物群落营养层及优势功能团的组成与变化. 生态学报, 22(5): 729–735.
- 吾玛尔·阿布力孜, 孜比妮沙·吾布力, 阿布都拉·阿巴斯, 2009. 我国螨类研究的最新进展. 生物学通报, 44(4): 12–15.