

转双价(*Bt*+*CpTI*)棉种植对土壤速效养分和酶活性的影响

娜布其^{1,2}, 赵建宁¹, 李刚¹, 杨殿林^{1*}, 红雨², 娜日苏^{1,2}, 刘玲^{1,3}

(1.农业部环境保护科研监测所, 农业部转基因生物生态环境安全监督检验测试中心(天津), 中国农业科学院武清转基因生物农田生态系统影响野外科学观测试验站, 天津 300191; 2.内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 呼和浩特 010022; 3.甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070)

摘要:本研究利用三室根箱对棉花根部土壤进行分区采集,以转双价棉 SGK321 及其亲本常规棉石远 321 为研究对象,对 3 个生长期(播种后 40、50 d 和 60 d)不同根区(S1、S2 和 S3)土壤速效养分(硝态氮、铵态氮和速效磷)含量及酶(脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶)活性变化进行了对比分析。研究结果表明,与常规棉相比,转双价棉的种植促进了 S2 根区土壤中磷素向有效态的转化,使 S2 和 S3 根区土壤硝态氮含量下降,而对各根区土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性及土壤铵态氮无显著影响。主成分分析结果表明,土壤速效养分和酶活性变化主要受生长时期的影响,转双价棉种植对其影响是非常有限的。

关键词:转双价棉;土壤酶活性;土壤养分;三室根箱

中图分类号:S154.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)05-0930-08

Effects of Transgenic *Bt* + *CpTI* Cotton Planting on the Soil Available Nutrients and Enzyme Activities

NA Bu-qi^{1,2}, ZHAO Jian-ning¹, LI Gang¹, YANG Dian-lin^{1*}, HONG Yu², NA Ri-su^{1,2}, LIU Ling^{1,3}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture; Eco-safety Supervision, Inspection & Testing Center of Genetically Modified Organisms, MOA, Tianjin, China; Wuqing Experiment Station for Field Observation of Farmland Ecosystem Impact of Genetically Modified Organisms, CAAS, Tianjin 300191, China; 2.College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3.Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this study, three-room rhizobox method was used to collect soil samples from different zones of cotton root. This experiment compared the effects of transgenic *Bt* + *CpTI* cotton SGK321 and conventional cotton SHIYUAN321 on soil available nutrients (NH_4^+-N , NO_3^--N and available P) and enzyme activities(urease, alkaline phosphatase and catalase) at different zones(S1, S2, S3) in three growing stages(40 d, 50 d and 60 d). The results showed that, compared to the conventional cotton, planting transgenic *Bt*+*CpTI* cotton improved soil P transforming to the available form in the S2 zone, while the content of NO_3^--N decreased in the S2 zone and S3 zone. No significant differences were observed in soil activities of urease, alkaline phosphatase, catalase and NH_4^+-N among three root zones. Principal component analysis showed that the changes of soil available nutrients and enzyme activities were mainly affected by the growth stages, the impact of transgenic *Bt* + *CpTI* cotton on soil available nutrients and enzyme activities was very limited.

Keywords: transgenic *Bt*+*CpTI* cotton; soil enzyme activity; soil nutrients; three-room rhizobox

近年来,随着转基因作物的大面积推广应用,其对农业生态系统健康与稳定产生的影响越来越受到

重视^[1-3]。转基因作物的长期种植,其外源基因表达产物 *Bt* 杀虫晶体蛋白可通过根系分泌物、作物残茬分解或秸秆还田以及花粉飘落等途径进入土壤生态系统,直接或间接影响土壤微生物数量及多样性^[4-5],进而引发一系列土壤生态过程的变化,最终影响土壤养分转化过程及养分的有效性^[6-7]。因此,转基因作物的种植对土壤生态环境的影响已经成为转基因作物对土壤生物安全性研究的新热点。

收稿日期:2010-12-01

基金项目:转基因生物新品种培育重大专项(2011ZX08012-005, 2008ZX08012-004);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目

作者简介:娜布其(1985—),女,硕士研究生,主要从事转基因作物对土壤微生物影响方面的研究。E-mail:nabuqi04423@163.com

* 通讯作者:杨殿林 E-mail:ydlgrl@126.com

土壤是生态系统中物质循环和能量转化过程的重要场所,土壤养分和酶是土壤生态系统的重要组成部分,土壤养分是评价土壤自然肥力的重要因素之一。土壤酶是土壤新陈代谢的重要因素,参与土壤中一切复杂的生物化学过程,与土壤肥力的形成和转化有密切关系^[8],且对环境等外界因素引起的变化较敏感,可作为衡量生态系统土壤质量变化的预警和敏感指标^[9]。因此,开展转基因作物种植对土壤养分含量及酶活性的影响研究对科学评价转基因作物潜在的生态风险具有极为重要的意义。

根据国际农业生物技术应用服务组织(ISAAA)的最新报道,2009年全球转基因作物种植面积达1.34亿 hm^2 ,比2008年增长了7%,其中,转基因棉花种植面积达1 617万 hm^2 ,占全球总种植面积的49%。我国是世界上最大的棉花生产国,自1997年转基因棉花投入生产种植以来,其种植面积迅速扩增至2009年的370万 hm^2 ,占棉花总种植面积的68%^[10],但随着其种植面积的逐年扩大,人们对其生态安全性的担忧与日俱增。目前,国内外关于转基因棉花种植对土壤酶活性的影响研究已有报道,但结果不一^[2,11-14],而对其种植引起的土壤养分含量变化的影响研究报道较少。另外,这类研究大多采用大田种植或普通盆栽试验进行,而大田试验中气候、土壤、水分、光照等条件复杂多变且难以控制,同时,大田试验和普通盆栽试验对根际和非根际土壤取样的界定比较模糊。鉴于此,本研究采用三室根箱装置将棉花根区土壤分成根表土壤(S1)、根际土壤(S2)和非根际土壤(S3)3个不同区域,在明确界定了根系土壤范围的基础上,以转双价(*Bt+CpTI*)棉SGK321和其亲本常规棉石远321为研究对象,通过对棉花根区土壤养分含量和酶活性变化进行分析,揭示转双价棉对土壤养分和酶的影响规律,为科学评价转基因棉花对土壤生态系统的潜在风险提供依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试棉花品种为转双价(*Bt+CpTI*)基因棉花SGK321及其亲本常规棉花石远321,均由中国农业科学院植物保护研究所提供。根箱供试土壤取自中国农业科学院武清转基因生物农田生态环境影响野外科学观测试验站,其基本理化性质如下:有机质 $10.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $1.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $42.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $26.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。播种前将供

试土壤过1 mm筛。

1.2 试验装置

本试验使用的三室根箱由不透光有机玻璃制成,箱内通过两张孔径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的尼龙筛网分隔为三室,中室为植物生长室,宽3 cm,棉花生长在此区域;中室两侧为土壤室,宽度均为5 cm(图1)。此设计可以防止植物生长室内的根系穿过植物生长室到达土壤室,而水分、养分及根系分泌物等却可以在根箱的各室间自由运移。本装置可以方便地分开植物根系与根系土壤,便于采样。

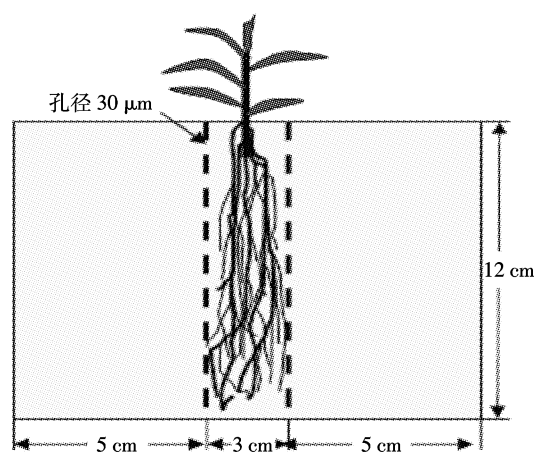


图1 根箱装置示意图

Figure 1 Constructed profile of the rhizobox

1.3 试验设计

试验在农业部环境保护科研监测所网室内进行,选择转双价(*Bt+CpTI*)基因棉SGK321和其亲本常规棉石远321两个品种(简称转双价棉和常规棉,下同),每个品种设4个重复,在播种后40、50、60 d分别采样^[15-16]。2009年7月10日播种,每个根箱装土1.2 kg,播种3粒棉花种子,待出苗后定苗至1株。播种后第10 d以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KH_2PO_4 混合液体的形式施一次肥,施氮量 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾 $188\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;日常管理过程中不喷洒农药,用称重法补充水分,使土壤含水量保持在17%左右。

采集土样时小心地拆除根箱周围的有机玻璃板,取植物生长室土壤作为根表土壤^[15](用S1表示);尼龙网紧贴植物生长室的表面覆满了根,因此,可将左右两土壤室紧贴尼龙网一侧4 mm范围内的土壤定义为根际土壤^[17-18](用S2表示);4 mm之外的土样混合,作为非根际土壤^[19](用S3表示)。过2 mm筛后,一部分土壤鲜样置于4℃冰箱保存,剩余土壤经风干、磨碎、过筛,保存。鲜样用于测定土壤速效养分铵态

氮、硝态氮,风干样用于测定土壤速效磷和土壤酶活性(脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶)。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤养分含量的测定^[20]

土壤全氮采用半微量凯氏法;全磷采用钼锑抗比色法;有机质含量采用重铬酸钾-氧化外加热法;硝态氮采用紫外分光光度法;铵态氮采用靛酚蓝比色法;速效磷采用钼锑抗比色法。

1.4.2 土壤酶活性的测定^[21-22]

土壤脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法,以每小时每克风干土壤经尿素水释出的 NH₄⁺-N 的 μg 数来表示;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,以 2 h 后 100 g 土壤中 P₂O₅ 的 mg 数表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,以每克风干土壤滴定所需 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的 mL 数来表示。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件对试验数据进行统计分析(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 转双价棉对土壤速效养分含量的影响

2.1.1 转双价棉对土壤硝态氮含量的影响

转双价棉种植对土壤硝态氮含量的影响随根系空间分布的变化而变化(表 1)。在棉花生长的 3 个时期内,转双价棉 S1、S2 和 S3 根区土壤硝态氮含量均随生长时期的推进呈现明显下降的趋势。与常规棉相比,转双价棉 S1 根区土壤硝态氮含量在播种后 40 d 时高于常规棉,而 50 d 和 60 d 时低于常规棉,分别比同期常规棉降低了 8.9%和 19.5%,但差异均未达显著水平($P>0.05$),说明转双价棉种植对 S1 根区土壤硝态氮含量无显著影响。转双价棉 S2 根区土壤硝态氮含量与常规棉相比变化幅度较大,在播种后 40 d 时显著高于常规棉,而到 60 d 时表现为显著低于常规棉($P<0.05$),这说明转双价棉随生长时期的推进显

著降低了 S2 根区土壤硝态氮含量。转双价棉 S3 根区土壤硝态氮含量在播种后 50 d 和 60 d 时均显著低于常规棉($P<0.05$),分别比同期常规棉降低了 12.5%和 25.9%,说明转双价棉种植降低了 S3 根区土壤硝态氮含量。转双价棉种植降低了 S2、S3 根区土壤硝态氮含量,也就是说明转双价棉根系更有利于吸收和利用硝态氮。

2.1.2 转双价棉对土壤铵态氮含量的影响

两种棉花不同生长时期土壤铵态氮含量测定结果见表 2。在棉花生长的 3 个时期内,转双价棉和常规棉 S1 根区土壤铵态氮含量随生长时期的推进呈现先下降,后上升趋势。转双价棉 S1 根区土壤铵态氮含量与同期常规棉相比均差异不显著($P>0.05$);S2 根区土壤铵态氮含量与同期常规棉相比除在播种后 50 d 时显著高于常规棉外,其他两个生长时期均无显著差异($P>0.05$);转双价棉 S3 根区土壤铵态氮含量与常规棉相比均无显著差异($P>0.05$)。这表明棉花根区土壤铵态氮含量主要受棉花生长时期的影响,而转双价棉种植的影响相对较小。

2.1.3 转双价棉对土壤速效磷含量的影响

转双价棉种植对土壤速效磷含量的影响随根系空间分布的变化而变化(表 3)。在棉花生长的 3 个时期内,转双价棉和常规棉 S1 根区土壤速效磷含量变化趋势基本一致,均随着生长时期的推进呈现先上升,后下降趋势,在播种后 40 d 时速效磷含量最低。转双价棉 S1 根区土壤速效磷含量与同期常规棉相比均无显著差异($P>0.05$),但在不同时期间差异显著,说明 S1 根区土壤速效磷含量变化主要受棉花生长时期的影响,而不受转双价棉种植的影响。转双价棉和常规棉 S2 根区土壤速效磷含量均随生长时期的推进呈现迅速上升的趋势。在棉花生长的 3 个时期内,转双价棉 S2 根区土壤速效磷含量均显著高于同期常规棉($P<0.05$),增幅分别为 14.6%、6.6%和 6.9%,说明转双价棉种植促进了 S2 根区土壤中磷素向速态转化的

表 1 转双价棉对土壤硝态氮含量的影响
Table 1 Effect of transgenic Bt+CpTI cotton on soil NO₃⁻-N content

	根区	播种后 40 d		播种后 50 d		播种后 60 d	
		转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	S1	345.29±28.49a	315.55±26.31ab	261.94±7.60c	287.43±10.90bc	155.15±6.55d	192.63±4.22d
	S2	270.07±9.19a	186.17±9.84bc	194.55±9.25b	211.23±13.09bc	117.34±6.17d	178.23±11.09c
	S3	270.67±7.10a	268.86±6.48a	233.43±5.88b	266.82±18.24a	153.68±8.04d	207.35±5.87c

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters within same line indicate significant difference at $P<0.05$, the same below.

表 2 转双价棉对土壤铵态氮含量的影响

Table 2 Effect of transgenic *Bt+CpTI* cotton on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content

根区		播种后 40 d		播种后 50 d		播种后 60 d	
		转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉
铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N/}$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	S1	14.28±1.40a	13.85±1.13a	10.60±0.95b	10.18±0.95b	11.63±0.58ab	11.53±0.76ab
	S2	11.53±0.67a	11.68±0.97a	11.00±0.91a	8.65±0.68b	10.25±0.41ab	11.20±0.54a
	S3	12.00±0.83ab	12.38±0.73a	10.40±0.93abc	9.25±0.69c	10.15±0.80abc	9.93±1.12bc

表 3 转双价棉对土壤速效磷含量的影响

Table 3 Effect of transgenic *Bt+CpTI* cotton on soil available P content

根区		播种后 40 d		播种后 50 d		播种后 60 d	
		转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉	转双价棉	常规棉
速效磷 Available-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	S1	49.56±0.40c	51.42±1.01c	73.54±1.84a	74.03±0.64a	58.82±1.89b	55.78±1.54b
	S2	69.03±1.97e	60.23±2.47f	79.64±0.68c	74.71±1.00d	91.35±1.72a	85.43±1.88b
	S3	72.23±0.89a	73.56±1.11a	65.99±1.60b	72.26±0.52a	70.77±1.02a	61.51±1.64c

过程。转双价棉 S3 根区土壤速效磷含量在播种后 40 d 和 50 d 时表现为低于常规棉,并在 50 d 时差异达显著水平($P<0.05$),而到 60 d 时表现相反趋势($P<0.05$)。

2.2 转双价棉对土壤酶活性的影响

2.2.1 转双价棉对土壤脲酶活性的影响

脲酶活性的高低在一定程度上反映了土壤的供氮水平^[21-23]。棉花土壤脲酶活性随根系空间分布的变化而变化,而同一根区土壤脲酶活性主要受棉花生长时期的影响(图 2)。在播种后 40、50 d 和 60 d 时,转双价棉 S1、S2 根区土壤脲酶活性与同期常规棉相比,均无差异显著($P>0.05$)。转双价棉与常规棉 S3 根区土壤脲酶活性除在播种后 40 d 时显著低于常规棉外,其他两个时期均差异不显著($P>0.05$)。结果表明棉花各根区土壤脲酶活性主要受棉花生长时期的影响,与其相比转双价棉种植的影响很小。

2.2.2 转双价棉对土壤磷酸酶活性的影响

磷酸酶是土壤中广泛存在的一种水解酶,能够催化磷酸酯的水解反应,碱性磷酸酶可以促进有机磷的矿化,提高土壤磷素的有效性,其活性是评价土壤磷素转化方向与强度的指标^[24-25]。在棉花生长的 3 个时期内,两种棉花 S1、S2 和 S3 根区土壤磷酸酶活性均随生长时期的推进呈现先增加后略下降的趋势(图 3)。转双价棉 S1 根区土壤磷酸酶活性在播种后 50 d 时显著高于常规棉,其他两个生长时期均无显著差异($P>0.05$)。转双价棉 S2 根区土壤磷酸酶活性在播种后 40 d 时显著低于常规棉外,其他两个生长时期无显著差异($P>0.05$),而转双价棉 S3 根区土壤磷酸酶

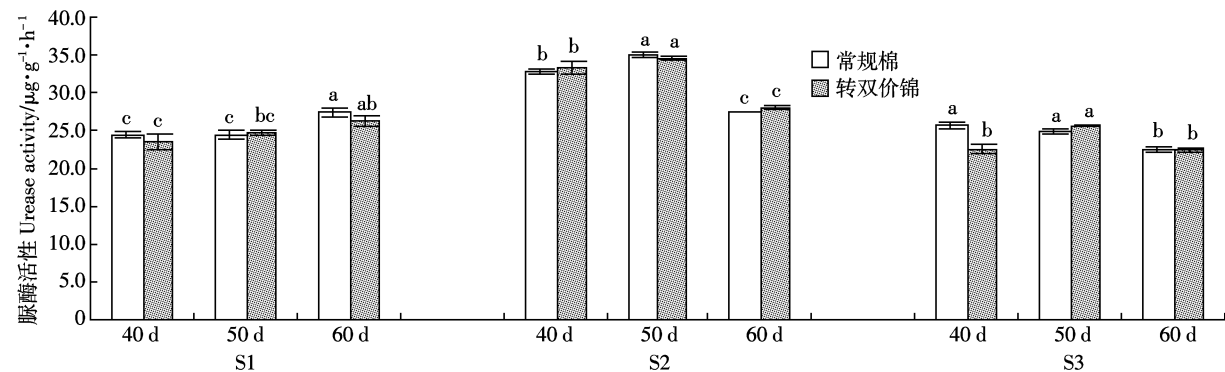
活性与同期常规棉相比均无显著差异($P>0.05$)。这表明影响棉花各根区土壤磷酸酶活性的主要因素是棉花生长时期,而转双价棉种植的影响是较小的。

2.2.3 转双价棉对土壤过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶参与植物的呼吸代谢,同时可清除在呼吸过程中产生的对活细胞有害的过氧化氢,其活性可指示土壤氧化过程的强度^[2,26]。两种棉花土壤过氧化氢酶活性均不随根系空间分布的变化而变化,并且同一根区土壤过氧化氢酶活性主要受棉花生长时期的影响(图 4)。在棉花生长的 3 个时期内,两种棉花 S1、S2 和 S3 根区土壤过氧化氢酶活性均随生长时期的推进呈现逐渐增加的趋势。转双价棉 S1、S2 和 S3 根区土壤过氧化氢酶活性与同期常规棉相比均无显著差异($P>0.05$)。这说明棉花根区土壤过氧化氢酶活性主要受棉花生长时期的影响,而不受棉花品种和根区分布的影响。

2.3 两种棉花不同生长时期土壤酶活性与速效养分的主成分分析

本研究对转双价棉与常规棉 3 个不同生长时期土壤速效养分和酶活性进行主成分分析,以进一步综合评价转双价棉种植对土壤生态系统的影响。由表 4 可见,转双价棉和常规棉在两个主成分组成的坐标平面中分布较紧密,均处于第 1 主成分轴的同侧,第一主成分方差贡献率达 97.68%,加之第二主成分方差贡献率 1.42%,其累计贡献率达 99%以上,因此前 2 个主成分能基本反映两个品种之间的变异信息。由图 5 可知,在播种后 40、50 d 和 60 d 时,转双价棉与常规棉分别两两聚集在一起,表明种植转双



图中 S1、S2、S3 分别表示根表、根际和非根际土壤样品;40 d、50 d、60 d 表示播种后天数;直方柱上标不同字母表示处理间差异显著水平 ($P<0.05$),下同。
S1, S2 and S3 represent three soil samples of root surface, rhizosphere and non-rhizosphere.; 40 d,50 d and 60 d indicate days after planting; Different letters over the bars mean the significant difference at $P<0.05$, the same below.

图 2 转双价棉对土壤脲酶活性的影响
Figure 2 Effect of transgenic *Bt+CpTI* cotton on soil urease activity

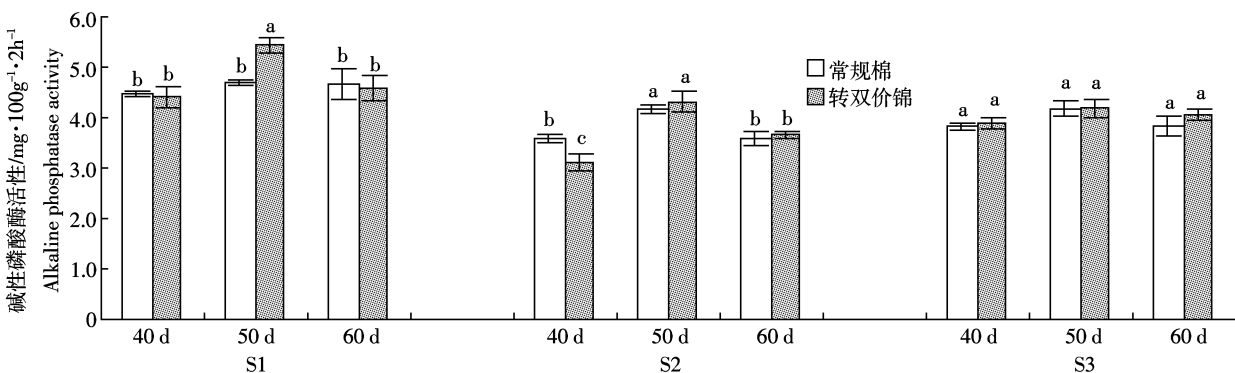


图 3 转双价棉对土壤碱性磷酸酶活性的影响
Figure 3 Effect of transgenic *Bt+CpTI* cotton on soil alkaline phosphatase activity

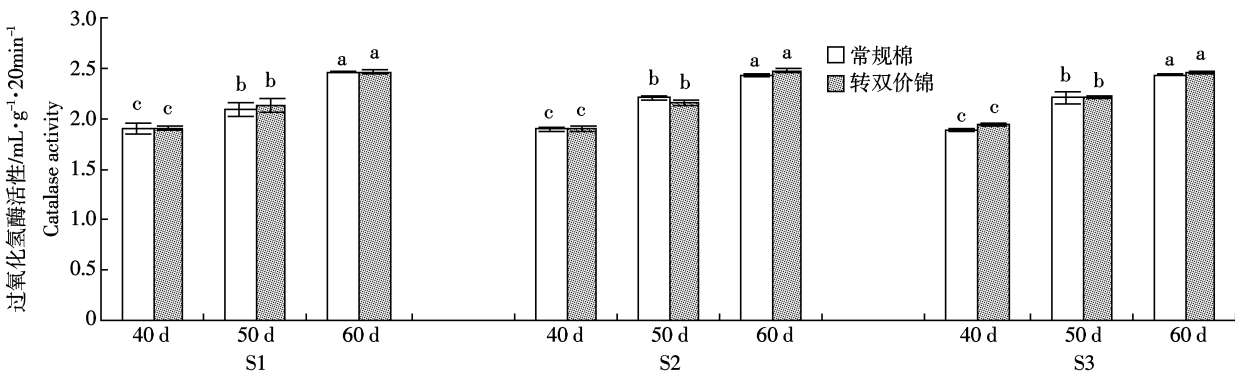


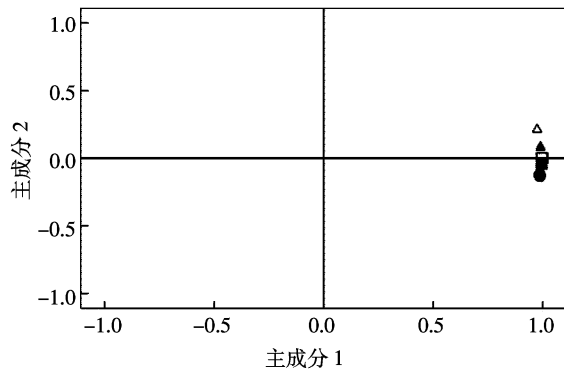
图 4 转双价棉对土壤过氧化氢酶活性的影响
Figure 4 Effect of transgenic *Bt+CpTI* cotton on soil catalase activity

价棉后土壤速效养分及酶活性含量变化情况与同期常规棉相似,而不同生长时期之间分布表现出一定差异。可见,在 3 个不同生长时期土壤养分和酶活性的角度看,转双价棉与常规棉之间差异较小,而主要受生长时期的影响。

3 讨论
转基因作物种植对土壤潜在影响的核心是其可能影响土壤生态系统的功能^[1,27]。土壤是生态系统中物质循环和能量转化过程的主要场所,也是植物生长

表 4 主要主成分特征值
Table 4 Principal component eigenvalues

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
第一主成分	5.861	93.68	93.68
第二主成分	0.085	1.42	99.10



图中 C 代表常规棉, Z 代表转双价棉; C and Z mean conventional and transgenic *Bt + CpTI* cotton; ○: Z-40 d; ●: C-40 d; △: Z-50 d; ▲: C-50 d; □: Z-60 d; ■: C-60 d.

图 5 转双价棉与常规棉不同生长期土壤酶活性和速效养分的主成分分析

Figure 5 PCA analysis of soil enzyme activities and soil available nutrient of transgenic *Bt+CpTI* cotton and conventional cotton at different planting stages

所需营养元素的主要来源。土壤速效养分是植物养分的直接来源,其含量是评价土壤供肥能力的主要指标。研究表明,转双价棉的种植可能通过根系分泌物的组成和质量改变,直接或间接地影响土壤养分的有效性^[24,28-29]。本研究表明,在棉花生长的 3 个时期内,转双价棉各根区土壤硝态氮、铵态氮和速效磷含量变化趋势与其常规棉基本一致,但各养分的具体变化规律有所不同。与常规棉相比,转双价棉种植对 S1 根区硝态氮含量无显著影响,而随着生长时期的推进显著降低了 S2、S3 根区土壤硝态氮含量,这可能是转双价棉根系分泌物促进了根系对硝态氮的吸收引起的;转双价棉 S1、S2 和 S3 根区土壤铵态氮含量(除 S2 根区 50 d 外)与常规棉无显著差异;转双价棉和常规棉 S2 根区土壤速效磷含量随生长时期的推进逐渐上升,且各生长时期内转双价棉均显著高于常规棉,增幅分别为 14.6%、6.6%和 6.9%,说明转双价棉的种植促进了 S2 根区土壤磷素向速态转化。转双价棉 S1 根区土壤速效磷含量与常规棉无显著差异,而转双价棉 S3 根区土壤速效磷含量没有明显的变化规律。从土壤速效养分角度看,土壤速效养分的变化随棉花根系空间分布和生长时期的不同而有所不同,转双价棉种植

对土壤硝态氮和速效磷有一定的抑制或刺激作用。孙磊等^[29]报道,在麦棉套作条件下 *Bt* 棉花根系分泌物能增加土壤中速效磷的含量,降低土壤中速效氮(硝态氮、铵态氮)的含量,本研究与其结果相似。

土壤酶作为土壤的组成部分,是土壤新陈代谢最活跃的因素。土壤酶活性可以反映土壤的生态功能、各种生物化学过程的强度和动向,是土壤重要的生物学特性,在土壤营养物质的循环和能量的转移中起关键性作用,是评价土壤肥力、土壤健康状况的重要指标^[24,30]。张丽莉^[12]、陈振华等^[13]报道转双价棉 SGK321 的种植对土壤脲酶活性无显著影响,而使土壤过氧化氢酶活性显著下降。本试验结果表明,与常规棉相比,在棉花生长的 3 个时期内转双价棉土壤脲酶(除 S3 根区 40 d 外)和过氧化氢酶活性均无显著差异。与文献^[12-13]报道有所不同可能是本研究与文献^[12-13]的试验土壤类型及条件不同有关。袁红旭等^[31]研究发现转双价抗真菌基因水稻的根际土壤中过氧化氢酶和脲酶活性均与对照无显著差异,这与本试验结果一致。马丽颖等^[14]研究发现种植转基因棉土壤碱性磷酸酶没有显著影响。也有研究表明转 *Bt* 作物添加残体或种植对土壤脲酶、磷酸酶活性无显著影响^[11,32]。本试验结果表明,在棉花生长的 3 个时期内转双价棉与常规棉相比,土壤碱性磷酸酶(除 S1 根区 50 d 和 S2 根区 40 d 外)无显著差异。从土壤酶活性角度看,土壤酶活性的变化主要与土壤酶类型和棉花生长时期有关,而转双价棉种植的影响较小。这一结果与前人研究报道的评价转基因作物对土壤生态系统影响的过程中,与试验地土壤类型、环境因子、耕作方式、生长时期等相比,转基因作物种植的影响是微小的^[1,33-34]的结果基本吻合。

本试验结果更多的反应根系分泌物的效应,从土壤速效养分和酶活性变化角度看,结果表明转双价棉种植对土壤硝态氮和速效磷有一定的影响,但是对土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶均无显著影响。因此,初步判断可能与转双价棉根系分泌物的组成与含量有关。孙磊等^[29]研究发现 *Bt* 棉花根系分泌物中含有酚类和有机酸类物质存在,并报道根系分泌物中的酚类具有刺激微生物生长的能力,而有机酸对土壤磷活化有促进作用。赵小亮等^[35]报道,土壤中速效磷的增加是棉花根系分泌物直接的酸化溶解作用及通过土壤微生物和土壤酶间接作用的综合效应。本试验发现,种植转双价棉对土壤碱性磷酸酶活性影响不大,但其显著增加 S2 根区土壤中速效磷含量,这可能是

根系分泌物直接主导的酸化溶解作用导致的。也有研究表明土壤中各种生物活动、酶活性变化与土壤中N、P、S、C等营养元素循环和植物营养状况的关系密切^[36-37]。因此,转基因作物在种植过程中土壤养分含量的变化是土壤中生物活动和酶活性等综合因素的影响的结果。转基因作物对土壤速效养分及肥力影响的机理有待于进一步深入研究。

利用PCA方法综合分析两种棉花不同生长期土壤速效养分与酶活性变化来解释两个棉花品种间的差异,结果显示转双价棉与常规棉之间差异较小,而因两种棉花采样时期不同而不同时期转双价棉和常规棉在坐标平面中的分布发生了明显的差异,说明棉花根区土壤速效养分和酶活性随棉花生长时期的改变而发生变化。这与张美俊等^[3]研究发现的转*Bt*基因棉不同生育期土壤酶活性和速效养分含量不同的结果一致,因此认为转双价棉种植对土壤速效养分和酶活性的影响与棉花生长时期的影响相比是微乎其微的。

4 结论

本研究采用三室根箱能够明确划分根系土壤范围的基础上,研究了转双价棉对各根区土壤速效养分和土壤酶活性影响效应,更真实地反映了植物与土壤之间的互作关系。结果表明,与常规棉相比,转双价棉的种植促进了S2根区土壤中磷素向有效态的转化,使S2和S3根区土壤硝态氮含量下降;而对各根区土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性及土壤铵态氮无显著影响。但是总体上看,转双价棉对土壤速效养分和酶活性的影响与棉花生长时期的影响相比是较小的。

值得注意的是,本试验中测定了部分土壤速效养分和土壤酶活性,对种植转双价棉后土壤速效养分和土壤酶活性变化情况进行初步研究的结果,旨在为大田试验提供可靠的理论依据。目前,国内外针对转基因作物释放对土壤生态系统的影响已开展了一系列研究,但并未得到统一结论,主要归因于杀虫蛋白类型、转基因作物品种、试验方法、土壤类型和环境因素等众多因素的差异^[13]。另外,转基因作物释放对土壤生态系统功能的影响是一个长期而复杂的过程,有必要在不同生态条件与土壤类型棉区*Bt*棉田土壤生态系统进行系统的长期监测研究,并与室内试验相结合,才有可能探明其机理,并对转基因作物环境安全性做出全面、科学和公正的评价。

参考文献:

- [1] 孙彩霞, 张玉兰, 缪璐, 等. 转*Bt*基因作物种植对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 943-946.
SUN Cai-xia, ZHANG Yu-lan, MIAO Lu, et al. Changes of nutrients in soil of transgenic *Bt* crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 943-946.
- [2] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 转基因棉种植对土壤氧化还原酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 277-280.
ZHANG Li-li, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Effect of transgenic cotton planting on soil oxidoreductases[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 277-280.
- [3] 张美俊, 杨武德. 转基因棉种植对根际土壤生物学特性和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 162-166.
ZHANG Mei-jun, YANG Wu-de. Effect of transgenic *Bt* cotton planting on biological characteristic and nutrient content in rhizosphere soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 162-166.
- [4] 李孝刚, 刘标, 韩正敏, 等. 转基因植物对土壤生态系统的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(5): 1957-1960.
LI Xiao-gang, LIU Biao, HAN Zheng-min, et al. Impact of transgenic plants on soil ecosystems[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(5): 1957-1960.
- [5] 叶飞, 宋存江, 陶剑, 等. 转基因棉花种植对根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 386-390.
YE Fei, SONG Cun-jiang, TAO Jian, et al. Effects of planting transgenic cotton on functional diversity of rhizosphere soil microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 386-390.
- [6] Nardi S, Concheri G, Pizzeghello D, et al. Soil organic matter mobilization by root exudates[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(5): 653-658.
- [7] Motavalli P P, Kremer R J, Fang M, et al. Impact of genetically modified crops and their management on soil microbially mediated plant nutrient transformations[J]. *Journal Environmental Quality*, 2004, 33(3): 816-824.
- [8] 杨海君, 肖启明, 谭周进, 等. 放牧对张家界索溪峪景区土壤酶活性及微生物作用强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 913-917.
YANG Hai-jun, XIAO Qi-ming, TAN Zhou-jin, et al. Effect of grazing on soil microbial and enzyme activities in Zhangjiajie Suoxiyu Scene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 913-917.
- [9] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 951-956.
WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 951-956.
- [10] Clive James. 2009年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(2): 1-22.
Clive James. Global status of commercialized Biotech/GM Crops: 2009 [J]. *China Biotechnology*, 2010, 30(2): 1-22.
- [11] SHEN Re-fang, CAI Hong, GONG Wan-he. Transgenic *Bt* cotton has no apparent effect on enzymatic activities or functional diversity of microbial communities in rhizosphere soil[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285(1-2): 149-159.
- [12] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 转基因棉种植对土壤水解酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1348-1351.
ZHANG Li-li, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Effects of transgenic

- cotton planting on soil hydrolase activity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11):1348–1351.
- [13] 陈振华, 孙彩霞, 郝建军, 等. 土壤酶活性对大田单季种植转 Bt 基因及转双价棉花的响应 [J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(5): 1226–1230.
- CHEN Zhen-hua, SUN Cai-xia, HAO Jian-jun, et al. Responses of soil enzymes to one-year planting transgenic Bt and Bt+CpTI cottons under field condition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1226–1230.
- [14] 马丽颖, 崔金杰, 陈海燕. 种植转基因棉对 4 种土壤酶活性的影响 [J]. 棉花学报, 2009, 21(5):383–387.
- MA Li-ying, CUI Jin-jie, CHEN Hai-yan. Effects of transgenic cotton planting on four kinds of soil enzyme activity[J]. *Cotton Science*, 2009, 21(5):383–387.
- [15] LI Yi-lin, FAN Xiao-rong, SHEN Qi-rong. The relationship between rhizosphere nitrification and nitrogen-use efficiency in rice plants[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(1):73–85.
- [16] 王 振. 转基因抗虫棉对根际土壤细菌多样性影响的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- WANG Zhen. Influence of transgenic cotton on bacterial diversity of rhizosphere soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.
- [17] YANG Xiao-E, Li H, Kirk G J D, et al. Room-induced changes of potassium in the rhizosphere of lowland rice[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(13):1947–1963.
- [18] Carrasco L, Caravaca F, Álvarez-Rogel J, et al. Microbial processes in the rhizosphere soil of a heavy metals-contaminated Mediterranean salt marsh: A facilitating role of AM fungi[J]. *Chemosphere*, 2006, 64(1): 104–111.
- [19] SHI Ying, SHEN Qi-rong, ZUO Ze-sheng, et al. Time and horizontal spatial variations of NH_4^+-N and NO_3^--N of rhizospheric soil with rice cultivation on upland condition mulched with half-decomposed rice straw[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(5):520–524.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Study way of soil enzymes[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [22] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- ZHOU Li-kai. Soil enzymes[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [23] 王 娟, 谷雪景, 赵 吉. 羊草草原土壤酶活性对土壤肥力的指示作用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):934–938.
- WANG Juan, GU Xue-jing, ZHAO Ji. Function of soil enzyme activities in indicating soil fertility in *leyluse chinensis* steppe[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):934–938.
- [24] 孙彩霞, 陈利军, 武志杰. Bt 杀虫晶体蛋白的土壤残留及其对土壤磷酸酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):761–766.
- SUN Cai-xia, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Persistence of Bt toxin in soil and its effects on soil phosphatase activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):761–766.
- [25] 万小羽, 梁永超, 李忠佩, 等. 种植转 Bt 基因抗虫棉对土壤生物学活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5410–5414.
- WAN Xiao-yu, LIANG Yong-chao, LI Zhong-pe, et al. Effect of planting transgenic Bt cotton on soil enzymatic and microbial activities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5410–5414.
- [26] 朱新萍, 梁 智, 王 丽, 等. 连作棉田土壤酶活性特征及其与土壤养分相关性研究[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(4):13–16.
- ZHU Xin-ping, LIANG Zhi, WANG Li, et al. Study on correlation between soil enzymatic activity and soil fertility in continuous cropping cotton field[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(4):13–16.
- [27] 王建武, 冯远娇, 骆世明. 转基因作物对土壤生态系统的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4):491–494.
- WANG Jian-wu, FENG Yuan-jiao, LUO Shi-ming. Effects of transgenic crops on soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):491–494.
- [28] 沈法富, 韩秀兰, 范术丽. 转 Bt 基因抗虫棉根际微生物区系和细菌生理群多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, 24(3):432–437.
- SHEN Fa-fu, HAN Xiu-lan, FAN Shu-li. Changes in microbial flora and bacterial physiological group diversity in rhizosphere soil of transgenic Bt cotton[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3):432–437.
- [29] 孙 磊, 陈兵林, 周治国. 麦棉套作 Bt 棉花根系分泌物对土壤速效养分及微生物的影响[J]. 棉花学报, 2007, 19(1):18–22.
- SUN Lei, CHEN Bing-lin, ZHOU Zhi-guo. Effects of root exudates on available soil nutrition, micro-organism quantity of Bt cotton in wheat-cotton intercropping system[J]. *Cotton Science*, 2007, 19(1):18–22.
- [30] 车明超, 黄占斌, 王晓茜, 等. 施用保水剂对土壤氮素淋溶及脲酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(Suppl.1):93–97.
- CHE Ming-chao, HUANG Zhan-bin, WANG Xiao-qian, et al. Effects of SAP application on nitrogen eluviations and the urease activity of soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl.1):93–97.
- [31] 袁红旭, 张建中, 郭建夫, 等. 种植转双价抗真菌基因水稻对根际微生物群落及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):122–126.
- YUAN Hong-xu, ZHANG Jian-zhong, GUO Jian-fu, et al. Activities of microbes and enzymes in soil after growing transgenic rice with two extra anti-funges genes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):122–126.
- [32] Flores S, Saxena D, Stotzky G. Transgenic Bt plants decompose less in soil than non-Bt plants[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(6):1073–1082.
- [33] Rasche F, Hödl V, Poll C, et al. Rhizosphere bacteria affected by transgenic potatoes with antibacterial activities compared with the effects of soil, wild-type potatoes, vegetation stage and pathogen exposure[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, 56(2):219–235.
- [34] FANG Min, Motavalli P P, Kremer R J, et al. Assessing changes in soil microbial communities and carbon mineralization in Bt and non-Bt corn residue-amended soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1–2):150–160.
- [35] 赵小亮, 刘新虎, 贺江舟, 等. 棉花根系分泌物对土壤速效养分和酶活性及微生物数量的影响 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(7):1426–1431.
- ZHAO Xiao-liang, LIU Xin-hu, HE Jiang-zhou, et al. Effects of cotton root exudates on available soil nutrition, enzyme activity and microorganism quantity[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7):1426–1431.
- [36] Rao M A, Violante A, Gianfreda L. Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: kinetics and stability[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(7):1007–1014.
- [37] Benitez E, Melgar R, Sainz H, et al. Enzyme activities in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annum* L.) grown with olive cake mulches [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(13):1829–1835.