



论文

中国 10 年抗虫棉大田生产: Bt 抗虫棉技术采用的直接效应和间接外部效应评估

黄季焜^①, 米建伟^{①②}, 林海^{①③}, 王子军^{①④}, 陈瑞剑^{①⑤}, 胡瑞法^①,
ROZELLE Scott^⑥, PRAY Carl^⑦

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101;

② 国家信息中心经济预测部, 北京 100045;

③ 中国农业大学, 北京 100083;

④ 复旦大学管理学院, 上海 200433;

⑤ 农业部对外经济合作中心, 北京 100125;

⑥ Food Security and the Environment Program, Freeman Spogli Institute for International Studies, Stanford University, Stanford, CA 94305-6055, USA;

⑦ School of Environmental and Biological Sciences, Rutgers, the State University of New Jersey, New Brunswick, NJ 08901-8520, USA

E-mail: jkhuan@ccap@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2009-10-09; 接受日期: 2009-10-30

国家自然科学基金(批准号: 70333001)、International Development Research Centre(批准号: 105562-001)、中国科学院知识创新工程(批准号: KSCX-YW-09, KSCX2-YW-N-039)、Rockefeller 基金会、Connell 大学和 Oxfam 项目资助

摘要 中国自 1997 年便开始大面积种植 Bt 抗虫棉. 本研究试图分析中国种植抗虫棉 10 年后减少防治棉铃虫杀虫剂用量的可持续性. 通过对 1999~2007 年 4 个省 16 个村农户大田 Bt 抗虫棉生产的跟踪调查数据分析, 发现生产上控制棉铃虫的杀虫剂用量不仅未增加, 反而呈下降趋势; 虽然没有直接回答 Bt 抗虫棉能够维持并增加其生产率的机理, 但本研究发现, 10 年来不仅抗虫棉, 而且非抗虫棉防治棉铃虫的杀虫剂用量也显著减少, 这与抗虫棉广泛种植后棉铃虫的种群总量下降有关. 这些发现对于 Bt 技术效应分析具有重要意义, 同时, 本文所采用的同时评估抗虫转基因技术生产的直接效应和间接外部性效应的方法, 对于未来该领域的同类研究也具有借鉴意义.

关键词

生物技术
Bt 抗虫棉
杀虫剂
可持续性
外部性
中国

迄今为止, 转基因抗虫农作物的培育是生物技术在农业上应用的最成功例子之一. 在 2007 年, 全球转基因抗虫作物总计种植了 4210 万公顷, 占当年世界转基因作物面积的 37%^[1]. 各国由于种植转 Bt (*Bacillus thuringiensis*) 抗虫棉均产生了巨大的经济效

益. 除了显著减少化学杀虫剂施用量外, 同时发现抗虫作物的种植提高了作物产量并降低了生产成本^[2~8].

虽然上述抗虫棉技术采用效果研究均证明其具有显著的经济效益, 但几乎所有这些研究均是在 Bt 抗虫棉刚开始商业化种植的年份开展的, 在长期种

英文版见: Huang J K, Mi J W, Lin H, et al. A decade of Bt cotton in farmer fields in China: assessing the direct effects and indirect externalities of Bt cotton adoption in China. *Sci China Life Sci*, 2010, 53, doi: 10.1007/s11427-010-0035-2

植的情况下抗虫棉的生产率变化及其外部性研究还不多. 影响Bt抗虫棉长期可持续性的主要潜在危险是目标害虫对Bt蛋白产生抗性^[9]. 人们担心Bt抗虫棉的长期种植将对棉铃虫(*Helicoverpa armigera* Hubner)产生选择压力, 导致对Bt蛋白产生抗性的棉铃虫(原本就存在)在棉铃虫种群中的比例上升. 如果对Bt蛋白产生抗性的棉铃虫比例过度增加到一定程度, 整个棉铃虫种群对Bt蛋白的敏感性将下降. 这种情况将导致化学杀虫剂施用量的增加, 降低Bt抗虫棉控制棉铃虫的有效性. 尽管在大多数情况下, 庇护所政策(refuge strategy)能有效地控制抗性的积累, 但许多发展中国家(如中国)没有实行类似于美国等国家的“庇护所”政策.

其他一些因素可能会使转基因抗虫作物种植早期所获得的收益得到加强. 例如, 由于Bt抗虫棉的大范围推广种植而产生正外部性影响是可能的. 如果Bt抗虫棉的大范围种植能够消除足够大的一部分棉铃虫种群, 使得棉铃虫个体减少到一定程度, 就能减少其他作物(包括非抗虫棉)所遭受的损失^[10,11].

中国的情况提供了为数不多的研究转基因抗虫作物长期效益的案例. 自从1997年中国批准Bt抗虫棉商业化种植以来, 已经有几百万小农户种植Bt抗虫棉, 到2007年中国已经商业化种植10年. 研究显示, Bt抗虫棉在中国最初几年的种植有效地减少了杀虫剂的施用量, 增加了棉花产量^[5,12,13]. 随着Bt抗虫棉品种的推广和种植年代的增加, 由于中国种植模式的原因, 一些研究人员开始担心Bt抗虫棉的长期影响^[14,15]. 研究发现, 棉花害虫, 如烟叶蚜(*Tobacco aphid*)和棉铃虫, 能在40代内积累起抗性^[16]. 按棉铃虫在中国一年可以繁殖4代, 到2007年Bt抗虫棉已经种植了10年计算, 棉铃虫已在Bt棉田生态条件下存活超过40代了. 因此, 现在是评价Bt抗虫棉的长期效益的合适时间. 对这个问题的研究将揭示发展中国家转基因技术应用的长期效果.

近来Wu等人^[11]在昆虫学领域的一项研究也进一步支持了本研究. 他们对棉铃虫种群变化的研究为Bt抗虫棉效益的长期可持续性提供了可靠的证据. 他们在中国华北地区建立了实验站, 连续10年对棉铃虫的种群变化进行了监测, 发现随着Bt抗虫棉推广种植面积的扩大, 棉铃虫种群数量在逐年下降. 更重要的是, Bt毒蛋白不仅减少了种植Bt棉花地块的棉铃虫数量, 而且对受到棉铃虫危害的其他作物产

生了正外部性. 根据Wu等人的研究结果, Bt抗虫棉的作用通过降低第一代棉铃虫的虫卵和幼虫数量来实现, Bt抗虫棉在经过10年的商业化种植以后, 还没有发现棉铃虫对Bt毒蛋白积累起抗性的迹象.

Bt抗虫棉在降低农药施用方面的可持续性非常重要, 但到目前为止还没有关于中国(或其他发展中国家)农户水平的实证研究. 尽管中国农户种植Bt抗虫棉已超过10年, 但人们还不了解农户控制棉铃虫用药量的变化趋势. 许多问题还需要进一步研究, 例如, Bt抗虫棉在中国商业化种植10年后, 同常规棉花相比, 其生产力优势是减少了还是增加了? 或者没有变化(至少从减少农药施用量的角度来看)? 为此, 本研究考察Bt抗虫棉在中国种植10年后, 其生产效益(至少是以控制棉铃虫杀虫剂施用量水平)的变化. 试图通过从20世纪90年代末开始, 对中国主要棉花种植省份农户棉花生产的长期调查数据的深入分析, 来回答上述问题.

本研究的数据由河北、山东、河南和安徽省的16个村6个独立调查年份——1999, 2000, 2001, 2004, 2006和2007年农田水平的调查数据组成, 包括控制棉铃虫和其他害虫的杀虫剂施用量和次数. 结果显示, 控制棉铃虫的杀虫剂施用量随时间推移不仅没有增加反而在下降. 即在其他条件不变的情况下, 在某一地区随着Bt抗虫棉种植面积的扩大, 农民在其他非Bt作物上控制棉铃虫的杀虫剂施用量在降低. 从而不仅以实证否定了随着抗虫棉种植, 棉铃虫会对Bt毒蛋白产生抗性的假设, 而且证明随着Bt抗虫棉种植区域的逐年扩大, 带来了显著的正外部性效应. 这一结果与Wu等人^[11]的发现一致. 需要说明的是, Bt抗虫棉长期种植后农民施用化学杀虫剂的变化可能包括对靶标昆虫和非靶标昆虫用药量的影响. 有关抗虫棉种植10年后对非靶标昆虫的影响见Wang等人^[17]的工作. 该研究表明, 随着Bt抗虫棉的推广, 农民用于控制非靶标次要害虫(如盲椿象)的农药用量显著增加, 然而, 这并未抵消由于抗虫棉种植使农民减少的农药用量, 造成这种现象的主要原因是气温和降雨量的变化.

1 数据来源与说明

本研究所用数据来自中国科学院农业政策研究中心(CCAP)调查数据库. 前3年调查数据曾被应用于评估中国Bt抗虫棉与传统棉花的效率差异^[5-7,12,13].

全部数据包括 6 次以 Bt 抗虫棉生产为重点的农户深入调查, 时间分别为 1999~2001, 2004, 2006 和 2007 年。由于 Bt 抗虫棉在中国的推广, 每次新调查都会增加样本数量和涵盖地域。截止 2007 年, 调查涵盖了 6 个省份的 44 个样本村, 即河北省(2 个样本村调查 6 次, 2 个样本村调查 4 次)、山东省(2 个样本村调查 6 次, 2 个样本村调查 4 次, 2 个样本村调查 2 次)、河南省(4 个样本村调查 5 次, 6 个样本村调查 1 次)、安徽省(2 个样本村调查 4 次, 2 个样本村调查 3 次, 4 个样本村调查 1 次)、江苏省(8 个样本村调查 1 次)和湖北省(8 个样本村调查 1 次)。

本研究所包括的样本村和样本农户为随机选择。在每个样本村, 调查队从当地户籍部门提供的本村全部农户列表中随机选择 20~30 户(具体数量取决于样本村大小)农户。经过 CCAP 调查队培训的调查员使用经济学文献中标准回忆调查技巧与每个农户面谈, 时间约为 2~3 h。按地块收集有关 Bt 抗虫棉和非 Bt 棉花生产的投入产出数据。调查员还向农户询问其对棉铃虫虫害的印象以及如果没有控制虫害会有多少损失等一系列问题。

为了评估调查样本农户在不同年份种植棉花过程中农药施用模式的变化, 并检验各种变化之间的相关关系, 本研究的分析只能基于至少调查过 2 次的农户调查数据(包括 2006 和 2007 年调查的一部分)。因此, 本研究去掉了 26 个仅调查了一次的村庄(即安徽的 4 个村、河南的 6 个村、江苏的 8 个村和湖北的 8 个村)。这样, 所采用的数据是基于至少调查过 2 次的河北、山东、河南和安徽 16 个村庄。这 4 个样本省份 Bt 抗虫棉种植面积占到 1998~2007 年间中国 Bt 抗虫棉种植面积的 65%以上。选中的样本农户共 525 户的 3576 个地块, 既有种植 Bt 抗虫棉的农户, 也有种植非 Bt 棉花的农户。对样本农户的描述统计分析见附表 1。

2 中国 Bt 抗虫棉生产以及控制棉铃虫农药的施用

2.1 转 Bt 抗虫棉种植情况

根据中国科学院农业政策研究中心(CCAP)对 Bt 抗虫棉种植情况的全国范围调查, 自 1997 年首次商业化种植以来, 中国农村 Bt 抗虫棉播种面积增加迅

速, 从第一年在河北、河南两省少数几个村到现在几乎所有棉花生产省份都有 Bt 抗虫棉种植。不过每个省份的 Bt 抗虫棉播种面积增加速度情况略有差别。比如, 河北省和山东省 Bt 抗虫棉播种面积早在 2001 年就已经超过 95%。而河南省和安徽省播种面积则增加较慢。到 2007 年, 全国 593 万公顷棉花播种面积中约有 389 万公顷是 Bt 抗虫棉, 占全部播种面积的 66%。在 4 个样本省份, 河北省和山东省的 Bt 抗虫棉播种面积已经占到 100%, 河南省和安徽省的播种面积也已超过 80%。尽管表 1 中未包含相关信息, 但是转基因抗虫棉确实已稳步推广到样本区域之外, 如江苏省和湖北省。

近些年, 由于 Bt 抗虫棉占棉花播种面积比重非常高(2005 年前后, 表 1 最底一行), 人们开始关注对庇护所的要求。美国环境保护局(EPA)于 1996 年针对转 Bt 基因作物的播种, 制定了控制针对 Bt 蛋白抗性增长的庇护所政策^[18]。例如, 在 20 世纪 90 年代中期, 美国南部棉农必须在其全部土地上留出 5%的“纯”庇护所(非转基因棉花, 不打化学杀虫剂进行害虫防治)或者 20%可以施用传统控制棉铃虫农药的庇护所。加拿大和澳大利亚等其他发达国家也针对 Bt 作物采用了类似的抗性管理政策^[19]。

与之相反, 中国没有制定类似于美国等国家的庇护所政策。但这并不表示没有关于庇护所问题的争论。一方面, 中国的一些科学家认为, 像玉米、小麦、水稻和花生等作物都可以作为棉铃虫的寄主, 因而, 在中国的产棉区已经有足够的“自然庇护所”^[20,21]。持有该观点的人还指出, 在中国这样拥有众多小农户的国家, 要实行庇护所政策非常困难^[22]。另一方面, 也有一部分学者认为, 棉铃虫正在逐渐产生对 Bt 蛋白的抗性^[23]。他们的观点和担忧是, 如果棉铃虫迅速对 Bt 蛋白产生抗性, 那就意味着农民将不得不重回大量施用农药防治棉铃虫的老路。

本研究中, 考虑到河北、山东、河南和安徽 4 省 Bt 抗虫棉播种面积高比例, 就更应该关注这 16 个样本村农户 Bt 抗虫棉种植比例相关的庇护所问题(表 2, 第 3, 6, 9 和 12 行)。河北省(自 1999 年起)和山东省(自 2001 年起)样本村农户 Bt 抗虫棉种植比例都达到了 100%。河南省 2007 年样本村农户 Bt 抗虫棉种植比例达到了 97%。而安徽省则在 2006 年样本村农户 Bt 抗虫棉种植比例就达到了 97%。如果抗性的增加与 Bt

抗虫棉播种面积占全部棉花播种面积的比例有关, 那么很明显, 本研究也应当考虑这一问题.

但是, 支持中国实行“零庇护所”或“自然庇护所”政策的观点也可以从本研究的调查数据中找到相应

的证据(表 2, 第 1, 4, 7, 10 列). 数据表明, 尽管中国的 Bt 抗虫棉种植比例非常高, 但中国仍然保留了足够高的“自然庇护所”. 在几乎所有的村庄, 农户都采取了多种作物的种植结构(尽管本研究的样本村位于

表 1 中国 Bt 抗虫棉种植规模和样本省技术采用率(1997~2008 年)^{a)}

年份	棉花面积(千公顷)		Bt 抗虫棉种植率(%)					4 省 Bt 抗虫棉面积 占全国份额(%)
	总面积	Bt 抗虫棉面积	中国	河北	山东	河南	安徽	
1997	4491	34	1	3	0	1	0	63
1998	4459	261	6	55	11	2	2	94
1999	3726	654	18	85	66	17	7	94
2000	4041	1216	30	97	88	31	20	91
2001	4810	2158	45	98	97	68	45	87
2002	4184	2156	52	99	99	77	56	86
2003	5111	2996	59	99	99	84	65	83
2004	5693	3533	65	100	100	84	70	79
2005	5062	3174	63	100	100	85	75	75
2006	5816	3700	64	100	100	85	85	69
2007	5926	3893	66	100	100	88	85	65
2008	5667	3831	68	100	100	90	85	66

a) 数据来源: 中国科学院农业政策研究中心棉花种植省区年度调查

表 2 中国北方种植模式下 Bt 抗虫棉、庇护所作物和棉花种植份额(1997~2007 年)^{a)}

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
河北											
棉花份额(%)	19	23	32	42	42	43	43	54	33	34	31
庇护所作物份额(%)	79	67	57	48	48	46	46	50	56	56	60
Bt 抗虫棉采用比例(%)	77	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100
山东											
棉花份额(%)	43	49	55	58	60	59	58	65	62	67	74
庇护所作物份额(%)	89	55	38	30	27	24	26	21	23	19	15
Bt 抗虫棉采用比例(%)	19	65	87	94	96	100	100	100	100	100	100
河南											
棉花份额(%)	50	50	43	46	48	46	42	38	30	26	27
庇护所作物份额(%)	100	94	62	43	39	43	44	47	56	63	62
Bt 抗虫棉采用比例(%)	0	8	55	79	84	81	85	89	95	94	94
安徽											
棉花份额(%)	35	35	38	39	41	41	42	40	42	42	-
庇护所作物份额(%)	100	97	92	72	50	50	46	46	42	42	-
Bt 抗虫棉采用比例(%)	0	19	27	50	85	85	92	98	99	99	-

a) 棉花份额是棉花播种面积占作物播种总面积的比例; 庇护所作物包括小麦、玉米、大豆、油菜、蔬菜和其他小杂粮作物; 庇护所作物份额是庇护所作物播种面积(小麦面积按 25% 计算, 蔬菜面积按 75% 计算)占作物播种总面积的比例; Bt 棉花采用率是 Bt 抗虫棉占棉花播种面积的比例

中国的核心棉区), 换句话说, 农户并不是单一的种植棉花. 例如, 在河北, 1997~2007 年棉花占总作物播种面积的比例在 19%~54%之间, 而在其他样本省, 该比例在 26%~74%之间. 因此, 与其他许多国家的单一种植结构(例如, 在美国和澳大利亚的一些地方, 农户大规模地种植同一种作物)不同, 中国的农作物播种结构是一种多样化的模式, 其他多种作物与棉花同时种植.

事实上, 在中国农户的种植结构中, 与棉花同时种植的其他许多作物也能够成为棉铃虫的寄主. 根据Wu和Guo的研究^[22], 棉铃虫不仅以棉花为食物, 其他作物如小麦、玉米、花生、大豆、油菜、蔬菜以及其他一些小杂粮作物也是棉铃虫的取食对象, 在本文中, 称之为“庇护所作物”.

由于小麦只有一部分生长季节与棉花重复, 在查阅相关技术文献以及听取相关专家的建议后, 将小麦的种植面积乘以系数 0.25, 经过调整计算后发现, 在所有种植 Bt 抗虫棉的地区, “庇护所作物”占总播种面积的比例相对比较大(表 2, 第 2, 5, 8, 11 行), 所有省份的历年“庇护所”作物面积的比例均超过了 15%(山东, 2007 年). 其中, 河北、河南和安徽的所有年份的比例都在 39%以上. 如果以村为单位进行考察(本文未列出), 所有村在所有年份的比例均超过了 10%, 其中 2007 年的平均比例达到了 46%. 如果按照支持“自然庇护所”政策的研究者的逻辑, 中国的自然庇护所比例应当能够有效容纳那些对 Bt 蛋白敏感的棉铃虫个体, 从而延缓棉铃虫的抗性积累. 尽管这种说法从逻辑上说得通, 但已有的研究还缺乏实证依据将这种种植结构与棉铃虫用药量的降低(至少是没有增加)联系起来.

除了需要关注密集种植转Bt基因抗虫作物可能带来的不利影响外, 同样也需要注意转Bt基因抗虫作物可能带来的正外部影响. 随着Bt抗虫棉面积的扩大, 其对于棉铃虫种群增长的抑制作用可能会进一步深化拓展, 如果棉铃虫种群数量被减少到足够低的水平, 对于全部农作物(也包含Bt抗虫棉)来说, 农户所获得的农药投入减少的收益(总收益)可能比Bt抗虫棉本身农药施用量的减少(直接收益)还要大. 这种情况在其他国家和地区也同样出现过, 例如, 在美国的亚利桑那州, 经过数年的Bt抗虫棉大规模商业化种植后, 棉铃虫种群在一些年份几乎完全消失^[10].

2.2 大田生产中控制棉铃虫农药施用量的变化趋势

与已有关于Bt抗虫棉技术经济影响的研究结果^[5]一致, Bt抗虫棉与非Bt棉花相比最大的优势在于, Bt抗虫棉的农药施用量显著低于非Bt棉花(表 3). 根据本研究的调查数据, 除了 1999 与 2000 年之间的变化, 其他所有年份的控制棉铃虫用药量都呈下降趋势(表 3, 第 1~6 列). 例如, 2000~2007 年河南省太康县的 2 个样本村以及山东梁山的 2 个样本村, 控制棉铃虫用药量从每公顷超过 14 公斤下降到了不足 4 公斤(第 2 和 4 行). 此外, 安徽的 4 个样本村的控制棉铃虫用药量在 2000 年以后也明显下降(第 8 和 9 行).

尽管不能确切地说控制棉铃虫用药量的下降是因为棉铃虫抗性没有上升, 但至少可以说, 控制棉铃虫用药量的下降趋势与“Bt 抗虫棉种植面积的扩大伴随着正外部性”的说法是一致的. 对于这个发现需要小心解释, 因为, 造成外部性的原因可能有多方面, 比如说, 农户如果发现他们在采用新的 Bt 抗虫棉技术时能够有效降低农药施用量, 那么这种“学习效应”也能降低农药施用量.

如果针对非 Bt 棉花的控制棉铃虫用药量进行统计性描述, 能够从以下几个方面对种植 Bt 抗虫棉的影响进行分离. 首先, 当考察非 Bt 棉花农药施用量的变化趋势时, 发现棉铃虫种群目前还没有积累起对 Bt 蛋白抗性的迹象(表 3, 第 10~18 行); 其次, 该趋势也表明, Bt 抗虫棉采用不仅对其自身的控制棉铃虫用药量产生影响, 而且还对其他作物也产生了外部影响. 具体来说, 从本研究调查来看, 非 Bt 棉花的控制棉铃虫用药量也在下降. 例如, 在河南太康县的两个样本村, 非 Bt 棉花的控制棉铃虫用药量从 2000 年的每公顷 33.2 公斤下降到了 2007 年的 4.7 公斤, 因为非 Bt 棉花本身并不抗虫或抗虫性随时间不会发生变化, 其用药量的下降就有可能是因为中国北方地区棉铃虫种群数量在减少(这可能是 Bt 抗虫棉大规模推广的结果). 总之, 尽管还不能肯定 Bt 抗虫棉种植和非 Bt 棉花用药量下降之间存在着因果关系, 但至少可以说, 非 Bt 棉花用药量的下降表明了这种外部性来自于同时影响 Bt 抗虫棉和非 Bt 棉花的某一个因素(如害虫种群数量的下降). 此外, 由于学习效应仅作用于 Bt 抗虫棉地块, 因此学习效应可能不是造成这种外部性的原因.

2001~2007 年农户调查所得到的关于虫害发生

程度的信息表明, 虫害发生程度在逐步下降. 图 1 描述了 4 个样本省农户对于虫害发生程度的评价. 从 1999~2007 年, 向农户询问了每个调查年份的虫害发生情况, 农户认为, 总地来说虫害发生程度在逐步下降(特别是 2001 年以后), 其中 2003~2006 年的虫害发生程度是最低的. 因为表 1 所报告的虫害发生程度仅仅是观察到的自然现象, 还不能由此把主要原因归结于 Bt 抗虫棉的推广. 但至少可以推测, 不论虫害发生程度下降的具体原因是什么, 棉铃虫用药量的下降与虫害发生程度的下降存在部分联系.

3 实证模型、待检验假设与多元回归结果

在前一部分的描述性分析中, 比较了农药施用量在各个年份之间、各个样本村之间以及 Bt 抗虫棉与非 Bt 棉花之间的差异, 分析表明了农药施用的潜在复杂模式. 但是, 其中一些突出的事实需要引起注意. 首先, Bt 抗虫棉的种植比例目前确实已经达到了比较

高的水平, 尽管存在棉铃虫可能产生抗性的担心, 但是, 正如在前文中所描述的那样, 棉花并不是农户所单一种植的作物, 在所有的样本村, 与棉花同时种植的还有相当数量的庇护所作物, 可能正是因为这个原因, 目前还没有直接的证据表明棉铃虫已经产生了抗性, 而控制棉铃虫用药量总体上保持下降态势(至少没有出现系统性上升)的事实可以作为其佐证. 此外, 不仅 Bt 抗虫棉地块的控制棉铃虫用药量在下降, 非 Bt 棉花地块也是如此. 总体来说, 描述性分析结果与以下论断是一致的: 控制棉铃虫用药量的下降是由于农民所观察到的棉铃虫虫害发生程度的降低造成的(该论点不仅体现在本研究的数据中, 而且在相关的农业科学文献中也得到印证^[11]).

由于描述性分析不是决定因素分析, 而且从理论上讲, 除了 Bt 抗虫棉采用变量以外, 还存在其他可能影响农药施药量的因素, 因此需要进行多元回归分析.

表 3 1999~2007 年样本村 Bt 棉和非 Bt 棉地块防治棉铃虫杀虫剂施用量(公斤/公顷)^{a)}

	1999	2000	2001	2004	2006	2007
Bt 抗虫棉地块	6.3	14.2	8.5	3.8	8.5	8.7
河南-太康 (2)	11.0	16.8	3.3	4.6	5.8	2.2
河南-扶沟 (2)	4.4	6.3	4.4	3.3	7.8	3.9
山东-梁山 (2)	8.5	14.5	8.2	3.2	5.3	3.6
山东-夏津 (2)	11.4	23.9	—	—	9.9	6.3
河北-深州 (2)	2.1	3.1	—	—	7.8	9.3
河北-夏津 (2)	2.0	14.7	9.8	2.9	19.4	25.1
安徽-东至 (2)	—	—	8.5	3.5	3.8	—
安徽-望江 (2)	—	—	17.5	8.2	8.0	—
非 Bt 棉花地块	69.1	36.3	46.3	14.3	22.5	9.4
河南-太康 (2)	—	33.2	27.5	16.3	15.2	4.7
河南-扶沟 (2)	—	42.6	27.3	7.2	32.8	0.1
山东-梁山 (2)	—	—	—	—	24.7	—
山东-夏津 (2)	69.1	—	—	—	—	5.7
河北-深州 (2)	—	—	—	—	—	—
河北-夏津 (2)	—	—	—	—	31.3	20.4
安徽-东至 (2)	—	—	68.3	34.8	—	—
安徽-望江 (2)	—	—	57.2	12.1	—	—

a) 河南-太康(2)指的是河南省太康县的 2 个村, 其他以此类推

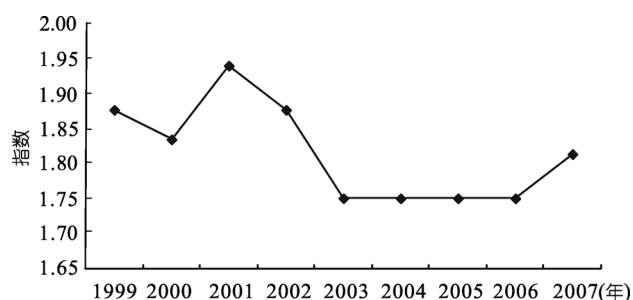


图 1 样本村棉农报告的棉铃虫危害程度(1999~2007 年)

指数由调查问卷中的问题:“棉铃虫危害和正常年份相比: (1) 轻、(2) 中等、(3) 严重”汇总得到

为了进行实证检验以分离出Bt抗虫棉采用(包括其他因素,如庇护所作物的种植比例、Bt抗虫棉的采用程度等)对控制棉铃虫用药量的影响,在农户施药行为计量模型^[6,24]的基础上,将其框架进一步拓展:(1) 与一般模型不同的是,本研究估计的是用于控制棉铃虫的农药施用量(即:方程左边的因变量是控制棉铃虫施药量,而不是总的农药施用量);(2) 因为要考察Bt抗虫棉技术的影响,所以将“Bt虚变量”作为解释变量放入方程右边,其中,Bt抗虫棉能够产生Bt蛋白从而有可能会降低农药施用量,而非Bt棉花则没有该效应;(3) 为了衡量Bt抗虫棉与非Bt棉花的农药施用量变化趋势,在方程右边加入了5个年份虚变量(1999年作为基准年份被去掉)及其与Bt虚变量的交叉项作为棉铃虫施药量的解释变量,其中年度虚变量的系数表示非Bt棉花的防治棉铃虫施药量跨期随时间影响;年度虚变量系数与Bt和年度虚变量交叉项的和表示Bt抗虫棉的防治棉铃虫施药量跨期影响;(4) 此外,村级水平的Bt抗虫棉采用程度和全村的庇护所作物种植比例也被包含进来,加入这两个变量是为了考察是否存在与样本村生产环境有关的正外部性或者负外部性。

上述理论模型设定如下:用于控制棉铃虫的农药量(地块级)= f [Bt 采用(地块级); 年份, 年份×Bt 采用; 本村的 Bt 采用比例和庇护所作物比例; 其他因素], ①

其中,因变量(以下简称为 $Q_bollworms$)是各个地块用于控制棉铃虫的农药施用量; Bt 采用是一个虚变量,如果该地块种植了 Bt 抗虫棉,该变量为 1, 否则为 0; 年份效应用两套变量来衡量,一系列年份虚变量 ($Year_dummies$, 包括 2000, 2001, 2004, 2006 和 2007

共计 5 个年份,对照年份为 1999 年)和 5 个交叉乘积项(Bt 变量和 5 个年份变量的乘积项),全村 Bt 采用率通过一个虚变量(Bt_full_adopt)来衡量,如果全村所有棉花地块都种植了 Bt 品种,该变量等于 1, 如果仍有非 Bt 品种存在则为 0. 庇护所比例($Refuge\ intensity$)通过小麦($\times 0.25$)以及其他和 Bt 抗虫棉处于同一生长季节的作物(即:玉米,大豆,花生,非 Bt 棉花,油菜和蔬菜)的总面积占全村农作物播种面积的比例来衡量. 同时引入了庇护所比例与省份虚变量的乘积来衡量庇护所所起的作用在不同省份之间的区别(3 个省份虚变量分别为河南、山东和安徽: $Refuge\ intensity*HN$; $Refuge\ intensity*SD$; $Refuge\ intensity*AH$, 河北为对照省)。

利用收集的调查数据(跨年份数据,并且有各个地块的生产信息),模型①的待估计形式为:

$$Q_bollworm_{ijt} = a + bBt_{ijt} + (c_0 + c_1 Bt_{ijt}) * Year_dummies + d Bt_full_adopt_{vt} + e Refuge_intensity_{vt} + f Refuge_intensity * province_{vt} + g Price_{it} + h Farm_size_{it} + r household_dummies + u_{ijt}, \quad (2)$$

其中 i, j, v 与 t 分别代表户、地块、村编码以及年份变量. $Q_bollworm_{ijt}$ 代表 t 年农户 i 在地块 j 上的每公顷棉铃虫用药量(公斤/公顷)或者农药成本(元/公顷). Bt , $Year_dummies$, $Bt*Year_dummies$, Bt_full_adopt , $Refuge\ intensity$, $Refuge\ intensity*Province\ dummies$ 的定义参照上一段内容. 符号 a, b, c, d, e, f, g, h 和 r 是需要估计的参数。

为了解释自变量 Bt , $Year$, $Bt*Year$, Bt_full_adopt 以及 $Refuge_intensity$ 对 $Q_bollworm$ 的净影响,其他可能对农户施药量产生影响的变量也要控制. 在本分析中加入了其他 3 个变量(或变量组). 具体来说,加入了衡量农药使用的控制变量. 包括农药价格 ($Price$: 元/kg)和农户耕地面积(或 $Farm_size$). 由于农户特征直接影响到农民的生产行为,农户特征中除耕地面积外基本保持不变,因此,在模型中加入了农户虚变量用来控制由于农户个体特征而产生的不可观测的固定效应。

如果方程②的误差项 u_{ijt} 遵循正态分布,则可以用普通最小二乘法(OLS)估计. 但在所有 3576 个地块样本中,有 625 个地块上农民没有使用农药控制棉铃虫(这部分数据亦用于回归分析). 使用Tobit估计量来估计方程②中的参数。

(1) 可检验的假设. 方程②所设定的模型可用来

检验以下与采用和推广 Bt 抗虫棉对 Q_bollworm 影响的假设.

假设 1: $b=0$. Bt 采用对于初始年份(1999 年)棉铃虫用药量没有影响, 若 b 显著异于 0, 则拒绝该假设.

假设 2: $c_0 = c_1 = 0$. 样本村 Bt 抗虫棉采用率的提高(以及其他因素, 主要是年份虚变量 Year_dummies 及其与 Bt 变量的交叉项 Bt*Year_dummies)不会减少 Bt 抗虫棉或非 Bt 棉花棉田里控制棉铃虫农药用量 Q_bollworm. 具体来说, 如果 c_0 和 c_1 都显著不为零, 则拒绝原假设. 如果 $c_0 < 0$, 则表明用于控制非 Bt 棉花棉田里棉铃虫的农药使用量(由于某种未能查明的随时间变化的因素)随时间推移而增加. 如果 $c_0 > 0$, 则表明在非 Bt 棉花棉田里, 控制棉铃虫的农药使用量也随时间推移而下降. 这种情况出现的原因之一可能是因为 Bt 抗虫棉的广泛使用导致了棉铃虫种群规模的下降. 但由于缺乏从昆虫学角度对各村棉铃虫种群规模的评估, 无法准确判定存在于 Q_bollworm 和 Bt 抗虫棉播种率之间的负相关关系是否真的来自于种群规模减少效应. 参数 c_1 (与 c_0 一起)是用来检验在 Bt 抗虫棉和非 Bt 棉花棉田中, 是否存在着不同的与 Bt 抗虫棉采用率相关的正或负外部性. 如果 c_0 为 0 且 c_1 为正, 则意味着 Bt 抗虫棉棉田中控制棉铃虫农药的使用随时间推移而增加. 也就是说, 棉铃虫的抗性增加了(尽管缺乏棉铃虫种群基因组成的数据, 但是该参数只能有这样一种解释). 如果 c_0 为 0 且 c_1 为负, 则意味着 Bt 抗虫棉棉田中控制棉铃虫农药的使用随时间推移而减少. 也就是说, 存在着种群规模减少效应(与前文一样, 尽管缺乏棉铃虫种群规模的数据, 但是该参数只能有这样一种解释). 事实上, 当 c_0 为 0 且 c_1 为负时, 也与农民的认知效应相一致, 即农民逐渐了解到, 当 Bt 抗虫棉采用率随时间推移而增加时, 他们只需要更少的农药就可以了. 调查结果确实如此, 由于只有 Bt 抗虫棉播种地块才出现了学习效应, 这一显著证据支持了棉铃虫种群规模减少效应的说法. 最后, 如果 c_0 为负且 c_1 为正, 那么这一估计结果也符合种群规模减少效应(只要 Bt 的系数为负且显著即可). 这意味着在非 Bt 棉田里, 控制棉铃虫使用的农药量持续下降, 并且, 在 1999 年最初采用 Bt 抗虫棉时的下降(1999 年为研究的第一年, 从该年度的 Bt 抗虫棉变量系数上可以看出)之后, 2000~2007 年间药量没有上升.

另一种可能的负外部性是抗性增加. 尽管上文

已经提到, 由于缺乏棉铃虫种群基因数据, 限制了本研究对于这一问题的解释能力. 但是, 至少可以说, 正的 c_0 意味着抗性上升.

假设 3: $d=0$. 如果 $d=0$, 那么某村全面播种 Bt 抗虫棉(或 Bt_fulladopt=1)不会对控制棉铃虫农药使用量产生负(或正)外部性. 正如假设 2, 如果 $d>0$, 则表明棉铃虫可能产生了抗性; 相反, 如果 $d<0$, 则可以得到与种群规模减少效应一致的结论.

假设 4a: $e=0$. 如果 $e=0$, 那么河北省(对照组)样本村庇护所作物面积比例(Refuge_intensity)则与负(或正)外部性无关. 反之, 如果 $e>0$ ($e<0$), 则从农药使用角度来说, 河北省的 Refuge_intensity 与负(或正)外部性相关. 负系数可以这样解释, 如果庇护所作物面积过小, 则棉铃虫抗性会上升, 用于控制棉铃虫的农药数量可能随之上升. 相反, 正系数则应当解释为, 随着庇护所作物面积的增加, 棉铃虫有可能找到更多的庇护所, 从而在样本村耕地中的棉铃虫数量增加, 农民就需要施用更多的农药. 不过, 多施的农药成本有可能被其他收益抵销, 主要是较大的庇护所作物面积减少了棉铃虫产生抗性的机会, 从而也就不施用更多的农药来控制棉铃虫.

假设 4b: $e+f=0$. 如果 $e+f=0$, 那么其他对照省(山东、河南或安徽)样本村庇护所作物面积比例(Refuge_intensity)则与负(或正)外部性无关(这种外部性可能来自于显著的抗性增强效应). 反之, 如果 $e+f>0$ ($e+f<0$), 则从农药使用角度来说, 其他省份的 Refuge_intensity 可能与负(或正)外部性相关.

(2) 估计结果. 方程②多元回归估计结果表明, 模型与理论期望非常一致(表 4). 为了说明这一点, 可以考察部分控制变量的估计参数是否与理论假设相符. 例如收益性指标变量价格(Price)的系数符号就与预期相一致. 当农药价格上升时, 控制棉铃虫农药施用量(Q_bollworm)下降. 另外, 耕地面积大小变量的参数符号是负的. 这意味着农药施用量存在着一定的规模效应. 也就是说, 在其他条件不变的情况下, 耕地面积增加, 则单位面积农药施用量减少.

更为重要的是, 在检验估计结果是否与假设一致时发现, 不仅没有多少证据支持存在着与 Bt 抗虫棉种植相关的严重负外部性的假设(至少到目前为止), 而且还有证据显示存在着正外部性. 无论如何选择估计量(此处使用了两种: 1, 2 列的 OLS 和 3, 4 列的 Tobit)和设定被解释变量(1, 2 列的农药施用量和

表 4 Bt 抗虫棉和非 Bt 棉生产中防治棉铃虫农药施用影响的 OLS 估计和 Tobit 估计结果^{a)}

	被解释变量: 防治棉铃虫的杀虫剂施用(Q_bollworm)			
	OLS 估计		Tobit 估计	
	施用量 (公斤/公顷)	金额 (元/公顷)	施用量 (公斤/公顷)	金额 (元/公顷)
Bt 虚变量	-54.2 (6.62)***	-1381.9 (7.81)***	-55.2 (20.92)***	-1403.4 (25.10)***
2000 年	-18.0 (2.11)**	-614.6 (3.33)***	-15.4 (5.00)***	-565.6 (8.66)***
2001 年	-13.1 (1.50)	-564.0 (3.03)***	-11.3 (3.58)***	-530.1 (7.95)***
2004 年	-40.2 (4.77)***	-1070.9 (5.87)***	-39.4 (11.09)***	-1056.8 (14.06)***
2006 年	-37.7 (4.33)***	-953.9 (4.97)***	-36.1 (8.21)***	-921.9 (9.91)***
2007 年	-47.9 (5.64)***	-1180.6 (6.47)***	-46.8 (8.00)***	-1158.0 (9.34)***
Bt* 2000 年	29.1 (3.38)***	866.1 (4.67)***	28.6 (9.23)***	857.8 (13.06)***
Bt* 2001 年	15.5 (1.77)*	646.4 (3.47)***	12.5 (4.08)***	581.5 (8.94)***
Bt* 2004 年	40.4 (4.80)***	1107.9 (6.08)***	35.7 (10.25)***	1009.9 (13.70)***
Bt* 2006 年	44.5 (5.11)***	1141.9 (5.95)***	44.8 (10.34)***	1151.2 (12.55)***
Bt* 2007 年	53.7 (6.33)***	1346.9 (7.40)***	54.6 (9.44)***	1364.8 (11.15)***
Bt 抗虫棉完全采用	-5.4 (4.03)***	-102.9 (4.27)***	-5.2 (4.78)***	-100.5 (4.40)***
庇护所作物密度	45.2 (9.74)***	993.1 (9.26)***	53.6 (8.17)***	1167.0 (8.41)***
庇护所作物密度*河南	-42.4 (7.57)***	-956.0 (7.37)***	-51.6 (6.81)***	-1154.0 (7.20)***
庇护所作物密度*山东	-36.1 (3.88)***	-846.8 (4.58)***	-40.4 (4.51)***	-946.2 (5.00)***
庇护所作物密度*安徽	-39.5 (3.14)***	-745.0 (3.09)***	-41.9 (3.62)***	-741.0 (3.03)***
杀虫剂价格	-0.2 (9.42)***	1.4 (1.45)	-0.2 (11.89)***	1.1 (2.96)***
土地规模	-2.8 (2.69)***	-51.8 (2.21)**	-3.6 (3.53)***	-66.4 (3.09)***
524 农户虚变量	进入估计但没有报告			
截距项	65.5 (6.34)***	1391.7 (6.39)***	67.8 (7.58)***	1414.6 (7.46)***
观测值	3576	3576	3576	3576
R-squared	0.62	0.61		
χ^2 test				
Refuge+HN_refuge = 0	0.49	0.17	0.23	0.02
Refuge+SD_refuge = 0	1.37	1.16	5.67**	3.52*
Refuge+AH_refuge = 0	0.24	1.35	1.57	4.56**

a) *, ** 和 *** 分别表示在统计上达到 10%, 5% 和 1% 的显著性水平。括号中的数字是 T 值。“Refuge+HN_refuge”中 Refuge 是庇护所作物密度, HN_refuge 是庇护所作物密度*河南, 其他以此类推

3, 4 列的农药成本), 在所有估计模型中, 用于检验上述 4 个假设的被关注变量的系数都与假设一致. 具体来说, 无论被解释变量是物理数量还是经济成本, 无论使用 OLS 还是使用 Tobit 估计量, Bt 变量的系数都是负的并且高度显著. 按照最为严格的解释, 这一系数意味着在本案例的第一年 1999 年里, 在所有的样本村, 采用 Bt 抗虫棉的农民平均减少农药施用量 54.2~55.2 千克/公顷. 进而, 该估计结果也表明农民在 1999 年的农药成本也减少了 1381.9~1403.4 元. 该发现与 Huang 等人^[5,6,12]和 Pray 等人^[7,13]的研究结果一致. 从而拒绝了在第一年(1999)采用 Bt 抗虫棉时没有减少农药施用量的假设(假设 1).

同样, 年份虚变量 Year_dummies 对 Q_bollworm 没有影响或正影响的假设(假设 2)也被拒绝. 年份虚变量 Year_dummies 高度显著的负系数表明, 在研究样本所跨 1999~2007 年度内, 当村级 Bt 抗虫棉种植比率提高时(以及当该村全面播种时), Q_bollworm 下降, 从而表明 Bt 抗虫棉大面积种植存在着正的外部性(或者某些正的时间变化效应). 值得注意的是, 由于在模型中加入了一组交叉项(Bt*Year_dummies), 则变量 Year_dummies 的负系数表明控制非 Bt 棉田里棉铃虫的农药用量也下降了. 因而, 该估计结果与种群数量减少效应一致. 换句话说, 如果该解释正确, 则在过去 10 年里, 随时间推移而逐渐推广的 Bt 抗虫棉不仅导致控制转基因棉田棉铃虫施用农药数量下降(前文所述), 同时也导致控制非转基因棉田棉铃虫施用农药数量下降, 这是由于广泛采用 Bt 抗虫棉减少了棉铃虫的种群数量.

对交叉项 Bt*Year_dummies 系数的谨慎解释也证实, 在中国种植 Bt 抗虫棉 10 年后, 并不存在棉铃虫对 Bt 抗虫棉抗性显著提高的证据. 尽管系数显著为正, 但是与 Bt 和 Year_dummies 的系数一起, 可以得到清晰的解释, 即在 Bt 抗虫棉田里, 自从 1999 年控制棉铃虫农药施用量首次下降以后, 就没有再增加过.

虽然还不能更精确地反应现实, 但是, 全面采用 Bt 抗虫棉这一变量 Full_Adopt 与最初的设想一致. 即当 Bt 抗虫棉种植比率上升为样本村全部播种时, 棉铃虫种群数量下降(假设 3). 控制棉铃虫数量的下降可能预示着, 在 Bt 抗虫棉种植比率提高的同时, 也创造出与其他因素无关的减少控制棉铃虫农药施

用量的效应. 当然, 究竟是该变量自身作用, 还是种群数量减少效应或者仅仅是农民慢慢通过学习了解到 Bt 抗虫棉不需要太多农药, 现在还无法区分. 但是, 至少得到了负的系数, 说明没有抗性增加的证据. 负系数是由于种群数量减少效应可通过模拟在控制其他因素条件下, 农民用于防治棉铃虫的农药量更直观地说明(附图 1).

由于本研究的数据缺乏对棉铃虫种群遗传结构进行评估的直接观测数据, 对估计结果的解释也需要更加小心. 实际上, 中国的棉铃虫种群还存在正积累起抗性的可能性, 当一个种群面临这样高的生存压力时(Bt 抗虫棉释放的 Bt 毒素杀死了大量的棉铃虫群体), 几乎都会以积累抗性作为基因的自然反应(敏感个体大量死亡, 产生较少的后代, 而具有较强抗性的个体存活下来). 从这个意义上说, 本发现至多只能说明在经过 Bt 抗虫棉商业化生产超过 10 年后, 棉铃虫群体的基因结构还没有发展到足以使农户施用更多的农药的程度, 或者还可以说, 即使抗性真的上升, 棉铃虫群体数量减少的效应足以抵消它的负面影响.

最后, 河北省和其他各省样本中的变量 Refuge_intensity 符号(以及交叉项的符号: e 和 f)需要分别解释(假设 4a, 4b). 当把两个系数放在一起时($e+f$), 山东、河南和安徽 3 省的综合效应为零的原假设都不显著. 具体讲, 不显著的系数可以解释为与中国“自然庇护所”政策的事实相符. 或者至少可以足够防止出现负外部性.

然而, 河北省的例子是令人感兴趣和特殊的, 变量(Refuge_intensity)庇护所作物密度的系数 e 显著为正. 这意味着当在一个村种植更多庇护所作物时, 控制棉铃虫的杀虫剂施用量在增加. 似乎这违反了直觉, 但根据与科学家以及田间棉农的交流, 找到一个逻辑上合理的解释. 当棉花(大多数是 Bt 抗虫棉)和许多庇护所作物毗邻种植时, 无疑给庇护所作物带来较大的虫害压力, 有更多的棉铃虫危害是可以理解的. 庇护所作物由于不表达 Bt 蛋白, 棉铃虫种群有增长的倾向(它们生活在庇护所作物上). 在河北省, 棉田里增多的害虫使棉农施用更多的杀虫剂. 需要注意的是, 这正是庇护所需要发挥的作用, 庇护所能够容纳较多的棉铃虫个体(未面临 Bt 毒素带来的高选择压力), 这些个体与那些 Bt 棉田中面临较高选择压力的棉铃虫个体进行交配.

4 结论

中国农业部门在Bt抗虫棉种植中实施的抗性管理政策与其他国家不同,制订“零庇护所”或“自然庇护所”的决策时也没有得到来自田间的实证依据。本研究的意义在于提供了来自田间的农户调查实证研究,研究结果显示中国“自然庇护所”政策是合理的,至少到目前为止。尽管存在棉铃虫累积起对Bt毒素抗性的可能,但到2007年为止,抗性的发展还没有达到足以使农户施用更多的农药的程度,Bt抗虫棉技术依然有效。这一结论与Wu等人^[25]和Gao等人^[26]的发现一致。

本研究也发现了由于Bt抗虫棉推广而带来的正外部效应。尤其是研究显示,由于Bt抗虫棉的推广既带来直接效应(和假设1有关,这和过去文献报告的发现一致),又带来间接效应(假设2)。研究结论和

这样一个逻辑是一致的: Bt抗虫棉的推广降低了棉铃虫种群数量,使得种植Bt抗虫棉和非Bt棉花的农户都减少了对控制棉铃虫的化学杀虫剂依赖。本结果是基于农户田间杀虫剂施用的实证发现,与Wu等人^[11]的研究结果一致。当研究Bt抗虫棉技术的成本和收益时,需要考虑以上两种效应。

然而,需要注意的是,虽然本研究对于其他发展中国家有参考意义,但Bt抗虫棉种植比率对控制棉铃虫杀虫剂施用的影响可能与环境高度相关。害虫种群的动态变化和许多因素有关,诸如气候、地理位置、种植制度和害虫种群特性等。因此,其他发展中国家欲借鉴中国的经验之前,还有许多相关研究需要完成。因此,一方面需要进行与本研究相关的其他领域的研究,另一方面,随着未来新情况的出现,相关的跟踪研究也有必要继续进行。

致谢 感谢中国科学院农业政策研究中心的师生对本研究数据调查的帮助,加拿大国际发展研究中心(IDRC)Ellie Osir 博士、英国 Robert Tripp 博士、世界银行 Derek Byerlee 博士、Standford 大学 Wally Falcon 教授、NC State 大学 Fred Gould 教授、东京大学 Keijiro Otsuka 教授、Connell 大学 Per Pinstrup-Andersen 教授、FAO Prabhu Pingali 博士、中央财经大学乔方彬博士和中国农业科学院吴孔明教授对本研究的建议。

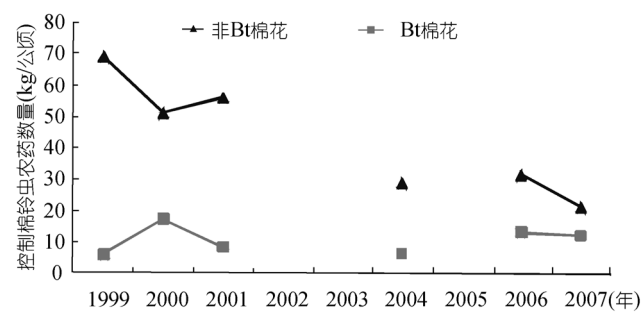
参考文献

- 1 James C. Global status of commercialized biotech/GM Crops: 2007. ISAAA Briefs No. 37. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Ithaca, NY. 2007
- 2 Perlak F J, Oppenhuizen M, Gustafson K, et al. Development and commercial use of Bollgard® cotton in the USA - early promises versus today's reality. *Plant J*, 2001, 27: 489—502^[DOI]
- 3 Traxler G, Godoy-Avila S, Falck-Zepeda J, et al. Transgenic cotton in Mexico: economic and environmental impacts(unpublished report). Auburn: Auburn University, 2001
- 4 Ismael Y, Thirtle C L B, Bennett R, et al. Smallholder adoption and economic impacts of Bt cotton in the Makhathini Flats, Republic of South Africa. Report for DFID Project R7946. Natural Resources Policy Research Programme, London, 2001
- 5 Huang J K, Rozelle S, Pray C, et al. Plant biotechnology in China. *Science*, 2002, 295: 674—677^[DOI]
- 6 Huang J K, Hu R F, Pray C, et al. Biotechnology as an alternative to chemical pesticides: a case study of Bt cotton in China. *Agr Econ*, 2003, 29: 55—67^[DOI]
- 7 Pray C E, Huang J K, Hu R F, et al. Five years of Bt cotton in China-the benefits continue. *Plant J*, 2002, 31: 423—430^[DOI]
- 8 Qaim M, Zilberman D. Yield effects of genetically modified crops in developing countries. *Science*, 2003, 299: 900—902^[DOI]
- 9 Bates S L, Zhao J Z, Roush R T, et al. Insect resistance management in GM crops: past, present and future. *Nat Biotechnol*, 2005, 23: 57—62^[DOI]
- 10 Carrière Y, Eilers-Kirk C, Sisterson M, et al. Long-term Regional Suppression of Pink Bollworm by *Bacillus thuringiensis* Cotton. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 1519—1523^[DOI]

- 11 Wu K M, Lu Y H, Feng H Q, et al. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. *Science*, 2008, 321: 1676—1678[DOI]
- 12 Huang J K, Hu R F, Rozelle S, et al. Transgenic varieties and productivity of smallholder cotton farmers in China. *Aust J Agr Resour Econ*, 2002, 46: 367—387[DOI]
- 13 Pray C E, Ma D M, Huang J K. Impact of Bt cotton in China. *World Dev*, 2001, 29: 813—825[DOI]
- 14 Wang S H, Just D, Andersen P. Tarnishing Silver Bullets: Bt Technology Adoption, Bounded Rationality and the Outbreak of Secondary Pest Infestations in China. Cornell University, 2005
- 15 Pems D, Waibel H, Gutierrez A P. Why do some Bt-cotton farmers in China continue to use high levels of pesticides?. *Int J Agr Sustain*, 2005, 3: 44—56
- 16 Moar W J, Smith R H. Bt resistance monitoring of tobacco budworm and cotton bollworm in Alabama cotton. In: let's get everyone involved. Proceedings Beltwide Cotton Conferences, San Diego, 1998. 1054—1056
- 17 Wang Z J, Lin H, Huang J K, et al. Bt cotton in China: are secondary insect infestations offsetting the benefits in farmer fields. *Agr Sci China*, 2009, 8: 101—105
- 18 EPA. U.S. Environmental Protection Agency FIFRA Scientific Advisory Panel. Subpanel on *Bacillus thuringiensis* (Bt) plant-pesticides and resistance management February 9-10. 1998, Docket No: OPPTS-00231
- 19 Fitt G P. Transgenic cotton resistance strategy. *Australian Cottongrower*, 1996, 17: 30—31
- 20 Wu K M, Guo Y Y, Gao S S. Evaluation of the nature refuge function for *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) within *Bacillus thuringiensis* transgenic cotton growing areas in North China. *J Econ Entomol*, 2002, 95: 832—837[DOI]
- 21 Wu K M, Feng H Q, Guo Y Y. Evaluation of maize as a refuge for management of resistance to Bt cotton by *Helicoverpa armigera* (Hubner) in the Yellow River cotton-farming region of China. *Crop Protect*, 2004, 23: 523—530[DOI]
- 22 Wu K M, Guo Y Y. The evolution of cotton pest management practices in China. *Annu Rev Entomol*, 2005, 50: 31—52[DOI]
- 23 Xue D Y. A summary of research on the environmental impacts of Bt cotton in China. Hongkong: Green Peace, 2002
- 24 Pingali P L, Carlson G A. Human capital, adjustments in subjective probabilities, and the demand for pest controls. *Amer J Agri Econ*, 1985, 67: 853—861[DOI]
- 25 Wu K M, Mu W, Liang G M, et al. Regional reversion of insecticide resistance in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) is associated with the use of Bt cotton in northern China. *Pest Manag Sci*, 2005, 61: 491—498[DOI]
- 26 Gao Y L, Wu K M, Gould F. Frequency of Bt resistance alleles in *H. armigera* during 2006~2008 in northern China. *Environ Entomol*, 2009, 38: 1336—1342[DOI]

附表 1 样本农户特征(1999~2007 年)

	均值	标准差
土地规模(公顷)	0.73	0.38
总播种面积(公顷)	1.19	0.68
棉花播种面积(公顷)	0.53	0.30
Bt 抗虫棉播种面积(公顷)	0.47	0.32
户主受教育水平(年)	7.3	2.8
户主年龄(年)	46.4	9.3



附图 1 Bt 抗虫棉和非 Bt 棉花地块防治棉铃虫农药施用量的变动趋势模拟(1999~2007 年)
模拟使用的参数是方程 2 估计的 c_0 和 c_1 , 具体数据是表 4 的第一列估计值