转基因抗虫棉经济效益可持续性研究

乔方彬*

中央财经大学中国经济与管理研究院, 北京 100081

* 联系人, E-mail: qiaofangbin@cufe.edu.cn

收稿日期: 2018-06-06; 接受日期: 2018-07-13; 网络版发表日期: 2018-09-12

国家自然科学基金(批准号: 71773150, 71273290)资助

摘要 虽然种植转基因抗虫棉的短期经济效益已经被广泛证实了, 然而其经济效益的可持续性问题仍待研究. 对其经济效益可持续性的质疑, 也成为近年来对转基因作物争论的焦点. 本文首先通过构建和分析理论模型来回答这一问题. 定性分析结果表明, 种植转基因抗虫棉能间接导致次要害虫农药使用量的上升. 本文用符合中国实际的生物和经济学参数来模拟棉花生产. 数值模拟结果显示, 次要害虫农药使用量的上升并不足以抵消种植抗虫棉带来的农药节省. 而且由于有大量自然避难所的存在, 棉铃虫对转基因蛋白的抗性在大田中并没有广泛建立起来. 总之, 本研究表明种植抗虫棉的经济效益不但在数量上是显著的, 在时间上也是可持续的.

关键词 生物技术, 转基因棉花, 经济效益可持续性, 中国

转基因抗虫棉在我国的经济效益已经被广泛证实^[1~5]. 类似地, 在世界上其他种植抗虫棉的国家, 其经济效益也得到了证实^[6~8]. 这些研究表明, 种植抗虫棉显著地降低了农药和劳动力的投入, 增加了棉花产量. 而且, 抗虫棉的大面积推广种植显著降低了棉铃虫在一定区域内的种群数量, 这使得抗虫棉的种植户和非种植户都从中受益^[9].

然而, 公众对转基因技术的质疑并没有因此而停止. 人们所担心的负面影响主要包括两个方面: 棉铃虫抗性的发展和棉田次要害虫危害的增加. 随着抗虫棉的大规模种植, 棉铃虫可能对转基因蛋白产生普遍的抗性. 一旦棉铃虫的抗性产生, 那么转基因蛋白对棉铃虫的防控作用就降低了. 最终, 农民不得不重新施用更多的化学农药来控制棉铃虫. 然而, 现有的研究表明由于我国有大量的天然避难所的存在, 棉铃虫

在大田中抗性的发展速度并不像人们想象的那么快^[10~12].

但是, 在棉田次要害虫危害的问题上, 目前的研究还不够完善. 抗虫棉的种植有效地控制了棉铃虫(即棉田的“主要害虫”)的数量, 也因此显著降低了防治棉铃虫的化学农药的使用量. 化学农药使用量的减少, 给棉田的其他害虫创造一个更加安全的环境. 相应地, 棉农专门用来防治其他害虫的农药使用量有可能增加. 有研究表明, 随着抗虫棉的推广, 次要害虫如盲蝽象和一些益虫的数量可能比其他非转基因棉田里要多一些^[13]. 特别地, 随着2004年前后棉田次要害虫危害在一些棉区的短时间爆发, 有研究认为转基因棉花的经济效益已经大为减少, 甚至于消失殆尽^[14~16].

与此同时, 也有研究表明2004年前后棉田次要害虫的爆发具有偶然性^[3,17]. 而且, 他们的研究表明这种

引用格式: 乔方彬. 转基因抗虫棉经济效益可持续性研究. 中国科学: 生命科学, 2018, 48: 1330–1342

Qiao F B. Sustainability of the economic benefit of Bt cotton (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2018, 48: 1330–1342, doi: 10.1360/N052018-00109

趋势并没有继续下去. 而且, 他们还发现即使在次要害虫爆发的年份, 为控制次生害虫危害而增加的农药使用量, 仍然远小于因种植转基因抗虫棉而减少的农药使用量. 他们的研究还表明, 次要害虫的短时间爆发在很大程度上与当地的气温和降水量有关.

然而, 这种建立在短期的(甚至是一年的)数据基础之上的实证分析, 还不能彻底打消人们对次要害虫危害增加的担心. 而要对此问题进行系统的科学分析, 则需要建立复杂的生物经济学模型. 那么, 转基因技术的采用会引起棉田次要害虫危害的增加吗? 如果会, 增加的幅度有多大? 次要害虫所造成的危害会发生什么样的动态变化? 随着时间的推移, 次要害虫危害的增加所带来的成本损失, 能不能完全抵消转基因抗虫棉采用的经济效益?

本文将试图对这些问题进行分析. 具体来说, 本文的研究目标包括3个. (i) 抗虫棉的采用对棉田次要害虫危害的影响. (ii) 随着抗虫棉大面积的推广种植, 次要害虫所造成的危害的动态变化. (iii) 种植抗虫棉经济效益的可持续性及其动态变化.

1 生物经济学模型

本文使用的生物经济学模型包括两个部分: 生物学模型和经济学模型. 经济学模型为该模型系统的目标函数, 而生物学模型则是该模型系统的限制条件. 因为该模型系统中的生物学模型部分相对比较复杂, 而经济学模型部分则相对简单, 所以本文首先介绍生物学模型.

在构建生物学模型时, 大部分同类的研究都采用了扩展的哈代温伯格(Hardy-Weinberg)模型^[18,19]. 该模型是在Alstad和Andow^[20]的模型的基础上建立起来的, 用于模拟昆虫种群对Bt蛋白产生抗药性的过程. 遵循这种传统, 本文也采用了该模型. 笔者使用两组基因, 每组基因组包括两个等位基因的模型, 分别模拟害虫对Bt蛋白和化学农药的抗性. 按照以前大多数研究的做法, 本文假设害虫无迁入迁出. 换言之, 本文研究的系统是一个封闭环境.

1.1 生物学模型

本文定义害虫在第*t*年初的种群密度为 $N^i(t)$. 其中, 上标*i*代表第*i*种害虫. 我国的棉花主产区, 棉铃虫毫

无疑问是最主要的害虫($i=1$). 然而, 次要害虫则依时期和棉花产区而不同. 在抗虫棉商业化之后, 盲蝽蟥在一些棉花产区危害加重. 特别是在2004年前后, 盲蝽蟥在一些棉区出现了爆发^[21]. 因此在很多研究中, 盲蝽蟥被当成次要害虫的代表. 在本文以后的部分, 除非特别说明, 次要害虫以盲蝽蟥作为代表($i=2$).

大部分文献假设害虫种群的自然生长符合logistic增长曲线, 本文沿用这一假设^[22]. 假定在自然条件下, 害虫种群的内生增长率为 g (自然死亡率内化为零), 环境承载力为 K (即在自然条件下, 单位土地面积上害虫的最高数量). 按照这样的假设, 新增害虫数量为:

$$N_{t+1}^i = \left[1 + g^i \left(1 - \frac{N_t^i}{K^i} \right) \right] N_t^i. \quad (1)$$

按照以前的类似研究, 本文假定棉铃虫的抗性是有一对等位基因控制的. 用 x 表示对Bt蛋白的抗性基因, X 表示对Bt蛋白的易感性基因. 同样地, y 表示对化学农药的抗性基因, Y 表示对化学农药的易感性基因. 根据等位基因的不同, 每种害虫可以被进一步分成九类. 例如, 其中一类害虫 N_{xyy}^i 表示第*i*类害虫里具有 $xyyy$ 基因型的害虫种群密度. 假定 x^i , X^i , y^i 及 Y^i 的基因频率分别为 P_x^i , P_X^i , P_y^i 及 P_Y^i . 在这样的假设条件下, 可以得到本文的生物学模型(详见网络版附录). 因为该生物学模型是本文生物经济学模型系统(下节将要在1.3中讨论)的限制条件, 所以在这里不重复列出.

1.2 经济学模型

在讨论经济学模型之前, 按照经济学的分析方法, 假定有一个代表性农户. 该农户的目标函数是一定时期内, 最小化其(经过折现的)总生产成本. 本文假定生产成本只包括3部分: (i) 农药成本; (ii) 抗虫棉(相对于非抗虫棉)增加的种植成本; (iii) 害虫所造成的产量损失. 出于简便的目的, 本文假定农药成本与农药的喷洒量成正比, 抗虫棉增加的种植成本与抗虫棉的种植比例成正比, 害虫所造成的产量损失与害虫数量成正比. 事实上, 这样的假设也与现有的文献相一致^[12,23]. 这样一来, 每一期的成本函数就可以具体化为:

$$\text{Cost} = \mu^1 N^1 + \mu^2 N^2 + \mu_{cp}(1 - \alpha) + \mu_{bt}(1 - \varphi), \quad (2)$$

其中 μ^1 和 μ^2 分别是单位棉铃虫和盲蝽蟥所造成的成本

增加, N^1 , N^2 分别是第 t 期棉铃虫数量与盲蝽象数量. μ_{cp} 是每单位农药的喷洒成本, μ_{bt} 是每单位面积抗虫棉额外的种植成本(即增加的种子成本). $1-\alpha$ 是农药的喷洒量, $1-\phi$ 是抗虫棉的种植比例.

1.3 生物经济学模型

现有的研究表明, 即便是一个更为简单的模型也可能无最优解, 或者无法得到其最优解^[10]. 为此, 在对该生物经济学模型进行定性分析之前, 先对其进行必要的简化. 首先, 本文假定所有的棉花都是抗虫棉. 也就是说 $1-\phi_t = 1$, 或者 $\phi_t = 0$. 这样的假定是和我国抗虫棉的实际情况一致的. 早在2004年前后, 在黄河流域和长江流域棉区, 基本上所有的棉花都是转基因抗虫棉^[5]. 而在最近几年, 抗虫棉在新疆棉花产区也基本达到了全覆盖^[4]. 所以在本研究中, 假定 $\phi_t = 0$. 经过这样的简化, 方程(2)变成:

$$\text{Cost} = \mu^1 N^1 + \mu^2 N^2 + \mu_{cp}(1-\alpha) + \mu_{bt}, \quad (3)$$

其次, 假定次要害虫对Bt蛋白的抗性为零. 同广谱性的化学农药不同, Bt蛋白的防治谱系比较窄, 它只对鳞翅目的昆虫有控制作用. 换言之, Bt蛋白对盲蝽象没有防治作用. 因此, 盲蝽象也不会对Bt蛋白产生抗性. 所以, 有 $P_{x,t}^2 = 0$.

在做了这样的简化以后, 本文的生物经济学模型中的控制变量只剩下一个, 即农药的喷施比例. 该模型的状态变量有5个, 分别是(i) 主要害虫的种群数量; (ii) 次要害虫的种群数量; (iii) 主要害虫对Bt蛋白敏感的基因比例; (iv) 主要害虫对化学农药敏感的基因比例; (v) 次要害虫对化学农药敏感的基因比例. 为了方便计算, 本文将主要害虫和次要害虫的环境容纳量都单位化为1, 即 $K^1 = 1$, $K^2 = 1$. 这样一来, 本文的生物经济学模型可以写成如下的形式:

$$\text{Min} \int_0^\infty [\mu^1 N^1 + \mu^2 N^2 + \mu_{cp}(1-\alpha) + \mu_{bt}] \cdot e^{-\beta t} dt,$$

限制条件:

$$\begin{aligned} \frac{dN^1}{dt} &= \left\{ (1-c_B^1)(P_x^1)^2 + 2h_B^1 P_x^1 P_X^1 + [1-m_{xx}](P_x^1)^2 \right\} \\ &\quad \left\{ (1-c_P^1)(P_y^1)^2 + 2[(1-\alpha)h_P^1 + \alpha] P_y^1 P_Y^1 + [1-(1-\alpha)m_{yy}](P_y^1)^2 \right\} \left[1 + g^1(1 - \frac{N^1}{K^1}) \right] N^1 - N^1 \\ \frac{dN^2}{dt} &= \left\{ (1-c_P^2)(P_y^2)^2 + 2[(1-\alpha)h_P^2 + \alpha] P_y^2 P_Y^2 + [1-(1-\alpha)m_{yy}](P_y^2)^2 \right\} \left[1 + g^2(1 - \frac{N^2}{K^2}) \right] N^2 - N^2 \\ \frac{dP_x^1}{dt} &= \frac{(1-c_B^1)(P_x^1)^2 + h_B^1 P_x^1 P_X^1}{(1-c_B^1)(P_x^1)^2 + 2h_B^1 P_x^1 P_X^1 + [1-m_{xx}](P_x^1)^2} - P_x^1 \\ \frac{dP_y^1}{dt} &= \frac{(1-c_P^1)(P_y^1)^2 + [(1-\alpha)h_P^1 + \alpha] P_y^1 P_Y^1}{(1-c_P^1)(P_y^1)^2 + 2[(1-\alpha)h_P^1 + \alpha] P_y^1 P_Y^1 + [1-(1-\alpha)m_{yy}](P_y^1)^2} - P_y^1 \\ \frac{dP_y^2}{dt} &= \frac{(1-c_P^2)(P_y^2)^2 + [(1-\alpha)h_P^2 + \alpha] P_y^2 P_Y^2}{(1-c_P^2)(P_y^2)^2 + 2[(1-\alpha)h_P^2 + \alpha] P_y^2 P_Y^2 + [1-(1-\alpha)m_{yy}](P_y^2)^2} - P_y^2 \\ P_x^i + P_X^i &= 1, P_y^i + P_Y^i = 1, i = 1, 2. \end{aligned} \quad (4)$$

在方程(4)中, c 为害虫对环境的适应性成本. m_{ij} 表示含有 ij 基因 ($ij=xx, xX, XX, yy, yY$ 或 YY) 害虫的死亡率. h_B^i 为杂合子 (即含有 xX 或者 yY 基因型的昆虫) 中第 i 类害虫对 Bt 蛋白抗性的有效占优性; h_p^i 表示第 i 类害虫对农药抗性的有效占优性^[24].

然而, 进一步的分析表明经过简化后的方程系统 (即方程(4)) 的最小化问题的 Hamiltonian 方程, 有最小值的充分条件并不满足 (过程从略). 换言之, 无法确定该方程系统一定有极值的存在. 基于此, 下面用数值模拟的方法来对最优控制措施, 以及各种状态变量的动态变化进行分析. 但是, 在进行数值模拟分析之前, 还可以对该模型系统中的生物学模型做一些简单的定性分析.

1.4 种植抗虫棉对次要害虫的影响

如前所述, 通过对次要害虫种群数量动态变化的分析, 可以回答抗虫棉是否是次要害虫危害爆发的原因. 为了分析该问题, 本文首先对主要害虫动态变化进行分析. 通过对方程(4)中第一个限制条件 (即主要害虫的种群数量) 方程, 对 ϕ 求偏导, 可以得到:

$$\frac{\partial N^1}{\partial \phi} = \left[2(1 - h_B^1)P_x^1P_X^1 + m_{xx}(P_X^1)^2 \right] B' \geq 0, \text{ 其中,}$$

$$B' = \left[(1 - c_p^1)(P_Y^1)^2 + 2[(1 - \alpha)h_p^1 + \alpha]P_Y^1P_Y^1 \right. \\ \left. + [1 - (1 - \alpha)m_{yy}](P_Y^1)^2 \right] \left[1 + g^1(1 - \frac{N^1}{K^1}) \right] N^1 \quad (5)$$

$$> 0.$$

方程(5)表明, 在其他条件不变的情况下, 主要害虫 (N^1) 的数量随着抗虫棉种植比例 ($1 - \phi$) 的增加而减小. 农民之所以愿意花更多成本 (相应于非抗虫棉来说) 购买抗虫棉的种子, 就是因为抗虫棉可以有效地控制棉铃虫的数量, 从而减少农药成本. 所以, 这一结果正如预期. 更为重要的是, 这一结论对本文下面的分析有重要的意义.

由于次要害虫不受 Bt 蛋白的影响 (即 $P_x^2 = 1, P_X^2 = 0$), 所以如方程系统(3)的第二个限制条件

(即次要害虫的种群数量) 所示, 该方程并不包含 ϕ 变量, 因此 $\frac{\partial f_{N^2}}{\partial \phi} = 0$. 也就是说, 在其他变量不变的情况下, 次要害虫数量与抗虫棉种植无关. 换言之, 种植抗虫棉对次要害虫的种群数量无直接影响.

然而, 通过对方程系统(4)第二个限制条件, 即次要害虫种群数量方程, 求其对 α 的偏导, 可以得到:

$$\frac{\partial f_{N^2}}{\partial \alpha} = \left[2(1 - h_p^2)P_Y^2P_Y^2 + m_{yy}(P_Y^2)^2 \right] \\ \left[1 + g^2(1 - \frac{N^2}{K^2}) \right] N^2 \geq 0. \quad (6)$$

该方程显示 f_{N^2} 随着 α 增大而增大. 因此, 在其他变量不变的情况下, 次要害虫数量随着农药的喷洒量 (即 $1 - \alpha$) 的减小而增大. 如前所述, 随着抗虫棉的种植, 农民喷洒农药的数量下降了 (即 $1 - \alpha$ 减少了). 由于 $\frac{\partial f_{N^2}}{\partial \alpha} \geq 0$, 次要害虫的数量增加了. 换言之, 种植抗虫棉间接引起次要害虫种群数量的增加.

2 仿真分析

如前所述, 对理论模型的定性分析表明种植抗虫棉不是次要害虫危害增加的直接原因. 但是, 抗虫棉的种植引起化学农药使用量的减少, 从而间接造成次要害虫危害的增加. 为了验证这一结论, 将在本节进行数值模拟分析.

本文进行数值模拟还有另外的原因. 在上一节对本文的生物经济学模型 (即方程(4)) 进行定性分析时, 发现无法得到其最优解. 因此, 无法对本文研究的第2个研究目的 (即次要害虫所造成的危害的动态变化) 和第3个研究目的 (即种植抗虫棉经济效益的可持续性及其动态变化) 给出具体的答案. 而数值模拟分析可以让我们对这两个研究目的予以直接回答.

2.1 模拟方程

方程(4)离散形式的 Bellman 方程为:

$$\text{Min}_{0 \leq \alpha \leq 1} V_t(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2) = \text{Min}_{0 \leq \alpha \leq 1} [\mu^1 N_t^1 + \mu^2 N_t^2 + \mu_{cp}(1 - \alpha_t) + \mu_{bt} + \beta V_{t+1}(N_{t+1}^1, N_{t+1}^2, P_{x,t+1}^1, P_{y,t+1}^1, P_{x,t+1}^2)],$$

约束条件为:

$$\begin{aligned} g_1(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2, \alpha_t) &= N_{t+1}^1 = \left\{ (1 - c_B^1)(P_{x,t}^1)^2 + 2h_B^1 P_{x,t}^1 P_{y,t}^1 + [1 - m_{XX}](P_{x,t}^1)^2 \right\} \\ &\quad \left\{ (1 - c_P^1)(P_{y,t}^1)^2 + 2[(1 - \alpha_t)h_P^1 + \alpha_t]P_{y,t}^1 P_{Y,t}^1 + [1 - (1 - \alpha_t)m_{YY}](P_{Y,t}^1)^2 \right\} \left[1 + g^1(1 - \frac{N_t^1}{K^1}) \right] N_t^1 \\ g_2(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2, \alpha_t) &= N_{t+1}^2 \\ &= \left\{ (1 - c_P^2)(P_{y,t}^2)^2 + 2[(1 - \alpha_t)h_P^2 + \alpha_t]P_{y,t}^2 P_{Y,t}^2 + [1 - (1 - \alpha_t)m_{YY}](P_{Y,t}^2)^2 \right\} \left[1 + g^2(1 - \frac{N_t^2}{K^2}) \right] N_t^2 \\ g_3(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2, \alpha_t) &= P_{x,t+1}^1 = \frac{(1 - c_B^1)(P_{x,t}^1)^2 + h_B^1 P_{x,t}^1 P_{y,t}^1}{(1 - c_B^1)(P_{x,t}^1)^2 + 2h_B^1 P_{x,t}^1 P_{y,t}^1 + [1 - m_{XX}](P_{x,t}^1)^2} \\ g_4(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2, \alpha_t) &= P_{y,t+1}^1 = \frac{(1 - c_P^1)(P_{y,t}^1)^2 + [(1 - \alpha_t)h_P^1 + \alpha_t]P_{y,t}^1 P_{Y,t}^1}{(1 - c_P^1)(P_{y,t}^1)^2 + 2[(1 - \alpha_t)h_P^1 + \alpha_t]P_{y,t}^1 P_{Y,t}^1 + [1 - (1 - \alpha_t)m_{YY}](P_{Y,t}^1)^2} \\ g_5(N_t^1, N_t^2, P_{x,t}^1, P_{y,t}^1, P_{x,t}^2, \alpha_t) &= P_{y,t+1}^2 = \frac{(1 - c_P^2)(P_{y,t}^2)^2 + [(1 - \alpha_t)h_P^2 + \alpha_t]P_{y,t}^2 P_{Y,t}^2}{(1 - c_P^2)(P_{y,t}^2)^2 + 2[(1 - \alpha_t)h_P^2 + \alpha_t]P_{y,t}^2 P_{Y,t}^2 + [1 - (1 - \alpha_t)m_{YY}](P_{Y,t}^2)^2} \\ P_{x,t}^i + P_{X,t}^i &= 1, P_{y,t}^i + P_{Y,t}^i, i = 1, 2 \\ N_{t=0}^1 &= N_0^1, N_{t=0}^2 = N_0^2, P_{x,t=0}^1 = P_{x,0}^1, P_{y,t=0}^1 = P_{y,0}^1, P_{x,t=0}^2 = P_{x,0}^2, P_{y,t=0}^2 = P_{y,0}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 参数来源

本文模拟分析中用到两类参数: 生物学参数和经济学参数. 大部分的生物学参数, 如Bt蛋白防治棉铃虫的效率, 自然避难所作物对棉铃虫不同的承载能力等, 都来自已经公布的数据或是由实验数据计算得出. 当然, 考虑到这些参数存在的不确定性, 所以本文还进行了敏感性分析, 以确定这些参数的选择不会影响到基本结论的稳定性.

对于另外几个没有文献支持的生物学参数, 咨询了该领域的相关专家. 考虑到参数对模拟分析结果的重要性, 接下来分别对这几个参数进行说明. 首先是抗性个体的适应性成本(fitness cost). 这个参数用来衡量抗药性和易感性害虫在非转基因棉田死亡率的差异. 这个参数虽然看上去可能微不足道, 但在分析中却起着关键作用. 令人遗憾的是, 不管在我国还是世界上的其他国家, 都无法从任何实验室或者大田实验中得到这个参数. 在本文的模拟中, 采用的适应性成本参

数是Qiao等人^[11,12]和Livingston等人^[19]在类似的研究中使用过的.

另外一类重要的生物参数是一组盲蝽的特征参数向量. 这包括盲蝽在抗虫棉种植初期对化学农药的抗性基因比例、盲蝽的自然增长率、含有杂合基因的盲蝽个体对农药抗性的有效占优性. 在基期方案中, 盲蝽的这些生物学参数都被假定跟棉铃虫一样.

同样地, 经济学参数的来源也是已经公布的数据, 本文的作者和作者的合作者实地的调查研究结果. 例如, 模型中用到的两个重要的经济学参数, 即抗虫棉的种植成本和杀虫剂成本, 都来源于北京大学中国农业政策研究中心的多年调查数据. 用这些数据进行的分析结果已经先后被刊登在《科学》、《中国科学: 生命科学》以及其他学术期刊上^[2,24,25]. 数值模拟分析中用到的生态学和经济学参数的默认值(即基准方案的参数数值)及其来源详见表1.

表 1 生物学和经济学参数的预设值及其来源^{a)}

参数	预设值	来源
每单位棉铃虫导致的产量损失	6446元/公顷	由IPP的数据计算 [*]
每单位次要害虫导致的产量损失	4958元/公顷	Lu等人 ^[13] 、Wu等人 ^[26]
抗虫棉的种植成本	895元/公顷	由CCAP的数据计算 ^{**}
农药的喷洒成本	1577元/公顷	由CCAP的数据计算 ^{**}
折现率	0.0275	人民银行5年期定期存款利率(2015年10月24日至今)
棉铃虫抗Bt蛋白基因的初始值	0.001	Livingston等人 ^[27] 、Gould ^[28]
棉铃虫抗农药的初始值	0.60	Ru等人 ^[29] 、Li等人 ^[30]
次要害虫抗农药的初始值	0.001	作者假设
易感害虫在抗虫棉田死亡率	0.90	Livingston等人 ^[27] 、Caprio ^[31] 、Wu ^[32] 、Storer等人 ^[33] 和崔等人 ^[34]
易感害虫因喷施农药的死亡率	0.90	Qiao等人 ^[11]
棉铃虫对Bt蛋白抗性的占优性	0.25	Qiao等人 ^[11]
棉铃虫对农药抗性的占优性	0.25	Qiao等人 ^[11]
次要害虫对农药抗性的占优性	0.25	作者假设
棉铃虫对Bt蛋白的适应性代价	0.05	Livingston等人 ^[19,27]
棉铃虫对农药的适应性代价	0.05	Qiao等人 ^[11]
次要害虫对农药的适应性代价	0.05	作者假设
棉铃虫的内生增长率	0.68	Qiao等人 ^[11]
次要害虫的内生增长率	0.60	作者假设

a) *: IPP为中国农业科学院植物保护研究所; **: CCAP为北京大学农业政策研究中心

2.3 模拟方案

出于研究目的, 本文在数值模拟过程中制定了不同的方案. 首先, 按照抗虫棉的比例制定了3个方案: (i) 完全不种植抗虫棉; (ii) 抗虫棉的比例为50%; (iii) 抗虫棉的比例为100%. 其中, 方案(i)是对照方案, 是抗虫棉商业化之前的情况. 方案(ii)和方案(iii)都是现实的情景. 由于我国棉农有生产规模小和地块细碎化的典型特征, 农作物种植结构非常多样. 即便是在主要棉区, 棉花也不是唯一的作物, 而是跟其他棉铃虫的寄主作物(如小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max* (Linn.) Merr.)、蔬菜等)比邻种植^[11]. 这些作物也被称为棉铃虫的自然避难所^[35]. 而方案(iii)是考虑在一些特殊地区或者特殊年份, 在一个小范围内(如一个自然村)内出现的极端情况.

按照时间跨度分别模拟抗虫棉的短期、中期和长期影响. 我国是从1997年开始正式商业化种植抗虫棉

的. 到2016年, 我国种植抗虫棉已经20年. 为此, 将 $T=20$ 作为基准方案, 并分别考虑 $T=10$ 年的短期方案和 $T=50$ 的长期方案.

在分别讨论以上方案的同时, 还将对模型中用到的, 重要的参数进行敏感性分析, 以验证模拟结果的稳定性.

2.4 模拟结果

接下来, 将分别对不同方案下的模拟结果进行分析. 具体来说, 将分析不同方案下: (i) 最优农药的喷施比例; (ii) 总生产成本, 主要害虫和次要害虫危害的动态变化; (iii) 棉铃虫种群数量和抗性的动态变化; (iv) 次要害虫的种群数量和抗性的动态变化. 通过对(i)和(iv)的分析, 可以回答种植抗虫棉是否引起次要害虫危害的爆发, 以及化学农药在抗虫棉推广以后是否出现了显著增加. 通过对(ii)的分析, 可以回答抗虫棉的优势是否会随着时间的推移而逐渐减少, 直至最终消失. 在此基础上, 还可以推算种植抗虫棉所带来

图1 农药喷施比例和生产总成本(网络版彩图)

的总收益. 最后, 对(iii)的分析结果将有助于(i)和(ii)的分析结论的解释.

(1) 最优农药喷施比例. 首先需要说明的是, 本文的最优策略为静态最优策略. 已有的研究表明, 动态最优策略和静态最优策略下生产者的总效益, 害虫的种群数量和抗性等差异不大^[11,12]. 而相比静态最优策略, 动态最优策略的模拟过程经常并不收敛. 因此, 本文采用了静态最优策略的模拟方案. 如图1所示, 在基准方案下, 最佳的农药喷施比例是48%. 这一结果和笔者的预期相一致. 因为抗虫棉只能控制棉铃虫的危害, 而不能控制所有的病虫害, 所以农民仍然需要喷施一定数量的化学农药以减少其他害虫的危害. 当然, 随着农药喷施比例的增加, 害虫对化学农药的抗性也会增加. 一旦其抗性在大田中广泛建立起来, 化学农药的效果就会显著下降. 因此, 过量喷施化学农药也不是经济上最优的选择.

然而令人费解的是, 最优农药喷施比例并没有随着抗虫棉种植比例的不同而发生变化(图1). 如前所述, 笔者的数值模拟包括3种方案. 然而令人奇怪的是, 无论是在对比方案下(即抗虫棉比例为0%), 还是在实际

方案下(抗虫棉比例分别为50%和100%的方案), 最优的农药喷施比例都是48%. 为什么会有这样的结果呢? 如前所述, 抗虫棉虽然能有效控制棉铃虫, 但是对盲蝽蟥等其他害虫却完全没有影响. 因此, 即使在抗虫棉田, 完全不用农药也不是最优的选择. 另外一方面, 棉铃虫的繁殖能力非常强. 数值模拟表明, 在完全没有控制的情况下, 棉铃虫在两年内就可以从0.1增加到0.9以上. 因此, 如果考虑的时间段足够长(比如基准方案中的20年), 种植抗虫棉对最优农药喷施比例的影响可能在数量上不太显著.

为了验证这个假设, 改变基准方案中关于时间的设置, 并重新模拟了方程. 如表2所示, 如果考虑的时间跨度仅为1年的话, 那么种植抗虫棉对最优农药喷施比例的影响是很显著的: 不种植抗虫棉的方案下, 化学农药的最优喷施比例为0.77; 抗虫棉比例为100%的情况下最优喷施比例为0.46 (即不到对比方案的60%). 如果考虑的是一个2年的时间跨度, 那么对比方案下化学农药的喷施比例(0.59)和抗虫棉比例为100%方案下的最优农药喷施比例(0.53)差别变的不再显著. 而一旦考虑的时间段扩大到5年, 对比方案 and 实际方案下的差别就消失了. 与此同时, 发现抗虫棉比例为50%方案下的最优农药喷施比例, 则一直都在完全不种植抗虫棉和完全种植抗虫棉的最优喷施比例之间. 这也从一个侧面, 佐证数值模拟结果是一致的和可信的. 总而言之, 表2说明种植抗虫棉在短期内可以显著减少化学农药的喷施比例. 然而, 如果考虑一个时间相对较长时期的话, 那么种植抗虫棉对最优化学农药喷施比例的影响会迅速下降, 并最终下降到与不种植抗虫棉的对比方案下没有显著差别.

表2还显示, 随着在方案中考虑时间跨度的增加, 最优的农药喷施比例也会下降. 这一结果也与预期相一致. 这是因为持续高强度地喷施化学农药的情况下, 害虫对农药的抗性会快速发展起来. 而一旦害虫对化学农药的抗性在大田中广泛建立起来, 再喷施农药只

表2 不同时间跨度对最优的农药喷施比例的影响

	时间跨度(年)					
	1	2	5	10	20	50
不种植抗虫棉	0.77	0.59	0.53	0.51	0.48	0.44
抗虫棉的比例为50%	0.63	0.57	0.53	0.51	0.48	0.44
抗虫棉的比例为100%	0.46	0.53	0.52	0.51	0.48	0.44

图2 不同方案下的最优农药喷施比例下生产总成本的动态变化(网络版彩图)

会造成生产成本的增加,并不会显著挽回产量损失。

(2) 总成本、主要害虫危害和次要害虫危害的动态变化。图2显示了种植抗虫棉对生产成本的影响。如图2所示,同不种植抗虫棉的方案比,种植抗虫棉可以显著地降低生产成本。这一结论对不同的化学农药的喷施比例都适用。例如,在最优农药的喷施比例(即48%)下,如果完全不种植抗虫棉,20年的总成本为103.00千元/公顷(1997年不变价,下同)。而抗虫棉比例为50%和100%的方案下的总成本分别为22.57和49.69千元/公顷。也就是说,种植抗虫棉可以分别节约成本78% (抗虫棉比例为50%方案)和52% (抗虫棉比例为100%方案)。

那么在不同方案下,生产成本在20年内的动态变动情况如何呢?如图2所示,在前期,种植抗虫棉比不

种植抗虫棉有很显著的成本节省。但是在后期,种植抗虫棉的成本开始上升。首先是在100%种植抗虫棉的方案下,生产成本从第12年左右开始迅速上升。类似地,在抗虫棉比例为50%的方案下,生产成本从第18年也开始明显上升。在20年期末的最后几年,完全种植抗虫棉和完全不种植抗虫棉的方案下的成本基本一样(图2)。

总的来说,种植抗虫棉能够显著减少生产成本。特别是在种植前期,抗虫棉带来的成本节约是非常显著的。然而,随着时间的推移,种植抗虫棉的比较优势会逐渐减少,甚至完全消失。在极端情况下,因为抗虫棉的种子成本比非抗虫棉高,在抗虫棉种植后期的一定年限内,有可能出现种植抗虫棉的成本大于种植非抗虫棉的情况。当然,这是假定抗虫棉的种子成本高于非抗虫棉的情况。很显然的,如果抗性真的在大田中发展起来,抗虫棉没有了防治棉铃虫的优势,那么抗虫棉的种子价格自然也会降下来。

那么,抗虫棉比较优势的变化是由棉铃虫危害的变化引起的,还是由次要害虫危害的变化而引起的呢?图3显示了主要害虫和次要害虫危害的动态变化情况。如图3A所示,因为初始条件一样,而且3种不同方案下最优的农药喷施比例相同,所以次要害虫的危害在3种方案下是完全重合的。换言之,种植抗虫棉的比较优势的变化不是由次要害虫的变化引起的。这也从一个侧面说明了种植转基因抗虫棉对盲蝽蟥的危害没有影响。

图3B显示了种植抗虫棉以来,不同方案下主要害虫

图3 最优农药喷施比例的不同方案下主要害虫和次要害虫危害的动态变化(网络版彩图)

A: 次要害虫造成的损失; B: 主要害虫造成的损失

虫造成的产量损失的动态变化. 同图2类似, 在前期, 由于种植抗虫棉, 主要害虫造成的损失显著低于不种植抗虫棉的方案. 而在后期, 3种不同方案下, 主要害虫造成的损失趋于一致. 类似地, 也发现抗虫棉比例为50%的方案比100%种植抗虫棉的方案带来的损失更小, 其成本迅速上升期出现的也更晚. 这一结论跟图2也是一致的. 也就是说, 主要害虫造成损失的动态变化, 同种植抗虫棉比较优势(即总成本)的变化是一致的.

(3) 主要害虫危害种群数量和抗性的动态变化. 图4显示主要害虫的种群数量(图4A), 对Bt蛋白的抗性(图4B)和对化学农药的抗性(图4C). 图4A显示, 3种不同方案下, 主要害虫种群数量的变化和其危害的动态变化(图3B)和图2中总成本的变动趋势是一致的. 总结来看, 种植抗虫棉使得棉铃虫的种群数量在前期显著减少, 从而使得其危害程度减少, 生产成本也随之减少. 而在后期, 棉铃虫种群数量上升, 其危害程度增加, 生产成本也相应增加.

那么, 为什么棉铃虫的种群数量在后期出现了显著的上升呢? 从图4B和C可以看出, 棉铃虫种群上升的原因在于其抗性的增加. 如图4B, 尽管一开始主要害虫对Bt蛋白具有抗性基因的比例很低, 然而随着抗虫棉的持续种植, 抗性基因的比例迅速上升. 首先是抗虫棉比例为100%的方案, 其次是抗虫棉比例为50%的方案, 抗性基因的比例在短短几年内就迅速上升到0.9以上. 随着棉铃虫对Bt蛋白抗性的产生, 棉铃虫的种群数量上升了(图4A), 危害也随之增加了(图2和3B).

图4C显示, 棉铃虫对化学农药的抗性也很快发展起来. 同抗Bt蛋白不同, 由于化学农药的持续使用, 在开始数值模拟的初期, 主要害虫对化学农药具有抗性基因的比例就已经很高(为0.60). 随着化学农药的持续使用, 棉铃虫对农药具有抗性的基因比例也随之上升到接近1的水平. 而随着抗Bt蛋白(图4B)和抗农药基因比例(图4C)都达到接近1的水平, 无论是Bt蛋白还是化学农药都失去了对棉铃虫的有效控制. 相应地, 棉铃虫的危害增加了(图3B)总成本(图2)也显著上升了.

(4) 次要害虫危害种群数量和抗性的动态变化. 图5A显示了不同方案下, 次要害虫的种群数量的动态变化. 图5B显示随着化学农药的持续使用, 次要害虫在后期也发展了对化学农药的抗性. 而随着抗性的建立, 化学农药的防治效果降低(图5A). 因此, 次要害虫的危害在后期也明显增加了(图3A).

图4 主要害虫的种群数量, 抗转基因蛋白的基因比例, 抗化学农药的基因比例的动态变化(网络版彩图)

A: 种群数量; B: 抗Bt蛋白基因比例; C: 抗化学农药基因比例

2.5 敏感性分析

如表1所示, 虽然在仿真分析中所用的大部分参数都是来自于实际大田调查数据或者现有的文献资料, 但是仍然有几个参数是假定的. 因为这些参数有可能

图 5 次要害虫的种群数量和其抗农药的基因比例的动态变化(网络版彩图)

A: 种群数量; B: 抗化学农药基因比例

表 3 模拟模型的灵敏度分析^{a)}

	最优农药比例 (%)			次要害虫危害 (千元/公顷)			总成本 (千元/公顷)		
	0%的 抗虫棉	50%的 抗虫棉	100%的 抗虫棉	0%的 抗虫棉	50%的 抗虫棉	100%的 抗虫棉	0%的抗 虫棉	50%的 抗虫棉	100%的 抗虫棉
不同种植期方案									
10年	51	51	51	0.95	0.95	0.95	57.07	13.40	16.00
20年(基准)	48	48	48	2.40	2.40	2.40	103.00	22.57	49.69
50年	44	44	44	56.25	56.25	56.25	234.25	146.89	185.28
不同5年期存款利率方案									
低贴现率2.75% (基准)	48	48	48	2.40	2.40	2.40	103.00	22.57	49.69
高贴现率6.66%	49	49	48	1.62	1.62	1.80	73.54	16.70	31.51
初始抗性基因比例方案									
低初始值0.0001 (基准)	48	48	48	2.40	2.40	2.40	103.00	22.57	49.69
中初始值0.0005	45	45	45	12.16	12.16	12.16	112.04	38.65	67.92
高初始值0.0010	44	44	44	17.15	17.15	17.15	116.78	49.49	76.81

a) 6.66%的5年期存款利率是1997年10月23日~1998年7月1日

对分析结果产生重大的影响, 所以在这一部分对一些重要参数进行进一步的敏感性分析. 如大家所知, 敏感性分析通常用来测试模型的模拟结果对某些关键参数的敏感程度. 换言之, 就是测试分析结论的稳定程度或者其广泛性. 事实上, 在上面的分析中已经对最重要的几个参数进行了敏感性分析. 例如, 分析了抗虫棉种植比例(0%, 50%和100%)的影响.

本节还要对3个重要的参数进行敏感性分析: (i) 时间跨度; (ii) 贴现率水平; (iii) 初始抗性基因比例. 由于是典型的敏感性分析, 所以在对每一个参数进行敏感性分析的时候, 只允许被分析的参数进行调整,

其他的参数则保持不变. 模型的分析结果见表3.

首先是时间跨度不同对结果的影响. 如前所述, 我国从1997年开始商业化种植抗虫棉, 到2016年刚好是20年, 这也是将20年选为基准方案的原因. 当然, 在黄河流域和长江流域棉区全部种植抗虫棉差不多是从2004年前后开始的. 考虑到这一因素, 又考虑了一个为期10年的方案. 最后, 考虑一个50年的方案作为长期方案. 如表3的第1~3行所示, 无论是10年的短期方案, 还是20年的基准方案, 或者是50年的长期方案, 种植抗虫棉对最优的农药喷施比例都没有影响. 相应地, 次要害虫的危害在3种不同的转基因种植比例下(0%, 50%,

100%)都是相同的。最后, 种植抗虫棉对总成本的影响在不同时间方案下的结论也是一致的。换言之, 不同的时间跨度选择下, 分析结论是稳定的和一致的。

同样, 贴现率的变化也没有从根本上改变模拟分析的基本结论。在基准方案中用的2.75%的贴现率是中国人民银行从2015年10月24日开始实行的5年期存款利率。这一利率也是最近20年来最低的。自1997年以来, 最高的5年期存款利率为6.66%, 是1997年10月23日~1998年7月1日期间实行的。为了考虑贴现率对模型结果的影响, 将2.75%的贴现率称为低贴现率方案(也是基准方案), 而把6.66%的贴现率方案称为高贴现率方案。如表3的第4~5行所示, 尽管在高贴现率方案下, 100%种植抗虫棉的最优农药喷施比例(48%)同不种植抗虫棉和抗虫棉比例为50%方案下的最优农药喷施比例(49%)有所不同, 但是差异仅为1%。类似地, 次要害虫的危害的差异也非常小(分别为1.62千元/公顷和1.80千元/公顷)。总之, 尽管在最优农药喷施比例和次要害虫的危害上有稍微的差异, 种植抗虫棉在总成本的优势仍然是显著的, 这和基准方案的结果相一致。

最后, 考虑初始抗性基因比例的影响。在以往的同类型研究中, 初始抗性基因的比例被设定为0.001^[11,12,27]。在这样的假设下, 模拟结果表明20年之后, 害虫的抗性应该能够在大田中建立起来。然而, 事实上, 尽管抗虫棉已经广泛种植了20年, 还没有发现了棉铃虫在大田中对Bt蛋白产生广泛的抗性。鉴于此, 将0.001的抗性比例定义为高初始值的方案, 并分别考虑抗性比例初始值为0.0005的中初始值方案, 和抗性比例初始值为0.0001的低初始值方案。如表3所示(第6~8行), 改变抗性基因的初始值并不影响数值模拟的基本结论, 即最优的化学农药的使用比例不变, 次要害虫的危害不变和种植抗虫棉在总成本节省上的优势不变。

3 结论

尽管转基因作物的短期效益已经被广泛证实, 其效益的长期性则受到大众的质疑。特别是随着次要害虫危害在一些年份在部分棉区的爆发, 转基因作物经济效益的长期影响成为公众关注的焦点。为了分析转基因作物经济效益的可持续性, 本文首先建立了一个包括两种害虫(主要害虫和次要害虫), 两种抗性(对转基因蛋白的抗性和对化学农药的抗性)的生物经济学

模型。该模型的定性分析结果表明, 抗虫棉并不是造成棉田次要害虫爆发的直接原因。其次, 本文用符合中国农业生产实际的参数对该模型进行了数值模拟分析。数值模拟分析结果证实了定性分析的结论。模拟结果还表明, 在一定时间内种植抗虫棉并不会引起最优化学农药喷施量的变化。

其次, 数值模拟结果显示种植抗虫棉使得生产总成本显著下降。特别是在种植抗虫棉的前几年, 这种优势更为明显。更有意思的是, 模拟结果显示部分种植抗虫棉比全部种植抗虫棉更能降低生产成本。我国的农业生产具有农户规模小, 地块细碎化, 作物种植多样性等典型特征。而多样化的种植结构为棉铃虫提供了充足的自然避难所。自然避难所的存在成功地延缓了棉铃虫抗性的发展, 扩大了种植抗虫棉的效益。

最后, 从棉铃虫危害的动态变化来看, 种植抗虫棉的比较优势在前期非常明显, 而在后期可能会出现显著的减少。随着棉铃虫抗性的发展, 抗虫棉在防治棉铃虫上的有效性可能会降低。相应地, 抗虫棉的比较优势也可能逐渐减少。当然, 如在敏感性分析中展示的那样, 棉铃虫对Bt蛋白抗性的建立可能需要更长的时间。事实也是如此, 尽管抗虫棉已经在我国广泛种植了20年, 棉铃虫的抗性还没有在大田中广泛建立起来。换言之, 抗虫棉比较优势明显的阶段可能会比较长, 种植者可以从中获益会更大。

本文的研究结论具有重要的实践意义。本文的研究结论证实转基因作物经济效益是长期的和可持续的。该结论不仅跟相关的实证分析结论相一致^[4,8,36], 而且也跟转基因作物在大田中的表现相一致。首先, 毫无疑问, 本文的研究结论将有助于公众对转基因技术经济效益可持续性的争论。转基因技术经济效益的持续性问题, 已经成为大众关注的焦点。特别是近10年来, 次要害虫在部分棉区的一些特定年份爆发, 而抗虫棉被认为是其爆发的主要原因。基于此, 有观点认为抗虫棉的经济效益会随着次要害虫危害的增加而逐渐消失。本文的研究结论表明, 这种怀疑是没有依据的。事实上, 本文的数值模拟结果还显示, 即使是考虑一个相当长的时间段, 抗虫棉的效益依然是非常显著的。因此, 本文的研究为平息或者减缓公众的争论提供了帮助。

本研究分析结论还有助于相关政策的制定。由于反对转基因技术声音的高涨, 近年来我国政府几乎完全停止了转基因作物商业化的相关政策制定和推进。

例如, 我国的转基因水稻十几年前就已经具备了实施商业化种植的技术能力, 然而直到今天也没有批准其商业化种植. 而且截止到目前, 还不知道这一政策何时会通过, 以及是否会通过. 造成这样结果的原因当然是多方

面的, 其中之一是人们对转基因作物经济效益的可持续性心存疑虑. 本文的研究结果将有助于澄清公众对转基因农作物经济效益可持续性的误解, 并可能为有关转基因农作物方面的政策制定以及实施提供依据.

参考文献

- 1 Pray C, Ma D, Huang J, et al. Impact of Bt cotton in China. *World Dev*, 2001, 29: 813–825
- 2 Huang J, Hu R, Rozelle S, et al. Transgenic varieties and productivity of smallholder cotton farmers in China. *Aust J Agric Res Econ*, 2002, 46: 367–387
- 3 Huang J K, Mi J W, Lin H, et al. A decade of Bt cotton in Chinese fields: assessing the direct effects and indirect externalities of Bt cotton adoption in China. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 981–991
- 4 Qiao F. Fifteen years of Bt cotton in China: the economic impact and its dynamics. *World Dev*, 2015, 70: 177–185
- 5 Qiao F, Yao Y. Is the economic benefit of Bt cotton dying away in China. *China Ag Economic Rev*, 2015, 7: 322–336
- 6 Qaim M. Bt cotton in India: field trial results and economic projections. *World Dev*, 2003, 31: 2115–2127
- 7 Qaim M, Zilberman D. Yield effects of genetically modified crops in developing countries. *Science*, 2003, 299: 900–902
- 8 Kathage J, Qaim M. Economic impacts and impact dynamics of Bt (*Bacillus thuringiensis*) cotton in India. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 11652–11656
- 9 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
- 10 Qiao F, Wilen J, Rozelle S. Dynamically optimal strategies for managing resistance to genetically modified crops. *J Economic Entomol*, 2008, 101: 915–926
- 11 Qiao F, Wilen J, Huang J, et al. Dynamically optimal strategies for managing the joint resistance of pests to Bt toxin and conventional pesticides in a developing country. *Eur Rev Agric Economics*, 2009, 36: 253–279
- 12 Qiao F B, Huang J K, Rozelle S, et al. Natural refuge crops, buildup of resistance, and zero-refuge strategy for Bt cotton in China. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 1227–1238
- 13 Lu Y, Wu K, Jiang Y, et al. Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China. *Science*, 2010, 328: 1151–1154
- 14 Wang S, Just D R, Pinstrup-Andersen P. Tarnishing silver bullets: Bt technology adoption, bounded rationality and the outbreak of secondary pest infestations in China. American Agricultural Economics Association Meeting, Long Beach CA, 2006
- 15 Wang S, Just D R, Andersen P P. Bt-cotton and secondary pests. *Int J Biotechnol*, 2008, 10: 113–121
- 16 Pems D, Waibel H. Assessing the profitability of different crop protection strategies in cotton: case study results from Shandong province, China. *Agric Syst*, 2007, 95: 28–36
- 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 Hurley T M, Secchi S, Babcock B A, et al. Managing the risk of European corn borer resistance to Bt corn. *Environ Resource Economics*, 2002, 22: 537–558
- 19 Livingston M J, Carlson G A, Fackler P L. Use of mathematical models to estimate characteristics of pyrethroid resistance in tobacco budworm and bollworm (Lepidoptera: Noctuidae) field populations. *J Economic Entomol*, 2002, 95: 1008–1017
- 20 Alstad D N, Andow D A. Managing the evolution of insect resistance to transgenic plants. *Science*, 1995, 268: 1894–1896
- 21 郭三堆, 王远, 孙国清, 等. 中国转基因棉花研发应用二十年. *中国农业科学*, 2015, 48: 3372–3387
- 22 Clark C W. *Mathematical Bioeconomics: the Optimal Management of Renewable Resources*. New York: John Wiley & Sons, 1976
- 23 Wilen J E, Msangi S. Dynamics of antibiotic use: ecological versus interventionist strategies to manage resistance to antibiotics. In: Laxminarayan R, ed. *Battling Resistance to Antibiotics and Pesticides: an Economic Approach*. Washington: Resource for the Future, 2002. 18–41

- 24 Bourguet D, Genissel A, Raymond M. Insecticide resistance and dominance levels. *J Economic Entomol*, 2000, 93: 1588–1595
- 25 Huang J, Hu R, Pray C, et al. Biotechnology as an alternative to chemical pesticides: a case study of Bt cotton in China. *Agric Economics*, 2003, 29: 55–67
- 26 Wu K, Mu W, Liang G, 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
- 27 Livingston M J, Carlson G A, Fackler P L. Managing resistance evolution in two pests to two toxins with refugia. *Am J Agr Econ*, 2004, 86: 1–13
- 28 Gould F. Sustainability of transgenic insecticidal cultivars: integrating pest genetics and ecology. *Annu Rev Entomol*, 1998, 43: 701–726
- 29 Ru L, Zhao J, Rui C. A simulation model for adaptation of cotton bollworm to transgenic Bt cotton in Northern China. *Acta Entomol Sin*, 2002, 45: 153–159
- 30 Li G, Wu K, Gould F, et al. Frequency of Bt resistance genes in *Helicoverpa armigera* populations from the Yellow River cotton-farming region of China. *Entomol Expis Appl*, 2004, 112: 135–143
- 31 Caprio M A. Evaluating resistance management strategies for multiple toxins in the presence of external refuges. *J Economic Entomol*, 1998, 91: 1021–1031
- 32 Wu K, Guo Y, Gao S. Evaluation of the natural refuge function for *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) within *Bacillus thuringiensis* transgenic cotton growing areas in North China. *J Economic Entomol*, 2002, 95: 832–837
- 33 Storer N P, Peck S L, Gould F, et al. Spatial processes in the evolution of resistance in *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) to Bt transgenic corn and cotton in a mixed agroecosystem: a biology-rich stochastic simulation model. *J Economic Entomol*, 2003, 96: 156–172
- 34 崔金杰, 雒瑶瑜, 王春义, 等. 转双价基因棉田主要害虫及其天敌的种群动态. *棉花学报*, 2004, 16: 94–101
- 35 Wu K M, Guo Y Y. The evolution of cotton pest management practices in China. *Annu Rev Entomol*, 2005, 50: 31–52
- 36 Qiao F, Huang J, Wang X. Fifteen years of Bt cotton in China: results from household surveys. *World Dev*, 2017, 98: 351–359
- 37 郭予元. 棉铃虫研究. 北京: 中国农业出版社, 1998
- 38 陆宴辉, 吴孔明. 棉花盲蝽蟥及其防治. 北京: 金盾出版社, 2008
- 39 Bourguet D, Desquilbet M, Lemarié S. Regulating insect resistance management: the case of non-Bt corn refuges in the US. *J Environ Manage*, 2005, 76: 210–220

Sustainability of the economic benefit of Bt cotton

QIAO FangBin

China Economics and Management Academy, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China

The short-run benefit of insect-resistant *Bacillus thuringiensis* (Bt) crops has been well documented, but its sustainability in the long run has not been well studied. In recent years, sustainability of the economic benefit of Bt crops has been subject to a heated debate. By setting up and analyzing a theoretical model, this study shows that Bt cotton adoption indirectly leads to an increase of pesticide use for secondary pest. This study then develops a simulation model calibrated to cotton production in China. The simulation results show the economic benefit that Bt technology had generated could not be completely offset by the increase of the pesticide use for secondary pests. In addition, the simulation results also show that there is no field evidence of pests developing resistance to Bt toxin owing to the existence of natural refuge crops. In summary, this study shows that the benefit of Bt cotton is not only substantial but also sustainable.

biotechnology, *Bacillus thuringiensis* cotton, sustainability of the economic benefit, China

doi: [10.1360/N052018-00109](https://doi.org/10.1360/N052018-00109)