

第19届优化配棉管理系统[®] 研讨大会
Greenville, SC

可持续性研究

Edward M. Barnes、Patricia F. O'Leary

农业研究部
美国棉花公司

内容介绍

美国棉花公司农业研究部的主要职责是通过开发、应用新型农业技术提高棉产品的收益性。增加收益可以更好地体现可持续性概念中包含的提高经济效益的环节。在我们开展研究项目的过程中，我们发现对收益的追求往往能够促进人类的环保意识、提高人们的生活品质，最终形成一个可持续发展的生产模式。由于时间关系，我们主要对可持续性农业体系中经常涉及到的两个方面进行探讨：水和杀虫剂的使用情况。我们希望通过研究可以提高：1) 水和杀虫剂在使用时间上的精确性—选择何时投放；2) 在使用区域上的准确度—选择何地投放。

通过合理控制水和杀虫剂的投放时间实现可持续性生产

为了实现棉花的可持续性生产，应确保水和杀虫剂只有在作物需要的时候才使用，并且保证其用量适度即可。目前，美国棉花公司在棉花的用水管理方面已有了一定的研究基础，并开始实施新的农药阈值（例如，根据已知害虫数量进行杀虫处理）。结合其它研究成果，我们现在在同样面积的土地上生产的棉花数量比25年前增加了50%之多。下面为大家详细介绍我们是如何优化生产过程以保证生产持续增效的。

用水管理

众所周知农业是用水大户，但其必要性显而易见—灌溉可以使大多数作物的产量增加100—400%（FAO，2006）。这显然可以为生产者带来经济效益，为社会提供长期、稳定的食物和纤维来源，并对环保有利—如果棉田得到最大程度的利用则可

降低自然界中的土地资源被转化为人类生产用地的比例。因此，灌溉农业生产符合可持续生产模式的定义。

水是有限资源，加之受众多经济因素制约（用水、灌溉、及人力等费用），生产者对用水管理极为谨慎。但在美国只有35%的棉田需要灌溉（NASS，2004），针对这些棉田，美国棉花公司进行了广泛的研究工作，力求能够做到每滴水都能够尽其所用。

灌溉时间及用水量预测方法的提高

美国棉花公司进行的灌溉研究之一是如何精确得出棉花的最佳用水量。长期以来，美国西部的许多地区利用灌溉来增加棉花产量，在这些地区，我们通常使用测渗仪精确计算出干旱地区的棉花最佳用水量—这是确定作物用水量的黄金标准（Howell等，2004）。测渗仪是一个内部装有一定量沙土的盒子，测试时将其置于土壤中，外表面与地表相平。通过测试盒子的重量变化可以直接计算出作物的需水量。

在成功除去棉子象鼻虫后，美国中南、东南部又重新开展了棉花生产活动。现在当地的棉农们已经认识到灌溉体系可以作为天然降水的补充。在高湿地带使用的测渗仪最初于2003年由美国农业部农业研究服务（ARS）部门安装于密西西比州的Stoneville公司（Fisher，2004）。同时在附近的棉田里还安装了用于测试草类用水量的测渗仪，以供参考对比。2005年，美国棉花公司出资建立了另外两个测试仪运行站点：一个建在位于路易斯安那州St.Joseph的路易斯安那州立大学，另一家建在位于南卡罗来纳Edisto的克莱姆森大学。

图1列出了位于密西西比州的测渗仪对草和棉花需水量的测试数据。认为棉花需水量巨大的观点并不正确，从图1可以看出，棉花灌溉所需要的水量要少于草类。从三个站点得到的不同年份的数据将被联合输入到一个简单的计算机软件中，再结合基本的气候情况和作物生长阶段可以精确得到棉花每日所需的水量，然后棉农们根据降水情况和作物需水量便可知道什么时候需要人工灌溉（注：一些棉农已经开始使用计算机软件预测灌溉时间—测渗仪所得数据可以使得计算机预测结果更为准确。）

需要注意的是我们在图1中列出的是灌溉用水和天然降雨量的总和（密西西比州安装测渗仪地区的年平均降雨量为52英寸）。在中南部和东南部，灌溉用水量在棉花总需水量中所占比例要小的多。例如在棉花公司在佐治亚州开展的一个研究项目中，研究人员发现2004年和2005年，当地种植棉花的人工灌溉用水只需6.3英寸和4.2英寸（Whitaker等，2006）。与不经人工灌溉时相比，2004年由于4.2英寸的灌溉用水导致每英亩棉田的棉绒产量增加了250磅，而2005年的6.3英寸的灌溉用水更是使得每英亩棉田的棉绒产量增加了620磅。

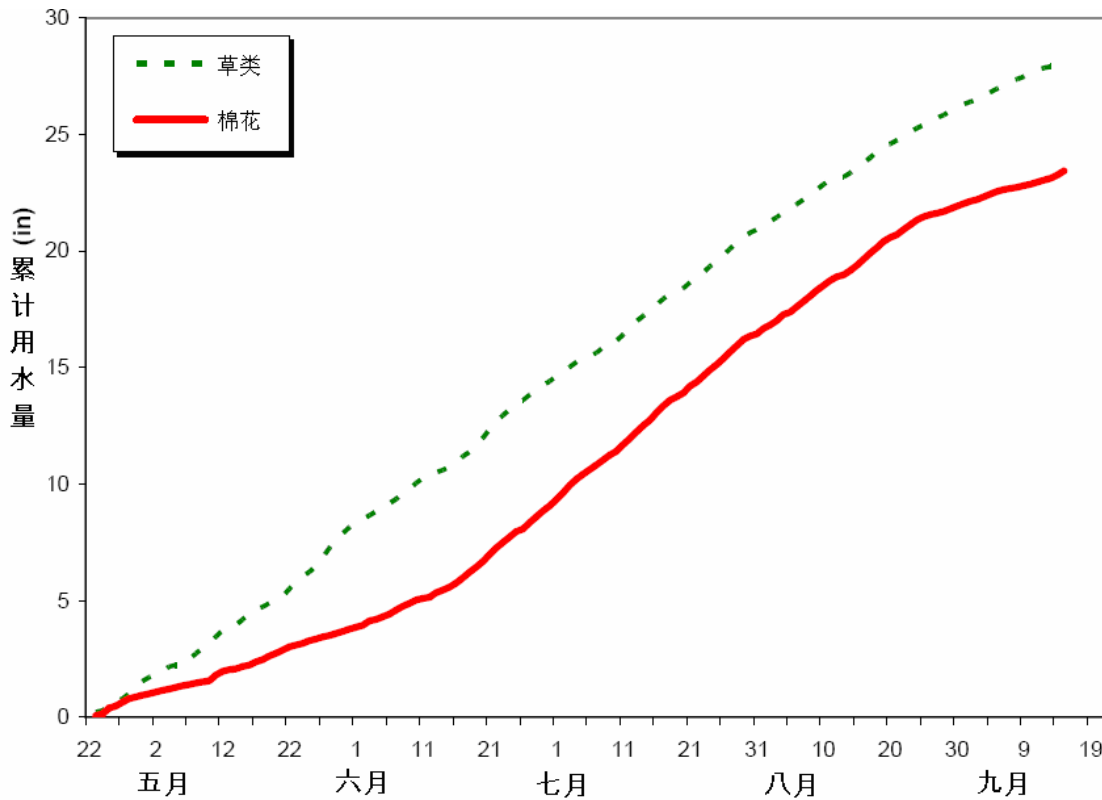


图 1 2003年密西西比州Stoneville公司的测渗仪测试的棉花和草类在其生长季节的用水量

棉花的真实用水效率解析

在密西西比地区测得的数据与学者们在其它刊物上发表的研究结论是一致的。荷兰的一家观水站最近完成了一项对小麦、水稻、玉米和棉花用水效率的总结报告（Zwart 和 Bastiaanssen, 2004）。报告依据近25年中四大洲的8个国家对作物用水情况的研究结果，对84个作物产地的各种作物的用水效率进行了综述。对上述

四种作物的平均用水效率（WUE）的比较如表1所示。WUE被定义为作物用水量与可出售作物产量的比值。由于棉花的可出售产品包括棉籽和棉绒，所以在与其它作物做比较时应将这两部分之和作为棉花的数据。从表1的数据可以看出，棉花的用水效率与其它作物相比并没有显著差别。Zwart 和 Bastiaanssen在权威期刊上发表的综述结论与Soth之前发表在WWF上的被互联网广泛引用的关于棉花用水情况的结果（1999）截然不同。在Soth的研究论文中，棉花的用水效率被错误的报告为7,000到29,000L水/Kg棉绒。之所以称其是“错误”的结论，是因为在Zwart 和 Bastiaanssen得到的66个地区的WUE值中，只有三个地区的WUE值大于7,000 L水/Kg棉绒，而最大的不超过10,000L水/Kg棉绒。而在Soth的报告中，WUE作为用来分析棉花用水效率的主要指标，其报告值与实际情况相比被扩大了2到6倍。

表1 2004年Zwart和Bastiaanssen统计的几种作物的平均用水效率（以可出售产物量（磅）与用水量（英亩英寸）的比值（lb/acre-in）和用水量（升）与可出售产物量（千克）的比值（L/kg）记）

作物	用水效率	
	lb/acre-in	L/kg
玉米	408	556
小麦	247	917
水稻	247	917
棉花 - 棉籽+棉绒	199	1136
棉籽	147	1538
棉绒	52	4348

运用COTMAN™判断灌溉终点（何时停止人工灌溉）

了解何时停止灌溉与懂得何时开始灌溉同样重要。棉花是一种多年生作物，可以不停地生长、开花、也需要不断地用水，直到气候条件不再适合其生长。由棉花公司出资赞助的COTMAN™ 系统的应用研究为棉花种植者们提供了及时做出停止灌溉决定且无损效益的有效途径。总体而言，COTMAN是一种依靠作物监测体系做出判断的作物管理系统。这套系统主要由三部分组成：1) 作物检测系统—为使用者提供有关作物生长的信息（图2）；2) 作物生长标准曲线—对当前作物的生长情况进行比较的依据（图3）；3) 最后一批棉桃的确定—对棉绒产量和质量有重要影响（图4），此时通常被称为棉花生长过程中的“断流点”。一旦确定了最后一批棉桃，就可通过其热量单位（HU）的累计（以60 °F为起点）监控棉桃的成熟度。通过使用此系统，我们可以避免不必要的灌溉用水和其它作物所需化学品的投入。

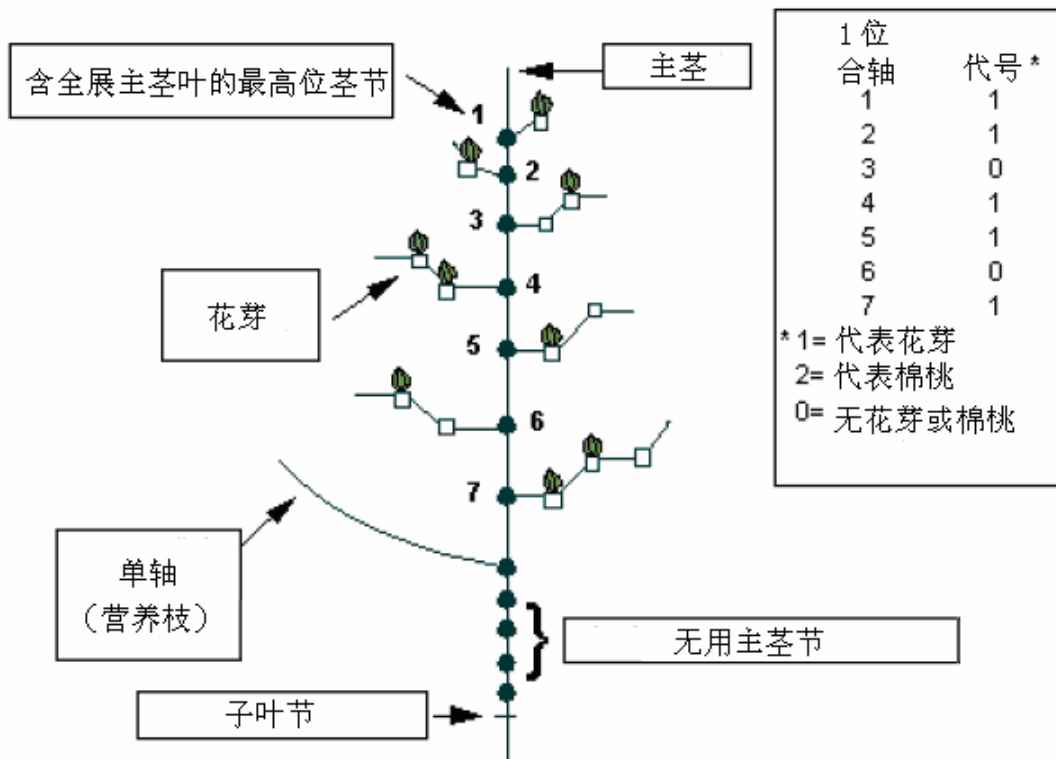


图2 作物监测示例

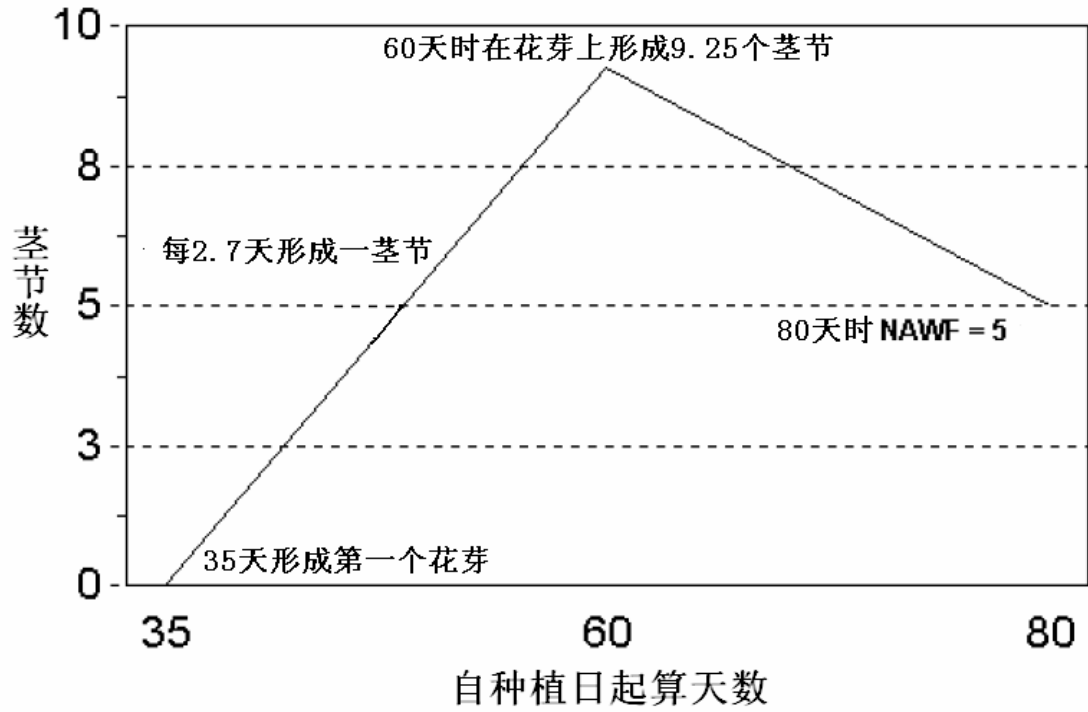


图 3 COTMAN 作物生长标准曲线

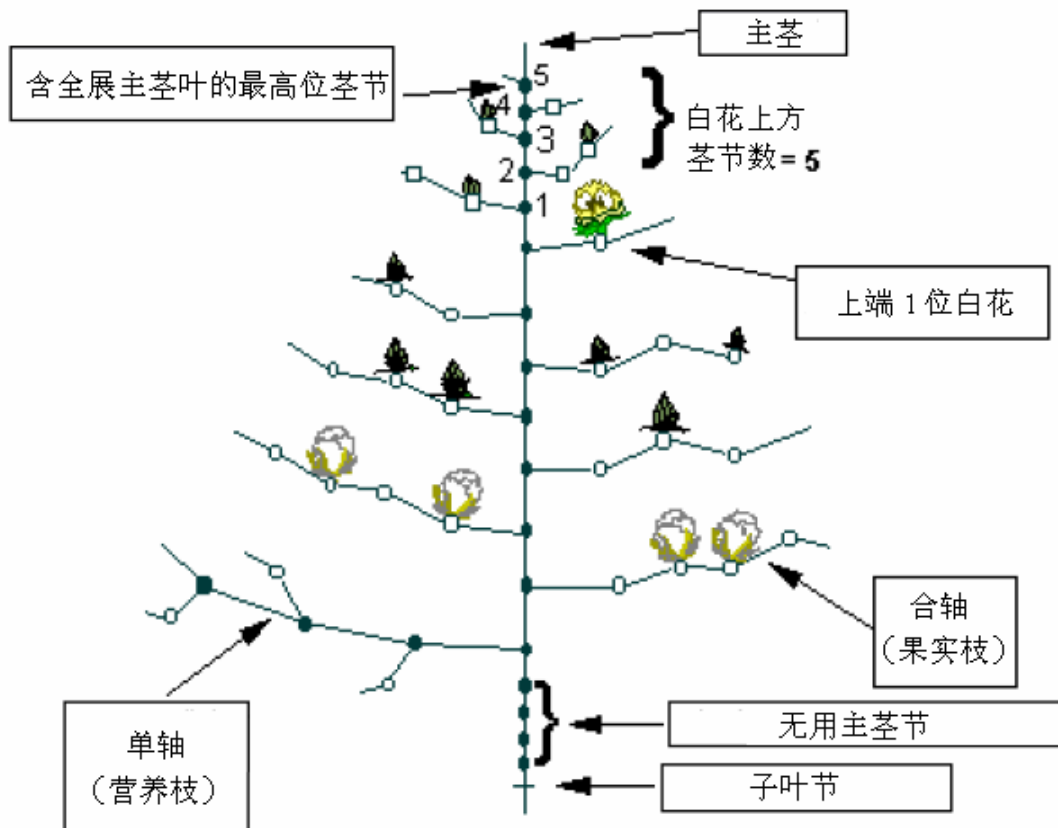


图4 白花上方茎节数=5 (NAWF=5)

自2000年起，棉花公司在中南部的四个州主要采用沟灌方式，在得克萨斯州以滴灌和低能耗精密灌溉（LEPA）为研究对象，着手收集关于判断灌溉终点的信息（图5）。所有的断流点的确定都是依靠COTMAN系统进行，并在此基础上结合不同阶段最后一批棉桃的成熟度判定何时该停止灌溉，同时对采用不同灌溉方式所得的棉花产量和经济效益进行了比较。



图5 用于COTMAN灌溉终点判定研究的几种灌溉体系：A. 沟灌，B. 滴灌，C. 低能耗精密灌溉（LEPA）

研究所得结果如表2所示。最佳灌溉终点的判定是基于经济效益结合棉花产出而得。在大多数情况下，可以依据这些灌溉终点对棉田实施灌溉

表2 基于COTMAN™作物管理系统得到的最佳灌溉终点（Hogan，2005；Doederlin et al，2004； Multer， 2005， 未发表数据）

灌溉方式	灌溉终点
中南部/沟灌	断流点 + 605 HU
得克萨斯/LEPA	断流点 + 600 HU
得克萨斯/滴灌	断流点 + 450 HU

使用COTMAN判断杀虫剂投放终点

可以运用COTMAN像判定灌溉终点那样判断何时应该停止使用杀虫剂。如何判断杀虫剂投放终点对很多从事作物管理的棉农来说都是一个棘手的问题。在解决这个问题时必须兼顾经济效益和生态效应，同时又要保证棉花产量不受虫害影响。首先需要像控制灌溉终点那样—确定影响产量的最后一批棉桃的数量。其次，需要知道这些棉桃达到何种成熟程度就可免于虫害影响。对大多时棉花害虫而言，当最后一批成熟的棉桃达到350个热量单位（HU）后，便不大会受虫害影响，因此此时便可停止投放杀虫剂。自19世纪90年代起，人们便对上述法则进行研究验证，而目前这已成为东部棉花生长带普遍认可的定律。表3—5列出了采用这种杀虫剂终点判定方法的环保和经济效益。实验所得结论显示：当作物的成熟度达到“断流点 + 350 HU”后便停止使用杀虫剂的方式与在整个棉花生长季节都使用杀虫剂相比在棉花产量上没有明显变化，但可减少平均1—2次的杀虫剂投放。

表3 使用COTMAN判断杀虫剂投放终点的试验结果（阿肯萨斯州）

棉田	产量		减少使用杀虫剂的次数	
	断流点 +350HU	整个棉花 生长季	断流点 +350HU	成本
Edwards	768	739	2	\$13.95
Wildy 15	896	866	2	\$16.15
Gandy	788	793	1	\$10.30
Kimbrell	938	854	1	\$5.34
Tarlton	735	747	2	\$27.46
Mizell #3	1028	904	2	\$24.46
平均值	859	817		\$16.28

表4 使用COTMAN判断杀虫剂投放终点的试验结果（得克萨斯州）

棉田	产量		减少使用杀虫剂的次数	
	断流点 +350HU	整个棉花 生长季	断流点 +350HU	成本
Edwin	912	949	1	\$6.88
Glass	1131	1163	1	\$6.88
Marburger	970	1047	1	\$6.88
平均值	1004	1053		\$6.88

表5 使用COTMAN判断杀虫剂投放终点的试验结果（密西西比州）

棉田	产量		减少使用杀虫剂的次数	
	断流点 +350HU	整个棉花 生长季	断流点 +350HU	成本
BM	1135	1310	2	\$21.92
HN	915	989	2	\$18.60
JO	727	715	2	\$31.68
KP	1417	1430	1	\$17.01
RO	986	948	5	\$70.91
平均值	986	948		\$26.69

使用自然控制手段抵御蚜虫

抵御各种虫害是综合虫害管理（IPM）的一个重要组成部分。在大多数情况下，实施虫害管理要依据害虫的种类、数量而行。但对中南部和东南部的棉蚜而言，实现IPM的另一有效途径是充分利用各种可能的方法—包括使用自然控制手段。长期以来自然控制手段被认为是IPM的重要组成部分，但其在应用时由于很难对虫害控制进行量化和预测，因此不易被棉农用以制定防虫害计划。现在，棉花公司从事的两方面的研究使得使用自然控制手段抵御蚜虫的方法在中南部和东南部地区成为一个可行方案。首先利用了蚜虫病原真菌，其次是在制定防虫害计划时结合使用抑制蚜虫生长的益虫，从而改变了虫害处理阈值。

19世纪80年代末，在中南部棉田里发现了一种可导致大量棉蚜死亡的真菌。经鉴定，该真菌为生长在自然界中的一种名为弗氏新接霉蚜霉菌的菌种，通常被人们称作蚜虫病原真菌。阿肯萨斯大学的学者们对这种真菌的生物学和生理学特性进行了研究（Steinkraus et al. 1995; Steinkraus & Slaymaker, 1994; Steinkraus et al. 1966），发现这种菌具有特殊的周期性的杀虫行为，可通过对土壤样品进行蚜虫真菌检测服务，预测蚜虫的减少情况。

在作物生长季节，棉花推广机构、棉花咨询机构和种植商共同对受蚜虫侵害的棉田样品做出分析，然后将这些样品送往阿肯萨斯大学的实验室，研究人员用显微镜观察真菌对蚜虫的作用规律。研究表明，如果真菌感染率大于等于15%，则可以估测到蚜虫的减少量，这样在剩下的时间里便可以省去杀虫剂的投放（Steinkraus 和 Hollingsworth, 1994; Hollingsworth et al. 1995）。对土壤样品进行蚜虫真菌检测服务的结果如表6所示，表中同时列出了使用这种方法所估测的成本节约量。

表6 2000—2003年对中南和东南部土壤样品进行蚜虫真菌检测服务后减少的杀虫剂投放数量

年份	样品田数量	样品田英亩数	真菌感染率 ≥15%的棉田英亩数	每英亩投放杀虫剂的平均成本 ¹	预测每英亩减少的杀虫剂投放次数	预测的在该样品田上节约的成本
2000 ²	219	16,598	3,265	\$8.24	1.11	\$29,863
2001 ³	234	13,834	3,959	\$8.89	1.22	\$42,939
2002 ³	182	13,997	3,975	\$9.06	1.33	\$47,898
2003 ³	297	18,603	4,188	\$8.57	1.00	\$35,891

¹ Williams et al. <http://www.msstate.edu/Entomology/Cotton.html>

² 包括乔治亚、阿拉巴马、密西西比、阿肯萨斯和路易斯安那等州

³ 包括南加利福尼亚、阿拉巴马、密西西比、阿肯萨斯和路易斯安那等州

这种方法并不仅仅局限于所测试的样品棉田，其应用范围非常广泛。单块棉田中的真菌情况一经测出立刻反馈给相关机构，并在网上登出

(<http://www.uark.edu/misc/aphid>)，同时该信息还被用于合作推广机构的商务通

讯、电话热线和棉花种植商、咨询商召开的信息大会，目的在于使整个行业了解到这种真菌的效能。表7列出了蚜虫真菌检测服务的潜在优势。这项工作使得中南部和东南部的城镇机构、棉花种植商、咨询商节省了一定量的杀虫剂，真菌抵御蚜虫的优良效应也因此得到了广泛认可。

表7 2000—2003年中南和东南部土壤如使用蚜虫真菌检测服务的效益估计

年份	真菌感染率 ≥15%的棉 田百分比	使用杀虫剂 的棉田英亩 数 ²	如进行真菌 检测服务不 需使用杀虫 剂的棉田英 亩数	估计可 节约的 成本
2000 ³	23	1,264,663	268,830	\$2,054,040
2001 ⁴	28	510,212	211,285	\$2,063,598
2002 ⁴	29	966,410	258,861	\$3,251,800
2003 ⁴	20	615,000	95,231	\$803,892

1 出自蚜虫病原真菌考察报告 (Steinkraus的未发表数据)

2 Williams et al. <http://www.msstate.edu/Entomology/Cotton.html>

3包括乔治亚、阿拉巴马、密西西比、阿肯萨斯和路易斯安那等州

4包括南加利福尼亚、阿拉巴马、密西西比、阿肯萨斯和路易斯安那等州

蚜虫真菌检测服务除了对环保有利外，每减少一次杀虫剂投放在每亩棉田上可节约成本\$8.00 - \$9.00，一旦推广开来便可节省几十万或上百万美元。

在第二个例子中，采用的方法是每年六、七月在蚜虫真菌出现之前控制蚜虫的生长数目。这种处理方法在制定防虫害计划时结合使用抑制蚜虫生长的益虫，从而改变了虫害处理阈值。以前的棉农们一般是在50%或更多数量的棉花受到蚜虫侵害且蚜虫数目持续增长时开始进行杀虫处理。近三年来进行的研究表明一些益虫可降低蚜虫的生长速度。这便为杀虫剂的推后施放提供了可能。在三年中进行的三次试验表明，在这种情况下推后使用杀虫剂可以不改变棉花产量且每年至少减少一次用于消灭蚜虫的杀虫剂的投放 (Conway et al. 2006)。由美国农业部资助的初始研究证明了利用益虫抵御蚜虫处理方式的可行性，但由于所需样品价格过高，不易被棉花大生产应用。在此基础上，棉花公司资助研究了一个可用于实际生产的新处理阈值。图6证明了采用这种新阈值在2004年的应用效果。从图6可以看出使用新阈值 (NEW) 的未施加杀虫剂的棉田部分与使用常规阈值、施加杀虫剂七天后的棉田 (CONVEN)所含蚜虫量相当。在每次实验中采用新性益虫阈值可以使杀虫剂投放推后一周。在图6所示的五个地方中，四个地方使用新的益虫阈值后的蚜虫含量都有下降，因此可以节省一次杀虫剂的投放。从中看出自然控制完全可以实现降低杀虫剂使用量的目的 (Chappell et al. 2005)。

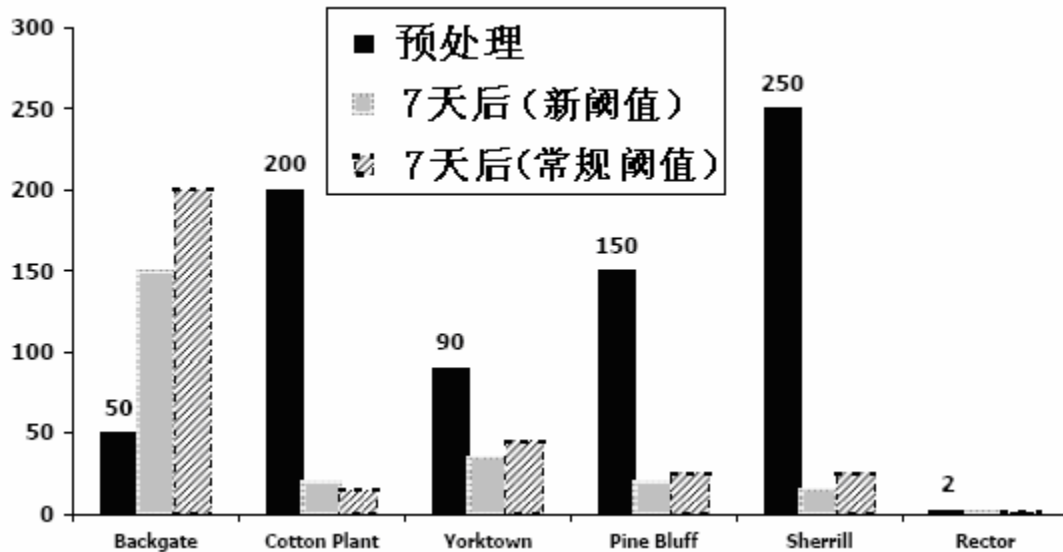


图 6 2004 年在阿肯萨斯的 5 个区域采用新益虫阈值与常规阈值的蚜虫含量对比

通过优化选择投料区域实现可持续生产的研究

“定位管理”是一种新型农业管理模式。长期以来，棉农在制定投料计划时往往是以单块的棉田为对象，在小范围内实行管理。随着全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）和自动调节控制系统的发展，棉农们可以在整个棉田里视作物需要进行投料管理。现在，定位管理已在棉花种植带普遍开展起来，其中一个很好的例子便是InTime公司（<http://www.golnTime.com>，第一个成功开展向密西西比的棉农提供记载图像以供其进行定位管理的公司）已经将棉农纳入其客户行列。美国棉花公司进行的研究项目进一步证实了采用定位管理模式进行投料管理的可行性（Barnes, 2004）。定位技术有助于形成可持续发展的生产系统，在产量不变甚至增加的前提下减少投料量—绝对是以少增多。下面我们依然以灌溉用水和杀虫剂使用管理为例对此项研究进行描述。

灌溉定位管理

灌溉水是需要考虑空间因素的农业投料之一。但直到两年前，才实现了商业化的定位灌溉管理系统。商品化的自动调节轴面系统最初由位于乔治亚州Tifton郡的国家生态友好农业生产实验室（NESPAL）开发而得，后由Hobbs & Holder公司自2004秋季起出售(<http://www.betterpivots.com/>)，Perry 等人 (2002)曾详细地介绍

了该系统的技术信息，目前在乔治亚州、南卡州、佛罗里达州和阿肯萨斯州等地的155英亩的土地都安装了该系统，全部安装费用为21,379美元，但除去美国国家自然资源保护局和乔治亚州火石河基地（自然资源保护局的一个合作机构）提供的资金赞助，棉农实际需要支付的费用只有5,000美元 (34美元/英亩)。

为了确定棉田上不同区域的需水量，可通过图表标识出棉田里不同部分的土壤、地质情况。例如，棉田中地势最低的地方一般需水量也是最少的，因为水会从较高的地方流下来。同理，地势较高的地方需水量也较大。图7所示的是使用该体系进行灌溉控制的示意图。在2005的棉花生长季节里，21个此类系统被用于灌溉管理，与常规灌溉模式相比省水量达17%。而在干旱的季节里，据估计这些系统共可节约用水1亿7千万加仑左右（NESPAL，2006）。

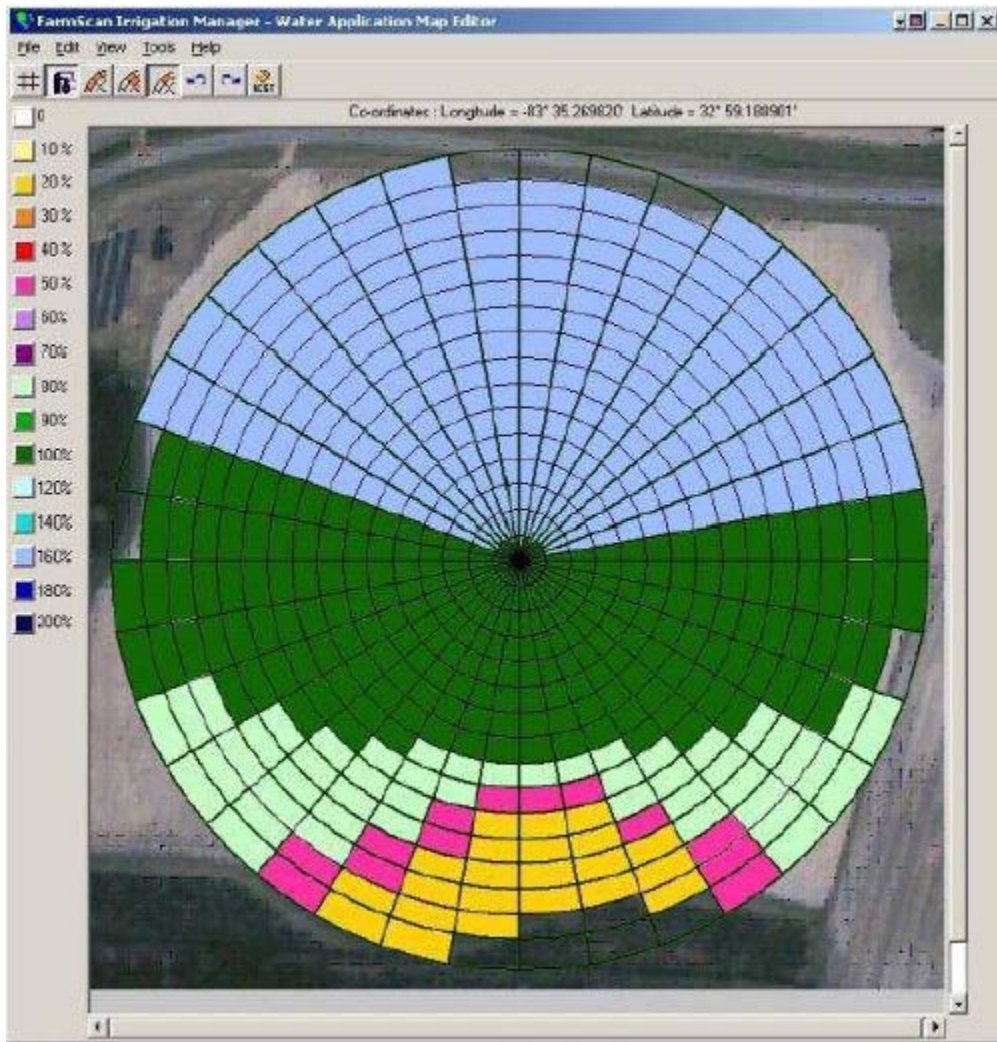


图7 用于灌溉管理的自动调节轴面系统示意图

美国棉花公司和乔治亚棉花委员会共同资助美国国家自然资源保护局开展的利用土壤无线传感网络优化当前灌溉系统的项目，其目的是对棉田中每一块土壤的需水情况进行长期稳定的监测。该项目使用电磁波确认标识（RFID）建立了最初的模型，据估计，该模型一定全部建成，将可用于面积为80英亩的土地，而成本还不到3000美元，但考虑到电磁波确认标识的涉及面可能不够广泛，因此目前的工作主要是开发一种“网状网络”，以保证通讯更为全面有效。使用传感器网络可以使得监控系统自行启动，保证在最需要水的区域实行灌溉。向传感器模式的转变可以更好地体现可持续性生产的理念，因为这种模式可以：

- 提高棉农生活质量（无需花时间对土壤的需水情况进行监测）；
- 通过增加产量提高经济、环保效益（使用传感器可以确保产量不会下降）；
- 减少农业用水（只在需要水的棉田进行灌溉），为城市居民用水和保持河流水位提供保障

过去传感器网络系统过于昂贵，但现在随着无线技术的飞速发展，这种传感网络设备可以在不久的将来得以应用（五年之内）。

虫害防治定位管理

与灌溉管理一样，长期以来棉田的虫害防治管理同样基于棉田的平均情况进行，而实际上大多数的农业用地因土壤类型、肥料情况和排水面积不同而有所差异。这些因素反过来又影响到棉花产量和效益。因此，定位技术可以帮助人们将一整块棉田划分为不同的管理区域，以便仅在收益较高的区域使用杀虫剂。

为验证上述方法，2003年在路易斯安那州开展了相关的调查研究（Temple et al. 2004）。试验将定位虫害控制（SVI）技术的效益和价值与传统的基于棉田的平均情况实施杀虫剂投放的模式进行了比较，图8和图9列出了两种模式的产量和效益以证明SVI技术的优势。在定位虫害控制（SCI）模式中，那些根据棉花产量和效益被列为次要管理地带的区域将不进行棉盲蝽和其它害虫的防治。

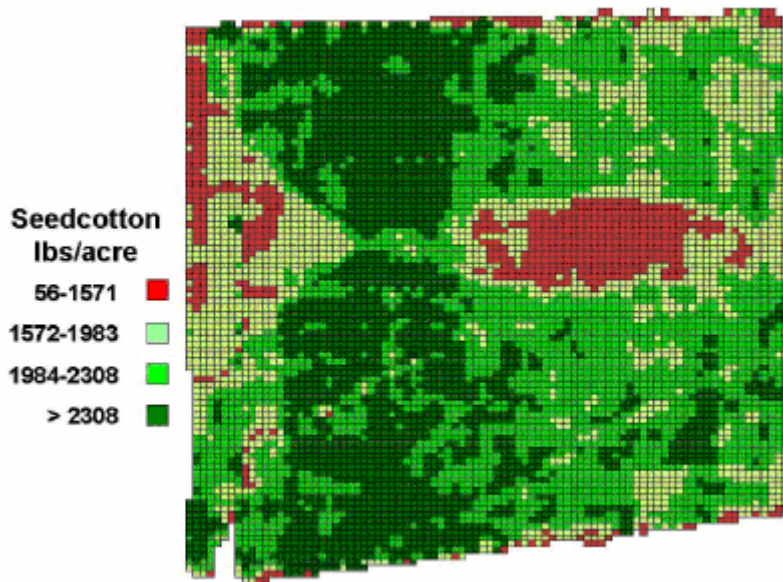


图8 为实施定位虫害控制（SVI）划分的棉花产量区域图（2001年）

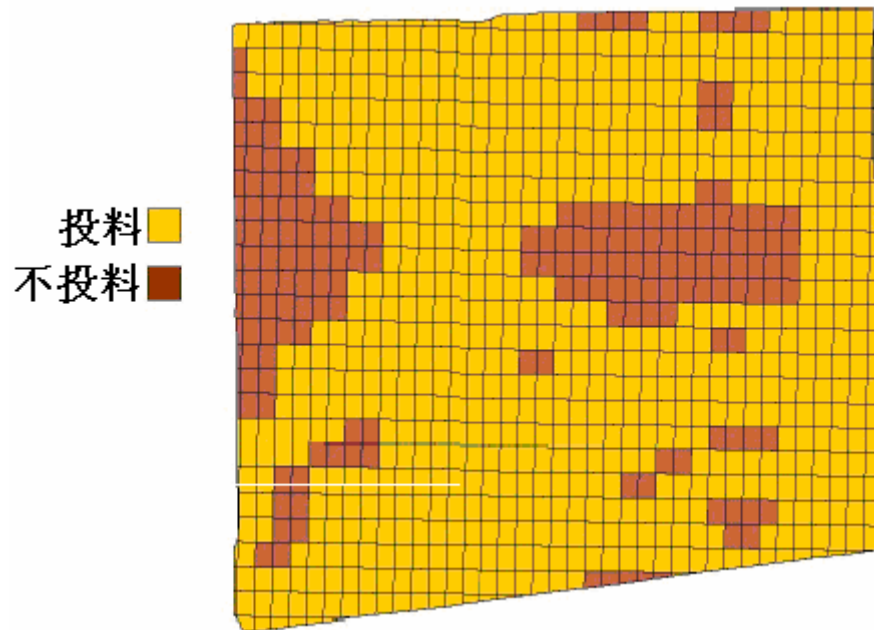


图9 根据棉花产量和效益划分的定位虫害控制（SVI）示意图

在该实验中，SVI技术显著降低了控制虫害管理的成本而不影响棉花产量（见图10和11）。此外，减少投放杀虫剂的土壤面积对环保有利。

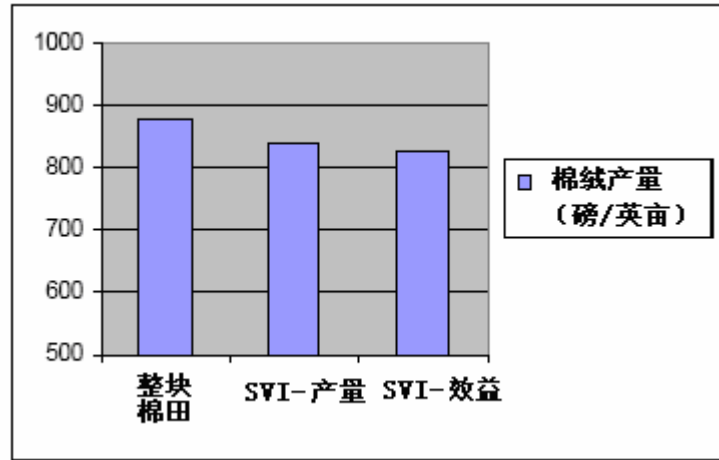


图 10 在整块棉田投料与按SVI—产量和SVI—效益投料的棉绒产量比较

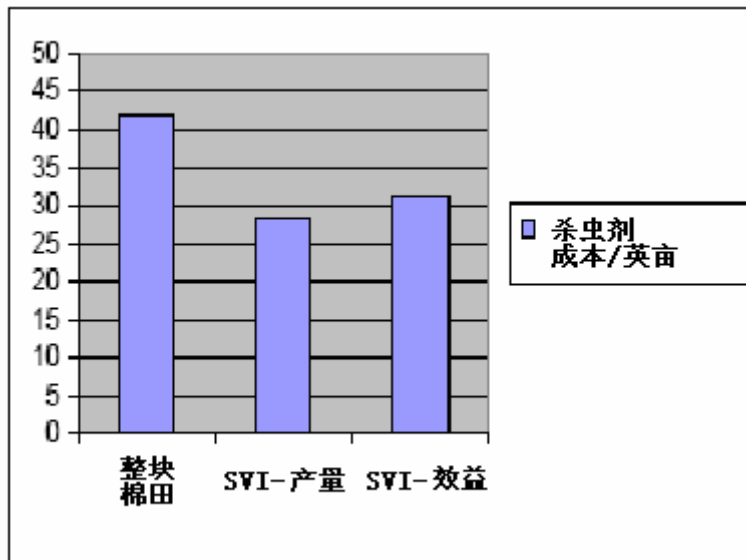


图 11在整块棉田投料与按SVI—产量和SVI—效益投料的杀虫剂使用成本比较

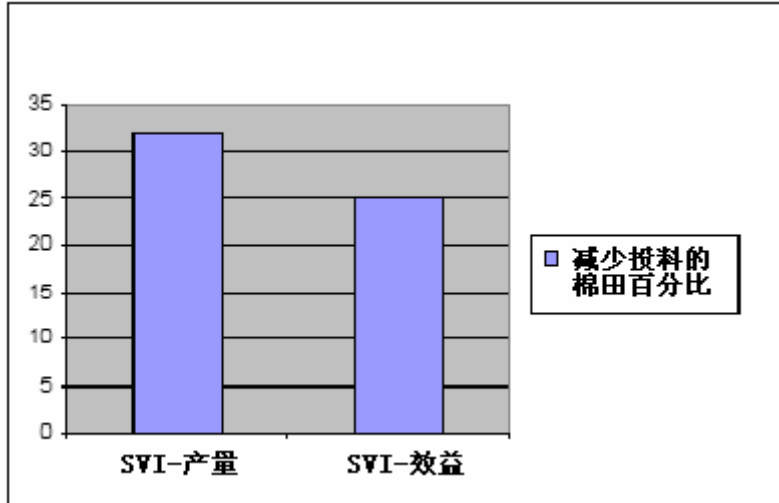


图12 使用SVI技术减少投料的棉田百分比

结语

在努力提高棉花生产利润的同时，美国棉花公司农业研究部门还致力于开发具有良好可持续性的生产体系。在精确确定作物需水量和优化虫害防治管理方面开发的技术有效降低了种植棉花所需要的资源，且同时保证或提高了棉花的产量。此外，随着定位技术的广泛使用，棉农们现在可以做到物尽所需，保证只在最需要的区域投放用料。本次报告仅仅展示了一小部分对形成可持续性棉花生产系统有利的农业研究项目。每年棉花公司都会在棉花种植带开展300多个研究项目，绝大多数对环境保护都有积极作用，具有良好的社会效应并有利于棉农们提高生产效益。这些项目的年度总结可以在棉花公司的网站上获得: <http://www.cottoninc.com>。这些长期不懈的研究工作确保了棉花生产兼顾社会、经济和环境效益，向着可持续发展的方向进行，最终造福于人类。

参考文献

- Barnes, E.M. 2004. Current implementation of site-specific technologies in U.S. cotton production. In Proceedings of SPIE, Vol. 5544, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability, 49th Annual SPIE meetings in Denver, CO Aug. 2-4, 2004, W. Gao and D.R. Shaw Editors
- Chappell, A.S., T.J. Kring, G.M. Lorenz, J.K. Greene, & G.E. Studebaker. 2005. Reliance on predators in making cotton aphid treatment decisions. Proc. Beltwide Cotton Conf., New Orleans, LA. 4-7 Jan. 2005. Natl. Cotton Council. Am., Memphis, TN: 1610-1612.
- Conway, H. E., D. C. Steinkraus, J. R. Ruberson, and T. J. Kring. 2006. Experimental Treatment Threshold for the Cotton Aphid (Homoptera: Aphididae) Using Natural Enemies in Arkansas Cotton. J. Entomol. Sci. 40: *in press*.
- Doederlin, T., B. Baugh, R. Boman, and D. Porter 2004. . Timing the last irrigation using COTMAN in LEPA. Proc. Beltwide Cotton Conf., San Antonio, TX. 5-9 Jan. 2004. Natl. Cotton Council. Am., Memphis, TN: 2285-2287.
- FAO, 2006. Water at a glance. Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://www.fao.org/ag/agl/aglw/WaterTour/index_en.htm (link verified 9 May 2006)
- Fisher, D.K. 2004. Simple and inexpensive lysimeters for monitoring reference- and crop-ET. In the proceedings of the 25th Annual International Irrigation Show, 14 - 16 November 2004, Tampa, Florida. Irrigation Association Sponsor.
- Hogan, R. 2005. Economic effect of late irrigation on mid-south cotton. Proc. Beltwide Cotton Conf., New Orleans, LA. 4-7 Jan. 2005. Natl. Cotton Council. Am., Memphis, TN: 676-679.
- Hollingsworth, R.G., D.C. Steinkraus, & R.W. McNew. 1995. Sampling to predict fungal epizootics on cotton aphids (Homoptera:Aphididae). Environmol. 24:1414-1421.
- Howell, T.A., S.R. Evett, J.A. Tolk, and A.D. Schneider. 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 130(4):277-285/
- NASS, 2004. Farm and ranch irrigation survey (2003 – compiled from the 2002 Census of Agriculture). U.S. Department of Agriculture (USDA), National Agricultural Statistics Service (NASS), Volume 3, Special Studies Part 1AC-02-SS-1.
- NESPAL, 2006. Enhancing irrigation efficiencies. <http://www.nespal.org/irreff/main.html>. 2005 specific performance information from personal correspondence with Calvin Perry, University of Georgia, Tifton.
- Perry, C., S. Pocknee, O. Hansen, C. Kvien, G. Vellidis, and E. Hart. 2002. Development and Testing of a Variable-Rate Pivot Irrigation Control
- 19 F:\EFS2006\Research on Sustainability-Final.doc

- System, ASAE-CIGR Meeting Paper No. 022290. St. Joseph, Mich.: ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Soth, J., C., C. Grasser and R. Salerno. 1999. The impact of cotton on fresh water resources and ecosystems, a preliminary synthesis. WWF Background Paper. 48 pp.
- Steinkraus, D.C. & P.H. Slaymaker. 1994. Effect of temperature and humidity on formation, germination, and infectivity of conidia of *Neozygites fresenii* (Zygomycetes: Neozygitaceae) from *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae). *J. Invertebr. Pathol.* 64:130-137.
- Steinkraus, D.C. & R.G. Hollingsworth. 1994. Predicting fungal epizootics on cotton aphids. *Ark. Farm Res.* 43:10-11.
- Steinkraus, D.C., R.G. Hollingsworth, & G.O. Boys. 1996. Aerial spores of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae): density, periodicity, and potential role in cotton aphid (Homoptera: Aphididae) epizootics. *Environ. Entomol.* 25: 48-57.
- Steinkraus, D.C., R.G. Hollingsworth, & P.H. Slaymaker. 1995. Prevalence of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae) on cotton aphid (Homoptera: Aphididae) in Arkansas cotton. *Environ. Entomol.* 24: 465-474.
- Temple, J., K. Paxton, H. Niu, B.R. Leonard, & R. D. Bagwell. 2004. Evaluating site-specific aerial insecticide applications based on historical yield data. Proc. Beltwide Cotton Conf., San Antonio, TX. 5-9 Jan. 2004. Natl. Cotton Council. Am., Memphis, TN: 1792-1798.
- Whitaker, J., C.W. Bednarz, G. Ritchie, and C. Mills. 2006. A Comparative Agronomic Analysis of Subsurface Drip Irrigation and Overhead Irrigation in Cotton Grown in Georgia. Proceedings of the 2006 Beltwide Cotton Conferences, National Cotton Council, Memphis, TN.
- Zwart, S.J. and G.M. Bastiaanssen. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69(2):115-133.