

我国棉花脱叶催熟技术研究进展

周婷婷¹, 肖庆刚¹, 杜睿¹, 韩小强^{1*}, 张国强¹, 王国宾²

(1. 石河子大学农学院 / 新疆绿洲农业病虫害治理与植保资源利用重点实验室, 新疆 石河子 832003;

2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255022)

摘要: 化学脱叶催熟技术是棉花机械收获的重要前提, 是机采棉综合农艺配套技术的关键环节。合理施用脱叶催熟剂能够提高机采棉的脱叶吐絮质量, 降低籽棉的含杂率, 对解决新疆棉花品质问题具有重要意义。然而, 当前棉花脱叶催熟剂存在有效成分单一、剂型同质化严重、喷施装备及喷施技术落后, 造成籽棉含杂率高, 严重影响棉花品质。本文评述了机采棉脱叶催熟剂及其施用的研究现状, 总结提出了棉花脱叶催熟剂存在的问题及解决途径, 对今后棉花脱叶催熟剂减施增效的前景和研究方向做了展望。

关键词: 棉花; 脱叶催熟剂; 施用技术; 减施增效

Research Advances on Cotton Harvest Aids in China

Zhou Tingting¹, Xiao Qinggang¹, Du Rui¹, Han Xiaoqiang^{1*}, Zhang Guoqiang¹, Wang Guobin²

(1. College of Agriculture / Key Laboratory of Oasis Agricultural Pest Management and Plant Protection Resources Utilization, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. College of Agricultural Engineering and Food Science / Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Agricultural Aviation Intelligent Equipment, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255022, China)

Abstract: Chemical defoliation and ripening is the important premise of machine-harvested cotton, and also the key of agronomic measures technology of machine-harvested cotton. Appropriate and safe harvest aids will improve timing and facilitate harvest of cotton. However, there are only few types of the cotton harvest aids active ingredients, and with serious formulation homogeneity as well as the backward equipments and technologies of cotton harvest aids spraying lead to high impurity content of seed cotton and seriously affects the quality of cotton. In this paper, the research status of harvest aids and its scientific application were reviewed, and the existing problems and solutions of cotton harvest aids were summarized. The prospect and research direction of reducing application efficiency of cotton harvest aids in the future were prospected.

Keywords: cotton; harvest aids; application technology; reduction and efficiency

棉花是世界上重要的经济作物之一, 在中国及世界经济发展中占有重要地位。目前我国已形成了长江流域、黄河流域和以新疆为主的西北内陆三大棉区^[1]。新疆因其独特的自然生态条件和资源禀赋, 已成为了我国最大的商品棉基地、国内唯一的长绒棉生产基地和世界重要的棉产地。棉花生产关系到国家安全和外贸主导产业的可持续发展, 关系到我国农业结构的战略性调整和粮食安全, 是国家和新疆发展的战略需求^[2], 也是新疆社会长治久安的重要产业依托。棉花生产规

模化、机械化、信息化、智能化和社会服务化是解决棉花生产过程中劳动力短缺、降低棉花生产成本、实现棉花产业现代化、巩固棉花产业优势地位的必然选择。原农业部《全国种植业结构调整规划(2016—2020年)》明确指出我国棉花区域布局调整的重点是: 推进棉花规模化种植、标准化生产、机械化作业, 提高生产水平和生产效率。发挥新疆光热和土地资源的优势, 推广膜下滴灌、水肥一体化等节本增效技术, 积极推进棉花机械采收, 稳定棉花种植面积, 保证国内用棉需要^[3]。

收稿日期: 2019-11-15 第一作者简介: 周婷婷(1995—), 女, 硕士, ztt@stu.shzu.edu.cn。* 通信作者: hanshz@shzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(31960566); 新疆生产建设兵团国际科技合作计划(2017BC001)

“十三五”期间,国家积极推进“一带一路”建设、棉花“西进”、棉纺产业转型升级、国家棉花目标价格改革“三年一定”等政策,对于棉花产业的可持续、高质量发展带来积极意义^[4]。

伴随劳动力成本的急剧增加和对劳动力需求的矛盾,新疆棉花价格优势不断缩减^[5]。因此,发展机采棉成为降低新疆棉花生产成本,实现棉花生产可持续发展的主要举措^[6]。近年来,随着棉花机械化收获技术在新疆棉区的快速发展和推广,机采棉的规模化、标准化和机械化生产优势突显,经济效益十分显著。至 2018 年新疆棉花机采率达到 35%,北疆地区(自治区)和新疆生产建设兵团机采棉总面积达 68.667 万 hm^2 ,棉花机采率 80.4%^[7]。机采棉技术的推广,有效解决了新疆棉区劳动力供需矛盾日益突出的问题,降低了棉花采收成本,对农业增效、团场增盈、职工增收及提升新疆棉花的国际市场竞争力做出了重要贡献,促进了棉花发展战略的进一步实施^[8]。

棉花脱叶催熟技术是使用化学脱叶剂及催熟剂干预棉花的生理生化过程,加快棉花的生育进程,使其叶片提前脱落,加快成熟的一种技术^[9-10]。棉花脱叶催熟技术是实现棉花机械采收的重要前提,脱叶催熟剂合理施用,不仅能够解决棉花后期贪青晚熟或成熟度不一致的问题,并加快了收获前棉花叶片的脱落,提高了机采棉的采摘率和作业效率,降低了机采籽棉含杂率^[11]。然而,由于多方面因素的影响,新疆机采籽棉含杂率过高,皮棉品质下降严重^[12],成为限制新疆棉花可持续发展的主要瓶颈问题。因此,提高脱叶催熟剂的效果,降低籽棉碎叶等杂质含量,是实现机采棉品质提升的关键。本文对棉花脱叶剂的作用机制、脱叶催熟剂种类及使用技术进行了总结分析,旨在为机采棉脱叶催熟剂的科学使用和棉花产业的可持续发展提供一些借鉴和参考。

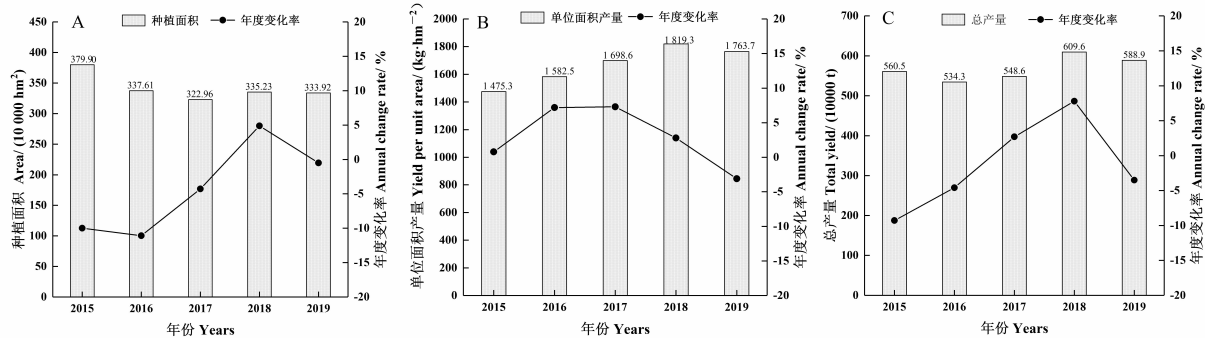
1 我国棉花种植现状

棉花是世界上主要的农作物之一,可以作为多种织物的原材料,既是重要的纤维作物,又是重要的油料作物^[13]。我国是世界上最大的棉花生产国和消费国,全国有 18 个省(市、自治区)种植棉花。近 10 年来全国棉花种植面积逐年减少,而

新疆棉花种植面积稳中波动。根据原农业部《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》,我国棉花种植品种结构与区域布局的调整重点是稳定面积和双提增效,即棉花生产向优势区域集中、向盐碱滩涂地和沙性旱地集中、向高效种植模式区集中,在已有的西北内陆棉区、黄河流域棉区、长江流域棉区的格局下,提升新疆棉区,巩固沿海沿江沿黄环湖盐碱滩涂棉区。到 2020 年,棉花面积稳定在 333 万 hm^2 左右,其中新疆棉花面积稳定在 167 万 hm^2 左右。着力提高单产、提升品质、增加效益。加快选育耐盐碱、抗性强、宜机收的高产棉花品种,集成配套棉花生产机械移栽收获等技术^[3]。据统计,2019 年全国棉花种植面积为 333.92 万 hm^2 ,比 2018 年减少了 1.52 万 hm^2 ,下降 0.5%;全国棉花单位面积产量为 1 763.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比 2018 年减少 55.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,下降 3.1%;全国棉花总产量 588.9 万 t,比 2018 年减少 21.3 万 t,下降 3.5%(表 1)^[14]。纵观近 5 年(2015—2019 年)数据,我国棉花种植面积逐年下降,并于 2018 年和 2019 年稳定在 330 万 hm^2 (图 1 A)^[14-18],基本达到了《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》中对全国棉花种植面积的部署要求。此外,棉花单位面积产量呈递增趋势,至 2018 年单产达到最高,为 1 819.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,仅 2019 年棉花单位面积产量较 2018 年有所下降(图 1 B)。虽然我国棉花种植总面积在压缩,基于高效栽培管理水平的提升,棉花单位面积产量增加显著,近 5 年来我国棉花总产量一直稳中有升,至 2018 年达到 609.6 万 t(图 1 C)^[14-18]。

新疆作为我国的棉花种植主产地,也是我国种植业产业调整的重点地区。近 5 年新疆棉花种植面积增加显著,至 2019 年达到 254.05 万 hm^2 (图 2 A),占到全国棉花种植总面积的 76.08%(图 3 A),与《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》中对新疆棉花种植面积的部署要求(2020 年新疆棉花种植面积稳定在 167 万 hm^2 左右)有较大的差异,下行调整压力较大。此外,由于资源优势和农业现代化水平较高,新疆棉花单位面积产量长期高于国内其他棉区,自 2016 年开始,单位面积产量一直维持在 1 900 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上(图 2 B)。在种植面积和单位面积产量优

势的基础上,新疆棉花的总产量在全国棉花产量的 84.94%(图 3 C),为国内用棉提供了充分的保障。



A: 我国棉花种植面积变化情况 (2015—2019 年); B: 我国棉花单位面积产量变化情况 (2015—2019 年); C: 我国棉花总产量变化情况 (2015—2019 年)。

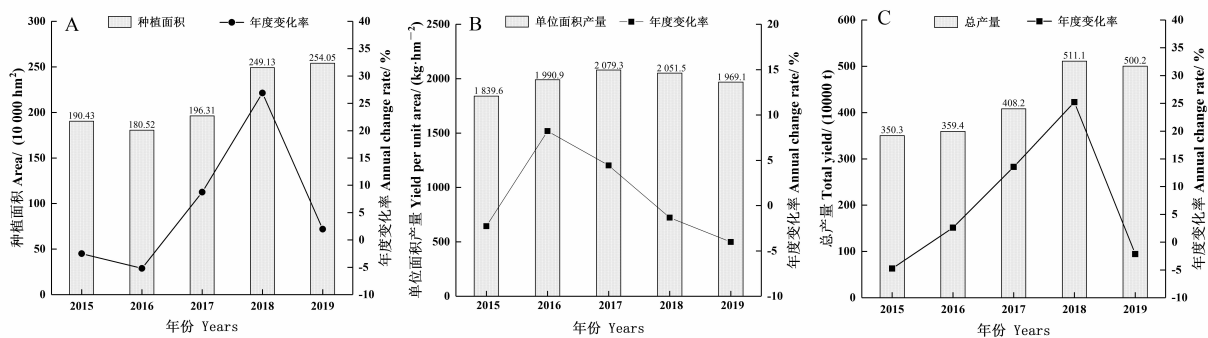
数据来源为国家统计局网站 (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/Tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html)。

A: changes of planting area of cotton in China (2015-2019); B: changes of per unit area yield of cotton in China (2015-2019); C: changes of total yield of cotton in China (2015-2019).

The data source is arranged by the National Bureau of Statistics (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/Tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html).

图 1 我国棉花种植情况 (2015—2019 年)^[14-18]

Fig. 1 Cotton cultivation in China (2015-2019)^[14-18]



A: 新疆棉花年种植面积变化情况 (2015—2019 年); B: 新疆棉花单位面积产量变化情况 (2015—2019 年); C: 新疆棉花年总产量变化情况 (2015—2019 年)。

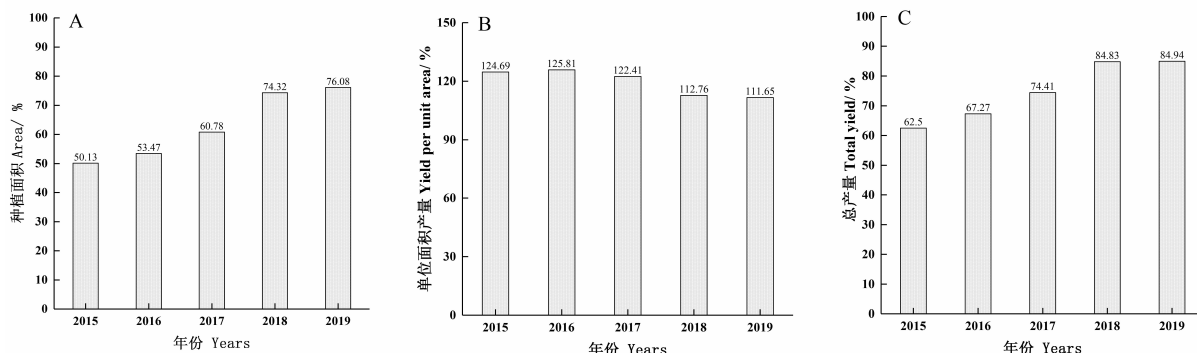
数据来源为国家统计局网站 (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/Tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html)。

A: changes of planting area of cotton in Xinjiang (2015-2019); B: changes of per unit area yield of cotton in Xinjiang (2015-2019); C: changes of total yield of cotton in Xinjiang (2015-2019).

The data source is arranged by the National Bureau of Statistics (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/Tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html).

图 2 新疆棉花种植情况 (2015—2019 年)^[14-18]

Fig. 2 Cotton cultivation in Xinjiang (2015-2019)^[14-18]



A: 新疆棉花种植面积占全国棉花种植总面积的比例(2015—2019年); B: 新疆棉花单位面积产量占全国棉花单位面积产量(2015—2019年); C: 新疆棉花总产量占全国棉花总产量(2015—2019年)。

数据来源为国家统计局网站 (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html)。

A: proportion of cotton planting area in Xinjiang to total cotton planting area in China (2015-2019); B: proportion of per unit area yield of cotton in Xinjiang to that in China (2015-2019); C: proportion of the total yield of cotton in Xinjiang to that in China (2015-2019)。

The data source is arranged by the National Bureau of Statistics (http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html; http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html)。

图3 新疆棉花种植与全国棉花种植对比情况(2015—2019年)^[14-18]

Fig. 3 Comparison of cotton planting in Xinjiang with that in China(2015–2019)^[14-18]

2 机采棉应用进展

随着农业生产技术的不断发展,规模化、标准化、机械化是农业生产的必由之路。近年来,随着棉花种植成本的增加,季节性拾花工的减少,劳动力短缺成为制约新疆棉花生产的瓶颈问题。因此,大力推广机械采棉技术,既可以减轻采收者的劳动强度,又可以促进实现棉花生产标准化、规模化经营,降低植棉成本,促进棉花生产方式的变革和棉花产业的可持续发展。

新疆对棉花机械化采收的研究可追溯到20世纪90年代。1989年,新疆维吾尔自治区科学技术委员会开展了棉花机械化收获技术引进的实验研究;1996年,新疆生产建设兵团(文中简称“兵团”)投资3 000万元开始实施“兵团机采棉引进试验示范项目”;2003年,兵团在国内率先研制出了4ZJ-8型摘棉桃机,通过了新产品鉴定并投入批量生产;2005年,贵航平水牌4MZ-5型自走式采棉机投入批量生产^[19],新疆机采棉进入了起步和快速发展阶段。

10多年来,新疆在机采棉种植、栽培管理、脱

叶、机械采收、加工和质量保证等诸多关键环节都已取得重大突破,推广应用机采棉技术的条件日趋成熟。2005—2017年,新疆机采棉进入快速发展时期,机采棉面积由5万hm²增长到94.33万hm²^[20]。需要指出的是,新疆自治区机采棉技术研究和推广起步较晚,但近些年发展迅速;而兵团的机采棉发展早于自治区也快于自治区,北疆地区机采棉的发展快于南疆。

机采棉技术的大力推广解决了劳动力供需矛盾日益突出的问题,为实现棉花产业的规模化、机械化、信息化、智能化发展和棉花发展战略的进一步实施具有重要意义。

3 棉花脱叶催熟剂作用机理及其种类

3.1 棉花脱叶催熟剂作用机理

棉花叶片的自然脱落是棉花植株体内发生的一系列生理生化变化的结果,常与叶片衰老相关,植物激素平衡的变化对叶片脱落过程中起着重要的作用^[21]。处于衰老的叶片中,促进脱落的乙烯和脱落酸的含量增加,而抑制脱落的生长素含

量下降,在离层两端生长素浓度梯度逐渐消失,从而离区对乙烯变得敏感,最终导致叶片脱落^[22-23]。

化学脱叶技术是机采棉农艺配套技术的关键环节和重要前提,其原理是特定化合物能够抑制生长素功能的发挥,同时促进或者诱导乙烯产生,进而促进叶片离层的形成,最终达到脱叶目的^[24]。外源喷施脱叶剂后可以促进棉花体内脱落酸的生成,有利于棉花叶片脱落,且脱落酸含量与脱叶剂效果呈正相关^[25-26]。外源施用乙烯或乙烯利也可以促进棉花叶片脱落,未完全展开的幼叶和较老的叶片对乙烯比较敏感,而生理功能叶片和完全展开的叶片对乙烯的敏感性较低^[27-28]。功能叶片没有衰老信号诱导下,未发生生理生化变化,在使用低剂量脱叶剂时不足以引起叶片脱落,增加脱叶剂使用剂量时则会造成叶片枯而不落^[21]。最近 Xu 等的研究表明细胞分裂素和乙烯信号相互作用共同调控棉花脱叶^[29]。

棉铃开裂的生理基础是棉铃铃柄基部维管束形成一个软木层阻止水分进入棉铃,维管束组织中的内层与心皮(铃壳)之间发生分离^[30]。棉铃开裂之前,乙烯释放量显著提高,至棉铃出现明显裂缝时,乙烯释放量达到高峰,之后迅速下降^[31]。韩碧文等研究结果表明,棉铃开放与铃壳内过氧化物酶活性升高呈正相关,据此推测乙烯能够提高过氧化物酶活性,从而生长素降解加速,导致棉铃中乙烯和生长素平衡受到破坏,促使棉铃开裂^[32]。

3.2 棉花脱叶催熟剂的种类

选择合适的脱叶催熟剂是保障棉花产量和质量的关键因素。通常可将棉花脱叶催熟剂分为三类:干燥剂、脱叶剂和催熟剂^[33]。

3.2.1 干燥剂。干燥剂可以引起植物细胞破裂,促进植株干枯、落叶^[33]。百草枯是一种快速灭生性除草剂,对叶绿体膜破坏力极强,以致光合作用和叶绿素合成很快终止,对棉花具有一定的脱叶和催熟作用,通常将低剂量($154\sim 461\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)百草枯与其他脱叶剂混合使用增强对棉花的催枯作用;若百草枯剂量过高会导致棉花叶片枯而不落,并对未成熟棉铃造成伤害^[34-35]。由于百草枯对高等动物的毒性问题和没有有效的解毒剂,自2016年7月1日起,禁止百草枯水剂在国内销售

和使用^[36]。

氯酸盐是一种具有强烈氧化作用的物质,可以降低植物叶片的光合作用、呼吸强度和蒸腾强度,低剂量时可以作为棉花脱叶剂使用,高剂量时与百草枯一样具有催枯作用^[35]。在美国部分地区,棉花生育后期遇到低温时,常选用氯酸盐进行脱叶、催枯^[37]。

3.2.2 脱叶剂。脱叶剂能够使棉花叶柄基部形成离层,促进叶片脱落。按照作用方式,可分为激素型和除草剂型,或是两类物质的混配使用^[35]。激素型脱叶剂的特点是刺激产生乙烯或者抑制生长素的运输,以噻苯隆及其相关复配产品为代表^[33]。

噻苯隆属于杂环芳香脲类化合物,是一种具有特殊植物生长调节作用的化合物。噻苯隆不直接伤害棉花叶片,通过棉花叶片吸收,影响植物乙烯、生长素和脱落酸的平衡,促进棉花茎叶和叶柄之间形成自然离层,叶片在棉花枯萎前脱落,避免采收时枯叶碎屑污染棉花^[38-41]。噻苯隆属于接触性脱叶剂,无内吸传导作用,药液必须喷洒全面,尽可能接触到所有的棉花叶片,才能保证达到良好的脱叶效果。但施药时的气候状况对噻苯隆脱叶效果有显著的影响,日最低温度低于 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 基本无效果^[37]。

敌草隆属于内吸传导性的苯基酰胺类和苯基脲类除草剂,具有一定的触杀活性,通过阻止植物制氧以及光电子转移来抑制植物的光合作用。敌草隆作为除草剂与噻苯隆复配,能够有效加快棉花叶片的焦枯速度,提高低温条件下的脱叶效果^[37]。需警惕的是,敌草隆在土壤中的半衰期大于300 d,能够通过土壤淋溶作用导致水域生态环境的污染。作为一种氯代有机物,敌草隆还具有较强生物富集作用,对鸟类、哺乳类动物甚至是水中的无脊椎动物均具有显著的毒害作用。与此同时,由于氯代基团的存在,敌草隆具有很强的毒性和抗生化降解能力,还具有环境持久性、生物累积性、长距离迁移能力,并且对人类健康和生态环境造成极其严重的危害,因此被欧盟确定为优先有害污染物^[41-43]。此外,通过不同的机制杀伤或者杀死植物的绿色组织;同时刺激乙烯的产生,从而起到催熟和脱叶的作用的物质均可用于棉花脱叶催熟^[44]。如噻节因是兼具激素和除

草剂活性的脱叶剂,能够抑制负责气孔开关蛋白的合成,气孔失去控制后导致棉花叶片迅速失水^[35]。脱叶磷则对叶片的栅栏组织具有较强的伤害作用。唑草酯通过产生自由基而伤害细胞膜^[45]。除此之外,吡草醚、噻草酸甲酯、氟胺草酯、环丙酰草胺及植物毒素冠菌素也可用于棉花脱叶^[46]。表 1 列出了国内外用于棉花脱叶的药剂及药剂

组合。
3.2.3 催熟剂。乙烯利作为催熟剂在棉花生产上得到了广泛的应用,它直接促进棉株的乙烯生成,加快棉铃的发育并促进成熟,从而引起叶片脱落和棉铃开裂吐絮。乙烯利的催熟效果优于其对棉花的脱叶效果。乙烯利与脱叶剂混配使用,可以协同加快棉花叶片的脱落^[36-37]。

表 1 棉花脱叶催熟剂主要种类
Table 1 Cotton defoliants

序号 Number	有效成分 Active ingredient	有效成分英文名 English name	商标 Trademark	生产企业 Manufacturer	参考文献 Reference
1	脱叶磷	tribufos	Folex [®]	AmvacChemicalCorporation	[47-48]
2	噻苯隆	thidiazuron	Dropp [®]	Bayer CropScience	[47]
3	敌草隆	dimethipin	Harvade	-	[47]
4	唑草酯	carfentrazone-ethyl	Aim [®]	FMC	[49]
5	吡草醚	pyraflufen-ethyl	ET TM	Nichino America	[49]
6	噻草酸甲酯	fluthiacet-methyl	Blizzard TM	Chemtura Corporation	[49]
7	氟胺草酯	flumiclorac-pentyl	Resource [®]	Valent USA Corporation	[49]
8	噻苯隆+敌草隆	thidiazuron+dimethipin	Ginstar Dropp ultra [®]	Bayer CropScience	[50-51]
9	乙烯利+环丙酰草胺	ethephon+cyclanilide	Ginstar plus Finish6-Pro	Bayer CropScience	[51]
10	噻节因	dimethipin	-	-	[35]
11	氯酸钠	sodium chlorate	-	-	[35]
12	草甘膦	glyphosate	-	-	[46]
13	百草枯	gramoxone	-	-	[34]

我国是世界重要优质棉生产基地,也是世界上最大的农药生产国,棉花脱叶剂市场巨大,脱叶剂原药和制剂成为登记热点。以噻苯隆原药为例,自拜耳股份公司 2005 年取得农业农村部农药检定所农药登记的噻苯隆原药生产登记后,共计 11 家企业先后获批噻苯隆原药登记证。

从制剂角度分析,2009 年有 6 个棉花脱叶剂制剂产品取得登记后,此后脱叶剂制剂产品登记呈现出逐年增加的趋势,2017 年有 22 个脱叶剂制剂产品获得登记。由于制剂产品的生产工艺及相关条件较容易实现,相信后期仍会有大量的脱叶剂产品获得登记。

虽然获批登记的脱叶剂产品数量众多,但从剂型角度看,获批脱叶剂剂型主要集中在悬浮剂和可湿性粉剂,另有少量水分散粒剂、可分散油

悬浮剂和微乳剂。制剂种类存在同质化严重的问题,不利于产业发展。

脱叶剂制剂产品数量庞大,但有效成分种类却极为单一。取得登记的 90 个脱叶剂制剂产品中,其中 88 个产品以噻苯隆为主要有效成分,噻苯隆单剂产品达到 46 个,噻苯隆和敌草隆复配产品为 40 个;另有 1 个噻苯隆、敌草隆和乙烯利三元复配;1 个噻苯隆和乙烯利复配的产品;另外 2 个是以吡草醚为有效成分的产品。

总体来说,目前国内市场脱叶剂种类繁多,但有效成分种类、有效成分含量和剂型同质化十分严重,造成恶性竞争,不利于脱叶剂乃至棉花产业的发展。其次,近年来植保无人机喷施棉花脱叶剂发展迅速,对脱叶剂的剂型及喷施技术提出了新的要求,但缺乏与之配套的飞防专用制剂。

4 棉花脱叶催熟剂喷施时间

棉花脱叶催熟剂的施用时间对棉花产量和品质具有直接的影响。因此,确定棉花脱叶催熟剂的施用时机非常关键,需要均衡考虑产量和品质之间的关系。目前,棉花生产中确定脱叶催熟剂施用时间的方法主要有以下 5 种。生产上常用一种以上的方法去验证或确认另一种,将这些方法结合起来可以提供最佳的脱叶催熟剂施用时间^[52]。

4.1 棉铃吐絮率

棉铃的吐絮率(Boll opening percentage, OB)是确定棉花收获时间最常用的方法。研究表明,吐絮棉铃分布均匀且达到 60%时,进行脱叶催熟剂喷施对棉花产量和纤维品质的影响最小^[53-54]。如果棉花株型比较紧凑,成铃早而集中,吐絮率达到 40%时喷施脱叶催熟剂对棉花产量和纤维品质的影响较小^[55]。由于吐絮率的测定需要耗费较多的人工成本,效率较低。近年来,利用光谱的遥感技术发展迅速,并与棉花脱叶催熟相结合,通过地面光谱、低空光谱和高空光谱相结合的方式判断棉花的吐絮情况,进而建立施药决策模型,确定喷施棉花脱叶催熟剂的时间^[56]。

4.2 棉铃刀切法

棉铃刀切法(Cut boll technique, CBT)是利用锋利的刀片切开最上部可收获棉铃,观察其成熟度进而确定脱叶催熟剂施用时间的方法。研究表明,采用刀切法判断脱叶催熟剂时间时,90%以上棉铃成熟后即可进行脱叶^[35]。刀切法可以直观地评估棉铃的成熟度,但评估者的主观性对判断结果影响较大,刀片的锋利程度也会影响判断结果。此外,成熟棉铃一般难以用刀片进行横切,而且横切时可能会带出纤维;成熟棉铃种子的种皮是棕褐色的,而未成熟种子的种皮是白色的,在成熟的种子内部,可以清晰辨别出小叶片,而未成熟种子内部包含的是凝胶状物质^[35]。

4.3 裂铃以上主茎节数

裂铃以上主茎节数(Nodes above cracked boll, NACB)与吐絮率法相比,主要关注于棉株上部未裂开的棉铃。倒数第 5 果枝上的棉铃开裂时喷施脱叶催熟剂,产量降低不超过 1%,纤维品质也不受影响。一般认为 NACB 等于 4 时,喷施脱

叶催熟剂较为适宜,但对于密度较低或成熟偏晚的棉田,NACB 等于 3 时较为适宜^[57]。NACB 法关注未开裂的棉铃,可以估计棉铃的成熟度,可以确定损失的产量,测定 NACB 也较吐絮率耗时较短。但要精确应用这种方法,必须明确有效棉铃的最终开花日期,而且该法适用于第 1 果节着生棉铃的棉株和倒数第 1 果枝的棉铃是可收获的植株。而对于密度较低、上部铃较多,或营养枝比例较高,以及结铃中断的地块不适宜采用该法。

由于喷施棉花脱叶催熟剂时,棉铃通常不能达到完全成熟,为了明确最优的脱叶催熟剂喷施时间,Wright 等研究了不同时期使用脱叶催熟剂对棉花脱叶效果、产量和纤维品质的影响。研究发现,NACB=6~7 时使用脱叶催熟剂,相比于 NACB=4~5 时使用脱叶催熟剂,能够提前收获 7~10 d,且对棉花产量无显著影响,对棉花品质也无显著影响。这些数据表明,当晚熟作物或收获季节气候恶化时,早期的落叶可能有利于开始早收^[58]。

4.4 生理生长终止后积累的热量单位

生理生长终止点,一般是指的是倒数第 6 果枝第 1 果节开花(Nodes above white flower, NAWF)的时间点,也即是 NAWF=5,这个节位上的花也被称为最后 1 个有效花。研究表明,在最后 1 个有效铃群体的开花期给予充足生长条件对产量有显著性的贡献^[59-60]。阿肯色大学农业系(University of Arkansas Division of Agriculture)开发的棉花信息管理系统(Cotton management expert system software, COTMAN)已采用生理生长终止后积累的热量单位(Accumulated heat units after cutout, degree-days, DDs)来决定田间棉花的脱叶期,生产者在棉花生长季的中期即可计划安排脱叶催熟剂的施用和棉花的收获^[61-62]。

按照 COTMAN 的指导,当棉田的 NAWF=5 后获得超过 850 DDs 时,可以进行脱叶催熟剂的施用^[61],在美国阿肯色州中部和东北部进行的重复研究证实了获得 850 DDs 后可以获得较好的效果^[63]。但该法实际操作的限制性较大,由于不同地区环境变化和栽培措施的不同,要求的 DDs 可能大于也可能小于 472,因此在整个美国

棉花带的适用性并未得到证实^[64]。

4.5 开花后天数

Copur 等以棉株开花后天数为脱叶催熟剂喷施指标,发现 75 DAF(Days after flowering)和 90 DAF 后进行脱叶剂处理的籽棉产量较 60 DAF 后脱叶剂处理的高^[65]。过早喷脱叶催熟剂对籽棉产量有显著的负面影响。一种可能的解释是,推迟落叶允许更多的碳同化和光同化物的分配,以促进棉铃生长。90 DAF 进行脱叶剂处理时,气温下降严重,对脱叶剂药效的发挥影响较大,棉叶因低温而不能落叶,造成脱叶不彻底。因此,最佳的落叶时间为 75 DAF^[65]。

棉花生长发育后期,既要脱叶又要催熟,除了上述 5 种判断脱叶催熟剂喷施时间的因素之外,还需要协调棉铃发育和气温变化之间的关系;适宜的脱叶催熟剂喷施时间既能够促进棉株顶部棉铃基本发育成熟,又能满足脱叶所需的气温条件。Tian 等研究表明喷施脱叶催熟剂后,不同时间段的叶片脱落率存在显著差异,以喷施后(7.0±1.0) d 内的脱落率最高,而且影响叶片脱落率的温度因子因时间段不同亦有较大差异。在喷施脱叶催熟剂后(7.0±1.0) d 内是实现良好脱叶效果的关键时间段,要求该时间段的最高温度大于 27.2 °C、每日≥12 °C 有效积温大于 7.0 °C·日^[12,66]。

5 棉花脱叶催熟剂喷施技术

科学合理的棉花脱叶催熟剂喷施技术能够提高棉花的脱叶吐絮质量,进而降低籽棉中的碎叶杂质,对解决棉花品质问题具有重要意义^[67]。但在实际生产中,脱叶催熟剂的喷施往往受到多种因素的影响,其中施药器械和施药技术具有很重要的作用^[68]。从最早的人工喷施,到喷杆喷雾机喷施,再到近年来发展迅速的植保无人机喷施,棉花脱叶催熟剂的施药效率在不断的提高,对棉花的高产、稳产起到了重要的作用。

然而,由于新疆棉花种植密度大(行距为 66 cm+10 cm),导致棉花叶片交叉重叠严重,棉花脱叶催熟剂喷施过程中,会造成雾滴穿透性差,影响棉花冠层下部的脱叶催熟剂雾滴覆盖率,导致脱叶吐絮效果不佳。其次,脱叶催熟剂喷

施及药效的发挥还受到多种因素的影响,如棉花品种及生长状态,施药期间的气温和光照、空气湿度和降雨等因素都对脱叶吐絮效果有着较大的影响。因此对脱叶催熟剂和科学施用提出更高的要求,如何在多变复杂的环境条件下,通过施药技术来改善和提高脱叶吐絮效果是一个极大的挑战。

5.1 喷杆喷雾机喷施技术

喷杆式喷雾机是一种将喷头装载于横向喷杆或竖向喷杆上的一种植保机械,广泛应用于大田作物,具有作业效率高,喷洒效果优良等特点。应用于棉花脱叶催熟剂喷施的喷杆式喷雾机主要分为普通喷杆式喷雾机、吊杆式喷杆喷雾机和风幕式喷杆喷雾机^[69-70]。

普通喷杆式喷雾机具有喷射压力大、雾化性能好、穿透力强、农药利用率高、操作简单、使用安全等特点,广泛地应用于新疆棉田植保作业和脱叶催熟剂喷施作业中,具有良好的作业质量。然而,喷杆喷雾机主要采用纯液力雾化的方式从棉花冠层上方向下喷施;而新疆棉花种植密度大、棉花冠层稠密,药液雾滴无法穿透冠层到达棉花的中下部,导致药液雾滴分布不均匀,中下部叶片着药量少,影响棉花的脱叶和吐絮质量^[71]。

为了提高棉花中下部叶片的着药量,将喷头安装在吊杆上的吊杆式喷杆喷雾机逐渐取代了普通喷杆式喷雾机。吊杆式喷杆喷雾机将喷头设置于吊杆上,其作业时吊杆沉入冠层内部并能够强制回位,克服了喷头只位于植株上部的缺点,可以大幅提高棉花冠层中下部药液量的沉积,大幅提高了中下部叶片的脱落率和棉铃吐絮率^[72-73]。但由于棉花冠层内部枝叶稠密,不利于药液雾滴扩散,冠层内部的药液沉积分布均匀性较差,易造成脱叶不完全,影响棉花品质^[71]。

棉花冠层内部着药量与中下部的脱叶效果直接相关,为了提高脱叶催熟剂在棉花冠层内部的穿透和附着,风送气流扰动方式辅助喷施的风幕式喷杆喷雾机发展迅速。风幕式喷杆喷雾机出风口喷出的辅助气流可以增加雾滴动能、提高雾滴穿透力、减少雾滴飘移、改善雾滴雾化效果,能够显著提升棉花中上部冠层内的药液雾滴沉积分布的均匀性^[74]。但在棉花冠层稠密时,其风送气

流扰动效果不佳,药液雾滴仍难以穿透冠层到达棉花下部区域,棉花中下部叶片着药量不足,无法实现叶片有效的脱落和棉铃的吐絮。

在喷杆喷雾机相关参数的研究中,秦维彩等采用响应面法构建了以横喷杆高度、吊喷杆高度和吊喷夹角等参数为设计变量,以棉花冠层平均雾滴覆盖率最大为优化目标的施药机具喷洒参数优化近似模型,发现对棉花冠层雾滴覆盖率的影响大小依次为横喷杆离地高度、吊喷离地高度、吊喷夹角;最优喷洒参数组合为横喷杆离地高度 134 cm,吊喷离地高度 27.5 cm,吊喷夹角 21° ^[75]。这为喷杆式喷雾机喷施棉花脱叶催熟剂提供了重要的理论参考。

然而,与喷杆式喷雾机配套的压力喷头还存在“跑、冒、滴、漏”现象,雾化效果不理想、药液利用率低、药效差、农药利用率低,植株和土壤中有药液残留等问题^[73]。此外,无论是何种喷杆式喷雾机喷施棉花脱叶催熟剂,都需要大型拖拉机进行牵引,作业过程中会导致碾压棉株、撞击棉铃、拽拉棉枝、撞落已吐絮棉花等问题,提高了机械采收的损失率^[71]。

5.2 植保无人机的喷施技术

植保无人机以轻小型无人机为载体,由飞行平台、导航飞控和农药喷雾设备三部分组成,并引入全球定位系统(Global positioning system, GPS)、地理信息系统(Geographic information system, GIS)和载波相位差技术(Real-time kinematic, RTK),以“云服务、大数据”为技术背景,实现精准化植保作业。植保无人机施药技术在小麦、水稻、玉米、棉花、果树等作物上发展迅速^[76-79],极大地提高了航空植保作业的质量,可有效提高农药的利用率,实现农药的减施增效,既促进资源高效利用,又有利于农产品安全和环境保护^[80]。航空植保技术在棉花上的应用主要是防治病虫害和喷施棉花脱叶催熟剂等,大面积的棉花种植,推动了植保无人机的生产与应用,同时也日益凸显出植保无人机的作业效率高、效果好、不伤苗、节约成本的特点,逐渐受到人们的广泛关注和青睐^[81-82]。

采用植保无人机喷施棉花脱叶催熟剂发展迅速,目前国内针对植保无人机喷施棉花脱叶催

熟剂的研究主要集中在可行性、药剂筛选和相关作业参数上。2016年,为探明植保无人机喷施脱叶催熟剂对棉花的脱叶效果及棉花品质的影响,以及研究与筛选适合无人植保机喷洒棉花脱叶催熟剂的喷洒参数和施药技术,国家航空植保科技创新联盟组织了多家联盟单位在新疆石河子开展了4种无人植保机喷施棉花脱叶催熟剂的联合飞防试验。这是国内首次大规模进行无人机喷施棉花脱叶催熟剂联合测试活动,对于植保无人机的推广具有积极的促进意义^[83]。自此以后,植保无人机喷施棉花脱叶催熟剂迅速发展,与之配套的相关研究越来越多,越来越深入。

为了明确植保无人机喷施棉花脱叶催熟剂的减施增效和提高棉花品质,国内外科学家开展了较多的卓有成效的研究。王喆等和胡红岩等^[84-85]对适合植保无人机喷施作业的棉花脱叶剂种类进行了筛选。张坤朋等和Xin等^[86-87]研究表明植保无人机喷施棉花脱叶催熟剂能够实现药剂的高效利用,从而降低脱叶催熟剂的使用量。胡红岩等和文纯杰等^[88-89]分别对比研究了植保无人机和背负式手动喷雾器喷施、植保无人机和地面机车喷施棉花脱叶催熟剂的作用效果,都表明植保无人机具有比人工和地面机车更高的作业效率,且能保证棉花的脱叶吐絮效果。

脱叶催熟剂喷施的药液量与其雾滴在棉花叶片沉积和附着有着直接的关系。Xin等和蒙艳华等^[87,90]研究表明,植保无人机喷施棉花脱叶催熟剂的施药液量应当不低于 $15 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。近年来,航空喷雾助剂发展迅速,添加航空喷雾助剂后能够显著提高雾滴的沉积,进而提高药效。Xiao等和Meng等^[91-92]对航空喷雾助剂对棉花脱叶催熟剂药效的影响进行了研究,发现植物油类助剂对提高脱叶剂雾滴沉积和增加药效具有显著的效果。

脱叶催熟剂的喷施效果主要以脱叶率和吐絮率进行判定,这直接关系到籽棉采收的含杂率和品质。无论是何种喷施装备,为了实现脱叶催熟剂功效的最大化,都要具备作业效率高、施药效果好、操控简单易于推广等基本要素。

6 展望

棉花生产规模化、机械化、信息化、标准化是

棉花可持续发展的必由之路,机采棉栽培模式与技术的全面推广对实现棉花产业的提质增效具有重要意义。如何实现棉花的高效脱叶和吐絮,仍将是我们急需解决的关键性技术。棉花脱叶催熟剂的脱叶效果与棉花品种、栽培模式、水肥管理、脱叶催熟剂种类、脱叶催熟剂喷施时机与剂量、环境温湿度和喷施装备等都有着密切的联系。对脱叶催熟剂敏感的品种筛选、一膜三行(76 cm 等行距)的栽培模式及精准的水肥管理等技术相对比较成熟。但是,脱叶剂种类单一、剂型同质化严重,缺乏在低温条件下具有稳定脱叶效果的产品;同时,脱叶剂剂型与施药装备的适配性研究不足,特别是针对植保无人机喷施棉花脱叶剂没有针对性的制剂。此外,脱叶催熟剂喷施装备发展较慢,现有的喷施装备存在雾滴沉积效果弱、穿透性差的弊端,适合新疆高密度栽培模式下易于推广的大型智能化精准喷施装备缺乏;植保无人机虽然发展迅速,但机型种类多种多样,喷施质量参差不齐,实现统一的标准化作业难度较大。为了充分发挥机采棉的优势,提高脱叶催熟剂脱叶吐絮效果,针对我国棉花脱叶催熟剂现状及发展趋势,今后应加强以下几个方面的研究:

一是开展农艺农机相结合的棉花脱叶催熟剂机械化喷施关键技术研究。以优化棉田脱叶效果为目标,以棉花叶片对脱叶催熟剂的敏感性与棉花品种、种植模式、水肥管理、化调化控的机理性关系为基础,研究棉花产质量统一理论框架下棉田实际生产各个环节农艺技术措施与农机设备的优化调整方案,为提高棉田脱节催熟剂喷施效果提供基础。

二是开展棉花脱叶催熟剂的减施增效技术研究。对脱叶剂的有效成分、剂量和剂型进行系统优化,特别是研发飞防专用制剂,并结合绿色助剂的合理配伍,降低脱叶催熟剂的用量、提高脱叶效果,探索出适合机采棉的脱叶催熟剂减施增效技术。

三是棉花脱叶催熟剂与智能机械化喷施装备的适配技术研究。对棉花脱叶催熟剂喷施技术与喷施装备适配技术进行系统优化,形成与智能化机械施药装备适配的脱叶催熟剂喷施技术。

参考文献:

- [1] 田笑明,李雪源,吕新,等.新疆棉作理论与现代植棉技术[M].北京:科学出版社,2016.
Tian Xiaoming, Li Xueyaun, Lü Xin, et al. Xinjiang cotton theory and modern cotton technology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 喻树迅.中国棉花产业百年发展历程[J].农学学报,2018,8(1): 85-91.
Yu Shuxun. The development of cotton production in the recent hundred years of China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 85-91.
- [3] 农业部.农业部关于印发《全国种植业结构调整规划(2016-2020年)》的通知[EB/OL].(2016-04-28)[2020-02-12].
http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content_5068722.htm
Ministry of Agriculture. Notice of the ministry of agriculture on printing and distributing the national crop production structure adjustment plan (2016-2020)[EB/OL]. (2016-04-28) [2020-02-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content_5068722.htm
- [4] 喻树迅,张雷,冯文娟.棉花生产规模化、机械化、信息化、智能化和社会服务化发展战略研究[J].中国工程科学,2016,18(1): 137-148. <https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2016.01.016>
Yu Shuxun, Zhang Lei, Feng Wenjuan. Study on strategy of large scale, mechanization, informationization, intelligence and social services for cotton production[J]. Engineering Sciences, 2016, 18(1): 137-148.
- [5] 王莉,杜珉.中美棉花生产成本比较分析[J].农业展望,2006,2(7): 12-13. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3908.2006.07.003>
Wang Li, Du Min. Comparative analysis of cotton production costs between China and the United States[J]. Agricultural Outlook, 2006, 2(7): 12-13.
- [6] 张立杰,王志坚,彭利.基于统计分析的机采棉与手采棉品质比较[J].中国农机化学报,2013,34(6): 89-94. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5553.2013.06.023>
Zhang Lijie, Wang Zhijian, Peng Li. Quality comparison between mechanical harvesting cotton and hand harvesting cotton based on statistic analysis[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 89-94.
- [7] 新疆生产建设兵团统计局.新疆生产建设兵团2018年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].(2019-03-22)[2020-02-12]
<http://www.xjbt.gov.cn/c/2019-03-22/7228412.shtml>
Xinjiang Production and Construction Corps Statistics Bureau. Statistical bulletin of the national economic and social development of Xinjiang Production and Construction Corps in 2018 [EB/OL]. (2019-03-22) [2020-02-12]. <http://www.xjbt.gov.cn/c/2019-03-22/7228412.shtml>

- [8] 喻树迅, 周亚立, 何磊, 等. 新疆兵团棉花生产机械化的发展现状 & 前景[J]. 中国棉花, 2015, 42(8): 1-4, 7. <https://doi.org/10.11963/issn.1000-632X.201508001>
- Yu Shuxun, Zhou Yali, He Lei, et al. Development of mechanization of cotton production in the Xinjiang Production and Construction Crops[J]. China Cotton, 2015, 42(8): 1-4, 7.
- [9] 王晓婧, 李思嘉, 刘瑞显, 等. 棉花施用脱叶剂对相邻未着药叶片生理活性的影响. 棉花学报, 2019, 31 (1): 64-71. <https://doi.org/10.11963/1002-7807.wxjlr.20181228>
- Wang Xiaojing, Li Sijia, Liu Ruixian, et al. Effect of defoliant application on physiological characters of cotton leaf without defoliant[J]. Cotton Science, 2019, 31(1): 64-71.
- [10] 李林林, 白玉超, 刘楠楠, 等. 化学脱叶剂及催熟剂在农作物上的应用现状[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 132-135. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb17070054>
- Li Linlin, Bai Yuchao, Liu Nannan, et al. Chemical defoliant and ripener in crops: main application status. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(12):132-135.
- [11] Boman R, Kelley M, Keeling W, et al. 2009 High plains and northern rolling plains cotton harvest-aid guide[EB/OL]. (2009-09-12) [2020-02-12]. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=245245>
- [12] Tian J S, Zhang X Y, Yang Y L, et al. How to reduce cotton fiber damage in the Xinjiang, China[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 803-811. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.036>
- [13] 韩淑君, 鲁振勇, 桑玉红. 棉花的种植加工与储存 [J]. 农业与技术, 2014, 34(10): 101. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-962X.2014.10.087>
- Han Shujun, Lu Zhenyong, Sang Yuhong. Cotton processing and storage[J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(10): 101.
- [14] 国家统计局. 国家统计局关于 2019 年棉花产量的公告 [EB/OL]. (2019-12-17) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html
- National Bureau of Statistics. Announcement of the national bureau of statistics on cotton production in 2019 [EB/OL]. (2019-12-17) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html
- [15] 国家统计局. 国家统计局关于 2018 年棉花产量的公告 [EB/OL]. (2018-12-29) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html
- National Bureau of Statistics. Announcement of the national bureau of statistics on cotton production in 2018 [EB/OL]. (2018-12-29) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170.html
- [16] 国家统计局. 国家统计局关于 2017 年棉花产量的公告 [EB/OL]. (2017-12-18) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html
- National Bureau of Statistics. Announcement of the national bureau of statistics on cotton production in 2017 [EB/OL]. (2017-12-18) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201712/t20171218_1564142.html
- [17] 国家统计局. 国家统计局关于 2016 年棉花产量的公告 [EB/OL]. (2016-12-20) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html
- National Bureau of Statistics. Announcement of the national bureau of statistics on cotton production in 2016 [EB/OL]. (2016-12-20) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201612/t20161220_1443527.html
- [18] 国家统计局. 国家统计局关于 2015 年棉花产量的公告 [EB/OL]. (2015-12-18) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html
- National Bureau of Statistics. Announcement of the national bureau of statistics on cotton production in 2015 [EB/OL]. (2015-12-18) [2020-02-12]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201512/t20151218_1292351.html
- [19] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5-10. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.002>
- Wu Jianshe, Chen Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 5-10.
- [20] 秦波, 付路解. 2018 年上半年新疆将经济社会发展形势分析与全年展望[J]. 新疆社科论坛, 2018(4): 46-55.
- Qin Bo, Fu Lujie. Analysis of the economic and social development situation and the full-year outlook for the New Year in the first half of 2018[J]. Tribune of Social Sciences in Xinjiang, 2018(4): 46-55.
- [21] Morgan P W. Stimulation of ethylene evolution and abscission on cotton by 2-chloroethylphosphonic acid[J]. Plant Physiology, 1969, 44: 337-341. <https://doi.org/10.2307/4261652>
- [22] Agusté J, Merelo P, Cercós M, et al. Ethylene-induced differential gene expression during abscission of citrus leaves [J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59 (10): 2717-2733. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern138>
- [23] 高丽丽, 李淦, 康正华, 等. 脱叶剂对棉花抗氧化酶及内源激素的影响[J]. 农药学报, 2016, 18(4): 439-446. <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2016.0061>
- Gao Lili, Li Gan, Kang Zhenghua, et al. Effect of defoliant on antioxidative enzyme activity and endogenous hormone contents of cotton[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2016, 18(4): 439-446.
- [24] Mishra A, Khare S, Trivedi P K, et al. Effect of ethylene,

- 1-MCP, ABA and IAA on break strength, cellulase and polygalacturonase activities during cotton leaf abscission[J]. South African Journal of Botany, 2008, 74(2): 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2007.12.001>
- [25] 刘铮翔, 官春云. 作物化学催熟研究进展[J]. 作物研究, 2007, 21(5): 489-492.
- Liu Zhengxiang, Guan Chunyun. Advances in research on crop chemical ripening[J]. Crop Research, 2007, 21(5): 489-492.
- [26] 王文敏, 田景山, 张煦怡, 等. 棉花喷施脱叶剂对棉铃蔗糖代谢影响及与纤维比强度的关系[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(9): 1580-1586. <https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2016.09.002>
- Wang Wenmin, Tian Jingshan, Zhang Xuyi, et al. Effects of spraying defoliant on sucrose metabolism of cotton boll and its relationship with fiber strength[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(9): 1580-1586.
- [27] Suttle J C. Involvement of ethylene in the action of the cotton defoliant thidiazuron[J]. Plant Physiology, 1985, 78: 272-276. <https://doi.org/10.1104/pp.78.2.272>
- [28] Suttle J C, Hulstrand J F. Ethylene-induced leaf abscission in cotton seedlings. The physiological bases for age-dependent differences in sensitivity[J]. Plant Physiology, 1991, 95: 29-33. <https://doi.org/10.2307/4273337>
- [29] Xu J, Chen L, Sun H, et al. Crosstalk between cytokinin and ethylene signaling pathways regulates leaf abscission in cotton in response to chemical defoliants[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(5): 1525-1538. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz036>
- [30] Simpson M E, Marsh P B. Vascular anatomy of cotton carpels as revealed by digestion in ruminal fluid[J]. Crop Science, 1977, 17: 819-821. <https://doi.org/10.2135/cropsci1977.0011183X001700050037x>
- [31] 刘文燕, 孙惠珍, 周庆祺, 等. 棉铃开裂生理. I. 棉铃的开裂与内生乙烯释放[J]. 中国棉花, 1981, 8(1): 22-24.
- Liu Wenyan, Sun Huizhen, Zhou Qingqi, et al. Physiology of cotton bolls opening. I. opening and endogenous ethylene release of cotton bolls[J]. China Cotton, 1981, 8(1): 22-24
- [32] 韩碧文, 徐楚年, 何钟佩, 等. 乙烯利催熟棉铃机理的探讨 1. 乙烯利催熟对棉铃内部过氧化物酶的影响[J]. 北京农业大学学报, 1981, 14(2): 47-54.
- Han Biwen, Xu Chunian, He Zhongpei, et al. Discussion on the mechanism of ethephon ripening cotton bolls 1. Effect of ethephon ripening on peroxidase in cotton boll[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1981, 14(2): 47-54.
- [33] Slosser J E, Cole C L, Boring E P, et al. Thrips species associated with cotton in the northern Texas Rolling Plains[J]. The Southwestern Entomologist, 2005, 30(1): 1-7. <https://doi.org/10.1111/j.0307-6962.2005.00441.x>
- [34] 王永山, 王凤良, 沈田辉, 等. 百草枯和乙烯利混配对棉花催熟效果好[J]. 农药, 1996, 35(10): 45-46. <https://doi.org/10.16820/j.cnki.1006-0413.1996.10.019>
- Wang Yongshan, Wang Fengliang, Shen Tianhui, et al. The effect on accelerating the ripening of cotton by mixture of paraquat and ethephon[J]. Pesticides, 1996, (10): 45-46.
- [35] Supak J R, Snipes E S. Cotton harvest management: use and influence of harvest aids[M]. Memphis, TN, USA: Cotton Foundation, 2001.
- [36] 农业部、工业和信息化部、国家质量监督检验检疫总局公告第 1745 号[EB/OL]. (2012-04-05) [2020-02-12]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201204/t20120427_2613538.htm
- Ministry of Agriculture, Ministry of Industry and Information Technology, State Administration of quality supervision. Inspection and Quarantine Announcement No. 1745 [EB/OL]. (2012-04-05) [2020-02-12]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201204/t20120427_2613538.htm
- [37] Pimentel D. Encyclopedia of pest management[M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [38] Suttle J C. Involvement of ethylene in the action of the cotton defoliant thidiazuron[J]. Plant Physiology, 1985, 78(2): 272-276. <https://doi.org/10.1104/pp.78.2.272>
- [39] Suttle J C. Disruption of the polar auxin transport system in cotton seedlings following treatment with the defoliant thidiazuron[J]. Plant Physiology, 1988, 86(1): 241-245. <https://doi.org/10.2307/4271114>
- [40] Grossmann, K. Induction of leaf abscission in cotton is a common effect of urea- and adenine-type cytokinins[J]. Plant Physiology, 1991, 95(1): 234-237. <https://doi.org/10.1104/pp.95.1.234>
- [41] 李艺, 杜明伟, 田晓莉, 等. 棉花叶片脱落过程中离层细胞微管的变化研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(1): 1-7. <https://doi.org/10.13880/j.cnki.65-1174/n.2016.01.001>
- Li Yi, Du Mingwei, Tian Xiaoli, et al. Study on the changes of microtubule cytoskeleton of abscission zone during leaf abscission in cotton[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2016, 34(1): 1-7.
- [42] Palma P, Köck-Schulmeyer M, Alvarenga P, et al. Occurrence and potential risk of currently used pesticides in sediments of the Alqueva reservoir (Guadiana Basin)[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(10): 7665-7675. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4390-1>
- [43] Ccancapa A, Masiá A, Navarro-Ortega A, et al. Pesticides in the ebro river basin: occurrence and risk assessment[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.059>
- [44] 高丽丽, 李淦, 康正华, 等. 脱叶剂对棉花叶片叶绿素荧光动

- 力学参数的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(4): 345-352. <https://doi.org/10.11963/issn.1002-7807.201604005>
- Gao Lili, Li Gan, Kang Zhenghua, et al. Effect of defoliant on chlorophyll fluorescence of cotton leaves[J]. Cotton Science, 2016, 28(4): 345-352.
- [45] 田晓莉, 段留生, 李召虎, 等. 棉花化学催熟与脱叶的生理基础[J]. 植物生理学报, 2004, 40(6): 758-762. <https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2004.06.037>
- Tian Xiaoli, Duan Liusheng, Li Zhaochu, et al. Physiological bases of chemical accelerated boll maturation and defoliation in cotton[J]. Plant Physiology Journal, 2004, 40(6): 758-762.
- [46] Du M W, Li Y, Tian X L, et al. The phytotoxin coronatine induces abscission-related gene expression and boll ripening during defoliation of cotton[J]. PLoS One, 2014, 9(5): e97652. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097652>
- [47] Gwathmey C O, Hayes R M. Harvest-aid interactions under different temperature regimes in field-grown cotton[J]. Journal of Cotton Science, 1997, 1(1): 1-28.
- [48] Byrd S A, Collins G D, Edmisten K L, et al. Leaf pubescence and defoliation strategy influence on cotton defoliation and fiber quality[J]. Journal of Cotton Science, 2016, 20(4): 280-293.
- [49] Warrick B E. Overview of PPO inhibitor cotton harvest aids in West Central Texas[C]. San Antonio: Beltwide Cotton Conferences, 2006.
- [50] Wright S D, Hutmacher R B, Shrestha A, et al. Impact of early defoliation on California pima cotton boll opening, lint yield, and quality[J]. Journal of Crop Improvement, 2015, 29(5): 528-541. <https://doi.org/10.1080/15427528.2015.1056399>
- [51] Singh K, Rathore P, Gumber R K. Impact of harvest-aid defoliants on yield of American cotton and their monetary evaluation[J]. International Journal of Plant Research, 2015, 28(2): 41-46. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2015.00035.X>
- [52] Bange M P, Long R L. Optimizing timing of chemical harvest aid application in cotton by predicting its influence on fiber quality[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(2): 390-395. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0293>
- [53] Karademir E, Karademir C, Basbag S. Determination the effect of defoliation timing on cotton yield and quality[J]. Journal of Central European Agriculture, 2007, 8(3): 357-362.
- [54] Bange M P, Long R L. Impact of harvest aid timing and machine spindle harvesting on neps in upland cotton[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(6): 651-658. <https://doi.org/10.1177/0040517512461704>
- [55] Faircloth J C, Edmisten K L, Wells R, et al. Timing defoliation applications for maximum yields and optimum quality in cotton containing a fruiting gap[J]. Crop Science, 2004, 44(1): 158-164. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0158>
- [56] Yang C H, Greenberg S M, Everitt J H, et al. Assessing cotton defoliation, regrowth control and root rot infection using remote sensing technology[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2011, 4(4): 1-11. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.04.001-011>
- [57] Faircloth J C, Specialist P, Wilson H. Cotton harvest aid selection and application timing[J]. American Journal of Orthopsychiatry, 2009, 83: 143-144.
- [58] Wright S D, Hutmacher R B, Banuelos G, et al. Impact of pima defoliation timings on lint yield and quality[J]. Journal of Cotton Science, 2014, 18: 48-58.
- [59] Robertson W C, Cordell M L, Groves F E. Defoliation timing based on heat units beyond cutout (1) [C]. New Orleans: Beltwide Cotton Conferences, January 9-12, 2007.
- [60] Bynum J B, Cothren J T. Indicators of last effective boll population and harvest aid timing in cotton[J]. Agronomy Journal, 2008, 100 (4): 1106-1111. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0134>
- [61] Cochran M J, Tugwell N P, Bourland F M, et al. Cotman expert system version 5.0[M]. Fayetteville: University of Arkansas, 1998.
- [62] Clay P A, Young K M, Taylor E R. Effect of heat unit accumulation on cotton defoliation, lint yield and fiber quality[C]. Tucson: University of Arizona, 2006.
- [63] Benson N R, Robertson W C, Bourland F M, et al. Timing defoliation based on heat units accumulated past cutout[C]. San Antonio: Beltwide Cotton Conferences, 4-8 January 2000.
- [64] Bynum J B, Cothren J T, Lemon R G, et al. Nodes above white flower and heat units as indicators of harvest aid timing[J]. College Station: Texas A & M University, 2005, 144 (1-6): 941. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(01\)59861-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)59861-X)
- [65] Copur O, Demirel U, Polat R, et al. Effect of different defoliants and application times on the yield and quality components of cotton in semi-arid conditions[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9 (14): 2095-2100. <https://doi.org/10.4314/ajb.v9i14>
- [66] 田景山, 张煦怡, 张丽娜, 等. 新疆机采棉花实现叶片快速脱落需要的温度条件[J]. 作物学报, 2019, 45(4): 613-620. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2019.84068>
- Tian Jingshan, Zhang xuyi, Zhang Lina, et al. Temperatures of promoting rapid leaf abscission of cotton in Xinjiang region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(4): 613-620.
- [67] 杜明伟. 黄淮海棉区适宜机采的棉花品种筛选及收获辅助技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- Du Mingwei. Cotton cultivars suitable for mechanical harvesting and harvest aids application technology in Huanghuaihai cotton region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012.
- [68] 邵蓉. 棉花分行冠内冠上组合风送式喷杆喷雾机的设计与试

- 验[D]. 江苏镇江:江苏大学, 2016.
- Shao Jing. Design and experiment of an air-assisted cotton boom sprayer which separating row and spraying inside and upper canopy[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2016.
- [69] 刘刚, 张晓辉, 范国强, 等. 棉花施药机械的应用现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2014(4): 225-228. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2014.04.054>
- Liu Gang, Zhang Xiaohui, Fan Guoqiang, et al. Application status and development trend of cotton spraying machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(4): 225-228.
- [70] 贾卫东, 张磊江, 燕明德, 等. 喷杆喷雾机研究现状和发展趋势[J]. 中国农机化报, 2013, 34(4): 19-22. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5553.2013.04.006>
- Jia Weidong, Zhang Leijiang, Yan Mingde, et al. Current situation and development trend of boom sprayer[J]. J Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 19-22.
- [71] 端景波, 张晓辉, 范国强, 等. 棉花脱叶剂喷施机械的研究与应用[J]. 中国棉花, 2013, 40(8): 10-11.
- Duan Jingbo, Zhang Xiaohui, Fan Guoqiang, et al. Research on cotton defoliant spraying machinery and its application[J]. China Cotton, 2013, 40(8): 10-11.
- [72] 曹阳, 严玉萍, 冯振秀, 等. 棉花机械采收脱叶剂应用试验及提高脱叶效果途径分析[J]. 作物杂志, 2012(4): 144-147. <https://doi.org/10.16035/j.issn.1001-7283.2012.04.034>
- Cao Yang, Yan Yuping, Feng Zhenxiu, et al. Application of defoliant in cotton mechanical harvesting and analysis of ways to improve defoliation effect[J]. Crops, 2012(4): 144-147.
- [73] 杨庆璐, 安军鹏, 范国强, 等. 小型自走式高地隙棉田喷雾机的设计及试验[J]. 中国农机化学报, 2017(11): 42-46. <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2017.11.008>
- Yang Qinglu, An Junpeng, Fan Guoqiang, et al. Design and experiment of small self-propelled clearance cotton sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017(11): 42-46.
- [74] Jensen P K. Increasing efficacy of graminicides with a forward angled spray[J]. Crop Protection, 2012, 32(32): 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.10.017>
- [75] 秦维彩, 薛新宇, 崔龙飞, 等. 棉花脱叶剂施药机喷雾参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(4): 25-32. <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2017.04.006>
- Qin Weicai, Xue Xinyu, Cui Feilong, et al. Optimization and test for spraying parameters of cotton defoliant sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(4): 25-32.
- [76] 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业技术与装备, 2014, 29(5): 19-25. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.24.001>
- Zhou Zhiyan, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. China agricultural aviation plant protection industry technology innovation development strategy [J]. Agricultural Technology and Equipment, 2014, 29(5): 19-25.
- [77] 何雄奎. 我国植保无人机喷雾系统与施药技术[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 33-38. <https://doi.org/10.16815/j.cnki.11-5436/s.2018.09.006>
- He Xiongkui. Plant protection UAV spray system and application technology in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(9): 33-38.
- [78] 袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 等. 植保无人机飞机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 152-158. <https://doi.org/10.16688/j.zubh.2018307>
- Yuan Huizhu, Xue Xinyu, Yan Xiaojing, et al. Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection[J]. Plant Protection, 2018, 44(5): 152-158.
- [79] 兰玉彬, 王国宾. 中国植保无人机的行业发展概况和发展前景[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 17-27. <https://doi.org/10.16815/j.cnki.11-5436/s.2018.09.004>
- Lan Yubin, Wang Guobin. The development situation and prospect of China's plant protection UAV industry[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(9): 17-27.
- [80] 郭永旺, 袁会珠, 何雄奎, 等. 我国农业航空植保发展概况与前景分析[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 79-82. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6820.2014.10.021>
- Guo Yongwang, Yuan Huizhu, He Xiongkui, et al. Analysis on the development and prospect of agricultural aviation plant protection in China[J]. China Plant Protection, 2014, 34(10): 79-82.
- [81] 沙帅帅, 王喆, 肖海兵, 等. P20 植保无人机作业参数优化及其施药对棉蚜防效评价[J]. 中国棉花, 2018, 45(1): 6-8. <https://doi.org/10.11963/1000-632X.sssw1.20171211>
- Sha Shuaishuai, Wang Zhe, Xiao Haibing, et al. Optimizing operation parameters of an unmanned aerial vehicle P20 and Its application effects for spaying insecticides to control cotton aphid[J]. China Cotton, 2018, 45(1): 6-8.
- [82] Lou Z X, Xin F, Han X Q, et al. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites[J]. Agronomy, 2018, 8(9): 187. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090187>
- [83] 马艳, 任相亮, 蒙艳华, 等. 无人植保机在新疆棉田喷施脱叶剂测试结果评述[J]. 中国棉花, 2016, 43(12): 16-20. <https://doi.org/10.11963/issn.1000-632X.201612004>
- Ma Yan, Ren Xiangliang, Meng Yanhua, et al. Review on result of spraying defoliant by unmanned aerial vehicles in cotton field of Xinjiang[J]. China Cotton, 2016, 43(12): 16-20.
- [84] 王喆, 冯宏祖, 王兰, 等. MG-1S 型无人机喷施不同棉花脱叶剂的田间效果对比[J]. 中国棉花, 2018, 45(1): 27-28, 46. <https://doi.org/10.11963/1000-632X.wzw1.2018011>
- Wang Zhe, Feng Hongzu, Wang Lan, et al. Effects comparison

- of different defoliant applied by Dajiang MG-1S unmanned air vehicle in cotton field[J]. *China Cotton*, 2018, 45(1): 27-28, 46.
- [85] 胡红岩, 任相亮, 马小艳, 等. 无人机喷施噻苯隆·敌草隆对棉花的脱叶催熟效果[J]. *中国棉花*, 2018, 45(6): 21-23. <https://doi.org/10.11963/1000-632X.hhmy.20180612>
- Hu Hongyan, Ren Xiangliang, Ma Xiaoyan, et al. Effects of thidiazuron-diuron applied by unmanned air vehicle on cotton [J]. *China Cotton*, 2018, 45(6): 21-23.
- [86] 张坤朋, 邓喜军, 王朝阳. 无人机喷洒不同棉花催熟、脱叶复合药剂效果研究[J]. *农药*, 2017, 56(8): 619-623.
- Zhang Kunpeng, Deng Xijun, Wang Chaoyang. Effects of different composite chemicals on cotton ripening and defoliation sprayed by UAV[J]. *Agrochemicals*, 2017, 56(8): 619-623.
- [87] Xin F, Zhao J, Zhou Y T, et al. Effects of dosage and spraying volume on cotton defoliant efficacy: a case study based on application of unmanned aerial vehicles[J]. *Agronomy*, 2018, 8(6): 85. <https://doi.org/10.3390/agronomy8060085>
- [88] 胡红岩, 任相亮, 马小艳, 等. 无人机喷施与人工喷施棉花脱叶剂效果对比[J]. *中国棉花*, 2018, 45(7): 13-15, 19. <https://doi.org/10.11963/1000-632X.hhmy.2018071>
- Hu Hongyan, Ren Xiangliang, Ma Xiaoyan, et al. Comparison of defoliation effects between unmanned air vehicle spraying and artificial spraying in cotton field[J]. *China Cotton*, 2018, 45(7): 13-15, 19.
- [89] 文纯杰, 杨炬仁, 韩军, 等. 植保无人机与机动车喷施棉花脱叶剂效果对比[J]. *农村科技*, 2018(3): 26-27.
- Wen Chunjie, Yang Juren, Han Jun, et al. Comparison of effects of plant protection drones and motor vehicle spraying defoliant [J]. *Rural Science & Technology*, 2018(3): 26-27.
- [90] 蒙艳华, 兰玉彬, 梁自静, 等. 无人机施药液量对棉花脱叶效果的影响[J]. *中国棉花*, 2019, 46(6): 10-15. <https://doi.org/10.11963/1000-632X.myhlyb.20190611>
- Meng Yanhua, Lan Yubin, Liang Zijing, et al. Impact of spraying volume on defoliation efficacy by unmanned aerial vehicle [J]. *China Cotton*, 2019, 46(6): 10-15.
- [91] Xiao Q G, Xin F, Lou Z X, et al. Effect of aviation spray adjuvants on defoliant droplet deposition and cotton defoliation efficacy sprayed by unmanned aerial vehicles [J]. *Agronomy*, 2019, 9: 217. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050217>
- [92] Meng Y H, Song J L, Lan Y B, et al. Harvest aids efficacy applied by unmanned aerial vehicles on cotton crop[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 140: 111645. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111645>
-