

岳耀杰, 栗健, 胡国芳, 等. 棉花雹灾脆弱性试验研究的装备与方法[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 102–107. [Yue Yaojie, Li Jian, Hu Guofang, et al. Equipment and methodology for experimental research of cotton vulnerability to hail hazard[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 102–107.]

棉花雹灾脆弱性试验研究的装备与方法^{*}

岳耀杰^{1,2}, 栗健¹, 胡国芳¹, 周兰¹, 张峰^{1,2}, 张化², 赵金涛³

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 廊坊师范学院, 河北 廊坊 065000)

摘要:从棉花雹灾脆弱性试验研究的角度, 研发一套降雹模拟装置和棉花雹灾田间试验方法。基于棉花雹灾脆弱性试验研究科学原理, 提出了降雹模拟装置的基本结构与功能, 阐明了棉花雹灾田间试验方法的基本步骤, 并通过田间试验初步验证了该套装置与方法的可靠性和适用性。结果表明: 该装置能够发射直径为 0.5~10.0 cm 的冰球, 其射向可以在垂向 0°~120°和水平 0°~180°范围内调节, 可使冰球发射速度达到 20.0~45.0 m/s, 可稳定控制冰球发射速度为 23.0~25.0 m/s, 从而满足模拟降雹的需求。人工模拟棉田降雹灾害的试验方法包括 4 步, 关键是要以棉花生长期、冰雹大小和降雹密度为变量设计雹灾情景, 以及对降雹前后棉花的植株性状进行观测, 从而获取不同致灾强度下棉花脆弱性指标参数。进行了 5 种冰球直径和 7 种降雹密度共 35 种降雹强度情景的验证研究, 对冰雹直径和落叶率关系分析的结果初步显示, 该试验装备与方法可以为揭示棉花雹灾脆弱性的规律提供可靠的试验数据。和测雹板实地监测, 遥感反演技术, 以及利用割草机、喷水器、人工等手段去除作物叶片等田间试验方法相比, 该装置与方法具有较大优势, 试验数据能够满足雹灾棉花脆弱性研究的需求。其不足之处主要是自动化和信息化程度还比较低, 加以改进将可更好满足其他雹灾承灾体脆弱性研究的需求。

关键词:棉花; 雹灾; 承灾体; 脆弱性; 试验研究; 降雹; 模拟装置; 适用性

中图分类号: S42; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)02-0102-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.020

脆弱性为承灾体对破坏和伤害的敏感性^[1], 是灾害科学研究的核心和热点之一^[2-3]。众多灾害研究论著和学者均强调脆弱性的重要地位, 甚至强调应以其为中心或立论基础地位^[4]。但如何定量评估承灾体的脆弱性, 是防灾减灾和风险管理需解决的首要科学难题。

冰雹灾害(以下简称雹灾)是由冰雹降落在承灾体上而导致损失的一种突发灾害现象, 每年给中国带来很大的损失^[1,5-7]。目前, 雹灾承灾体脆弱性研究方法主要有测雹板监测^[8-11], 遥感反演^[12-15]和田间试验^[16-20]。但测雹板主要用于特定的试验研究基地; 遥感反演方法仅能对有保险记录区域的承灾体脆弱性进行研究^[21]。由于雹灾突发性和局地性强, 很难获得长时间序列降雹与损失数据, 故雹灾模拟试验是承灾体脆弱性研究的常用方法。但当前的试验模拟方法, 试验装置均较简单, 且多数无法提供降雹因子参数^[21]。如 Lane^[16]使用碎冰发射设备模拟棉花雹灾, 但没有报道该设备设计原理与工作参数, 也未说明使用效果。Seino^[17]使用一种类似漏斗的简易装置和石

头模拟降雹对作物的影响。还有学者使用割草机^[18]、喷水器^[19]或人工剪除^[20]来去除作物叶片研究降雹导致的落叶率与作物雹灾损失之间的关系。由于所用设备结构与功能的限制, 上述试验的降雹情景和模拟效果与实际降雹相差甚远。因此, 雹灾承灾体脆弱性试验研究的装备和方法尚需改进。

中国的棉花产量占世界总产量的 1/5 以上, 但主产区降雹主要集中在 4~9 月, 正值棉花生育期内^[22]。所以, 研究棉花雹灾脆弱性对保障中国棉花及相关产业可持续发展意义重大, 但目前研究还较少。1987 年, 中国学者通过人工模拟雹灾对不同生育期的棉花进行了破坏性试验^[23]。1990 年, 进一步开展了人工投掷石子砸击棉株试验^[24]。但上述试验均没有使用专业设备, 而是人工去除棉花叶片或投掷石子来代替降雹, 其能在多大程度上反映自然降雹导致的灾害结果, 还值得商榷。总之, 还没有一套可以满足棉花雹灾脆弱性试验研究的装备和方法体系, 显然不能适应灾害学对承灾体脆弱性定量评估的科学需求及棉花防雹减

^{*} 收稿日期: 2014-10-09 修回日期: 2014-11-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271515); 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学)开放基金资助项目(2009-KF-06); 国家重点基础研究发展规划项目(2012CB955403)

作者简介: 岳耀杰(1975-), 男, 山东嘉祥县人, 讲师, 主要从事生态安全和自然灾害研究. E-mail: yjyue@bnu.edu.cn

通讯作者: 张峰(1980-), 男, 山东肥城人, 工程师, 主要从事科研装备试制研究. E-mail: zhangfeng@bnu.edu.cn

灾的现实需求。

为此, 基于棉花雹灾成灾原理, 本文旨在研发一种人工控制雹灾模拟试验装置和棉花雹灾田间试验方法, 希望该试验装备与方法可以为相关研究和学者提供一定借鉴。

1 棉花雹灾脆弱性试验研究原理

根据灾害系统理论^[25-27]和降雹成灾的基本过程, 可以将雹灾系统划分为孕灾环境(强对流天气过程、下垫面状态)、致灾因子(降雹)和承灾体(农作物等)三部分。不稳定的天气系统是雹灾孕育的大环境, 降雹是直接致灾因子, 其危险性和农作物等承灾体的脆弱性综合作用导致损失(灾情), 而雹灾承灾体脆弱性则由致灾因子而被揭露^[21]。就棉花雹灾脆弱性评估而言, 本质是要刻画出棉花对降雹打击的敏感性, 可通过降雹危险度与相应棉花损失的关系模型来表达。

因此, 棉花雹灾脆弱性评估, 重点是厘清降雹因子与棉花受损特征之间的关系。降雹因子是指描述降雹致灾强度的要素, 一般包括冰雹直径、单位面积上冰雹个数(降雹密度)、降雹持续时间、冰雹落地速度等。棉花受损特征包括两方面: 一是降雹导致的棉株直接损伤, 包括叶片破损脱落、茎枝折断脱落、花蕾棉铃破损脱落; 二是棉花因损伤导致的产量损失。而棉花雹灾脆弱性试验的核心目标, 就是获取上述重要参数。

为此, 棉花雹灾脆弱性试验研究的装备与方法要能够模拟出降雹致灾的过程与结果, 提供降雹致灾强度参数和棉花因雹损失参数。要实现上述科学目标, 在试验装备与方法设计上, 要突出2点内容:

(1) 降雹模拟设备要能够模拟出类似自然雹灾的天气过程。通常这种天气短而急促, 降雹伴随强风给棉花带来损害。所以, 该设备应具有以下功能与特点: 能够产生强风; 能够发射不同大小的人造冰雹(冰球), 并且使其达到足够大的速度; 能够自行或被牵引进入农田, 在试验中能够自行或被牵引移动; 至少能在2个方向调节发射角度, 以提高打击的准确度。

(2) 田间试验方法要基于降雹致灾强度变化和棉花暴露性、恢复性和脆弱性的时间差异制订雹灾情景进行试验。致灾因子不同, 即冰雹大小和降雹密度等降雹参数不同, 也会导致棉花雹灾脆弱性的表达形式不同。

棉花在不同的生育期由于本身生理特征差异, 其对降雹打击的敏感性不同、暴露度不同、恢复力不同, 导致脆弱性也不同。同时, 为全面评估棉花雹灾脆弱性, 需要在试验设计中体现上述特点, 从降雹情景设计入手, 结合棉花生长发育过程来实施模拟雹灾试验。那么通过田间试验研究棉花受冰雹影响所表现出来的损失程度随降雹强度及棉花生育期的变化规律, 并建立冰雹致灾强度与棉花雹灾损失之间的定量关系, 就可以表达棉花雹灾脆弱性。根据上述原理, 棉花雹灾脆弱性试验研究的技术路线可用图1来表达。

进一步地, 基于试验数据, 全面分析降雹与棉花损害的关系, 进而确定这些损害对产量的影响机制, 实现对棉花雹灾脆弱性的科学分析。

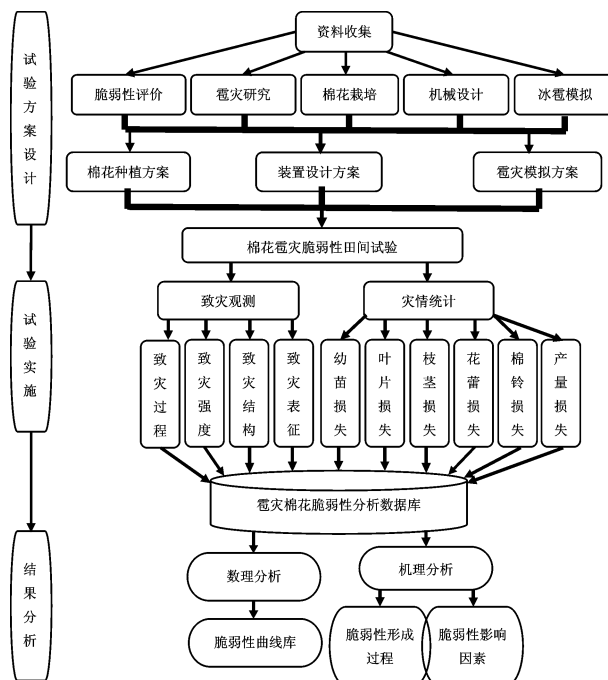


图1 棉花雹灾脆弱性试验研究技术路线

2 试验装备与方法设计

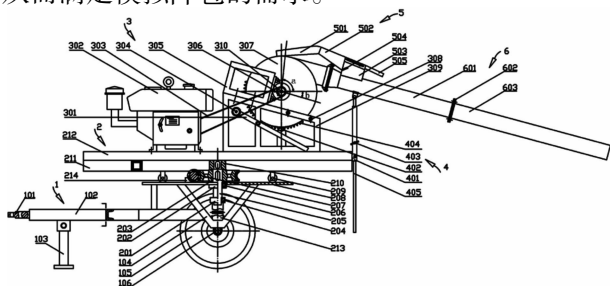
2.1 降雹模拟装置设计

降雹是棉花成灾的致灾因子, 根据棉花雹灾脆弱性试验研究的基本原理, 以及对降雹模拟装备基本功能的要求, 研发出一种模拟降雹的装置^[25]。它包括移动牵引部分、水平旋转部分、角度调节部分、产风部分、进冰部分、发射部分。产风部分联接发射部分, 发射部分联接进冰部分; 产风部分、角度调节部分设置在水平旋转部分上; 水平旋转部分设置在移动牵引部分上。其工作原理是利用内燃机驱动离心风机产生高压风, 在输风管中将冰球加速、输送, 最终以一定的速度射向承灾体。

降雹模拟装置设计图如图2所示。移动牵引部分1的框架102底面设置有可折叠的支架103, 框架的头端联接有牵引杆101, 尾端联接有轮架104, 轮架上安装有轮轴106及车轮105。水平旋转部分2的传动轴205顶部与试验平台212固联, 下部设置有轴承套201, 其内装有圆锥滚子轴承204, 下轴承套设置在轮轴支撑架213上, 轮轴支撑架固联在移动牵引部分1的轮架104上, 传动轴205上还设置有上轴承套202, 其内装有向心球轴承206, 上轴承套设置在环形的钢板208中心孔内, 环形钢板固联在移动牵引部分的轮架及框架上, 传动轴上部键联接有涡轮203及传动轴套210, 涡轮啮合蜗杆207, 蜗杆设置在蜗杆轴架214上, 蜗杆轴架设置在环形钢板上; 传动轴套外侧固联有方管211, 方管上面固联有试验平台, 方管底面固联有支撑轮209, 且支撑轮位于环形钢板上。产风部分3的柴油机302、钢架309安装在水平旋转部分的试验平台上, 柴油机下面装有弹簧垫圈, 钢架的上平面为斜面, 联接有斜置的风机架305, 风机架上安装有风机307, 风机轴310上安装有传动带轮306, 柴油机的输出轴通过其轴上安装的传动带轮及三角传动带303联接风机轴上的传动带轮, 三角

传动带上设置有张紧轮 304, 钢架上铰接有张紧轮调节杆 301, 张紧轮调节杆锁固在钢架上设置的定位销 308 上。角度调节部分 4 的支撑杆 401 内设置有升降杆 405, 升降杆上端铰接在发射部分 6 的发射管 601 下面, 支撑杆下端铰接在水平旋转部分的试验平台侧面, 支撑杆上设置有锁紧扳手 403; 齿轮轴 402 安装在齿轮轴架 406 上部的轴承座 408 内, 轴承座两侧设置有手柄 407, 齿条 404 安装在风机 307 壳体的外侧, 齿条为圆弧形, 齿条与齿轮轴 402 啮合。进冰部分 5 的置冰凹槽 501 位于风机之上, 方形置冰凹槽后部衔接滑落凹槽 502, 滑落凹槽后部设置有冰球出口 503, 冰球出口上方设置有滑盖 505 冰球出口侧壁上设置有销轴 504, 置冰凹槽、滑落凹槽通过销轴与冰球出口活动联接, 冰球出口焊接在发射部分的发射管上。发射部分的发射管一端为方口, 通过螺栓与产风部分的风机方口联接, 另一端为圆口, 通过法兰盘 602 与圆管 603 联接; 发射管上设置有方形开口 604 与进冰部分的冰球出口相对应。

根据上述结构与功能原理制造出了人工控制雹灾模拟试验装置, 使用的离心风机流量 $1\ 174 \sim 2\ 062\ \text{m}^3/\text{h}$, 全压 $4\ 603 \sim 4\ 447\ \text{Pa}$, 标定转速 $2\ 900\ \text{r}/\text{min}$, 额定功率 $4\ \text{kW}$ 。为之匹配的内燃机最大功率 $16.2\ \text{kW}$, 标定转速 $2\ 200\ \text{r}/\text{min}$ 。输风管长 $2.5\ \text{m}$, 直径 $15\ \text{cm}$, 可发射直径为 $0.5 \sim 10.0\ \text{cm}$ 的冰球, 其射向可以在垂向 $0 \sim 120^\circ$ 和水平 $0 \sim 180^\circ$ 范围内调节, 确保冰球恰好打击到指定范围内的棉花植株。经测试, 发动机怠速 $800\ \text{r}/\text{min}$ 时, 输风管出口风速 $22.0\ \text{m}/\text{s}$, 最大转速 $2\ 200\ \text{r}/\text{min}$ 时风速为 $48.0\ \text{m}/\text{s}$ 。采用录相法测试, 可使冰球发射速度达到 $20.0 \sim 45.0\ \text{m}/\text{s}$ 。根据《地面用晶体硅光伏组件—设计鉴定和定型》国家标准^[26], 试验中设定冰球发射速度为 $23.0 \sim 25.0\ \text{m}/\text{s}$ 。利用数显式转速表(测试范围 $5 \sim 99\ 999\ \text{r}/\text{min}$, 分辨率 $0.1\ \text{r}/\text{min}$)将内燃机转速控制在 $1\ 050 \sim 1\ 150\ \text{r}/\text{min}$ 时, 可稳定控制冰球发射速度为 $23.0 \sim 25.0\ \text{m}/\text{s}$, 从而满足模拟降雹的需求。



图中各部分名称:

1. 移动牵引部分: 101 - 牵引杆; 102 - 框架; 103 - 支架; 104 - 轮架; 105 - 车轮; 106 - 轮轴。
2. 水平旋转部分: 201 - 下轴承套; 202 - 上轴承套; 203 - 蜗轮; 204 - 圆锥滚子轴承; 205 - 传动轴; 206 - 向心球轴承; 207 - 蜗杆; 208 - 环形钢板; 209 - 支撑轮; 210 - 传动轴套; 211 - 方管; 212 - 试验平台; 213 - 轮轴支撑架; 214 - 蜗杆轴架。
3. 产风部分: 301 - 张紧轮调节杆; 302 - 柴油机; 303 - 三角传动带; 304 - 张紧轮; 305 - 风机架; 306 - 传动带轮; 307 - 风机; 308 - 定位销; 309 - 钢架; 310 - 风机轴。
4. 角度调节部分: 401 - 支撑杆; 402 - 齿轮轴; 403 - 锁紧扳手; 404 - 齿条; 405 - 升降杆; 406 - 齿轮轴架; 407 - 手柄。
5. 进冰部分: 501 - 置冰凹槽; 502 - 滑落凹槽; 503 - 冰球出口; 504 - 销轴; 505 - 滑盖。
6. 发射部分: 601 - 发射管; 602 - 法兰盘; 603 - 圆管; 604 - 方形开口。

图2 人工控制雹灾模拟试验装置设计图

经测试, 该装置具有调节方向、角度、高度等多种功能, 可人工模拟不同冰雹直径、不同降雹密度和不同降雹时长的降雹情景, 产生的冰雹打击范围大, 实现对农田中不同生长时期、不同高度、不同位置的农作物进行打击, 可准确完成野外田间农作物的雹灾损害模拟试验; 且伴随冰雹发射, 同时产生高速气流, 最大程度接近自然风雹天气过程, 有利于通过定量控制和精确测量模拟自然冰雹致灾过程, 为开展承灾体雹灾试验提供了装备基础。

2.2 棉花雹灾田间试验方法设计

棉花雹灾田间试验方法的基本目标是获取棉花雹灾脆弱性曲线, 为厘定棉花脆弱性提供科学依据。根据棉花雹灾脆弱性试验研究基本原理, 利用上述实验装备进行棉花雹灾脆弱性试验的基本方法如下^[27]: ①以棉花生长期、冰雹大小和降雹密度为变量设计雹灾情景; ②根据步骤①设计的情景将试验田划分为试验小区和对照小区; ③在每个棉花生长期, 按照步骤①设计的降雹情景, 分别对相应的试验小区内的棉花植株实施人工模拟降雹打击试验, 并观测和记录相应试验小区和对照小区在打击前后的棉花植株生物性状; ④在最后一个棉花生长期结束后, 观测和记录相应试验小区和对照小区的产量; ⑤处理试验数据, 通过 Logistic 分析冰雹直径和降雹密度等与棉花灾情(包括落叶率、果枝折断脱落率、棉铃(桃)脱落率、棉花产量损失率等)的关系, 获得棉花雹灾脆弱性评估模型。

3 棉花雹灾脆弱性试验研究实例

3.1 试验设置

应用上述试验设备和方法在河北省三河市荣家庄村进行了试验研究。试验区总面积 $0.154\ \text{hm}^2$, 试验小区按降雹情景(即雹径大小和降雹密度的组合)采用裂区设计, 小区面积 $1.0\ \text{m} \times 1.0\ \text{m}$, 采用 1 膜 2 行模式种植棉花, 并设置保护行。整块试验田作为一个种植大区, 采用统一的种植与管理制度, 以确保供试棉花生长发育一致性。

供试棉花品种为国审 GK45(邯鄹 109), 全生育期 $133\ \text{d}$, 株高 $92.8\ \text{cm}$, 茎秆紫红色、较粗壮, 叶片较大而厚、浓绿色, 第一果枝节位 8.1 节, 铃卵圆形, 单铃重 $5.8\ \text{g}$, 吐絮畅而集中, 衣分 38.43% , 籽指 $12.6\ \text{g}$, 霜前花率 87.4% , 前期长势一般, 中后期长势强。

根据文献[5], 雹径多集中于 $0.5 \sim 5.0\ \text{cm}$, 故降雹情景采用 5 种冰球直径(1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.0 和 $5.0\ \text{cm}$) 和 7 种降雹密度(100 、 150 、 200 、 300 、 400 、 450 和 $500\ \text{粒}/\text{m}^2$) 的设计, 共计 35 种降雹强度情景, 每一种情景设置 3 次重复, 1 次总计需 105 个试验小区和 3 个对照小区。在每个棉花生长期, 按照降雹情景, 分别对试验小区内的棉花植株实施人工模拟降雹打击试验, 并观测和记录试验小区和对照小区在打击前后的棉花植株生物性状; 观测项目包括: 株高、叶片数、果枝数、棉铃(棉桃)数, 并且给每个植株编号, 方便试验后性状观测。

试验用冰球采用模具盛装淡水放入冰柜冻制而成, 平均密度为 0.975 g/cm^3 。试验前, 把冰球冻制完成, 并按小区需用冰球数量分装入袋, 标记直径和数量, 存储在冰柜中。试验中, 把冰球由冰柜转放入隔热箱中运送到田间, 每个小区使用一袋。

实施人工模拟降雹打击时, 用拖拉机牵引所述人工模拟降雹机进入田间, 发动机器, 调节油门使冰雹飞出管口时的速度达到要求的 23 m/s 以上。然后调节降雹机, 确保冰雹恰好能打击到指定范围内的棉花植株。调整好装置后, 启动人工模拟降雹机, 将试验前准备的冰球发射出去, 发射过程持续时间视冰球数量而异, 一般为 $5 \sim 10 \text{ min}$ 。一个小区试验结束后, 拖拉机牵引人工模拟降雹机到下一小区进行试验。

3.2 试验结果与分析

能否基于试验数据得到棉花雹灾脆弱性的评估模型, 是验证本文装备与方法适用性的重要标

准。前人认为蕾期雹灾对棉花生产影响最为严重^[28], 本文选择棉花蕾期试验数据, 分析了冰雹直径、降雹密度和棉株落叶率、断枝率、落蕾铃率的关系, 得到了棉花蕾期雹灾脆弱性评估的模型。

降雹直径与植株损失的关系见图 3。落叶率随降雹直径增大而增加, 变化区间为 $0.19 \sim 0.88$, 表明叶片脆弱性与直径呈现出正相关关系。断枝率随直径增大而增加, 变化区间为 $0.15 \sim 0.99$, 果枝与叶片一样, 降雹直径越大越脆弱。落蕾铃率随直径增大而增加, 变化区间为 $0.20 \sim 0.99$, 说明生殖器官与叶、枝相同, 脆弱性随直径增大而升高。一般认为, 雹粒直径越大, 落地动量越大, 所致灾情越重^[10, 28]。因此, 试验数据较好地反映了棉花营养器官(叶、枝)和生殖器官(蕾、铃)雹灾脆弱性的规律。

此外, 落叶率、落蕾铃率、断枝率随直径的变化变化规律在不同密度之间体现的差异较小。

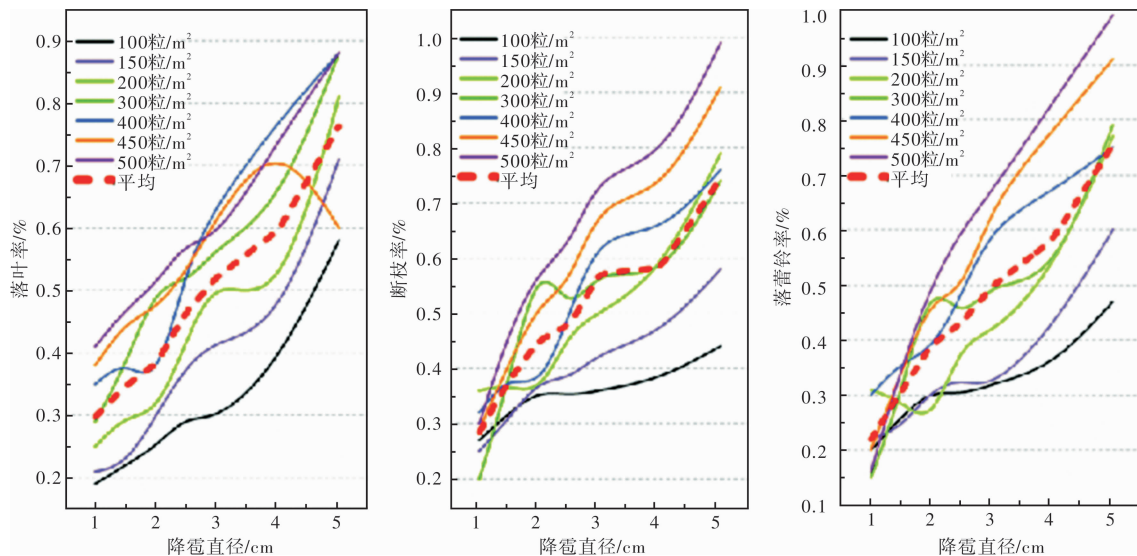


图3 蕾期棉花脆弱性随降雹直径变化的规律

表1 蕾期棉花雹灾脆弱性评估模型及其参数

参数	100 粒/ m^2	150 粒/ m^2	200 粒/ m^2	300 粒/ m^2	400 粒/ m^2	450 粒/ m^2	500 粒/ m^2
落叶率与降雹直径之间 Logistic 函数的回归参数							
A_1	0.21	0.18	0.24	0.20	0.35	0.41	0.37
A_2	2 528.67	3 637.68	4 270.49	109 587.14	0.88	0.67	2 686.34
X_0	131.96	1 009.62	549.06	583 961.54	2.92	2.50	1 756.71
p	2.70	1.68	1.92	1.03	5.51	7.52	1.46
R^2_{adj}	0.95	0.87	0.74	0.88	0.94	0.68	0.98
断枝率与降雹直径之间 Logistic 函数的回归参数							
A_1	0.18	0.24	0.28	-5.59	0.31	-0.35	-1.37
A_2	9 811.29	3 637.68	390.88	9.21	0.76	17.26	9.32
X_0	41 359.84	1 009.62	53.00	140.82	2.73	604.77	265.41
p	1.17	1.68	2.83	0.09	4.60	0.53	0.32
R^2_{adj}	0.81	0.87	0.90	0.65	0.97	0.97	0.99
落蕾铃率与降雹直径之间 Logistic 函数的回归参数							
A_1	-0.15	0.12	0.34	-93.26	0.35	-0.29	-0.81
A_2	2.09	143.60	1 242.35	0.75	0.70	10.35	7.71
X_0	527.56	19 129.49	150.85	0.01	2.58	434.31	284.77
p	0.23	0.70	2.33	1.15	10.51	0.47	0.33
R^2_{adj}	0.80	0.92	0.93	0.67	0.89	0.92	0.93

注: logistic 函数方程 $y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + (x/x_0)^p)$ 。

同一降雹直径下, 落叶率、落蕾铃率和断枝率随降雹密度的变化均不显著。经计算, 落蕾铃率和断枝率随密度变化的平均变异系数仅为它们随直径变化平均变异系数的 1/2, 而落叶率随密度变化的平均变异系数甚至不足随直径变化平均变异系数的 1/4, 表明棉花植株损害对降雹密度的响应远不如它们对降雹直径敏感。

通常, Logistic 曲线拟合是获得雹灾承灾体脆弱性评估模型的常用分析方法^[8-10, 17-20]。本文利用 logistic 分析方法得到落叶率、落蕾铃率、断枝率与冰雹直径的定量关系模型, 采用最小二乘法解出了回归参数(表 1), 并在 0.05 置信度水平下采用校正决定系数对函数拟合效果进行显著性检验, 证明蕾期落叶率、断枝率和落蕾铃率与降雹直径均呈现出显著的 Logistic 函数关系。

由此, 本文认为降雹直径是影响棉花脆弱性的重要因素, 与前人对其他作物的研究结果一致^[10, 29]。进一步, 得到了棉花蕾期雹灾脆弱性评估定量模型。当然, 目前的试验及结果还是初步的, 由于作物在不同生育期对雹灾的抵抗能力不同, 从而其脆弱性也不同^[12, 18, 21, 28]。所以还需进一步依生育期进行试验研究, 方可得到更全面的棉花雹灾脆弱性评估模型。

4 装备与方法适用性讨论

基于以上设计原理与试验结果, 本文研发的装备与方法, 与以往研究相比, 具有较好的适用性和实用性, 具体有以下几点。

(1) 具有布置灵活, 获取试验数据连续性强的优势。大量研究使用测雹板来获取降雹和灾情参数, 但因其安装和数据记录耗费巨大人力财力, 只适用于少量特定地域^[8-11]。雷达遥感方法仅能在有保险数据的区域进行研究, 否则无法获取灾情数据^[12-15]。而本文的装置和方法, 可在任一地域、在承灾体生育期的任一阶段进行一次或多次试验, 较测雹板监测和雷达遥感方法有较大优势。

(2) 可以同时获得致灾和损失数据, 有利于建立起降雹因子与作物雹灾损失间的直接联系。雷达遥感方法依赖雹灾保险记录提供灾情数据^[12-15], 传统的利用割草机、喷水器或人工去除作物叶片等田间试验方法无法获得降雹参数^[18-20]。以上方法都不能同时获得致灾和损失数据, 无法呈现降雹导致承灾体损失的过程, 不利于剖析承灾体脆弱性形成机理^[21]。而运用本文装置和方法, 不仅可在试验中同时获得降雹致灾和承灾体受损参数, 而且也提高了工作效率。

(3) 装置可控性强, 降雹情景丰富, 模拟过程接近真实降雹, 可为棉花雹灾承灾体脆弱性研究提供高质量的科学数据。前人一般利用简易降雹装置^[16-17]或割草机^[18]、喷水器⁰、人工^[20]等手段去除作物叶片模拟雹灾, 或者人力投掷冰粒或石头模拟降雹^[23-24]。如 Seino^[17]使用的装置仅是一个距离地表 3.4 m 高的容器, 让直径大约 2.2 cm 的石子自由降落来模拟降雹对承灾体的打击。人工^[23-24]横向投掷石子与冰雹近乎垂直打击给棉

株造成的损害差别很大。上述装置与方法不仅难以实现稳定控制, 而且不适宜大田试验。此外, 前述研究^[16-20, 23-24]中对雹块(石子)直径、单位面积内雹块(石子)数量和雹块(石子)速度考虑不充分, 不能反映降雹时强风导致的损失, 其试验情景和自然降雹相差甚远, 试验数据刻画降雹对承灾体影响的能力较差。前已述及, 本文装置与方法的设计遵循了棉花雹灾脆弱性试验研究的基本原理, 可模拟出接近自然风雹过程的降雹情景, 田间试验证明可获得较高质量的科学数据。

基于上述特点与优势, 该套研究装备和方法, 还有望适用于棉花以外的其他承灾体, 既可用于雹灾直接损失的试验研究, 也可应用于雹灾承灾体脆弱性评估和风险分析。目前, 该装备与方法的不足主要是自动化和信息化程度还比较低, 如在装备操控和信息感知方面还主要依靠人工, 这会部分地影响试验结果。未来, 需要在上述两方面加以改进。

5 结论

论文阐明了棉花雹灾脆弱性试验研究的基本原理, 研发出一套降雹模拟装置和棉花雹灾田间试验方法。该降雹模拟装置能够发射直径为 0.5 ~ 10.0 cm 的冰球, 其射向可以在垂向 0° ~ 120° 和水平 0° ~ 180° 范围内调节, 确保冰球恰好打击到指定范围内的棉花植株。经测试, 可使冰球发射速度达到 20.0 ~ 45.0 m/s, 可稳定控制冰球发射速度为 23.0 ~ 25.0 m/s, 从而满足模拟降雹的需求。人工模拟棉花雹灾的田间试验方法包括 4 步, 关键是要以棉花生长期、冰雹大小和降雹密度为变量设计雹灾情景, 以及对降雹前后棉花的植株性状进行观测, 从而获取不同致灾强度下棉花脆弱性指标参数。

应用该套装备与方法, 进行了 5 种冰球直径和 7 种降雹密度共 35 种降雹强度情景的验证研究, 对冰雹直径、降雹密度和落叶率、落蕾铃率、断枝率关系进行了分析, 获得了棉花蕾期雹灾脆弱性评估模型。结果显示, 该试验装备与方法可以为揭示棉花雹灾脆弱性的规律提供可靠的试验数据。与以往相比, 该装置和方法具有布置灵活, 可控性强, 降雹情景丰富, 模拟过程接近真实降雹情景, 获取试验数据连续性强的优势, 有望为雹灾承灾体脆弱性试验研究提供支撑。

致谢: 王静爱教授和史培军教授对研究提出了建议; 仇梦梦硕士参与了部分田间试验。

参考文献:

- [1] UNDRO. Natural Disasters and Vulnerability Analysis[R]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, 1982.
- [2] 苏桂武, 朱林, 马宗晋, 等. 京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性变化的初步研究 - 空间变化[J]. 地震地质, 2007, 29(1): 15-33.
- [3] 聂承静, 杨林生, 李海蓉. 中国地震灾害宏观人口脆弱性评估[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 375-382.
- [4] Thywissen K. Core terminology of disaster reduction: A comparative glossary [M]// Birkmann J. Measuring vulnerability to natu-

- ral hazards towards disaster resilient societies. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press, 2006: 486–489.
- [5] 段英. 冰雹灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 91–92.
- [6] 李丽华, 陈洪武, 毛伟峰, 等. 基于 GIS 的阿克苏地区冰雹灾害风险区划及评价[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 224–229.
- [7] 董安祥, 张强. 中国冰雹研究的新进展和主要科学问题[J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 68–76.
- [8] Changnon Jr S A. Hailfall characteristics related to crop damage [J]. Journal of Applied Meteorology, 1971, 10(2): 270–274.
- [9] Wojtiw L, Renick J H. Hailfall and crop damage in Alberta [C] //The 8th Conference on Severe Local Storms. Denver, 1973: 138–141.
- [10] Garcia R R, Weiss B E, Murphy A H. Relationships between crop damage and hailfall parameters on the High Plains [M]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1976: 28.
- [11] Katz R, Garcia R. Statistical relationships between hailfall and damage to wheat [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 29–43.
- [12] Wojtiw L, Ewing C. The relationship of time-integrated radar reflectivity with hail crop damage [C] //The 23rd Conference on Radar Meteorology Radar Meteorology. Snowmass, 1986: 23–26.
- [13] Schiesser H H. Hailfall: the relationship between radar measurements and crop damage [J]. Atmospheric Research, 1990, 25(6): 559–582.
- [14] Schiesser H H, Aller D. Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings [J]. Atmospheric Research, 2002, 63(3): 177–207.
- [15] Schiesser H H, Knepper I. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland [J]. Atmospheric Research, 2002, 61(3): 215–238.
- [16] Lane H, T. A. E. Station. Simulated hail damage experiments in cotton [R]. Bryan: Bulletin of the Texas Agricultural Experiment Station, 1959.
- [17] Seino H. Experimental study on crop damage by hail, 1; the effect of simulated hailfall on crop yield [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 361–368.
- [18] Sij J W, Ott J P, Olson B L S, et al. Growth and yield response to simulated hail damage in guar [J]. Agronomy Journal, 2005, 97(6): 1636–1639.
- [19] Irigoyen I, Domeño I, Muro J. Effect of defoliation by simulated hail damage on yield of potato cultivars with different maturity performed in Spain [J]. American Journal of Potato Research, 2011, 88(1): 82–90.
- [20] Conley S P, Pedersen P, Christmas E P. Main-stem node removal effect on soybean seed yield and composition [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(1): 120–123.
- [21] 周兰, 岳耀杰, 栗健, 等. 冰雹灾害承灾个体脆弱性评估研究进展[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 330–337.
- [22] 王瑛, 王静爱, 吴文斌, 等. 中国农业雹灾灾情及其季节分区[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 30–36.
- [23] 李存山. 棉花种植雹灾保险研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [24] 农村灾害保险技术研究中心, 北师大资源与环境科学系自然灾害研究室. 农村灾害保险技术研究中心年报(1992–1993) [M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [25] 岳耀杰, 栗健, 张峰, 等. 一种人工控制的雹灾模拟试验装置: 中国 ZL201120558289[P]. 2012–09–05.
- [26] Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules-Design qualification and type approval (IEC61215–2005, IDT).
- [27] 岳耀杰, 栗健, 王静爱, 等. 一种人工模拟降雹灾害的试验方法: 中国, ZL201210038963. 1[P]. 2013–12–18.
- [28] 李明正, 赵凤仙. 不同程度雹灾对棉花生长和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(4): 649, 673.
- [29] 山义昌. 冬小麦风雹灾害的等级划分与灾情评估[J]. 气象, 1998, 24(2): 49–51.

Equipment and Methodology for Experimental Research of Cotton Vulnerability to Hail Hazard

Yue Yaojie^{1,2}, Li Jian¹, Hu Guofang¹, Zhou Lan¹, Zhang Feng^{1,2}, Zhang Hua² and Zhao Jintao³

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Langfang Normal College, Langfang 065000, China)

Abstract: This paper aims to establish a set of equipment and methodology for conducting experimental research on cotton vulnerability under influence of hail hazard. Thus, a design of hail fall simulation apparatus and field experimental method are put forward from two perspectives, which are simulation of hail strike and obtaining parameters of cotton damages. The equipment can shoot ice balls which are 0.5 ~ 10.0 cm in diameter. Its shooting direction can be adjusted 0 ~ 120° vertical and 0 ~ 180° horizontal, to ensure that the ice balls shoot the cotton plants within specified scope. At the same time, shooting speed of ice balls can reach 20.0 ~ 45.0 m/s, and can be stably controlled at 23.0 ~ 25.0 m/s, so as to meet the needs of hail falling simulation. Method of hail hazard experiment in cotton field includes four steps. Based on the mentioned equipment and method, a field experiment with 35 hail fall scenarios, including 5 kinds of ice ball diameters and 7 kinds of hail densities was carried out. According to the primary result, this set of equipment and method has a lot of advantages, such as flexibility of setup, easiness of handling, abundance of hail falling scenarios, in comparison with field monitoring methods such as hail-pad observation, remote sensing inversion, simple field experiment methods including removing plant leaves by facility of mower, sprinkler and even hand. These advantages ensure the cotton hail hazard stimulation more similar to conditions of real natural hail hazard, thus provide high quality experiment data. In future, the automated capabilities of manipulating platform and information apperceiving of hail fall simulating apparatus should be improved; to meet the demands of experimental vulnerability research of more hail hazard affected bodies.

Key words: cotton; hail hazard; vulnerability of hazard affected body; experimental study; hail fall; simulating apparatus; applicability