

基于雪荷载对于农用设施大棚倒塌气象风险评估

杨 栩¹, 汪 洲², 崔 倩¹, 杨培强¹, 同 伟¹, 孟翠丽³

¹武汉市蔡甸区气象局气象台, 湖北 武汉

²武汉市新洲区气象局气象台, 湖北 武汉

³武汉市东西湖气象局农事站, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年8月6日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月11日

摘 要

研究2024年低温雨雪冰冻天气对农业生产的影响, 构建蔡甸区钢筋大棚不同相态下降水致灾的气象预警指标、探讨冬季低温雨雪冰冻导致大棚倒塌的应对措施具有现实意义。为此, 以武汉市蔡甸区为研究区域, 基于蔡甸区气象观测站逐日气象资料, 钢架大棚, 结合农作物、塑料大棚灾情资料, 采用有限元建模的方法, 引入安全系数的概念。结果表明: Q235A型钢管的钢架的最大承载风荷载为9级风, 最大雪荷载积雪厚度为9.6 cm; 本次雨雪冰冻过程中关键致灾因子: “底冰上雪”, 即先下冻雨形成光滑冰壳道中(无法滑落), 再覆盖积雪, 由此产生的垂直荷载约为0.67 KN/m², 远超农业大棚极限承载力(约0.28 KN/m²), 直接导致大棚结构性坍塌; 通过实地调研走访, 因为基础不牢、钢管锈蚀、管壁薄、安装方式不科学等非气象因素的原因大大降低了大棚的承载力, 引入安全系数, 得到塑料大棚致灾的气象临界阈值, 冻雨阈值为1 cm, 冻雨阈值为2 cm, 冰粒纯雪深度阈值为5 cm。

关键词

低温雨雪冰冻, 钢架大棚, 荷载, 倒塌临界气象阈值

Meteorological Risk Assessment of Agricultural Greenhouse Collapse Based on Snow Load

Xu Yang¹, Zhou Wang², Qian Cui¹, Peiqiang Yang¹, Wei Tong¹, Cuili Meng³

¹Meteorological Observatory, Caidian District Meteorological Bureau, Wuhan Hubei

²Meteorological Observatory, Xinzhou District Meteorological Bureau, Wuhan Hubei

³Agricultural Meteorological Station, Dongxihu District Meteorological Bureau, Wuhan Hubei

Received: August 6, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 11, 2026

文章引用: 杨栩, 汪洲, 崔倩, 杨培强, 同伟, 孟翠丽. 基于雪荷载对于农用设施大棚倒塌气象风险评估[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 1002-1012. DOI: 10.12677/ccrl.2026.155107

Abstract

It is of practical significance to study the impacts of low-temperature rain, snow and freezing weather on agricultural production in 2024, establish meteorological early warning indicators for disasters caused by different phases of precipitation on steel-structured greenhouses in Caidian District, and explore countermeasures against greenhouse collapse induced by winter low-temperature rain, snow and freezing disasters. Taking the Caidian District of Wuhan City as the research area, this study adopted the finite element modeling method and introduced the concept of safety coefficient based on daily meteorological observation data from meteorological stations, steel frame greenhouse parameters and disaster data of crops and plastic greenhouses. The results show that the maximum wind load bearing capacity of Q235A steel pipe greenhouses corresponds to Grade 9 wind, and the maximum snow load bearing capacity is equivalent to a snow depth of 9.6 cm. The key disaster-causing factor during this rain-snow-freezing event was the formation of an ice layer covered with snow: freezing rain first formed a smooth ice crust on greenhouse surfaces that prevented snow from sliding off, followed by snow accumulation. The resultant vertical load reached approximately 0.67 KN/m^2 , which far exceeded the ultimate bearing capacity of agricultural greenhouses (about 0.28 KN/m^2) and directly caused structural collapse of greenhouses. Field investigations revealed that non-meteorological factors including unstable foundations, rusted steel pipes, thin-walled slender pipes and unscientific installation methods greatly reduced the bearing capacity of greenhouses. Combined with safety coefficient correction, the critical meteorological disaster thresholds for plastic greenhouses were determined: 1 cm for freezing rain, 2 cm for ice accretion, and 5 cm for pure snow depth.

Keywords

Low-Temperature Rain-Snow Freezing Disaster, Steel Frame Greenhouse, Load, Critical Meteorological Threshold for Collapse

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2024年初,湖北省出现了一次严重的低温雨雪冰冻天气气候事件,本次灾害导致的直接经济损失仅次于2008年,达到了53.7亿元,且发生在春节期间,对农业尤其是市场供应造成了十分严重的影响。期间共出现两次低温雨雪冰冻过程,均出现复杂的降水相态,雨、冻雨、冰粒、雨夹雪、纯雪、冰雹、霰等多种相态交织出现。冻雨是由过冷水滴组成第一次过程出现在2月1日~6日,冻雨灾害突出,强度极端,由于冻雨和冰粒的密度大,且质量比雪重,给大棚扫雪增加了极大困难,导致设施大棚棚顶和库房等形成大量坍塌。第二次过程出现在2月18日~24日,寒潮强度更大,并伴随强对流天气,此次冻雨持续时间虽短,但主要是以冰粒为主。两次过程间隔较近,直接导致蔡甸区农作物特别是大棚作物受到严重灾害,根据蔡甸区农业农村局搜集灾情资料显示,本次灾害特点一是受灾范围广。全区1.99万亩钢架大棚普遍受灾,全区损毁钢架大棚1.145万亩,占全区大棚的57.7%;经济损失高达9500万元,其中钢架大棚损失达8100多万元。

前人从天气、气候的角度出发,对低温雨雪冰冻灾害天气成因、过程进行了许多研究[1]-[4]。在低温雨雪冰冻天气对农业生产的影响方面,胡菊芳[5]、陈正洪[6]、周慧[7]等分别对江西、湖北、湖南等省市

的低温雨雪冰冻天气典型实例进行了分析，顾品强等人[8]根据上海 2008 年 1 月 28~29 日和 2 月 1~2 日两次强雨雪天气过程积雪资料与发生特点，初步分析和确定了设施大棚致灾(坍塌)的临界积雪深度为在 7~8 cm，刘可群等人[9]建立武汉地区客观的冬季大棚蔬菜雪灾灾损评估模型与气象灾害预警指标。汪天颖等人[10]采用 S-W 检验、正态分布置信区间估计方法，研究 2018 年末低温雨雪冰冻天气过程对农业生产的影响，并构建了湖南省塑料大棚积雪致灾气象指标，得到了构建得到湖南大棚致灾积雪深度指标为 5 cm。冻雨的密度和普通纯雪不同，根据魏华斌等人的研究[11]武汉市的雪密度常年(1951~2020 年)在 0.19 g/cm³，而冻雨的密度在 0.9 g/cm³，在同样厚度的纯雪和冻雨对于农业大棚的影响也是不同的，同样厚度的冻雨更重，对于大棚的危害也就越大。

目前基于不同降水相态对于农业大棚的影响研究较少，本文基于蔡甸区国家站气象观测资料，结合塑料大棚、农作物灾情信息，分析了 2024 年低温雨雪冰冻天气对农业生产的影响，构建本地区钢筋大棚不同相态下降降水致灾的气象指标和气象预警指标、探讨冬季低温雨雪冰冻导致大棚倒塌的应对措施。

2. 资料与方法

2.1. 资料

根据国家农业部大棚蔬菜低温冻害调查分级标准(试用)，大棚风灾与雪灾灾损分级标准分别为 1 级损害为因冻雨损坏的大棚占总大棚数的 10%以下，2 级损害为 10%~30%，3 级损害为 30%~80%，4 级损害为 80%以上。

根据灾情数据显示：全区 1.99 万亩钢架大棚普遍受灾，据街乡上报，全区损毁钢架大棚 1.145 万亩，占全区大棚的 57.7%，其中损毁率 > 70%以上的 8998 亩；损毁率 30%~70%的 681 亩；损毁率 < 30%以下的 169 亩。据调查，可以维修的占 60%，约 6000 余亩，40%需拆除重建。本次达到了 3 级损害。

气象资料来自于武汉市蔡甸区国家气象观测站，包括 2024 年 2 月 1 日~6 日逐日的降水量，积雪深度，积雪重量、日极大风速、电线积冰的观测资料，灾情资料来自于保险公司、蔡甸区应急管理部门和农业部门的统计信息。

农业种植塑料大棚从骨架上主要分为竹木结构、钢架混凝土结构、钢架结构、钢竹混合结构等，本文研究的是在本次受灾过程中用途最为广泛的钢架结构的农业种植大棚，根据《农业温室结构荷载规范》¹GB/T 51183-2022，塑料大棚的设计使用寿命为 10 年，如果本次过程中的风压、雪压超过塑料棚的最大风荷载值和雪荷载值，那么塑料大棚就会倒塌。为了科学起见，假设本次雨雪冰冻钢架大棚是按照《农业温室结构荷载规范》设计的，设计参考图如图 1 所示，大棚结构参数见表 1。

Table 1. Structure and configuration of greenhouse

表 1. 大棚的结构和配置

大棚结构		GP-C832
跨度(m)		8
顶高(m)		3.2
肩高(m)		1.8
通风部位		上肩部
拱管材料(mm)	直径	32
	厚度	1.5
拱间距(m)		0.7

¹<https://baike.baidu.com/item/gb%2Ft%2051183-2016%20%E5%86%9C%E4%B8%9A%E6%B8%A9%E5%AE%A4%E7%BB%93%E6%9E%84%E8%8D%B7%E8%BD%BD%E8%A7%84%E8%8C%83/59759505?fr=aladdinM%E6%9A%AF%E8%88%8A%huhu>

续表

纵拉杆(道)	3
卡槽(道)	4
下卡槽高度(m)	0.5~0.8
上卡槽高度(m)	1.8
加固斜撑(根)	4
门	摇门
卷膜杆以及卷膜器(套)	2

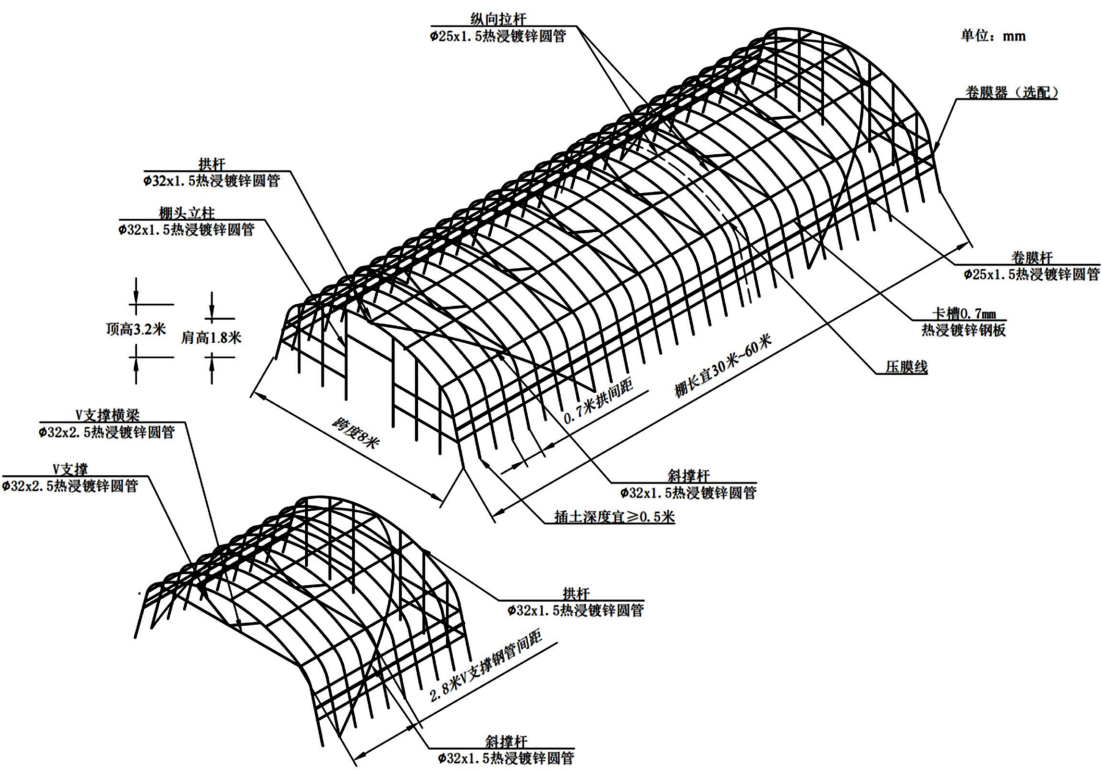


Figure 1. Schematic diagram of GP-C832 arch greenhouse
图 1. GP-C832 型拱棚示意图

2.2. 建立有限元模型

采用通用有限元软件 CAE 建立 GP-C832 型拱棚的三维空间梁单元模型。大棚都由若干单拱罗列而成，4~5 个单拱间添加 1 根带横梁的加强单拱。大棚单拱的三维数字模型如图 2 所示。

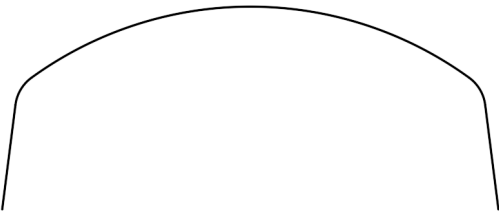


Figure 2. Single arch model
图 2. 单拱模型

2.2.1. 网格划分

采用1阶5 mm × 5 mm 四边形壳网格单拱进行网格划分,GP-C832 的单元数为48,600,节点数48,620。

2.2.2. 材料以及属性

GP-C832 采用 Q235A, 材料基本参数详见表 2。

Table 2. Basic parameters of Q235A material

表 2. Q235A 材料的基本参数

材料	杨氏模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
Q235A	2.11×10^3	0.3	7.9×10^3	306.51	390

2.2.3. 边界条件与荷载

本研究对大棚单拱的约束采用 SPC。根据《农用单体钢架大棚安全技术规范》², GP-C832 埋入地下高度为 40 cm, CAE 网格模型中针对埋入地下的网格节点进行 x, y, z 这 3 个方向上的自由度约束。

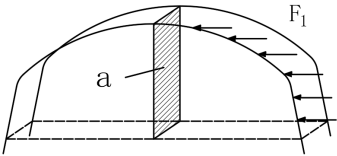


Figure 3. Wind bearing capacity of greenhouse
图 3. 大棚的风承载力

由图 3 可见, 两单拱间地表上方风载面积 $S_a = \text{拱间距} \times \text{拱离地高度}$, 侧向风力 $F_1 = S_a \times P_w$ 。 P_w 指风压, F_1 均分到单拱各受力节点, 可得出各受力节点风力大小。

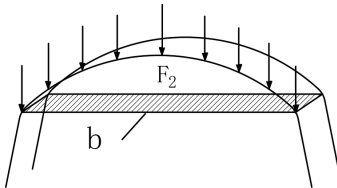


Figure 4. Snow bearing capacity of greenhouse
图 4. 大棚的雪承载力

由图 4 可见, 两单拱间覆雪区域面积 $S_b = \text{拱间距} \times \text{覆雪宽度}$, 雪载力 $F_2 = S_b \times P_s$ 。 P_s 指雪压, F_2 均分到单拱各受力节点, 可得出各受力节点雪载力大小。

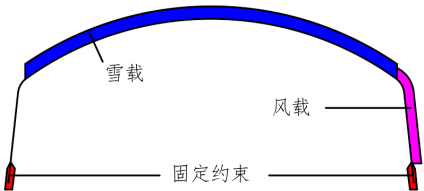


Figure 5. Constraints and stress of single arch of greenhouse
图 5. 大棚单拱约束和受力

²<https://www.renrendoc.com/p-20814600.html>

单拱受力均如图 5 所示。粉红色水平向左箭头代表侧向风载，蓝色竖直向下箭头代表雪载，大红色三角代表固定约束。

对于风速和风压的关系：

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \tag{1}$$

v 为风速，单位 m/s ； ρ 为空气密度，取 1.25 kg/m^3 ； P_w 为风压，单位为 Pa ，风压和风力等级如表 3 所示。

对于雪压与积雪厚度的关系：

$$P_s = 9.8 \times \rho_s \times h \tag{2}$$

P_s 为雪压，单位为 Pa ， ρ_s 为积雪密度，根据魏华斌等人的研究[11]武汉市的雪密度常年(1951~2020 年)在 190 kg/m^3 ， h 为积雪厚度，单位为 m 。

2.2.4. 有限元的计算以及风载和雪载的求解

在 Hyperwork 的 Load Collector 中创建非线性分析。经分析，当风载达到型号为 Q235A 型钢管屈服极限 306.51 MPa 时，单拱侧向受力 580 N 。拱顶点离地高度 2.9 m ，拱间距 h 为 0.7 m ，整栋大棚平均到单拱上的侧向受风面积为： $S_o = 2.9 \times 0.7 = 2.03 \text{ m}^2$ 。单拱所受风压为 $P = 580 \div 2.32 = 285 \text{ Pa}$ 。由表 3 查得 9 级风。

经分析，当雪载达到型号为 Q235A 型钢管屈服极限 306.51 MPa 时，单拱垂直向下受力 F_2 1065.4 N ，单拱覆雪宽度 7.4 m ，拱间距 0.8 m ，整栋大棚平均到单拱上的覆雪面积为： $0.8 \times 7.4 = 5.92 \text{ m}^2$ 。故整栋大棚所受雪压为 $P_2 = F_2 \div S_b = 180 \text{ pa}$ ，根据公式(3)积雪厚度 $h = 9.6 \text{ cm}$ 。

理想状态下大棚最大承载风力为 9 级风，最大承载的积雪厚度为 9.6 cm 。

Table 3. Wind pressure and wind force grade
表 3. 风压和风力等级

风级	名称	风速范围 (m/s)	最小风压 (Pa)	最大风压 (Pa)	直观概念 (每平方米受力)
			(下限风速)	(上限风速)	
0	无风	0.0~0.2	0	0.02	几乎无感
1	软风	0.3~1.5	0.06	1.38	轻拂脸颊
2	轻风	1.6~3.3	1.57	6.68	旗帜微动
3	微风	3.4~5.4	7.09	17.89	树叶沙沙响
4	和风	5.5~7.9	18.53	38.24	吹起灰尘
5	清劲风	8.0~10.7	39.2	70.1	小树摇摆
6	强风	10.8~13.8	71.42	116.76	举伞困难
7	疾风	13.9~17.1	118.07	179.36	全树摇动
8	大风	17.2~20.7	180.69	262.16	行走阻力大
9	烈风	20.8~24.4	264.6	364.56	瓦片掉落
10	狂风	24.5~28.4	367.66	494.93	树木拔起

3. 本次雨雪冰冻过程中倒塌原因分析

3.1. 雨雪天气过程描述

2月2~7日蔡甸区出现一次大范围的低温雨雪冰冻天气，2日08时观测到电线覆冰，3日05时转为冰粒，2日08时~3日05时冻雨量为22.3mm，没有出现积雪，电线积冰厚度为4.6mm，4日04时后转为纯雪，4日中到大雪，5日阴天，夜间小到中雪，6日中到大雪，7日阴到多云。表4为蔡甸区国家站的天气过程数据。

Table 4. Weather process

表 4. 天气过程

时间	天气现象	降水量(mm)	最大积雪深度/电线积冰厚度(mm)	极大风速(m/s)
2日08时~3日05时	电线积冰(冻雨)	22.3	4.6	5.9
3日05时~4日04时	冰粒	24.3	5	4.3
4日04时~7日08时	大到暴雪(纯雪)	17.9	10	4.6

3.2. 计算单位面积的重量(面密度)

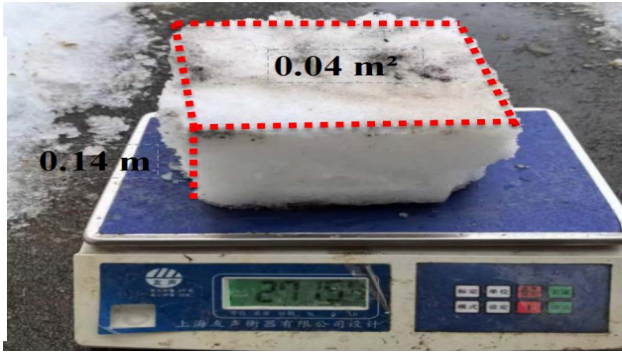


Figure 6. Snow sample (Including freezing rain mixed layer)

图 6. 积雪样本(含冻雨混合层)

现场实测数据如图6所示，取自灾区的大棚积雪样本(含冻雨混合层)积雪混合物的计算得到测算面积 s 为 0.04 m^2 、厚度 h 为 0.14 m 的积雪块重量 m 为 2.715 kg ，那么单位面积的压强 $P_{1\text{m}^2}$ 公式：

$$P_{1\text{m}^2} = \frac{m \times g}{S} \quad (3)$$

$$m = 2.715 \text{ kg}, s = 0.04 \text{ m}^2, g = 9.8 \text{ m/s}^2, P_{1\text{m}^2} = 0.665 \text{ KN/m}^2.$$

3.3. 计算积雪样本的密度

$$\rho_s = \frac{m}{v} = \frac{m}{S \times h} \quad (4)$$

$$h = 0.14 \text{ m}, v = 0.04 \times 0.14 = 0.0056 \text{ m}^3.$$

$$\rho_s = \frac{2.715}{0.0056} = 484.8 \text{ kg/m}^3 = 0.48 \text{ g/cm}^3$$

根据魏华斌等人的研究[11], 武汉市 1961~2020 平均雪密度 0.19 g/cm^3 , 根据陈璇等人的研究[12]表明根据长江中下游冻雨雨滴谱和导线覆冰同步观测到本次雨雪冰冻过程中冻雨的平均密度为 0.86 g/cm^3 , 冰粒密度为 $0.42\sim 0.63 \text{ g/cm}^3$, 在现场实测的冰雪混合物的密度为 0.48 g/cm^3 , 远高于武汉市平均雪密度, 又低于实测出的本次冻雨的平均密度, 他是接近冰粒的或含冰量很高的混合雪泥。

现场实测数据显示, 取自灾区的积雪样本(含冻雨混合层)在厚度为 14 cm 时, 其面密度高达 0.67 kN/m^2 , 冰雪混合物的样本密度达到 0.48 g/cm^3 , 是普通降雪密度的 2.5 倍以上。本次产生的冰雪混合物的压力也远超当地农业大棚设计基本雪压(0.30 kN/m^2), 超载倍数达 2.2 倍, 冰雪混合物过重是导致大棚结构性坍塌的直接原因。

4. 实地调查中发现的其他问题

在本次雨雪冰冻天气中, 除了天气本身的原因, 还有年久失修、大棚钢管质量、以及安装方式问题, 以及其他人为原因导致大棚倒塌, 经过调查走访研究, 大棚倒塌原因有以下几点, 所以气象风险阈值只能作为一个参考阈值, 这就导致大棚实际承载的雪深要比计算出来的 9.6 cm 要低得多。

4.1. 基础不牢

走访过程中, 因为年久失修, 有些大棚的基础不牢固, 出现了基础破损和抬起, 这就造成了大棚的钢架受力不均, 改变了大棚的力学结构。

4.2. 镀锌钢管生锈

如图 7 所示, 因为使用时间久了, 钢管出现了锈蚀, 锈蚀后的钢管的承载力低于未锈蚀的钢管, 导致大棚的强度不足。

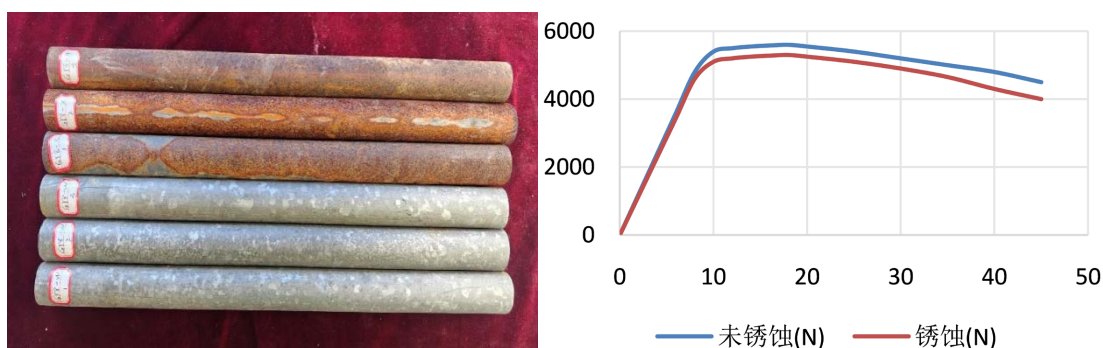


Figure 7. Load-displacement curves of corroded and uncorroded steel pipes

图 7. 锈蚀和未锈蚀的钢管荷载 - 位移曲线

4.3. 管壁壁薄

标准的钢管的厚度是 1.5 mm , 管壁长为 32 mm , 实地检测的钢管厚度仅为 1.43 mm , 管壁长为 31.41 mm , 低于设计值, 管壁壁薄导致了实际大棚的承载力达不到设计标准。

4.4. 安装方式缺陷

在实地走访中发现大棚出现节点屈曲或断裂, 连接件断裂或拔出现象, 这和人为安装的不科学直接相关, 预埋件的埋深不足、以及连接件仅仅用铁丝捆住, 没有焊接, 导致大棚实际承载力低于设计值。还有拉杆道数少, 拱距 $> 0.8 \text{ m}$, 导致大棚的实际承载力下降。

5. 大棚倒塌的气象临界阈值

本次雨雪过程中风力较小, 阵风 3~4 级, 主要倒塌原因还是由于冰雪混合物导致的雪压大于大棚极限承载力, Q235A 钢管达到屈服极限时的临界压力值。上文的到 $P = 180 \text{ pa}$, $\rho(\text{冻雨}) = 0.86 \text{ g/cm}^3$, $\rho_S = 0.48 \text{ g/cm}^3$, $\rho(\text{雪}) = 0.19 \text{ g/cm}^3$

$$h = \frac{P}{\rho \times g} \quad (5)$$

5.1. 不同相态下的气象临界阈值

5.1.1. 冻雨厚度阈值

如果大棚表面完全由冻雨(冰层)覆盖

$$h_{\text{冻雨}} = \frac{180 \text{ N/m}^2}{860 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \approx 0.0213 \text{ m} \approx 21 \text{ mm}$$

对于该型号大棚, 若形成均匀的纯冻雨冰层, 厚度达到 21 mm 时, 冻雨量在 18 mm, 即可达到承重极限, 引发倒塌风险。本次雨雪天气共计持续 5 天, 仅 2 月 2 日一天就已经达到 23 mm 的冻雨量, 达到承重极限。

5.1.2. 冰雪混合物厚度阈值

实际发生的冰雪混合物的密度

$$h_{\text{冰雪混合物}} = \frac{180 \text{ N/m}^2}{480 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \approx 0.0382 \text{ m} \approx 3.8 \text{ cm}$$

5.1.3. 纯雪的厚度阈值

$$h_{\text{雪}} = \frac{180 \text{ N/m}^2}{190 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \approx 0.096 \text{ m} \approx 9.6 \text{ cm}$$

5.2. 综合安全预警阈值建议

非气象因素(基础不牢、钢管锈蚀、壁厚不足、无临时支撑), 实际工程中必须引入安全系数(Safety Factor)。通常农业设施安全系数取 1.5~2.0, 但鉴于走访中发现受灾区大量大棚质量不达标, 建议采用更保守的阈值 2.0。在今后的气象服务中, 可根据表 5 中气象预警阈值, 结合积雪深度农户进行服务。

Table 5. Weather warning thresholds

表 5. 气象预警阈值

降水相态	理论临界值(完美大棚)	建议预警阈值(考虑老化/质量缺陷)
纯冻雨(积冰厚度)	2.1 cm	<1.0 cm
冻雨 + 冰粒混合	3.8 cm	<2.0 cm
雪	9.6 cm	<5.0 cm

本次雨雪冰冻过程中关键致灾因子: “底冰上雪”, 在实际走访中最危险的情况不是纯雪, 也不是纯冰, 而是先下冻雨形成光滑冰壳(无法滑落), 再覆盖积雪。这种结构密度极大且无法通过倾斜棚顶自然滑落。普通雪的气象阈值 5 cm 这和汪天颖等人[3]得到湖南大棚致灾积雪深度指标为 5 cm 相同。

在冬季低温雨雪天气预报中, 只要出现“冻雨”或“冰粒”字样, 无论预报积雪深度多少, 都应立即

启动最高级别防御响应，因为此时 1~2 厘米的结冰就是大棚的生死线。

6. 提升防灾减灾的措施

通过对蔡甸区数十家大棚种植户的实地走访，大棚倒塌还和防灾减灾能力息息相关，通过一定的人为手段，可以有效降低大棚倒塌的发生。

6.1. 识别“生死线”：建立精准气象预警阈值

一旦预报有冻雨或雨夹雪，1~2 厘米的积雪/结冰就可能导致坍塌。不要等到积雪很厚才行动。关注“底冰上雪”，最危险的情况是：先下冻雨形成光滑冰壳(无法滑落)，再覆盖积雪。这种组合密度极大，且无法通过倾斜棚顶自然滑落。

6.2. 灾前“硬加固”：提升结构冗余度

6.2.1. 增设临时立柱

在梁架底下每隔 2~5 米增加一根立柱。立柱底部要垫砖石，防止陷入泥土，确保立柱顶部要与拱架紧密接触，真正起到支撑作用。

6.2.2. 加固基础与连接点

检查大棚两侧的地锚是否松动，拉紧压膜线。对于锈蚀严重的钢管，提前用木棍或竹竿进行局部支撑补强。

6.2.3. 增加内保温(二道膜)

在棚内搭建小拱棚或悬挂二道幕。这不仅能保温，还能形成多层支撑结构，分担顶部荷载。

6.3. 灾中“快减负”：科学除雪与应急

6.3.1. 及时除雪

当雨雪来临时，必须做到“随下随清”，减轻棚体负担，不要等雪停了再扫。当积雪达到 3~5 厘米时，使用长竹竿或专用推雪板，从棚顶一端向另一端清除积雪。

6.3.2. 撒盐融雪

利用无人机在棚顶撒融雪剂或食盐加速融化，但需注意防止盐水流下腐蚀钢管或伤害作物。

6.3.3. 破膜保棚

如果积雪厚度已超过棚体承重极限，且无法人工清除，大棚结构开始变形，必须果断在棚顶适当位置割破棚膜，让积雪滑落。

7. 结论与讨论

(1) 应用有限元方法对型号为 Q235A 型钢管的钢架大棚进行建模，最大承载风荷载为 9 级风，最大雪荷载积雪厚度为 9.6 cm。

(2) 本次雨雪冰冻过程中关键致灾因子：“底冰上雪”，而是先下冻雨形成光滑冰壳道中(无法滑落)，再覆盖积雪，由此产生的垂直荷载约为 0.67 kN/m^2 ，远超农业大棚极限承载力(约 0.28 kN/m^2)，直接导致大棚结构性坍塌。

(3) 通过实地调研走访，非气象因素基础不牢、钢管锈蚀、管壁薄、安装方式不科学大大降低了大棚的承载力，引入安全系数(Safety Factor)，得到塑料大棚致灾的气象临界阈值，冻雨阈值为 1 cm，冻雨阈值为 2 cm，冰粒纯雪深度阈值为 5 cm。

参考文献

- [1] 周慧, 黄小玉, 黎祖贤, 等. 湖南 2008 年极端冰冻特大灾害气候特点及影响评估[J]. 中国农业气象, 2009(S1): 148-153.
- [2] 廖玉芳, 吴贤云, 杜东升, 等. 2008 年湖南低温雨雪冰冻天气分析与数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 169-176.
- [3] 姚蓉, 许霖, 张海, 等. 湖南 2008/2011 年两次低温雨雪冰冻灾害成因与影响对比分析[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 75-79+91.
- [4] 李丽, 徐勋建, 冯涛, 等. 湖南地区雨雪冰冻过程中的高空急流演变特征[J]. 气象与减灾研究, 2017, 40(2): 132-140.
- [5] 胡菊芳, 王怀清, 彭静, 等. 2008 年 1-2 月江西低温雨雪冰冻灾害分析评估[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(1): 67-72.
- [6] 陈正洪, 史瑞琴, 李兰. 湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻灾害特点及影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 639-644.
- [7] 周慧, 朱国强, 禹伟, 等. 湖南 2008 年极端冰冻特大灾害成因分析及影响评估[J]. 灾害学报, 2009, 24(1): 80-85.
- [8] 顾品强. 设施大棚大雪致灾指标的气候分析及应对措施[J]. 上海蔬菜, 2008(4): 16-17+28.
- [9] 刘可群, 杨文刚, 刘志雄, 等. 冬季大棚蔬菜低温冰雪灾害评估与预警研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(22): 4617-4621+4625.
- [10] 汪天颖, 廖玉芳, 李晶. 2018 年末湖南雨雪冰冻过程对农业的影响及大棚积雪致灾指标构建[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(4): 1-9.
- [11] 魏华斌, 陈正洪, 杨培强. 武汉地区积雪与冻雨密度长期观测特征(1951-2020) [J]. 湖北气象, 2022, 41(2): 28-32.
- [12] 陈璇, 钟敏, 陈赛男, 罗昱, 等. 2024 年 2 月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(6): 668-679.