DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.5001

风雹作用下塑料大棚薄膜抗冲击性能评估与风险预测

袁立鹏，戴益民，罗　浩

（湖南科技大学 土木工程学院，湖南 湘潭 411201）

摘　要：采用风雹耦合试验系统进行了塑料大棚薄膜在风雹作用下的试验研究，得到了风雹作用下薄膜的破坏过程；基于试验数据给出薄膜的破坏概率及风险等级，构建了 PSO-BP 神经网络模型预测薄膜破坏的风险等级。研究结果表明：破坏概率随冰雹直径与风速增加而显著上升；基于薄膜破坏概率与损伤分类，将风险划分为 5 个等级，最高风险等级 5 级出现于高风速与大冰雹工况；以试验数据为基础，采用 PSO-BP 模型建立的单颗粒冰雹冲击下的风险等级预测模型，其预测准确率高达 97.5%。

关键词：风雹作用；塑料大棚薄膜；抗冲击性能；风险预测；PSO-BP 神经网络

中图分类号：TU261　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)05−0001−09

引文格式：袁立鹏，戴益民，罗　浩 . 风雹作用下塑料大棚薄膜抗冲击性能评估与风险预测 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：1−9.

Evaluation of Impact Resistance and Risk Prediction of Plastic Greenhouse Films Under Hail and Wind

YUAN Lipeng，DAI Yimin，LUO Hao

（School of Civil Engineering，Hunan University of Science and Technology，Xiangtan Hunan 411201，China）

Abstract：Using a wind-hail coupled experimental system, a study has been conducted on the performance of plastic greenhouse films under the action of wind and hail, thus obtaining the failure process of the films under these conditions. Based on the experimental data, the failure probability and risk levels of the films are given, with a PSO-BP neural network model constructed to predict the risk levels of film damage. The research results indicate that the probability of film damage increases significantly with the hail diameter and wind speed. Based on the failure probability and damage classification, the risk can be divided into five levels, with the highest risk level 5 occurring under conditions of high wind speed and heavy hail. By citing experimental data, a PSO-BP model is established to predict the risk level under the impact of a single hailstone, achieving a prediction accuracy of 97.5%.

Keywords：wind and hail effects；plastic greenhouse film；impact resistance；risk prediction；PSO-BP neural network

1　研究背景

近年来，极端气候事件频发，风雹灾害呈现加剧趋势，对农业生产系统构成了严峻挑战。强风与冰雹等灾害性天气常导致塑料大棚覆盖薄膜被破坏乃至整体结构失稳或坍塌，造成严重的经济损失 [1]。而薄膜的抗冲击性能是衡量塑料薄膜耐久性的重要指标之一，其决定了薄膜在复杂环境如冰雹、强风等外力

收稿日期：2025−08−16

基金项目：国家自然科学基金资助面上项目（52178478）；湖南省自然科学基金资助面上项目（2022JJ30247）

作者简介：袁立鹏，男，湖南科技大学硕士生，主要研究方向为温室大棚结构风雹灾害，E-mail：1410488118@qq.com

通信作者：戴益民，男，湖南科技大学教授，博士，主要研究方向为温室大棚结构风雹灾害，E-mail：617275190@qq.com

作用下的可靠性与防护能力。因此，开展塑料大棚薄膜在风雹作用下的抗冲击性能评估对提升设施农业防灾减灾能力具有深远的现实意义。

目前，针对温室大棚结构抗冲击研究主要为采用试验或数值模拟手段研究温室大棚抗风或薄膜抗冲击等。在风灾风险评估方面，许晶等[2]结合谐波叠加法与数值模拟分析了塑料大棚在风荷载下的响应，提出以最大水平位移为指标的动力失效判定准则，实现了抗风设计量化评估。孙朝锋等[3]基于福建省 203 个气象站数据开展了塑料大棚风害风险区划研究，为区域布局与结构设计提供了依据。杨再强等[4]通过研究设施大棚表面风压分布规律，计算出设施大棚各区域发生风灾的临界风速。在风压作用机理方面，H. Moriyama 等[5−6]利用风洞试验研究了管架温室屋脊高度对温室屋面风压影响的成因，发现脊高影响温室（尤其风向垂直于屋脊）迎风屋面的风压分布规律较明显。Yang Z. Q. 等[7]研究了单跨塑料温室和日光温室在不同风向下的风压分布与临界风速，为温室抗风设计提供了关键参数。吴昆等[8]通过数值模拟，研究了拱形塑料大棚单棚及群棚模型在不同风向角与棚间距下的表面风压特性，发现群体布置塑料大棚存在风致干扰效应。在覆盖材料方面，G. Dougka 等[9]通过有限元方法研究了风作用下温室覆盖膜的承载能力，并提出温室薄膜支撑系统优化设计方案。丁敏等[10]通过数值模拟研究了薄膜受力性能对日光温室承载力的影响，指出薄膜尺寸与厚度是关键影响因素。朱自强等[11]通过实验与模拟分析了塑料薄膜在冰雹冲击下的破坏形式与损伤规律，发现提升抗拉强度是增强薄膜抗冲击能力的主要途径。总体而言，现有研究仍存在一些值得关注的问题：1）在灾害分析上具有单一性，缺乏多灾害耦合作用研究；2）在风险评估上多依赖经验，未能发挥智能预测方法在构建复杂非线性关系上的优势。

随着科技不断发展，数据驱动的智能预测模型展现出巨大潜力。BP（back propagation）神经网络作为目前应用最广的网络模型之一[12]，其良好预测能力已得到验证[13−15]，但随着应用领域的扩大，逐渐暴露出其收敛速度慢、易陷入局部极小值等问题[16]。粒子群优化（particle swarm optimization，PSO）算法是一种群体智能全局优化算法[17]，能有效探索解空间，弥补 BP 神经网络易受局部极小值影响的缺点，但在拱形塑料大棚风险预测方面的应用还较少。

综上，国内外学者们对塑料大棚抗风和薄膜抗冲击开展了研究，但针对塑料大棚如何构建高效、精准的风险预测模型，仍是亟须解决的问题。因此，本文拟以风雹耦合试验为基础，以 PSO-BP 神经网络为模型算法构建风雹作用下单颗粒冰雹冲击拱形塑料大棚风险预测模型，对拱形塑料大棚薄膜在风雹作用下的抗冲击性能评估开展系统研究，以期为温室大棚塑料薄膜的风雹灾害防治提供参考。

2 试验概况

2.1 试验系统

本文利用湖南科技大学风工程试验中心的试验平台，采用冰雹发射装置、高速摄像机、三维脉动风速仪等设备，搭建了一套集冰雹冲击模拟、试验数据采集为一体的试验系统，见图 1。



图 1 风雹耦合试验系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind-hail coupling test system

冰雹发射装置用于发射冰球，通过操作箱调整气压发射不同粒径的冰球，每次发射一枚冰球。本研究用高速摄像机 FDR-AX700 作为冰雹速度测量装置，记录薄膜的破坏过程，相机分辨率为 1 920 × 1 080，帧率为 1 000 fps。采用 Delta 六分量高频测力天平对薄膜所受冲击力进行采集，来流风与天平 X 分量夹角为 0°。使用 TFI 眼镜蛇三维脉动风速仪作为风速采集装置。试验所用拱形大棚测力天平支架长 1 200 mm、宽 1 000 mm、高 400 mm，下部使用连接片与测力天平固定。试验前须对模型进行覆膜处理，模型覆膜前后形貌如图 2 所示。试验使用的塑料薄膜为被广泛用于温室大棚覆盖材料的蓝色 PO（Polyolefin）无滴膜，该膜具有透光性能好、保温性能强等优点。试验件的尺寸为 1 800 mm × 1 300 mm，厚 0.10 mm，膜材料参数见表 1。



a）拱形大棚测力天平支架　　b）覆膜后测力天平支架

图 2 拱形塑料大棚形貌图

Fig. 2 Model pictures of arched plastic greenhouse

表 1　PO 无滴膜材料参数

Table 1　PO anti-drip film material parameters

参　数	典型值	
	纵向	横向
拉伸强度 /MPa	33.7	31.9
断裂伸长率 /%	668	751
直角撕裂强度 /(kN·m^{-1})	82	103

试验时，使用专业冰雹粒子模具制备不同尺寸且符合试验要求的球形冰雹粒子，为减小试验误差，制备完成后使用精密电子天平进行称量，以保证冰雹粒子达到合格标准。本实验冰雹合格标准如下：表面没有明显裂缝；尺寸和质量均在规定值的 ± 5% 范围内。根据相关研究 [18]，球形冰雹的理论落速 V 可以通过式（1）进行计算。本文为讨论实际情况中不同冰雹的落速对冰雹冲击行为的影响，首先计算出不同粒径冰雹的理论落速，然后选取理论速度邻近区间内的不同速度作为冰雹的冲击速度。试验用冰雹的理论参数详见表 2。

$$V=1.8\times10^{-2}d^{0.407\,5}\sqrt{\rho_{\mathrm{H}}g/\rho_{\mathrm{a}}}\text{，}\ 5\ \mathrm{mm}\leqslant d\leqslant 50\ \mathrm{mm}。\tag{1}$$

式中：ρ_{H}为冰雹密度，取值 0.92 g/cm^3；ρ_{a}为空气密度，取值 1.1×10^{-3} g/cm^3；g 为重力加速度，取值 9.80 m/s^2；d 为冰雹直径，mm。

表 2　试验用冰雹的理论参数

Table 2　Theoretical parameters of hail for experiments

冰雹直径 /mm	密度 /(g·cm^{-3})	质量 /g	理论落速 /(m·s^{-1})
20	0.92	3.85	20.36
25	0.92	7.53	22.77
30	0.92	13.01	24.93

2.2　试验工况

本试验以风速、风向角为变量，对不同参数（粒径、冲击速度）的冰雹粒子冲击拱形塑料大棚薄膜的破坏情况展开对比分析，系统评估薄膜在风雹作用下的抗冲击性能。

表 3 为具体的试验工况设计。

表 3　试验工况设计表

Table 3　Test working condition design table

冰雹直径 / mm	冰雹速度 /(m·s^{-1})	风速 /(m·s^{-1})	风向角 /(°)
20	20.5/21.0/21.5/22.0/22.5/23.0	0/7/9/11	0/15/30/45/60
25	22.5/23.0/23.5/24.0/24.5/25.0	0/7/9/11	0/15/30/45/60
30	24.0/24.5/25.0/25.5/26.0/26.5	0/7/9/11	0/15/30/45/60

试验以来流风方向正对塑料大棚模型长轴方向为 0° 风向角，图 3 为试验风向角布置示意图。

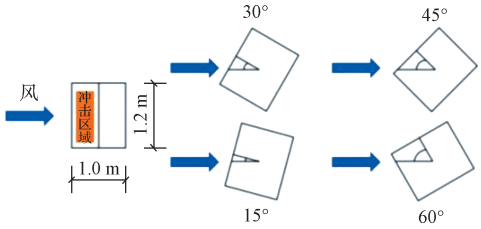


图 3　风向角布置示意图

Fig. 3　Wind direction angle layout diagram

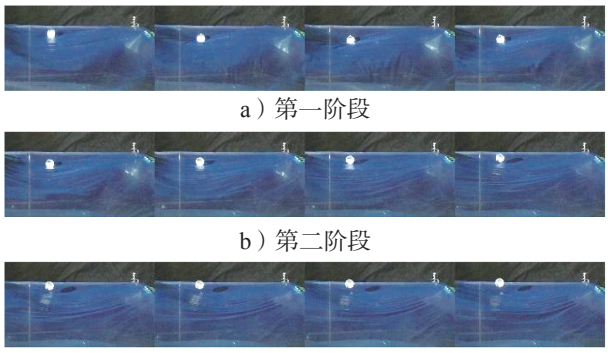
2.3　试验结果

试验使用高速摄像机记录了薄膜的破坏过程，主要分为冰雹冲击过程和冰雹冲击破坏后两个部分。

2.3.1　冰雹冲击过程

本文将冰雹冲击过程分为冰雹未冲破薄膜和冰雹冲破薄膜两种情况进行讨论。

1）冰雹未冲破薄膜。该情况下的冲击过程见图 4。对图 4 进行分析，冰雹未冲破薄膜时的冲击过程共分为 3 个阶段。第一阶段：当冰雹撞击薄膜时，在接触点处形成了高应力区域，这导致了该区域的薄膜发生塑性变形，产生明显凹陷，并且由于材料结构的变化在表面上留下白色痕迹。随着这些应力通过薄膜向四周扩散，引起其他部分的弹性变形。同时，由于表面应力分布不均，薄膜表面出现多个不规则凸起或波纹。第二阶段：由于冰雹的动能不足以穿透薄膜，它将剩余动能传递给薄膜后速度降为 0 m/s，暂时静止于薄膜上。此时，薄膜达到其最大的弹性变形程度，应力扩展至边界并开始回弹。第三阶段：由于薄膜具有一定的弹性模量，允许其在承受应力时不会发生永久变形。因此，在薄膜吸收了冰雹的所有动能并转化为形变之后，其弹性恢复特性将部分能量重新转化为冰雹动能，导致冰雹出现显著的回弹现象。



a）第一阶段

b）第二阶段

c）第三阶段

图 4　冰雹未冲破薄膜的冲击过程示意图

Fig. 4　Impact process schematic diagram of hail before breaking through the film

2）冰雹冲破薄膜。冰雹冲破薄膜的冲击过程见图 5。分析图 5，认为冰雹冲破薄膜的冲击过程主要包含两个阶段。第一阶段：当冰雹以较高速度撞击薄

膜时，在接触点形成高应力区域。由于该区域应力迅速达到薄膜极限强度，导致薄膜在极短时间内发生破裂。由图可知，初期破损区域略小于冰雹直径，且此时应力波还未扩散。第二阶段：一旦薄膜初次破裂，冰雹便携带剩余动能继续下落，应力开始从初始破坏点向外扩散，形成拉伸波。随着拉伸波的传播，冰雹造成的开口逐渐扩大，破裂边缘开始向外翻卷。最终由冰雹引起的破坏区域常略超过冰雹直径。



a）第一阶段



b）第二阶段

图 5 冰雹冲破薄膜的冲击过程示意图

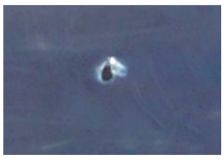
Fig. 5 Impact process schematic diagram of hail breaking through the film

2.3.2 冰雹冲击破坏后

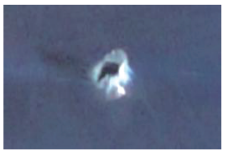
冰雹冲破薄膜后的薄膜响应见图 6。由图 6 发现，即使冰雹冲破薄膜后，破损口尺寸和形状仍在发生变化，见图 6b。这种现象是由应力在薄膜中的传播引起的。具体来说，随着初始拉伸波扩散，薄膜其他部分经历了弹性变形。而在随后的弹性恢复过程中，这些区域释放的弹性势能在破损口周围重新聚集，形成新的应力集中点，导致破损区再次弹起，并促使第二个拉伸波产生，同时进一步扩大破裂口，见图 6c。这一系列过程会重复二或三次，直到薄膜表面达到稳定状态。每次循环中，应力波的传播与弹性恢复相互作用，不断调整破损口大小和形态，直至能量完全耗散，薄膜不再发生显著变化。



a）冰雹冲击破坏后



b）破损口细节一



c）破损口细节二

图 6 冰雹致损后的薄膜响应过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the film response process after hail damage

3 拱形塑料大棚的抗冲击性能评估

3.1 风雹冲击下拱形塑料大棚的破坏概率

为研究拱形塑料大棚在不同工况下受风雹冲击时的破坏概率，本研究对风雹耦合影响冰雹冲击试验中的各组工况进行了 10 次重复试验，并记录各组工况下冰雹对薄膜造成破坏的次数，以此计算各组工况下冰雹对大棚的破坏概率，结果见表 4。

表 4 不同工况下冰雹冲击塑料大棚的破坏概率

Table 4 Probability of hail damage to plastic greenhouses under different working conditions %

冰雹直径 / mm	风向角 / (°)	风速 /(m·s^{-1})			
		0	7	9	11
20	0	0	10	30	60
	15	0	10	20	40
	30	0	10	10	40
	45	0	0	10	30
	60	0	0	10	20
25	0	20	40	40	60
	15	20	40	40	60
	30	20	30	40	60
	45	20	30	40	60
	60	20	20	20	50
30	0	30	50	60	80
	15	30	50	60	80
	30	30	50	50	70
	45	30	50	50	70
	60	30	40	40	60

对表 4 进行分析可发现：风速对冰雹破坏概率的增幅明显，在 7 m/s 和 9 m/s 风速下，冰雹造成破坏的概率显著增加，尤其是在较大直径冰雹的情况下；在 11 m/s 风速下，冰雹的破坏概率大致为无风时的 3 倍。此外，风向角对冰雹破坏概率的影响相对风速较小，但随着风向角的增加，破坏概率总体上有所下降，尤其在较小直径冰雹的情况下，如 20 mm 冰雹在 60° 风向角时，即使在 11 m/s 风速下，破坏概率也只有 20%。冰雹直径也是影响冰雹破坏概率的重要因素，冰雹直径越大，破坏概率越高。试验中，冰雹冲击塑料大棚的最大破坏概率发生在 30 mm 直径冰雹及 11 m/s 风速时。

3.2 风雹冲击下拱形塑料大棚的损伤情况

在分析了冰雹冲击拱形塑料大棚的破坏过程及破坏概率后，对冰雹冲击拱形塑料大棚所致损伤进行分类。试验中，冰雹冲击拱形塑料大棚时存在两种情况：冰雹冲破薄膜和冰雹未能冲破薄膜。对这两种情况进行分析。首先，当冰雹冲击未能冲破薄膜时，薄膜与冰雹的接触点仍然会有塑性变形，产生不可逆的拉伸，但是没有出现孔洞。其次，当冰雹动能足够大以至于冲破薄膜时，薄膜的破坏形式初始都为孔洞

破坏，后续随着应力的传播等原因，薄膜破坏情况分化为两种：一种是薄膜破损口未产生二次破坏，破损口仍然为圆形孔洞形状，破损孔洞的直径略大于或者等于冰雹直径，此时薄膜周围区域未有明显拉伸、撕裂等变形情况。第二种则是薄膜破损口因受应力传递等因素的影响，由初始的孔洞向周边扩大，产生二次破坏，此时破损口面积大于冰雹直径，薄膜破损口周围的区域出现了明显的拉伸、撕裂等塑性变形情况。

综上，研究中塑料大棚薄膜受风雹冲击时的损伤情况共有 3 类，本文将其具体划分为 I、II、III 3 类（见图 7），具体划分情况如表 5 所示。



a）I 类损伤　　b）II 类损伤　　c）III 类损伤

图 7　薄膜受风雹冲击损伤情况示意图

Fig. 7　Diagram of film damage caused by wind and hail

表 5　薄膜受风雹冲击损伤情况分类

Table 5　Classification of damage to the films caused by wind and hail impact

类别	损　伤　情　况
I	未出现孔洞破坏，但接触点有轻微凹陷
II	出现孔洞破坏，孔洞直径略大于或等于冰雹直径，周边无明显形变
III	出现孔洞破坏，孔洞周边有明显撕裂、拉伸，孔洞直径大于冰雹直径

3.3　风雹作用下拱形塑料大棚的抗冲击性能评估

通过以上研究，得到了不同工况下薄膜受冰雹冲击的破坏概率（P）以及损伤分类（S），将这两个参数与冰雹直径、风速、风向角 3 个变量进行组合，可得到本次试验的评估数据集。表 6 给出了部分性能评估数据集。

表 6　部分性能评估数据集

Table 6　Partial performance evaluation dataset

冰雹直径 /mm	风速 /(m·s^{-1})	风向角 /(°)	P	S
20	0	0	0	I
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	9	15	0.4	II
25	9	30	0.4	II
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	11	30	0.7	III

整理得出评估数据集后，基于此数据集对不同工况下拱形塑料大棚抗风雹冲击性能进行风险区间划分，划分结果如表 7 所示。在明确拱形塑料大棚的风险区间后，对表 7 中各工况的风险区间进行定义，结果见图 8，图中每个单元格中的数字表示对应条件下的风险等级。

表 7　拱形塑料大棚风险等级区间划分

Table 7　Classification of risk levels for arched plastic greenhouses

风险等级	区间定义
1- 低风险（蓝色）	P < 0.1，损伤分类为 I 级
2- 中低风险（绿色）	0.1 ≤ P<0.3，损伤分类为 II 级
3- 中风险（黄色）	0.3 ≤ P<0.5，损伤分类为 II 级
4- 中高风险（橙色）	0.5 ≤ P<0.7，损伤分类为 III 级
5- 高风险（红色）	P ≥ 0.7，损伤分类为 III 级

冰雹粒径&风向角	不同风速下风险等级			
	0 m/s	7 m/s	9 m/s	11 m/s
30 mm0°	3	4	4	5
30 mm15°	3	4	4	5
30 mm30°	3	4	4	5
30 mm45°	3	4	4	5
30 mm60°	3	3	3	4
25 mm0°	2	3	3	4
25 mm15°	2	3	3	4
25 mm30°	2	3	3	4
25 mm45°	2	3	3	4
25 mm60°	2	2	2	4
20 mm0°	1	2	2	3
20 mm15°	1	2	2	2
20 mm30°	1	2	2	3
20 mm45°	1	1	2	2
20 mm60°	1	1	2	2

图 8　不同工况下塑料大棚受风雹冲击的风险等级

Fig. 8　Risk level of plastic greenhouses impacted by wind and hail

分析图 8 可得：无论何种情况，随着风速和冰雹粒径的增加，风险等级都显著提高；此外，可发现风向角对风险因素的影响较小，而冰雹粒径与风速的影响比较显著。最高风险等级 5 级发生在高风速（如 11 m/s 风速）和大冰雹粒径（如 30 mm 粒径）的情况下。

4　拱形塑料大棚的风险预测模型

通过试验分析可知，风雹作用下拱形塑料大棚薄膜的破坏情况受冰雹直径、冲击速度、风速、风向角及冰雹冲击力等因素的影响，并且这种多因素影响下的冰雹冲击行为更加复杂。BP 神经网络是一种模拟人脑活动原理的数据映射模型，可对大量数据进行自适应学习以实现复杂关系的映射 [19]，因此建立 BP 神经网络预测模型可为多因素影响下拱形塑料大棚薄膜抗风雹设计提供参考。

BP 神经网络的性能很大程度上取决于初始权重的选择，若权重初始化不当，网络的性能会受到很大影响 [20]。同时，BP 神经网络采用梯度下降法将误差反向传播，并根据误差调整网络的权重和阈值，这种算法易陷入局部极小值，影响网络性能。PSO 算法是一种受自然启发的群体智能优化算法，具有不易陷入局部极小值、需要调整的参数少且易于实现等优点，所以在非线性和多模态问题中使用较广 [21]。为了得到更好的预测结果，本文采用 PSO 算法对 BP 神经网络

的初始权值和阈值进行优化，以解决 BP 神经网络易产生局部极小值的问题，从而提高预测精度[22]。

4.1 模型构建

本研究以冰雹直径、冰雹速度、风速、风向角、冲击力 5 个参数作为风险预测模型的输入特征，以拱形塑料大棚的 5 个风险等级作为分类模型的输出特征，以在试验所获取的 120 组工况下拱形塑料大棚的风险等级数据为基础，构建了模型的数据集，表 8 中列出了部分数据集。

表 8 拱形塑料大棚风险预测模型数据集

Table 8 Arched plastic greenhouse risk prediction model dataset

冰雹直径 / mm	冰雹速度 / (m·s^{-1})	风速 / (m·s^{-1})	风向角 / (°)	冲击力 / N	风险等级
20	19.51	0	0	30.41	1
20	20.10	0	0	32.79	1
20	20.46	0	0	34.71	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	23.28	7	0	55.60	3
25	23.38	7	15	53.02	3
25	22.60	7	30	50.37	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	25.40	11	30	108.54	5
30	25.93	11	45	100.96	5
30	25.24	11	60	91.50	4

确立模型数据集后，对数据集进行归一化处理，本文采用 Min-Max 归一化方法，其可将原始数据线性变换到 [0, 1] 区间内。Min-Max 方法计算式为

$$x'=\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}, \tag{2}$$

式中：x 为原始数据点；x' 为归一化后的数据点；$x_{\min}$ 为该特征的最小值；$x_{\max}$ 为该特征的最大值。

将数据归一化处理后，对模型训练集进行划分，本研究采用按比例随机划分法，将数据集随机打乱后，按比例划分为训练集和测试集，本模型选取 80 组数据作为训练集，40 组数据作为测试集。考虑到模型样本数量较小，本文将模型构建为单隐藏层前馈网络模型。利用式（3）所示经验公式[23]计算出隐藏层神经元节点数的估计值为 4~12，然后采用试凑法确定最佳隐藏层节点数。

$$h=\sqrt{m+n}+a, \tag{3}$$

式中：h 为隐藏层神经元节点数；m 为输入层神经元节点数；n 为输出层节点数；a 为常数，通常取 1~10。

在神经网络模型中，将隐藏层神经元个数设为 4~12 个进行训练，得出不同隐藏层的训练均方误差，如图 9 所示。由图可知，当隐藏层神经元节点数为 10 时，测试的均方误差最小，故将本模型的隐藏层神经元节点数设置为 10。

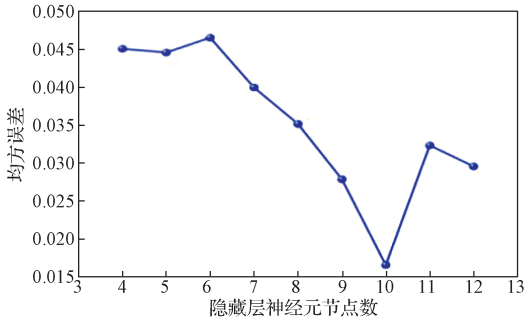


图 9 隐藏层节点数选择图

Fig. 9 Selection chart of hidden layer nodes

本模型将冰雹直径等 5 个参数作为风险预测模型输入层，将风险等级作为模型输出层，构建 PSO-BP 神经网络模型，其结构如图 10 所示。

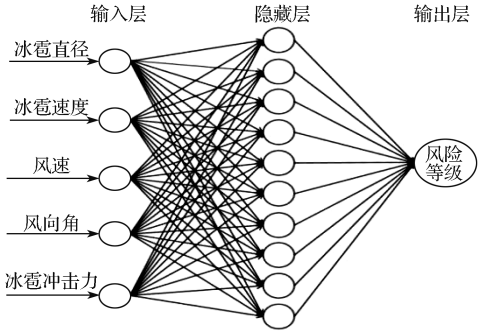


图 10 神经网络预测模型结构

Fig. 10 Neural network prediction model structure

确立神经网络模型结构后，对其基本参数进行设置，PSO 粒子群优化算法的性能高度依赖算法参数的选择，在种群更新次数为 50 的情况下，不同种群规模适应度函数值如图 11 所示。由图可得，不同种群规模下，粒子群迭代次数在 50 次迭代中趋于稳定且达到模型精度要求，因此将粒子群迭代次数设为 50 次。此外发现种群规模为 50 时，PSO 算法的适应度值最低。这表明在该种群规模下，模型拥有更好的泛化能力和预测精度，因此本模型设置种群规模为 50。

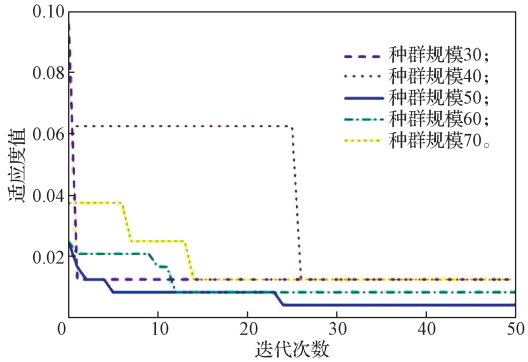


图 11 不同种群规模的 PSO-BP 模型适应度值

Fig. 11 Fitness values of PSO-BP models with different population sizes

对模型的相关超参数进行设置：粒子群模型的粒子速度范围为 ±1.0；粒子群边界范围为 [−2, 2]；最大迭代次数范围为 1 000 次，目标误差范围为 1×10^{-6}，学习率为 0.01。模型采用 tansig（双曲正切 S 型函数）作为输入层到隐藏层的激活函数，purelin（线性激活函数）作为隐藏层到输出层的激活函数。

本文模型属于分类预测，模型的预测精度主要通过以下指标进行评估：模型整体准确率 A（即预测正确的样本数占总样本数的比例）、各分类情况的精确率 P、召回率 R 和 F_1 分数，具体计算式如下。

$$A=\sum_{i=1}^{C}TP_i\Big/N, \tag{4}$$

$$P_i=TP_i\big/\left(TP_i+FP_i\right), \tag{5}$$

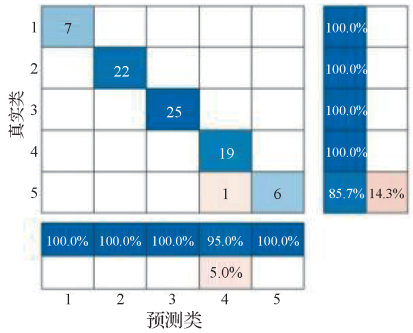
$$R_i=TP_i\big/\left(TP_i+FN_i\right), \tag{6}$$

$$F_{1i}=2\times P_i\times R_i\big/\left(P_i+R_i\right)。 \tag{7}$$

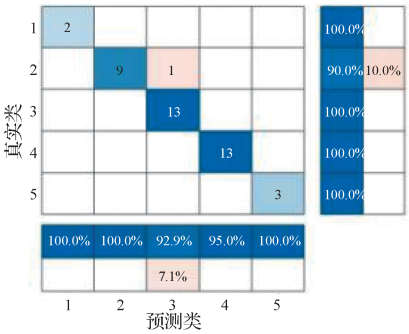
式中：TP_i 为第 i 类别被正确分类样本数；N 为总样本数；C 为类别总数；FP_i 为类别 i 的假正例数（即其他类别被错误预测为类别 i 数量）；FN_i 为类别 i 的假负例数（即类别 i 被错误预测为其他类别数量）。

4.2　模型预测结果与分析

模型预测结果各评估指标可通过混淆矩阵进行分析得出。混淆矩阵是一个表格，用于描述分类模型的预测结果与实际结果之间的对比情况。本模型训练集及测试集的混淆矩阵如图 12 所示。



a）训练集混淆矩阵



b）测试集混淆矩阵

图 12　模型混淆矩阵

Fig. 12　Model confusion matrix

从图 12 所示混淆矩阵来看，PSO-BP 模型在测试集上的表现良好。其中一个中低风险等级被识别为中风险等级，这表明模型在学习过程中，中低风险和中风险等级的特征存在局部相似，但并不影响整体预测结果的准确性，其余等级均能精准预测。基于混淆矩阵计算所得模型的性能指标如表 9 所示。

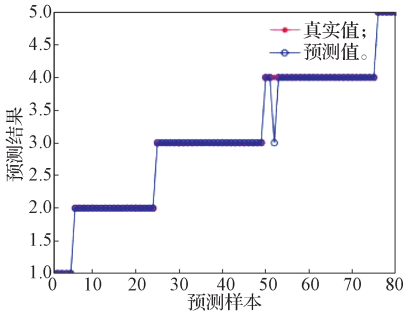
表 9　风雹作用下拱形塑料大棚风险预测模型性能指标

Table 9　Performance index of risk prediction model for arched plastic greenhouse under wind and hail

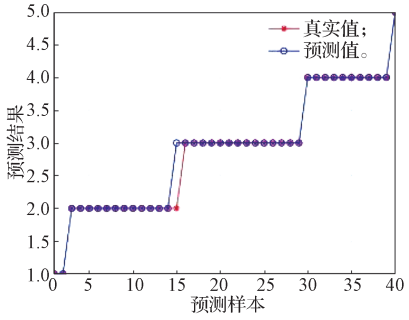
类别	指标	风险等级				
		1	2	3	4	5
训练集	P/%	100	100	100	95	100
	R/%	100	100	100	100	85.7
	F_1	1	1	1	0.97	0.92
	A/%	98.75				
测试集	P/%	100	100	92.9	100	100
	R/%	100	90	100	100	100
	F_1	1	0.95	0.96	1	1
	A/%	97.5				

分析表 9 可得，该模型在测试集上的表现非常出色。总体准确率为 97.5%，大多数类别都能实现精准预测，且最高风险等级预测无任何误判，由此可见模型具有良好的泛化能力和稳定性，可以有效地预测风雹作用下单颗粒冰雹冲击拱形塑料大棚的风险等级。

在经过反复多次打乱数据集测试模型后发现，模型始终保持有 90% 以上的预测精确度。图 13 为训练好的 PSO-BP 神经网络模型的预测结果对比图。



a）训练集预测结果对比



b）测试集预测结果对比

图 13　PSO-BP 神经网络预测结果对比图

Fig. 13　Comparison chart of PSO-BP neural network prediction results

由图 13 可知，模型在测试集上的准确率为 97.5%，预测值与真实值在整体上高度一致，表明了 PSO-BP 模型具有可靠的预测性能。

5 结论

本文通过构建风雹耦合试验系统，研究了不同风向角、冰雹直径及风速对拱形塑料大棚薄膜的抗冲击性能，并结合 PSO-BP 神经网络建立了风险预测模型，得出结论如下：

1）薄膜破坏概率随冰雹直径与风速增加而显著上升，风向角对冰雹破坏概率的影响相对较小，随着风向角的增加，破坏概率总体上呈下降趋势。

2）依据不同工况下的破坏概率及破坏情况对冰雹冲击薄膜大棚进行了破坏分级，并给出了各个工况的风险等级对照表，可为塑料大棚的风雹灾害防治提供参考。研究发现，随着风速和冰雹粒径的增加，风险等级都显著提高；最高风险等级 5 级发生在高风速（11 m/s）和大冰雹粒径（30 mm）的情况下。

3）以风雹耦合试验中 120 组工况的风险等级为数据集，采用 PSO-BP 神经网络构建了一个风雹下单颗粒冰雹冲击拱形塑料大棚风险预测模型，该模型测试集精度达 97.5%，可以较好地预测不同风雹情况下单颗粒冰雹冲击拱形塑料大棚的风险等级。

参考文献：

[1] 戴益民，徐 瑛，李怿歆，等 . 工程结构抗冰雹冲击研究进展及展望 [J]. 湖南大学学报（自然科学版），2023，50(1)：228−236.
DAI Yimin，XU Ying，LI Yixin，et al. Research Progress and Prospect of Hail Impact Resistance of Engineering Structures[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences)，2023，50(1)：228−236.

[2] 许 晶，胡治康，史志清，等 . 拱形塑料大棚风振动力响应分析 [J]. 中国农业大学学报，2024，29(11)：188−195.
XU Jing，HU Zhikang，SHI Zhiqing，et al. Dynamic Response Analysis of Wind Load of Arched Plastic Greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University，2024，29(11)：188−195.

[3] 孙朝锋，吴 立，黄川容，等 . 基于 GIS 的福建省塑料大棚风害风险评估与区划 [J]. 气象与环境科学，2022，45(4)：67−73.
SUN Chaofeng，WU Li，HUANG Chuanrong，et al. Risk Assessment and Division of Wind Damage to Plastic Greenhouses in Fujian Province Based on Geographic Information System[J]. Meteorological and Environmental Sciences，2022，45(4)：67−73.

[4] 杨再强，张 波，薛晓萍，等 . 设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律 [J]. 生态学报，2012，32(24)：7730−7737.
YANG Zaiqiang，ZHANG Bo，XUE Xiaoping，et al. The Wind Tunnel Test of Plastic Greenhouse and Its Surface Wind Pressure Patterns[J]. Acta Ecologica Sinica，2012，32(24)：7730−7737.

[5] MORIYAMA H，SASE S，UEMATSU Y，et al. Influence of Ridge Height of Pipe-Framed Greenhouses on Wind Pressure Coefficients[J]. Transactions of the ASABE，2015，58(3)：763−769.

[6] MORIYAMA H，SASE S，OKUSHIMA L，et al. Which Design Constraints Apply to a Pipe-Framed Greenhouse?：From Perspectives of Structural Engineering, Meteorological Conditions, and Wind Engineering[J]. Japan Agricultural Research Quarterly：JARQ，2015，49(1)：1−9.

[7] YANG Z Q，LI Y X，XUE X P，et al. Wind Loads on Single-Span Plastic Greenhouses and Solar Greenhouses[J]. Hort Technology，2013，23(5)：622−628.

[8] 吴 昆，王少杰，张广鹏，等 . 拱形塑料大棚风致干扰效应及风压特性研究 [J]. 农业工程学报，2019，35(15)：165−174.
WU Kun，WANG Shaojie，ZHANG Guangpeng，et al. Wind-Induced Interference Effects and Wind Pressure Characteristics of Arched Plastic Greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2019，35(15)：165−174.

[9] DOUGKA G，BRIASSOULIS D. Load Carrying Capacity of Greenhouse Covering Films Under Wind Action：Optimising the Supporting Systems of Greenhouse Films[J]. Biosystems Engineering，2020，192：199−214.

[10] 丁 敏，施旭栋，李密密，等 . 薄膜承载力及其对日光温室结构稳定性能的影响 [J]. 农业工程学报，2013，29(12)：194−202, 2.
DING Min，SHI Xudong，LI Mimi，et al. Load-Bearing Capacity of Films and Its Effect on Structure Stability of Chinese Solar Greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，29(12)：194−202, 2.

[11] 朱自强，赵洪志，蔡沅冶，等 . 冰雹冲击下塑料薄膜的损伤分析 [J]. 农业工程学报，2022，38(17)：246−253.
ZHU Ziqiang，ZHAO Hongzhi，CAI Yuanye，et al. Damage Analysis of Plastic Film Under Hail Impact[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，38(17)：246−253.

[12] 邓传军，欧阳斌，陈艳红 . 一种基于 PSO-BP 神经

网络的建筑物沉降预测模型 [J]. 测绘科学，2018，43(6)：27−31, 38.
DENG Chuanjun，OUYANG Bin，CHEN Yanhong. A Buliding Settlement Prediction Model Based on PSO-BP Neural Network[J]. Science of Surveying and Mapping，2018，43(6)：27−31, 38.

[13] 殷运童，马　剑，白镇滔，等 . 基于改进 PSO-BP 神经网络的土遗址锚固力智能化预测研究 [J]. 力学学报，2025，57(4)：867−882.
YIN Yuntong，MA Jian，BAI Zhentao，et al. Intelligent Prediction of Anchorage Force for Earthen Ancient Heritage Sites Based on Improved PSO-BP Neural Network[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2025，57(4)：867−882.

[14] 许　斌，龚安苏，贺　佳，等 . 基于神经网络模型的结构参数提取新方法 [J]. 工程力学，2011，28(4)：35−41.
XU Bin，GONG Ansu，HE Jia，et al. A Novel Structural Parameter Extraction Methodology with Neural Network Based Nonparametric Model[J]. Engineering Mechanics，2011，28(4)：35−41.

[15] 黄靓钰，阳军生，张　聪，等 . 基于 BP 神经网络的水下岩溶地层盾构掘进参数预测与分析 [J]. 土木工程学报，2020，53(增刊 1)：75−80.
HUANG Liangyu，YANG Junsheng，ZHANG Cong，et al. Prediction and Analysis of Shield Tunneling Parameters in Underwater Karst Stratum Based on BP Neural Network[J]. China Civil Engineering Journal，2020，53(S1)：75−80.

[16] 杨存满，鞠佳伟，袁　芳，等 . 基于 PSO-BP 神经网络的水厂智能消毒预测模型 [J]. 中国给水排水，2022，38(3)：57−61.
YANG Cunman，JU Jiawei，YUAN Fang，et al. Research on Intelligent Disinfection Prediction Model of Waterworks Based on PSO-BP Neural Network[J]. China Water & Wastewater，2022，38(3)：57−61.

[17] 黄晓锋，石　崇，朱珍德，等 . 基于粒子群优化算法的边坡临界滑动面搜索方法 [J]. 防灾减灾工程学报，2014，34(6)：751−757.
HUANG Xiaofeng，SHI Chong，ZHU Zhende，et al. Determination Method of Critical Slip Surface Based on PSO Algorithm[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2014，34(6)：751−757.

[18] 徐家骝 . 冰雹阻力系数的半经验关系和末速度的近似公式 [J]. 兰州大学学报，1978，14(1)：90−103.
XU Jialiu. Approximate Formulas of Hailstone Drag Coefficients and Its Terminal Velocity[J]. Journal of Lanzhou University，1978，14(1)：90−103.

[19] 周志华 . 机器学习 [M]. 北京：清华大学出版社，2016：34−48.
ZHOU Zhihua. Machine Learning[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2016：34−48.

[20] 戴益民，李怿歆，徐　瑛，等 . 基于 GA-BP 神经网络的风雹耦合所致冰雹冲击力预测 [J]. 工程力学，2025，42(12)：191−199.
DAI Yimin，LI Yixin，XU Ying，et al. Prediction of Hail Impact Force Induced by Wind-Hail Coupling Based on GA-BP Neural Network[J]. Engineering Mechanics，2025，42(12)：191−199.

[21] 郭琪磊，桑为民，牛俊杰 . 基于粒子群 BP 神经网络的结冰大气参数预测 [J]. 气动研究与试验，2025，3(2)：96−102.
GUO Qilei，SANG Weimin，NIU Junjie. Atmosphere Icing Parameters Prediction Based on PSO-BPNN[J]. Aerodynamic Research & Experiment，2025，3(2)：96−102.

[22] 崔　峰，王汉封，舒卓乐 . 基于 PSO-BP 神经网络的隧道内气动压力幅值预测 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2023，54(9)：3752−3761.
CUI Feng，WANG Hanfeng，SHU Zhuole. Prediction of Aerodynamic Pressure Amplitude in Tunnel Based on PSO-BP Neural Network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2023，54(9)：3752−3761.

[23] 闫鹏程，尚松行，张超银，等 . 改进 BP 神经网络算法对煤矿水源的分类研究 [J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(7)：2288−2293.
YAN Pengcheng，SHANG Songhang，ZHANG Chaoyin，et al. Classification of Coal Mine Water Sources by Improved BP Neural Network Algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2021，41(7)：2288−2293.

（责任编辑：廖友媛）