

谭方颖,何亮,赵晓凤,等,2022.日光温室和塑料大棚风灾指标构建[J].气象,48(9):1186-1194. Tan F Y, He L, Zhao X F, et al, 2022. Construction of wind disaster indexes for solar greenhouses and plastic tunnels[J]. Meteor Mon, 48(9):1186-1194 (in Chinese).

## 日光温室和塑料大棚风灾指标构建\*

谭方颖<sup>1</sup> 何 亮<sup>1</sup> 赵晓凤<sup>1</sup> 张继波<sup>2</sup> 程 路<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国家气象中心,北京 100081

<sup>2</sup> 山东省气候中心,济南 250031

**提 要:** 构建科学合理易操作的灾害指标是灾害预警快速有效、评估准确的基础和关键。基于风对农业设施致灾原理,将风灾划分为导致日光温室和塑料大棚主体结构受损(I级)和棚膜损坏(II级)两个等级。根据当地气候特点,以日光温室和塑料大棚结构设计使用年限为依据,采用极值概率分布模型对1989—2018年全国2467个气象站最大风速观测资料进行分析,计算了20 a和10 a重现期的最大风速,在此基础上,综合考虑不同体型设施抗风能力以及设施农业致灾要素,构建了基于极大风速的日光温室和塑料大棚不同等级风灾指标,并绘制了相应风灾指标分布图。经2009—2018年全国设施农业大风灾情资料以及2020年各区域代表省份风灾实例检验,所得风灾指标与承灾体受灾程度、实际观测风速均具有较好的一致性。

**关键词:** 风灾指标,日光温室,塑料大棚,重现期,极大风速

中图分类号: P49, S626

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.042201

## Construction of Wind Disaster Indexes for Solar Greenhouses and Plastic Tunnels

TAN Fangying<sup>1</sup> HE Liang<sup>1</sup> ZHAO Xiaofeng<sup>1</sup> ZHANG Jibo<sup>2</sup> CHENG Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Meteorological Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> Shandong Climate Centre, Jinan 250031

**Abstract:** Scientific and reasonable disaster indexes are the basis and key to the effective disaster early warning and accurate disaster impact assessment. In this study, based on the principle of wind damage to agricultural facilities, the wind disaster indexes of protected agriculture are divided into two levels. Level I is for the damage to the main structure of the facility, Level II is for the damage to the shed film. Based on the local climate characteristics and design service lifetime of solar greenhouses and plastic tunnels, the extreme value probability distribution model is used to analyze the maximum wind speed observation data of 2467 weather stations from 1989 to 2018, and the maximum wind speed of 20-year and 10-year return period are calculated. On this basis, the wind resistance of different types of agricultural facilities and the disaster-causing factors are considered comprehensively, and the wind disaster indexes for solar greenhouses and plastic tunnels of different levels based on extreme wind speed are established. According to the main distribution areas of solar greenhouses and plastic tunnels in China, the wind disaster indexes distribution maps are drawn. Based on the 2009—2018 wind disaster data of protected agriculture and the wind disaster cases of representative provinces in each region in 2020, the wind disaster indexes determined in this study are in good agreement with the disaster-bearing body's degree of damage and the observed wind speed.

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507802)资助

2021年8月3日收稿; 2022年6月2日收修定稿

第一作者:谭方颖,主要从事农业气象预报及灾害影响评估研究. E-mail: tanfangying0803@163.com

And the method for determining the wind disaster index is feasible.

**Key words:** wind disaster index, solar greenhouse, plastic tunnel, return period, extreme wind speed

## 引言

设施农业生产是农业增产、农民增收的主要手段,对于保障农产品有效供给、增强农业综合生产力以及实施乡村振兴战略具有重要意义。20世纪80年代以来,中国以日光温室、塑料大棚为代表的设施农业发展迅速(陈思宁等,2014),据农业农村部统计,2008—2016年期间,全国(不含港澳台)设施农业总面积由81.312万 $\text{hm}^2$ 增加至208.288万 $\text{hm}^2$ ,以平均每年14.108万 $\text{hm}^2$ 的幅度增长,其中日光温室和塑料大棚总面积占比达95%以上。尽管中国设施农业取得了长足进步,但农业设施抵御自然灾害能力依然薄弱,尤其是在气候变化背景下,极端灾害性天气频发,给设施农业生产带来的损失显而易见(李秀芬等,2007;苗克红等,2016),严重制约设施农业可持续发展。国外发达国家设施农业标准化程度高,设施环境综合调控及农业机械化技术发达,设施农业受气象灾害影响较小,其研究主要侧重于经济风险、社会风险和环境影响(Piers,1998;Carter,1995)。我国对于设施农业的研究主要集中在气候适应性和气候区划(李德等,2013;张亚红,2003;张明洁和赵艳霞,2013)、气象灾害风险分布(蔡冰等,2011;杨再强等,2012;陈思宁等,2017;黄川容等,2012)及灾害影响和防御措施方面(柳军等,2018;刘佳等,2018),而对于灾害指标的研究甚少。随着天气预报业务的发展,数值天气预报为气象灾害快速、精准预警服务提供了更广阔的发展空间。大风天气时有发生,准确的预报预警信息可使生产者提前做好防范,有效减少风灾损失,因此,制定科学合理的风灾指标尤为重要。设施农业风灾指标常规的获取方法有:现场观测法、计算流体力学法(CFD法)和风洞试验法(Lukiantchuki et al,2020;任兰红等,2019;张波,2013;杨振超,2006)。现场观测法需要耗费大量的时间和人力,风洞试验法受试验条件所限,试验模型、灾害发生环境与实际情况存在明显差异,且因耗资较大,研究也较少,而CFD法主要用于温室内部环流场的模拟。目前针对设施农业风灾的预报预警服务,大多采用蒲福风力等级作为风灾指标(孙治贵等,2018;孙智辉等,2011),但此

标准未考虑各地气候特点差异,也未与农业设施抗风设计标准及风灾影响程度相结合,不利于设施农业生产者有针对性地采取防御措施,导致风灾预警和防御的有效性大打折扣。可见,通过以上方法确定的风灾指标在实际应用中均存在一定局限性。

本文基于风对农业设施致灾原理及其影响程度划分风灾等级,以我国各地气候特点及主要农业生产设施结构设计使用年限为依据,探讨了日光温室和塑料大棚风灾指标确定方法,并利用实际灾情资料对风灾指标进行验证,以期为各地农业设施风灾预报预警和风险评估、农业防灾减灾以及设施农业科学管理、减少生产成本提供参考依据。

## 1 资料及方法

### 1.1 资料及来源

本研究所用气象资料为1989—2018年全国2467个气象观测站10 m高度处日最大风速,即从给定时间段(1 d)内选取任意10 min平均风速的最大值,用于分析计算不同重现期最大风速;2009—2018年全国1714个气象观测站10 m高度处日极大风速,即给定时间段(1 d)内3 s最大瞬时风速,用于1.5节中构建日最大风速与极大风速间关系模型,以上风速资料均来自国家气象信息中心。2009—2018年和2020年灾情资料用于风灾指标验证,来自中国气象局气象灾害管理系统。

### 1.2 风灾等级划分

在设施农业生产中,当风速达到一定量级,对日光温室和塑料大棚的直接影响是掀翻棚膜、棚体倾斜,随着风速的增加,超过设施结构设计的风荷载,设施主体结构将受到损坏,甚至垮塌(龚伟等,2017;陈松来,2009)。因此,本文基于以上风灾对农业设施的影响,将其划分为两个等级。由于日光温室建造时,墙体的承载力一般都大于其可能承受的荷载量,因此对于日光温室,主体结构主要考虑钢骨架结构。

### 1.3 设施结构设计使用年限确定

我国温室、大棚由于其使用材料、功能以及用户

需求的差异,在重要性、安全度、实际使用年限等方面各不相同(孙德发等,2002),因此,针对不同设施结构设计使用年限,一般规定基本风压的重现期为 5~30 a,即风速的保证概率为 80.0%~96.7%。本研究中日光温室指三面为保温围护墙体,单坡面以钢管为骨架支撑、以塑料薄膜覆盖的农业生产设施,使用年限一般不超过 20 a(李中明等,2011);塑料大棚指以钢或钢、竹木混合为支撑,以塑料薄膜覆盖的拱形农业生产设施,使用年限一般不超过 10 a。综合以上日光温室和塑料大棚结构设计使用标准,以及实际使用寿命和风速保证率,本文对于日光温室和塑料大棚主体结构的设计使用年限,分别采用 20 a 和 10 a 的重现期标准(王笃利等,2005;闫俊月等,2014),相应风速保证率分别为 95%和 90%。

#### 1.4 T 年重现期最大风速估算方法

基于 1989—2018 年逐日最大风速,计算各站点年最大风速  $x$ (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),采用广义极值分布函数(Coles,2001)对逐年最大风速  $x$  的分布进行拟合:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{\delta} e^{-(1+kz)^{-\frac{1}{k}} (1+kz)^{-1-\frac{1}{k}}} & k \neq 0 \\ \frac{1}{\delta} e^{-z-e^{-z}} & k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$z = \frac{x - \mu}{\delta}$$

式中: $g(x)$ 为拟合函数, $k$ 为形状参数, $\delta$ 为尺度参数, $\mu$ 为位置参数。参数  $k$ 、 $\delta$ 、 $\mu$  的估计采用最大似然法,函数拟合优度检验利用 Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验法。

基于式(1)对参数  $k$ 、 $\delta$ 、 $\mu$  的估计结果, $T$ 年重现期最大风速  $U$ 通过式(2)做估算:

$$U = \begin{cases} \mu - \frac{\delta}{k} \{1 - [-\ln(1 - \frac{1}{T})]^{-k}\} & k \neq 0 \\ \mu - \delta \ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})] & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U$ 为  $T$ 年一遇最大风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $T$ 为重现期,根据 1.3 节的规定取值。

#### 1.5 风灾指标阈值计算方法

农业设施抵御风灾的能力由其结构本身的风荷载决定,风荷载的大小取决于基本风压,而各地基本风压是一个关于重现期、风速时距和离地高度三个变量的复合单调函数(王笃利等,2005),表示如下:

$$W = \frac{1}{2} r U^2 \beta^2 \omega \quad (3)$$

式中: $W$ 为农业设施结构设计基本风压(单位:  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $r$ 为空气密度(单位:  $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $U$ 为不同重现期最大风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\omega$ 为标准地貌下的风压高度变化系数; $\beta$ 为时距换算系数,对于日光温室和塑料大棚,此类轻型结构设计宜采用 3 s 时距的最大瞬时风速(即极大风速)作为基本风压取值的基础要素,因此本研究  $\beta$ 即为极大风速(3 s 时距)与最大风速(10 min 时距)的换算系数,通过构建最大风速( $x$ )与极大风速( $y$ )间关系模型  $y = f(x)$ 得到,因此式(3)可改写为:

$$W = \frac{1}{2} r f U^2 \omega \quad (4)$$

根据伯努利方程,实际来流风压可表示为:

$$W_0 = \frac{1}{2} r V^2 \quad (5)$$

式中: $W_0$ 为实际来流风压(单位:  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ), $V$ 为实际风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

基于式(4)和式(5),当  $W_0 = W$ ,即实际来流风压达到农业设施结构设计的基本风压时,设施主体结构可能受到损坏,此时的风速  $V$ 即为造成设施主体结构受损的风灾指标阈值,即:

$$V_j = \sqrt{f(U_j)^2 \omega_j} \quad (6)$$

式中: $f(U_j)$ 为不同重现期最大风速对应的极大风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $j$ 为设施类型, $j=1$ 代表日光温室, $j=2$ 代表塑料大棚; $\omega_j$ 为风压高度变化系数,按照《农业温室结构荷载规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2016b)中 4 m(日光温室)和 3 m(塑料大棚)高度标准取值, $\omega_1=0.76$ , $\omega_2=0.7$ 。

根据 1.2 节风灾等级划分标准,各等级风灾指标阈值按照式(7)计算:

$$V_{i,j} = V_j \alpha_i \quad (7)$$

式中: $V_{i,j}$ 为不同等级日光温室和塑料大棚风灾指标阈值(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $i$ 为风灾等级(分别为 I 和 II); $\alpha_i$ 为不同等级风灾影响系数,根据张波(2013),日光温室和塑料大棚顶部和侧面局部往往承受的风压较大,即当风速达到一定量级,以上部位棚膜首先被损坏,而风在设施表面产生的风压可通过风荷载体型系数体现,根据中华人民共和国住房和城乡建设部(2016b)相关规范, $0^\circ$ 风向时设施顶部和垂直风向的设施表面风荷载体型系数为 0.8,同时参考蒲福风力等级影响以及风力为 6~8 级时相邻等级间

风速阈值比值,由此以 I 级风灾的影响系数  $\alpha_I = 1.0$  为标准, II 级风灾影响系数  $\alpha_{II} = \alpha_I \times 0.8 = 0.8$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同重现期最大风速

利用 1.4 节中介绍的方法计算不同重现期最大风速,并检验函数模拟拟合优度,结果显示:全国 2467 个气象观测站点中,共 1714 个站点数据拟合结果通过检验,基于上述 1714 个站点计算 20 a、10 a 重现期最大风速,结果见图 1 和图 2。可见,最大风速高值区主要分布在西藏中东部、新疆中东部、青海、内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁大部、山西中北部、河北南部、山东半岛、华南和东南沿海地区等地,其中西藏北部、内蒙古北部、青海西部、新疆北部等地受地形等因素影响,华南沿海地区受台风影响,20 a、10 a 一遇最大风速分别在  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上;最大风速低值区主要分布在长江以南的非沿海地区,其中湖北南部、湖南、江西、华南西部和北部、四川盆地等地 20 a、10 a 一遇最大风速均在  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下;其他地区属于风速较高值区,大部地区 20 a、10 a 一遇最大风速在  $14 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,在不同地区,不考虑设施体型、高度等风荷载参数不同的情况下,即使是相同设计使用年限的温室或大棚,其基本风压、抗风能力也会有所差别,在温室和大棚建造时,应加以考虑。

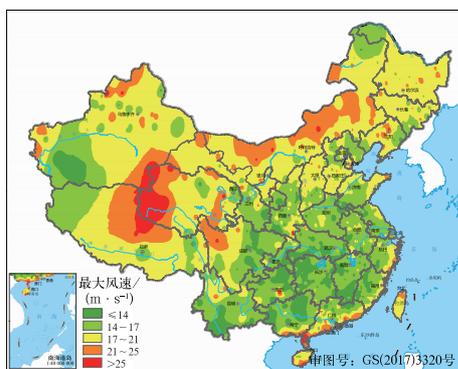


图 1 全国 20 a 重现期最大风速分布  
(港澳台数据由克里金插值法计算获得,下同)

Fig. 1 Maximum wind speed distribution with a return period of 20 years in China  
(Hong Kong, Macao and Taiwan data are obtained by Kriging interpolation method, the same below)

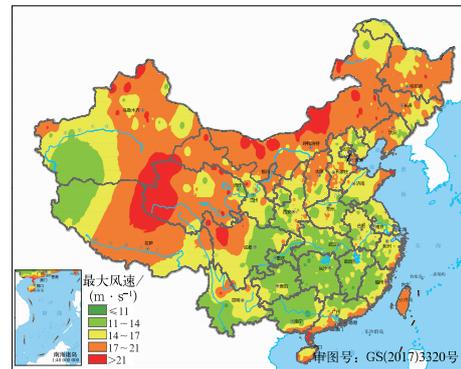


图 2 全国 10 a 重现期最大风速分布  
Fig. 2 Maximum wind speed distribution with a return period of 10 years in China

### 2.2 最大风速与极大风速换算系数

考虑到各地气候特点不同,以及近年来气候较 20 世纪 80 年代之前的变化(孟丹等,2019;敖雪等,2020),如最大风速与极大风速换算系数按照经验常数(朱瑞兆,1976)取值,在时间和空间上将会存在一定差异,为使指标更加准确,本文利用 1.5 节中介绍的  $\beta$  计算方法,对各站点最大风速与极大风速换算系数进行估算。分析结果显示,两者间存在  $f(x) = kx + b$  的线性关系,且所有站点线性方程均可通过  $P < 0.05$  的显著性水平检验,全国 85% 的站点参数  $b$  的绝对值在  $[0, 1]$ , 99% 站点参数  $b$  的绝对值在  $[0, 2]$ 。因此,拟将参数  $k$  作为最大风速  $U$  与极大风速换算系数,即极大风速为  $Uk$ 。经方差分析检验,  $f(x)$  与  $Uk$  无明显差异,因此,  $k$  可作为最大风速与极大风速换算系数,尤其是在极大风速资料获取困难、无法构建极大风速与最大风速转换方程的情况下使用,由此图 3 给出了  $k$  的空间分布。可见,  $k$  值在长江以南地区和新疆较大,大部在  $1.6 \sim 1.9$ ; 在东北地区、内蒙古、青海、河南、安徽、广西等地最小,普遍在  $1.1 \sim 1.6$ ,与重现期风速大小的空间分布大致相反。从全国来看,77% 站点的  $k$  在  $1.4 \sim 1.8$ ,全国平均值为 1.6。

### 2.3 风灾指标计算结果

由于日光温室以冬季保温为目的,主要分布在长江以北和高海拔地区,塑料大棚则在全国范围内均有分布。根据 1.5 节方法,计算日光温室和塑料大棚风灾指标阈值, I 级指标阈值分布见图 4 和图 5。可见,风灾指标阈值高值区主要分布在西藏、新疆、

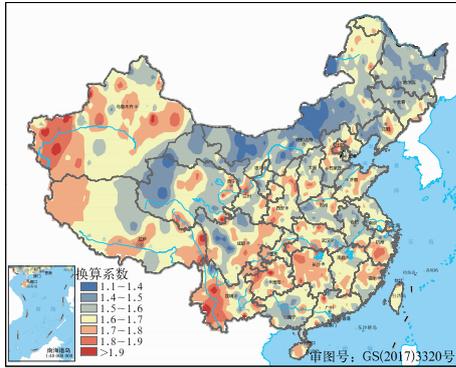


图 3 全国最大风速与极大风速换算系数  
Fig. 3 The conversion factor between maximum wind speed and extremum wind speed in China

青海、甘肃中北部、宁夏、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、山西中北部、河北中南部、山东半岛等地,以上地区日光温室和塑料大棚 I 级风灾指标分别为极大风速  $\geq 24.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $\geq 21.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 指标阈值低值区主要分布在河南西部以及长江以南的湖北南部、贵州东北部、重庆东南部、湖南西北部、江西、广西中北部等地,日光温室和塑料大棚(以塑料大棚为主) I 级风灾指标分别为极大风速在  $[15.2, 19.0] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $[13.5, 16.9] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 其他地区属于指标较高值区,主要为黄淮海地区、西北地区东南部和长江以南非沿海的大部分地区, I 级风灾指标位于高值区和低值区的风灾指标之间。当极大风速达到或超过以上标准,日光温室和塑料大棚主体结构可能损坏或倒塌。

指标高值区的日光温室和塑料大棚 II 级风灾指标分别为极大风速在  $[19.2, 24.0) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $[17.5, 21.9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 低值区指标分别为极大风速在  $[12.2, 15.2] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $[10.8, 13.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其他地区属于风灾指标较高值区,当极大风速达到或超过以上标准,日光温室和塑料大棚棚膜可能被损坏或掀翻。由于风灾 II 级指标阈值与 I 级指标阈值分布相同,只存在量级上的差异,因此不再给出空间分布图。可见,风灾指标存在空间差异,如采用同一抗风标准建造日光温室或塑料大棚,一定程度上可能会造成抗风能力不足而影响使用,或者抗风标准过高浪费生产成本。

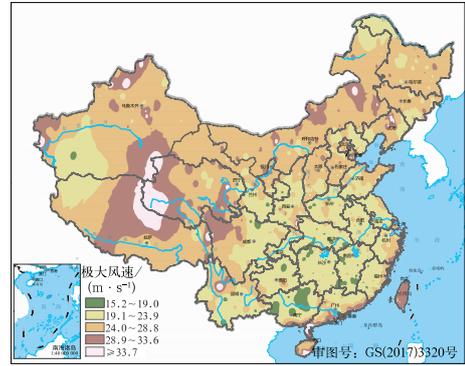


图 4 日光温室 I 级风灾指标阈值分布  
Fig. 4 Threshold distribution of Level I index of wind disaster in solar greenhouse

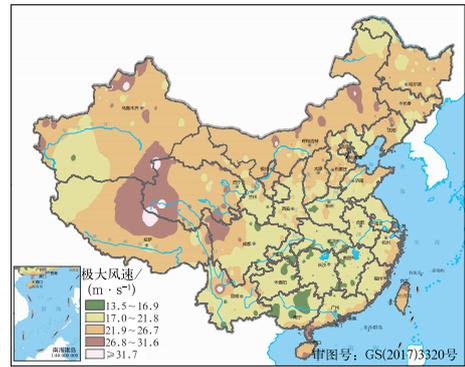


图 5 塑料大棚 I 级风灾指标阈值分布  
Fig. 5 Threshold distribution of Level I index of wind disaster in plastic tunnel

### 3 风灾指标检验

#### 3.1 合理性检验

从 2009—2018 年全国风灾灾情数据中共提取出 754 个农业设施受灾,根据风灾发生时间、地点,从灾情记录和观测数据中提取每个风灾过程中的日极大风速,将其与风灾指标进行相关性分析。结果显示,各风灾样本的极大风速观测值与风灾指标显著相关( $n=754, r=0.372, P<0.05$ )。说明各地风灾发生时的极大风速与该地风灾指标具有较好的一致性。此外,754 个检验样本中极大风速观测值  $\geq 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (塑料大棚风灾 II 级指标阈值下限) 的占比为 97.6%,一定程度也反映了指标的合理性。

### 3.2 准确性检验

因历史灾情资料中大多未明确记录承灾体类型是日光温室或是塑料大棚,受灾程度为棚膜受损还是主体结构受损,因此很难对灾害指标的准确性进行验证,这也是目前很多指标缺少验证的主要原因。因此,本文选择南、北方设施农业主要分布和适宜发展地区(张亚红,2003)中的代表省份山东省(黄淮海地区)、甘肃省(西北地区),以及江西省、湖北省和江苏省(长江中下游地区),从 2020 年风灾灾情中提取有详细记录的 24 个农业设施受灾样本,进一步对风灾指标和等级进行验证,并规定风灾样本中观测极

大风速与风灾等级及其对应的指标范围完全吻合即为“符合”,相差一个等级为“基本符合”,否则为“不符合”,验证结果见表 1。表 1 显示,24 个风灾样本中,17 个样本的验证结果为“符合”;4 个样本极大风速观测值与日光温室、塑料大棚的 II 级风灾指标吻合,但未达到 I 级指标即出现“部分结构损坏”,验证结果为“基本符合”;3 个样本在极大风速观测值未达到风灾 II 级指标即出现“棚膜受损”,验证结果为“不符合”,但指标阈值与极大风速观测值相差较小,均在  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内。可见,本文确定的日光温室和塑料大棚风灾指标较为准确。

表 1 2020 年代表省份设施农业风灾指标验证

**Table 1 Wind disaster index verification of facility agriculture in representative provinces in China in 2020**

样本序号	省份	受灾地点	受灾时间/月-日	日极大风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	承灾体/受灾程度	塑料大棚风灾 II / I 级指标/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	日光温室风灾 II / I 级指标/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	相符
1		菏泽市牡丹区	3-26	17.8	B/2	13.4/16.8		Y
2		菏泽市牡丹区	5-17	22.5	A/1	13.4/16.8	14.9/18.6	Y
3		菏泽市鄄城县	5-17	20.5	B/1	13.1/16.3		Y
4	山东	济宁市兖州区	5-17	16.6	B/2	18.4/23.0		N
5		泰安市东平县	5-17	20.5	B/2	17.0/21.2		Y
6		聊城市高唐县	6-1	19.7	B/2	16.7/20.8		Y
7		日照市莒县	12-29	19.3	B/2	15.6/19.5		Y
8		敦煌市	4-9	21.4	A/2,B/2	17.5/21.9	19.6/24.5	Y
9		酒泉市瓜州县	4-16	18.3	B/2	18.8/23.5		N
10		玉门市	4-16	19.7	B/1	19.0/23.7		O
11	甘肃	白银市会宁县	5-1	17.0	B/2	15.9/19.9		Y
12		临夏永靖县	5-15	18.4	A/2,B/2	16.2/20.3	18.1/22.6	Y
13		玉门市	6-26	21.4	A/1,B/1	19.0/23.7	21.0/26.2	O
14		玉门市	7-28	22.7	A/2,B/1	19.0/23.7	21.0/26.2	O
15		张掖市临泽县沙河镇	8-15	24.6	B/1	16.2/20.2		Y
16		抚州市崇仁县	3-22	24.5	B/1	16.1/20.1		Y
17	江西	新余市渝水区	3-25	20.8	B/1	13.2/16.5		Y
18		赣州市全南县	5-16	16.3	B/2	13.8/17.2		Y
19		瑞金市	8-25	21.7	B/1	13.5/16.8		Y
20	湖北	武汉市东西湖区	2-15	16.1	B/1	11.2/13.9		Y
21		随州市	5-4	13.5	B/1	14.9/18.6		N
22		徐州市邳州区	5-17	23.2	B/1	15.2/19.0		Y
23	江苏	新沂市	5-23	23.3	B/1	13.8/17.3		Y
24		连云港市东海县	12-29	16.9	B/1	16.6/20.8		O

注:A 代表日光温室,B 代表塑料大棚,1 代表结构损坏,2 代表棚膜掀翻或损坏,Y 代表符合,O 代表基本符合,N 代表不符合。

Note: A stands for solar greenhouse, B stands for plastic tunnel; 1 stands for the structure of the facility damaged, 2 stands for the plastic shed film overturned or damaged; Y stands for corresponding, O stands for mainly corresponding, N stands for non-corresponding.

## 4 结论与讨论

根据我国主要农业生产设施(日光温室和塑料大棚)结构抗风设计标准,基于气候特点及风对农业

设施致灾原理,确定了日光温室和塑料大棚风灾等级及相应等级风灾指标。日光温室和塑料大棚风灾指标阈值呈北方、沿海地区及高海拔地区大、南方及低海拔地区小的特点。指标阈值高值区主要集中在西北地区中西部、内蒙古、东北地区和华北部分地区

以及沿海地区,日光温室和塑料大棚风灾 I 级指标分别为极大风速 $\geq 24.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\geq 21.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , II 级指标分别为 $[19.2, 24.0) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $[17.5, 21.9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上述地区农业设施一般宜为抗风和保温性能好、厚度较厚的钢、镀锌管等材料;湖北南部、江西、湖南、广西和四川盆地东部等地属于指标阈值低值区,塑料大棚 I 级风灾指标为极大风速 $[13.5, 16.9] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , II 级指标为 $[10.8, 13.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上述地区农业设施主体结构一般为厚度较薄的经济型材料,农业设施以塑料大棚为主,如设施内栽培经济价值较高的作物,则多采用玻璃或大型连栋温室等抗风性能更好的设施;全国其余大部地区为指标阈值较高值区,也是我国设施农业主要分布区域,设施主体结构一般为可综合考虑抗风性能和经济投入的标准日光温室和塑料大棚。张波(2013)通过风洞试验得到塑料大棚和日光温室的致灾临界极大风速分别为 $14.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在本研究塑料大棚和日光温室风灾 II 级指标较高区域范围之内;张淑杰等(2015)对东北地区 2013 年大风灾害统计结果显示,80%以上风灾样本导致掀棚的极大风速在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;郭小芹等(2016)给出了甘肃省武威市设施农业轻度、中度和重度风灾指标的极大风速分别为 $13.8 \sim 17.1$ 、 $17.1 \sim 20.7$ 和 $20.7 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与本文的研究结果较为一致。此外,现有地方标准(山西省质量技术监督局,2016;辽宁省质量技术监督局,2015;浙江省市场监督管理局,2021)中,山西省塑料大棚和日光温室棚膜被吹破的指标分别为风力 7~8 级和 8~9 级,辽宁省风力达 8~9 级时启动风灾橙色预警,浙江省塑料中棚和单体钢架大棚中度和重度受损的指标分别为风力 6~7 级和 8 级以上,均与本文研究结果较为吻合。

本研究风灾指标可为不同地区日光温室和塑料大棚风灾预报预警和评估提供依据和参考,同时生产者可根据预报风速对应的不同风灾等级,采取相应防御措施,提高防灾避险的有效性,减少不必要的生产成本浪费。当预报的极大风速达到 II 级风灾指标时,生产者可通过适时关闭通风口、提前修补破损棚膜,增加设施密封性,并通过采取压平和抻平棚膜、增加压膜线等措施,提高设施防风性,北方日光温室在没有降雨、降雪的大风天气,可适当增加草帘厚度,同时用绳索、纱袋等固定、压牢,减少棚膜受灾风险;当预报的极大风速达到 I 级风灾指标时,除采取 II 级风灾相应防御措施外,还应采取加固或增加

棚室立柱和骨架等措施,提高设施主体结构抗风能力,必要时可适时揭膜或破膜保棚,减少因垮棚而造成的经济损失,对于北方日光温室,还可采取在后墙设置防风膜等风灾防御措施。此外,基于本文风灾指标,可计算全国不同区域日光温室和塑料大棚基本风压,其结果也可为设施农业建设投资和合理布局提供参考,以防止因设施抗风能力不足导致受灾风险增大,或因风压标准过大导致建造成本浪费。

在进行指标合理性检验时,2.4%的灾害样本在未达到风灾指标的情况下出现了不同程度灾情,主要原因之一可能是在风灾发生期间,同时伴随其他灾害性天气,之二可能是承灾体为闲置的年久失修大棚或者简易拱棚等,基于以上情况,今后风灾指标在构建时还应进一步考虑利用其他致灾因子和周期因子对指标加以修正;还有部分样本的观测风速明显偏大,可能是受客观条件所限,该地区样本较少,有记录的灾情多为受灾极为严重的情况。利用 2020 年灾情资料对风灾指标准确性的检验结果总体较好,但甘肃省风灾指标较样本观测值总体偏大,导致风速未达到风灾指标,即出现设施受灾的情况,其原因可能是样本中设施使用时间较久或疏于管理,也可能是当地设施结构设计标准与本研究存在一定差异,具体原因还需进一步调研确定。

本研究是以我国各地气候特点及主要农业生产设施抗风结构设计标准为依据,在正常生产和管理的条件下,给出了北方日光温室和全国塑料大棚不同等级风灾指标构建方法,虽然一定程度上解决了目前农业设施风灾预报预警、评估指标针对性不足、农业设施结构复杂风灾指标难以确定的问题,但由于农业设施种类和用途繁多,即使是同种设施类型,其不同地区间的规模、覆盖材料、管理水平等方面仍存在差异,因此,其他类型和抗风设计标准的农业设施风灾指标可参考本文方法进行计算,在应用时也应根据当地设施农业生产管理水平、设施结构材料本身特点等实际情况进行适当调整。此外,根据工程技术规范(中华人民共和国住房和城乡建设部,2016a),农业设施用地一般选择在背风、非冰雹频发、平整的地块,地形坡度不宜大于 $10^\circ$ ,而实际生产中,受客观条件所限,部分农业设施并不能够按照规范建造,且在风灾发生时还可能伴随冰雹、暴雨等灾害性天气,更易造成棚膜破损、主体结构不稳,一定程度上会降低设施的抗风能力,针对以上情况,建议在实际应用时对风灾指标进行适当折减。

## 参考文献

- 敖雪,翟晴飞,崔妍,等,2020.城市化对辽宁省近地面风速的影响分析[J].气象,46(9):1153-1164. Ao X, Zhai Q F, Cui Y, et al, 2020. Analysis of urbanization effect on near-surface wind speed change in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 46(9):1153-1164 (in Chinese).
- 蔡冰,刘寿东,费玉娟,等,2011.江苏省设施农业气象灾害风险等级区划[J].中国农学通报,27(20):285-291. Cai B, Liu S D, Fei Y J, et al, 2011. The risk grading regionalization of meteorological disaster of facilities agriculture in Jiangsu Province[J]. Chin Agric Sci Bull, 27(20):285-291(in Chinese).
- 陈思宁,黎贞发,柳芳,等,2017.天津新型日光温室风灾风险评估及区划[J].中国农学通报,33(2):115-120. Chen S N, Li Z F, Liu F, et al, 2017. Wind disaster of new type solar greenhouse in Tianjin: risk evaluation and zoning division[J]. Chin Agric Sci Bull, 33(2):115-120(in Chinese).
- 陈思宁,黎贞发,刘淑梅,2014.设施农业气象灾害研究综述及研究方法展望[J].中国农学通报,30(20):302-307. Chen S N, Li Z F, Liu S M, 2014. Review of facilities agriculture meteorological disasters and prospect of associated study methods[J]. Chin Agric Sci Bull, 30(20):302-307(in Chinese).
- 陈松来,2009.轻型木结构房屋抗风性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学. Chen S L, 2009. Behavior of light wood frame construction under wind load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(in Chinese).
- 龚伟,刘建,杨小锋,等,2017.海南温室大棚结构设计基本风压取值的研究[J].农业工程技术,37(34):44-51. Gong W, Liu J, Yang X F, et al, 2017. Research on the value of basic wind pressure in the structural design of greenhouses in Hainan[J]. Agric Eng Technol, 37(34):44-51(in Chinese).
- 郭小芹,刘明春,陈立夫,等,2016.河西东部设施农业风灾指标设计及其特征研究[J].中国农学通报,32(8):122-128. Guo X Q, Liu M C, Chen L F, et al, 2016. Wind disaster index design for facility agriculture in eastern Hexi Corridor of Gansu[J]. Chin Agric Sci Bull, 32(8):122-128(in Chinese).
- 黄川容,杨再强,刘洪,等,2012.北京日光温室风灾风险分析及区划[J].自然灾害学报,21(3):43-49. Huang C R, Yang Z Q, Liu H, et al, 2012. Risk analysis and regionalization of wind hazard to sunlight greenhouse in Beijing[J]. J Natl Dis, 21(3):43-49(in Chinese).
- 李德,杨太明,刘瑞娜,等,2013.安徽省设施农业冬季低温风险分析和区划[J].中国农业气象,34(6):703-709. Li D, Yang T M, Liu R N, et al, 2013. Low temperature risk division in winter for protected agriculture in Anhui Province[J]. Chin J Agrometeor, 34(6):703-709(in Chinese).
- 李秀芬,朱教君,贾燕,等,2007.2007年辽宁省特大暴风雪形成过程与危害[J].生态学杂志,26(8):1250-1258. Li X F, Zhu J J, Jia Y, et al, 2007. Formation process of extraordinarily serious snowstorm and its induced damage in 2007 in Liaoning Province [J]. Chin J Ecol, 26(8):1250-1258(in Chinese).
- 李中明,沈军,王仲,等,2011.北京市日光温室与塑料大棚生产效益分析[J].中国蔬菜,(22/23/24):13-19. Li Z M, Shen J, Wang Z, et al, 2011. Production efficiency analysis of solar greenhouse and plastic big-arch shelter in Beijing[J]. China Veg, (22/23/24):13-19(in Chinese).
- 辽宁省质量技术监督局,2015.设施农业(温室)风雪气象灾害预警等级:DB21/T 2475—2015[S]. Liaoning Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015. Wind and snow meteorological disaster warning level of facility agriculture (greenhouse):DB21/T 2475—2015[S](in Chinese).
- 刘佳,高雪,刘晋联,2018.晋中市气象灾害对设施农业生产的影响及防御对策[J].农业灾害研究,8(6):83-84. Liu J, Gao X, Liu J L, 2018. Effects of meteorological disasters on facility agricultural production and countermeasures in Jinzhong[J]. J Agric Catastrophol, 8(6):83-84(in Chinese).
- 柳军,吴春龙,谢金花,2018.强降雪对设施草莓的影响及防御对策分析[J].安徽农学通报,24(17):132-134. Liu J, Wu C L, Xie J H, 2018. The influence of severe snowfall on facility strawberries and countermeasures[J]. Anhui Agric Sci Bull, 24(17):132-134 (in Chinese).
- 孟丹,陈正洪,陈城,等,2019.基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J].气象,45(12):1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. Meteor Mon, 45(12):1756-1761(in Chinese).
- 苗克红,刘慧琴,高佳欣,2016.灾害性天气对设施农业的影响及其防御措施[J].现代农业科技,(9):207,209. Miao K H, Liu H Q, Gao J X, 2016. Disastrous weather's influence on facility agriculture and its defense measures[J]. Mod Agric Sci Technol, (9):207,209(in Chinese).
- 任兰红,曾坚,曾穗平,等,2019.福建沿海历史街区风荷载特性数值模拟与风险防控方法[J].灾害学,34(2):103-109. Ren L H, Zeng J, Zeng S P, et al, 2019. Numerical simulation of wind load characteristics and risk control methods for historic blocks along Fujian Coast[J]. J Catastrophol, 34(2):103-109(in Chinese).
- 山西省质量技术监督局,2016.设施农业气象灾害风灾预警等级:DB14/T 1209—2016[S]. Shanxi Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2016. Meteorological disasters of facility agriculture-warning level of wind disaster:DB14/T 1209—2016[S](in Chinese).
- 孙德发,苗香雯,崔绍荣,2002.连栋温室结构设计中动态风压取值方法初探[J].农业工程学报,18(1):93-95. Sun D F, Miao X W, Cui S R, 2002. Preliminary study on calculating dynamic wind pressure for multi-span greenhouse structural design[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 18(1):93-95(in Chinese).
- 孙治贵,王元胜,张禄,等,2018.北方设施农业气象灾害监测预警智能服务系统设计与实现[J].农业工程学报,34(23):149-156. Sun Z G, Wang Y S, Zhang L, et al, 2018. Design and realization of intelligent service system for monitoring and warning of meteorological disasters in facility agriculture in North China[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 34(23):149-156(in Chinese).

- 孙智辉,刘志超,曹雪梅,等,2011.日光温室气象服务体系设计与应用[J].中国农学报,27(11):219-223. Sun Z H, Liu Z C, Cao X M, et al, 2011. Design and application on meteorological service system of sunlight greenhouse[J]. Chin Agric Sci Bull, 27(11): 219-223(in Chinese).
- 王笃利,陈青云,曲梅,2005.温室基本风压取值方法探讨[J].农业工程学报,21(11):171-174. Wang D L, Chen Q Y, Qu M, 2005. Method for calculating basic wind pressure of greenhouse[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 21(11):171-174(in Chinese).
- 闫俊月,周磊,周长吉,等,2014.塑料大棚设计中基本风压取值方法[J].农业工程学报,30(12):171-176. Yan J Y, Zhou L, Zhou C J, et al, 2014. Method for calculating basic wind pressure of plastic greenhouse[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 30(12):171-176(in Chinese).
- 杨再强,朱凯,赵翔,等,2012.中国南方塑料大棚气象灾害风险区划[J].自然灾害学报,21(5):213-221. Yang Z Q, Zhu K, Zhao X, et al, 2012. Meteorological disaster greenhouse in risk zoning for plastic south China[J]. J Nat Dis, 21(5):213-221(in Chinese).
- 杨振超,2006.日光温室室内最佳风速指标与CFD模拟[D].杨凌:西北农林科技大学. Yang Z C, 2006. Optimal wind speed and CFD simulation in sunlight greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University(in Chinese).
- 张波,2013.温室风灾与雪灾预警技术的研究[D].南京:南京信息工程大学. Zhang B, 2013. Study on the Early Warning technique for wind and sown disaster of greenhouse[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 张明洁,赵艳霞,2013.北方地区日光温室气候适宜性区划方法[J].应用气象学报,24(3):278-286. Zhang M J, Zhao Y X, 2013. The climate suitability zoning method of the solar greenhouse in the northern of China[J]. J Appl Meteor Sci, 24(3):278-286(in Chinese).
- 张淑杰,孙立德,马成芝,等,2015.东北日光温室最大风荷载特征及风灾预警指标研究[J].资源科学,37(1):211-218. Zhang S J, Sun L D, Ma C Z, et al, 2015. Analysis of maximum wind load characteristics and gale disaster early warning index on greenhouse in Northeastern China[J]. Resour Sci, 37(1):211-218(in Chinese).
- 张亚红,2003.中国温室气候区划及连栋温室采暖气象参数的研究[D].北京:中国农业大学. Zhang Y H, 2003. Study on greenhouse climatic regionalization and heating meteorological parameters of multi-span greenhouse in China[D]. Beijing: China Agricultural University(in Chinese).
- 浙江省市场监督管理局,2021.农业设施风灾等级:DB33/T 2335—2021[S]. Zhejiang Provincial Bureau of Market Supervision, 2021. Grade of wind disaster for greenhouse: DB33/T 2335—2021[S](in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2016a.种植塑料大棚工程技术规范:GB/T 51057—2015[S].北京:中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2016a. Technical Code for Horticultural Plastic Tunnel Engineering: GB/T 51057—2015[S]. Beijing: China Planning Press(in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2016b.农业温室结构荷载规范:GB/T 51183—2016[S].北京:中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2016b. Code for the Design Load of Horticultural Greenhouse Structures: GB/T 51183—2016[S]. Beijing: China Planning Press(in Chinese).
- 朱瑞兆,1976.风压计算的研究[M].北京:科学出版社. Zhu R Z, 1976. Research on Wind Pressure Calculation[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Carter D A, 1995. The Scaled Risk Integral- A Simple Numerical Representation of Case Societal Risk for Land Use Planning in the Vicinity of Major Accident Hazards, Loss Prevention in the Process Industries, vol II [M]. Amsterdam: Elsevier.
- Coles S, 2001. Basics of statistical modeling[M]//Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London: Springer:18-44.
- Lukiantchuki M A, Shimomura A P, Da Silva F M, et al, 2020. Wind tunnel and CFD analysis of wind-induced natural ventilation in sheds roof building: impact of alignment and distance between sheds[J]. Int J Ventil, 19(2):141-162.
- Piers M, 1998. Methods and models for the assessment of third party risk due to aircraft accidents in the vicinity of airports and their implications for societal risk[M]//Jorissen R E, Stallen P J M. Quantified Societal Risk and Policy Making. Boston: Springer: 166-204.

(本文责编:何晓欢)