

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.022.

吴雅欣, 何奇瑾, 刘佳鸿, 等. 华北平原夏玉米不同生育阶段大风灾害危险性评估[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 257-264, 275.

Wu Yaxin, He Qijin, Liu Jiahong, et al. Assessment on Risk of Gale Disaster in Different Growth Stages of Summer Maize in North China Plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 257-264, 275.

# 华北平原夏玉米不同生育阶段大风灾害危险性评估

吴雅欣<sup>1</sup>, 何奇瑾<sup>1,2</sup>, 刘佳鸿<sup>1</sup>, 肖潇<sup>1</sup>, 孙未伟<sup>1</sup>,  
石雨鑫<sup>1</sup>, 周可欣<sup>1</sup>, 周思佳<sup>1</sup>, 马色力麦<sup>1</sup>, 王荣万<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100083;

2. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** [目的] 大风灾害是制约社会经济发展的主要气象灾害之一, 科学评估大风灾害危险性对夏玉米生产防灾减灾具有重要意义。[方法] 基于夏玉米拔节后不同生育阶段最大风速和大风日数的时空分布特征, 筛选并利用历史倒伏案例验证区域适用的夏玉米大风倒伏判别指标, 运用风险区划方法, 评估了华北平原夏玉米不同生育阶段的大风倒伏危险性。[结果] (1) 1980—2019 年以来, 华北平原夏玉米拔节后最大风速和大风日数均呈显著的波动式下降趋势, 空间上由东部向中西部逐渐递减。(2) 夏玉米拔节后以轻度倒伏为主, 区域平均的倒伏发生概率为 44.5%, 重度倒伏发生概率最小, 为 7.8%; 拔节—抽雄阶段最易发生倒伏。(3) 夏玉米拔节后大风倒伏概率总体呈逐渐降低趋势, 但 2011 年以后局部地区拔节—抽雄期大风倒伏有极端加剧的趋势。(4) 夏玉米大风灾害危险性分布整体上呈现由东向西逐渐递减的趋势, 东部为高风险地区, 中部大部分地区为中风险区, 北部和西部部分地区为低风险地区。[结论] 尽管近年来最大风速和大风日数均呈下降趋势, 但华北平原局部地区夏玉米大风倒伏有加剧趋势, 需要加强防灾减灾相关建设。

**关键词:** 夏玉米; 大风灾害; 大风日数; 危险性

中图分类号: S162.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0257-08

## Assessment on Risk of Gale Disaster in Different Growth Stages of Summer Maize in North China Plain

Wu Yaxin<sup>1</sup>, He Qijin<sup>1,2</sup>, Liu Jiahong<sup>1</sup>, Xiao Xiao<sup>1</sup>, Sun Weiwei<sup>1</sup>, Shi Yuxin<sup>1</sup>,  
Zhou Kexin<sup>1</sup>, Zhou Sijia<sup>1</sup>, Ma Selimai<sup>1</sup>, Wang Rongwan<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University,

Beijing 100083, China; 2. Collaborative Innovation Center for Meteorological Disaster Forecasting, Early

Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** [Objective] Gale disaster is one of the main meteorological disasters that restrict social and economic development. The aim of this study is to scientifically assess the risk of gale disaster, which is of great significance for disaster prevention and mitigation of summer maize production. [Methods] Based on the spatial and temporal distribution characteristics of maximum wind speed and gale days at different growth stages of summer maize after jointing, the regionally applicable gale lodging discriminant indexes of summer maize were screened and verified by historical lodging cases, and the risk of gale lodging at different growth stages of summer maize in North China Plain was evaluated by risk zoning method. [Results] (1) From 1980 to 2019, the maximum wind speed and gale days after jointing of summer maize in the North China Plain showed a significant fluctuating downward trend, and gradually decreased from the east to the middle and

收稿日期: 2023-05-12

修回日期: 2023-06-10

资助项目: 国家自然科学基金“植物物候对气候变化响应的模拟试验研究”(42130514)

第一作者: 吴雅欣(1999—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事农业生产应对气候变化研究。E-mail: wuyaxin@cau.edu.cn

通信作者: 何奇瑾(1981—), 女, 吉林蛟河人, 博士, 副教授, 主要从事农业生产应对气候变化研究。E-mail: heqijin@cau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

west in space. (2) Mild lodging was the main lodging type of summer maize after jointing, and the regional average lodging probability was 44.5%, and the probability of severe lodging was the lowest (7.8%). The jointing-tasseling stage was most prone to lodging. (3) The probability of gale lodging after jointing of summer maize showed a decreasing trend, but after 2011, the gale lodging in the jointing-tasseling period in some areas showed an extreme trend. (4) The risk distribution of summer maize gale disaster showed a decreasing trend from east to west. The eastern part was a high-risk area, most of the central part was a medium-risk area, and the northern and western parts are low-risk areas. [Conclusion] Although the maximum wind speed and the number of gale days have shown a downward trend in recent years, the lodging of summer maize in some areas of the North China Plain has intensified, and it is necessary to strengthen the construction of disaster prevention and mitigation.

**Keywords:** summer maize; gale disaster; gale days; hazard

大风作为中国发生率高、影响严重的气象灾害之一,常造成人员伤亡,房屋倒塌和农田受灾,严重制约着社会经济发展及资源环境保护。近几十年来,在全球变暖的影响下,近地面风速持续下降<sup>[1]</sup>,1980—2010年期间陆地北半球10 m平均风速呈显著下降趋势,而海洋南半球则具有显著上升趋势<sup>[2]</sup>。1958年以来,中国近地面风速下降了约0.109 m/s<sup>[3]</sup>,年度和季节性大风最高值和大风日数也呈明显下降趋势<sup>[4]</sup>,特别是中国东部地区冬季风速下降明显<sup>[5]</sup>。虽然风速下降已成事实,但风灾造成的损失仍有增加趋势。以河北省为例,尽管大风日数、最大风速逐年减小,但夏季最大风速无大幅下降,风灾发生次数、直接经济损失、农作物的受灾面积、成灾面积、绝收面积等均有增加趋势<sup>[6]</sup>。气候变化背景下,极端天气和气候灾害的发生发展呈现新的变化特征,虽然已有研究表明风速呈减小趋势,但由于大风灾害具有季节性和区域性的特点,因灾损失总体呈增加趋势,所以有必要进一步开展区域尺度的相关分析。

大风灾害对作物生产具有负面影响,对小麦、水稻而言,大风灾害会导致倒伏,影响田间通风透光,倒伏越早,影响越大<sup>[7-8]</sup>,而大风灾害对玉米生产的负面作用主要体现在生长中后期,引起倒伏、光合受阻,影响水分和营养物质的传输,威胁玉米生产的稳定性<sup>[9-10]</sup>。为抵御大风灾害对作物稳产的影响,前人已开展了大量研究<sup>[11-15]</sup>,多是以实地调查或大田试验等为主,如马焕香等<sup>[7]</sup>针对一次雷雨大风事件对滨州当地小麦倒伏情况进行实地调查,分析了小麦倒伏特点,并提出救灾措施;Aaqil等<sup>[16]</sup>通过大田试验研究了种植密度和施氮量对小麦倒伏的影响;李树岩等<sup>[9]</sup>对比了抽雄期前后不同倒伏类型对夏玉米生长及产量形成的影响,得出不同品种的抗倒性差异和适播期;何贤彪等<sup>[17]</sup>调查并比较了水稻台风倒伏后人工扶正与否的产量损失差异。除了人工扶正和品种选

育,化学控制剂也是解决作物稳产和倒伏灾害之间矛盾的有效手段之一<sup>[18]</sup>。农业气象灾害风险研究是把农业生产和农业作为承灾体,研究气象灾害对农业带来的风险程度,可以提前为作物生产防灾减灾提供建议<sup>[19]</sup>。准确、定量地评价作物发育过程中的农业气象灾害风险,对农业可持续发展、提高防灾减灾能力、趋利避害,保障农业增产增收具有十分重要的意义<sup>[20]</sup>。近年来,干旱、洪涝、低温等农业气象灾害的风险评估研究已取得了诸多进展<sup>[21-23]</sup>,而大风灾害方面的相关研究较少,限制了高秆类作物,特别是玉米作物防灾减灾工作的开展。

玉米是世界上最重要的粮食之一,2021年中国玉米产量已达 $2.7 \times 10^9$  t,占全国粮食生产比重达到40%,华北平原是中国最大的玉米播种区,也是主要的夏玉米生产基地,但该地区玉米生产处于不稳定状态,对于大风灾害的监测预警和防御技术还有待加强。基于此,本研究以华北平原夏玉米为研究对象,筛选并验证大风倒伏灾害判别指标,分析夏玉米关键生育阶段大风灾害的时空演变特征,评估夏玉米大风灾害的气候危险性。研究结果可服务于玉米生产防灾减灾,对保障国家粮食安全具有十分重要的意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本研究选取京、津、冀、鲁、豫五省的夏玉米主要种植区为研究对象。采用的数据包括:(1)气象数据,来自于中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集48个站点1981—2019年逐日气象数据,选取的气象要素为日降水量(mm)及日最大风速(m/s),站点空间分布如图1所示。(2)夏玉米物候数据,取自1991—2011年中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,各地夏玉米发育期如表1所示。(3)灾害数据,来自中国气象数据网1991—2019年中国农

业气象灾情旬值数据集。

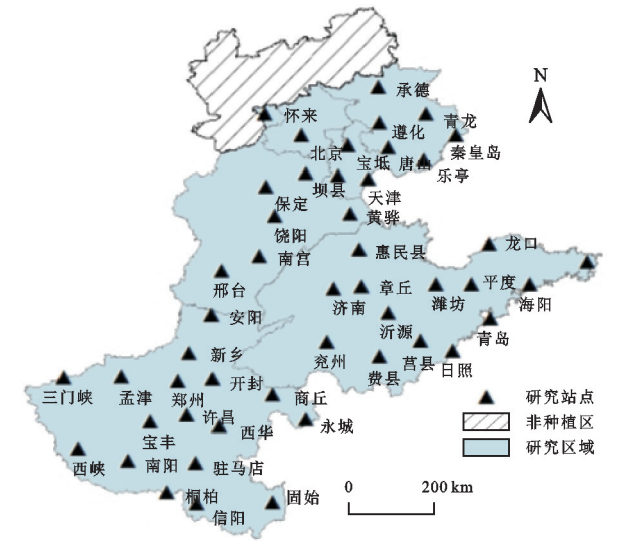


图 1 研究站点分布图  
Fig. 1 Research site distribution map

表 1 研究区域夏玉米生育阶段划分

Table 1 Division of growth stages of summer maize in study area

区域	阶段				
	播种—出苗	出苗—拔节	拔节—抽雄	抽雄—乳熟	乳熟—成熟
京津冀	6 月中旬—6 月下旬	6 月下旬—7 月下旬	7 月下旬—8 月中旬	8 月中旬—9 月上旬	9 月上旬—9 月下旬
河南	6 月上旬—6 月中旬	6 月中旬—7 月中旬	7 月中旬—7 月下旬	7 月下旬—8 月下旬	8 月下旬—9 月中旬
山东	6 月中旬—6 月下旬	6 月下旬—7 月下旬	7 月下旬—8 月上旬	8 月上旬—9 月上旬	9 月上旬—9 月下旬

表 2 夏玉米大风倒伏指标

Table 2 Wind lodging index of summer maize

生育阶段	倒伏等级	日最大风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	过程 降水量/mm
拔节—抽雄	轻	6~8	20
	中	8~11	20
	重	$\geq 11$	20
抽雄—乳熟	轻	6~9	30
	中	9~12	30
	重	$\geq 12$	30
乳熟—成熟	轻	5~7	10
	中	7~10	10
	重	$\geq 10$	10

1.2.2 大风倒伏危险性指数 将大风倒伏气候危险性指数定义为倒伏发生强度和发生概率的函数<sup>[20]</sup>。倒伏对夏玉米最终产量的影响程度受到生育阶段的影响,越到生长后期,特别是拔节期以后,倒伏对产量的影响越大,因此本研究时段选取拔节期以后,首先计算夏玉米拔节后各生育期的大风倒伏危险性指数。可以表示为:

$$I = F(G, P) = \sum_{i=1}^n G_i P_i \tag{1}$$

式中: $I$  为大风倒伏气候危险性指数; $i$  为不同倒伏等级; $G_i$  为不同倒伏等级强度,这里分别以 1,2,3 代表

1.2 研究方法

1.2.1 大风倒伏判别指标 目前,常用的夏玉米大风倒伏判别指标有两种,第一种主要基于日最大风速和过程降水量<sup>[10]</sup>,如表 2 所示,简称指标 1。

过程降水量,指出现大风当日和前两日的降水量累积之和。

第 2 种主要基于日平均风速<sup>[24]</sup>,即夏玉米生长中后期经历五级(8.0 m/s)以上大风,简称指标 2。

为选取适用于本研究的夏玉米大风倒伏指标,根据以上两种指标分别判别大风倒伏发生情况,并与 1991—2019 年中国农业气象灾情旬值数据集中 26 条夏玉米倒伏灾害记录进行对比验证(表 3)。结果发现,指标 1 准确率为 92.3%,指标 2 准确率为 69.2%,且指标 1 对受灾程度和夏玉米发育期有较为细致的划分,具有较高可信度,因此选择日最大风速和过程降水量作为本研究评估判别夏玉米大风倒伏的指标。

轻、中、重 3 个强度等级; $P_i$  为不同等级倒伏发生的概率; $n$  为等级总数。

对拔节期以后各生育阶段倒伏危险性指数进行加权综合,构建拔节后大风倒伏综合危险性指数:

$$I_z = a_1 I_B + a_2 I_C + a_3 I_R \tag{2}$$

式中: $I_z$  为拔节后大风倒伏综合气候危险性指数, $I_B, I_C, I_R$  为分别代表拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期的气候危险性指数, $a_1, a_2, a_3$  为各生育阶段的权重系数,其大小取决于该生育阶段玉米倒伏所造成的受灾率占总 3 个时期总受灾率的比值,根据 1991—2019 年夏玉米大风倒伏案例分析获得,权重系数如表 4 所示。

由此获得的夏玉米倒伏危险性指数,当数据符合个数多且分布均匀时,对其进行一般的线性归一化,公式如下:

$$I_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{3}$$

式中: $I_i$  为归一化处理后的数列; $X_i$  为原始数列; $X_{\max}$  为数列的最大值; $X_{\min}$  为数列的最小值。

当数据列中出现一个或者数个异常数据,一般的线性归一化将无法真实表达情况。因此考虑使用分段线性归一化:

当数据小于中位数时,

$$I_i = \frac{X_i - X_{\min}}{\overline{X} - X_{\min}} \times 0.5 \tag{4}$$

当数据大于中位数时，

$$I_i = \frac{X_i - \overline{X}}{X_{\max} - \overline{X}} \times 0.5 + 0.5 \tag{5}$$

式中： $\overline{X}$  为数列的中位数，这样处理出来的数据相对于简单的归一化更能体现真实的情况。根据归一化之后的气候危险性指数，使用克里金法进行插值并绘图<sup>[25]</sup>。

表 3 不同倒伏指标验证结果

Table 3 Verification results of different lodging indexes				
地点	时间	受灾程度	指标 1	指标 2
霸县	2007 年 8 月上旬	中	中	有
	1995 年 8 月中旬	轻	轻	无
唐山	1999 年 8 月上旬	不明	中	有
	1982 年 8 月中旬	不明	中	有
	1984 年 8 月上旬	不明	中	有
新乡	1996 年 8 月中旬	轻	中	有
郑州	1999 年 7 月下旬	中	轻	有
	2003 年 8 月下旬	中	轻	无
南阳	2009 年 8 月下旬	中	轻	无
	2011 年 7 月下旬	不明	中	有
信阳	2011 年 7 月下旬	中	中	有
惠民县	2009 年 7 月下旬	不明	中	有
	2011 年 8 月中旬	不明	轻	无
莒县	1995 年 7 月中旬	中	中	无
北京	2011 年 8 月上旬	不明	轻	无
	1981 年 8 月中旬	不明	重	有
	1988 年 9 月上旬	不明	重	有
天津	1989 年 9 月中旬	不明	中	有
	1996 年 7 月下旬	不明	中	有
	1998 年 8 月上旬	不明	轻	无
保定	1981 年 8 月上旬	不明	中	有
	1998 年 8 月上旬	不明	中	有
遵化	1984 年 9 月中旬	不明	中	有
黄骅	1986 年 7 月下旬	不明	轻	无
秦皇岛	1896 年 9 月上旬	不明	中	有
承德	1990 年 8 月上旬	不明	重	有

表 4 夏玉米生育阶段划分及权重系数

Table 4 Division of summer maize growth stage and weight coefficient	
生育阶段	权重系数
拔节—抽雄	0.27
抽雄—乳熟	0.31
乳熟—成熟	0.42

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件对数据进行统计分析，采用 ArcGIS 10.2 绘制分布图。

2 结果与分析

2.1 最大风速和大风日数的时空变化特征

如图 2 所示，1981—2019 年华北平原夏玉米拔节后的最大风速变化范围为 8.3~13.0 m/s，近 38 年来呈现显著的波动式下降趋势，平均每 10 a 下降 0.7 m/s，在 1985—1989 年下降幅度最大，变幅为-21.4%，最大值出现在 1985 年，为 13.0 m/s；最小值出现在 2009 年，为 8.3 m/s，之后风速有所上升。空间上的变化如图 3 所示，最大风速呈现从东到西逐渐递减趋势，山东大部分地区风速超过 4.5 m/s，在沿海地区甚至达到 6.5 m/s 以上，河南和京津冀大部分地区都处在 4.0 m/s 以内，京津冀西北部和东南部，河南的西北和南部的部分地区风速稍大，达到 4.5 m/s。

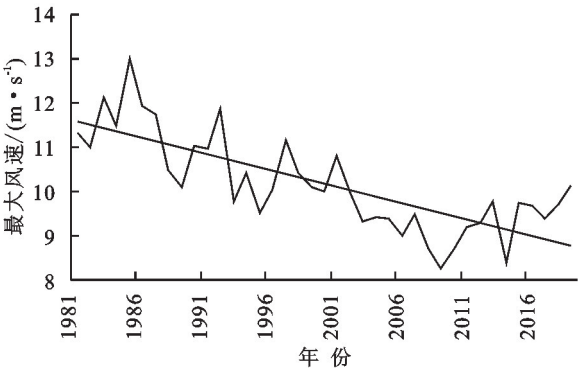


图 2 华北平原夏玉米拔节后最大风速年际变化

Fig. 2 Interannual variation of maximum wind speed after summer maize jointing in North China Plain

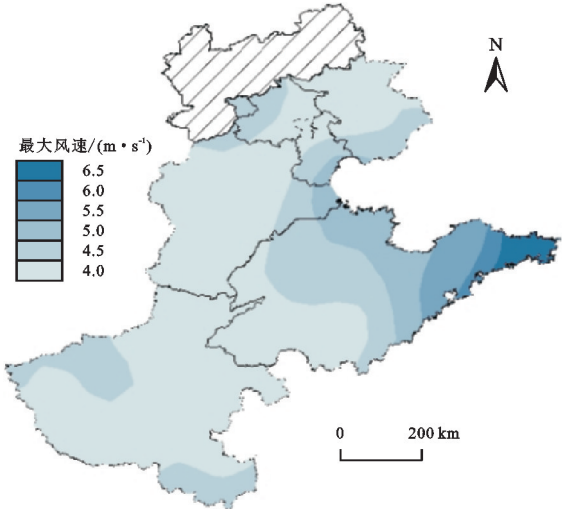


图 3 华北平原夏玉米拔节后最大风速空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of maximum wind speed after summer maize jointing in North China Plain

1981—2019 年夏玉米拔节后生育期内大风日数的变化范围为 3.0~9.9 d，呈现较显著的波动式下降趋势(图 4)，与全球范围内大风日数下降的研究结果



吻合<sup>[2]</sup>。大风日数的气候倾向率为 $-1.0\text{ d}/10\text{ a}$ ,在 2000—2006 年下降幅度最大,变幅为 $-52.4\%$ ,最高值出现在 1985 年,为 $9.9\text{ d}$ ;最低值出现在 2006 年,为 $3.0\text{ d}$ ,在 2006 年后有波动式上升的趋势。

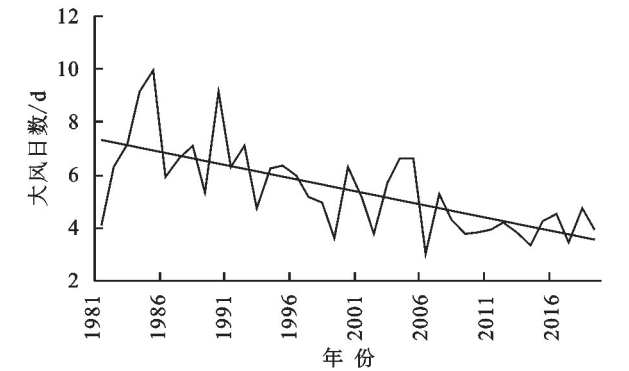


图 4 夏玉米拔节后大风日数的年际变化特征

Fig. 4 Interannual variation characteristics of gale days after jointing of summer maize

夏玉米拔节后大风日数的空间分布呈自东向西显著递减的趋势,其中山东东部沿海地区年均大风日数在 $14.0\text{ d}$ 以上,从沿海到内陆大风日数递减但大部分地区都在 $6.0\text{ d}$ 以上;京津冀在 $8.0\text{ d}$ 以内;河南中部的大风日数小于 $4.0\text{ d}$ ,但南部的部分地区大于 $6.0\text{ d}$ (图 5)。

夏玉米拔节后各生育期最大风速随着生育阶段的推进而逐渐降低(图 6),在拔节—抽雄期,华北平

原地区最大风速大于 $11.0\text{ m/s}$ ,山东东部和京津冀东部大于 $14.0\text{ m/s}$ ;抽雄—乳熟期,平原大部分地区最大风速大于 $11.0\text{ m/s}$ ,京津冀西南部、河南东部和山东西南部风速在 $8.0\sim 11.0\text{ m/s}$ ,仅山东东部大于 $14.0\text{ m/s}$ ,最大风速大于 $14.0\text{ m/s}$ 范围较抽雄期以前有所缩减;乳熟—成熟期的最大风速最小,大部分地区小于 $11.0\text{ m/s}$ 。

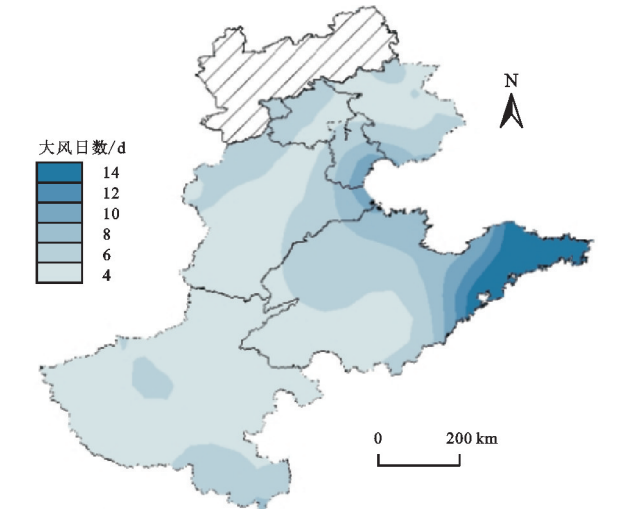


图 5 华北平原夏玉米拔节后大风日数空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of gale days after jointing of summer maize in North China Plain

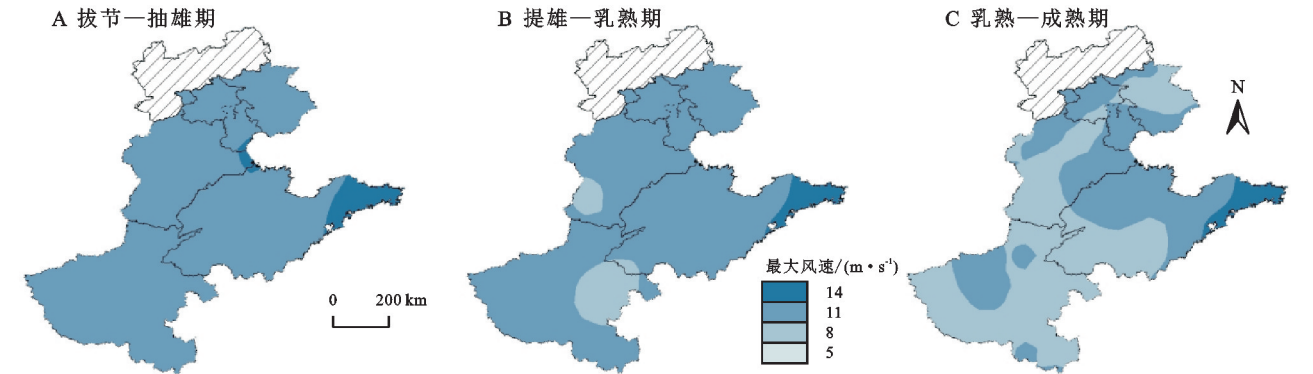


图 6 夏玉米各生育期最大风速空间分布

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of strong wind days after summer maize jointing in North China Plain

2.2 夏玉米各生育期倒伏概率的时空演变趋势

分析夏玉米大风倒伏可能发生概率可见(表 5),分地区而言,拔节—抽雄期,京津冀地区最易发生倒伏,山东次之,河南地区发生倒伏概率最低;抽雄—乳熟期,山东地区更易发生倒伏;乳熟—成熟期,山东地区最易发生倒伏。这是由于河南地区相较于山东、京津冀等地更靠近内陆,该地区风速低于其他两个地区导致的。综合全区域,拔节—抽雄阶段由于风速较大,区域平均倒伏发生概率最大,为 $28.0\%$ ;其次是乳熟—成熟期,为 $26.5\%$ ,主要因为该时期果穗重量不断加重,茎秆承重增加,对大风的耐受程度下降,比抽

雄—乳熟期更易发生倒伏。就倒伏程度而言,轻度倒伏发生的概率最大,为 $44.5\%$ ,中度倒伏发生概率次之,为 $21.9\%$ ,重度倒伏发生概率最小,为 $7.8\%$ 。

进一步分析 1981—2019 年夏玉米拔节后大风倒伏概率的年代际变化发现,拔节—抽雄期大风倒伏概率随着年代推进呈现整体逐渐降低,但局部极端情况增加的趋势,如 2011—2019 年山东和京津冀部分地区出现倒伏概率大于 $75\%$ 的情况(图 7D)。京津冀、山东大部分地区倒伏概率超过 $50\%$ ,河南除 1981—1990 年及 2001—2010 年东南部地区倒伏概率大于 $50\%$ ,其余时段均小于 $50\%$ 。

表 5 夏玉米不同生育阶段大风倒伏概率  
Table 5 Wind lodging probability of summer maize at different growth stages %

生育阶	地区	轻度	中度	重度	平均
拔节—抽雄期	京津冀	59.4	32.1	13.7	35.1
	河南	33.9	15.2	4.5	17.9
	山东	48.7	32.6	14.1	31.8
	华北平原	47.3	26.3	10.6	28.0
抽雄—乳熟期	京津冀	23.7	7.2	4.1	11.7
	河南	43.4	12.2	3.2	19.6
	山东	53.1	23.1	12.8	29.7
	华北平原	39.3	13.6	6.3	19.7
乳熟—成熟期	京津冀	48.3	26.5	5.0	26.6
	河南	51.0	22.5	2.9	25.4
	山东	40.7	28.9	13.0	27.5
	华北平原	47.0	25.9	6.6	26.5
拔节后生育期平均	京津冀	43.8	22.0	7.6	24.5
	河南	42.8	16.6	3.5	21.0
	山东	47.5	28.2	13.3	29.7
	华北平原	44.5	21.9	7.8	24.7

夏玉米抽雄—乳熟期大风倒伏概率总体上呈现下降趋势,倒伏概率整体上低于拔节—抽雄期,大部分地区低于 50%,平原东部倒伏概率大于 50%的范围向东缩减,倒伏概率大于 75%的范围以 2010 年为界,呈先增后减趋势,主要分布在山东东部沿海地区(图 8)。

华北平原的大部分地区夏玉米乳熟—成熟期大风倒伏概率在 25%~75%范围内,其中概率为 25%~50%的地区主要分布在华北平原中部,高于 75%的极端地区极少(图 9)。2001—2010 年期间倒伏概率为 50%~75%的范围最广,面积超过了 80%(图 9C)。与乳熟之前相比,乳熟后夏玉米倒伏概率大于 50%的地区增多,大于 75%的区域减少,整体而言倒伏概率高于抽雄—乳熟期,低于拔节—抽雄期。

2.3 夏玉米大风倒伏危险性评估

根据计算得到的夏玉米大风倒伏危险性指数,将其分为高风险区、中风险区和低风险区,如表 6 所示,评估华北平原夏玉米大风灾害的气候危险性。

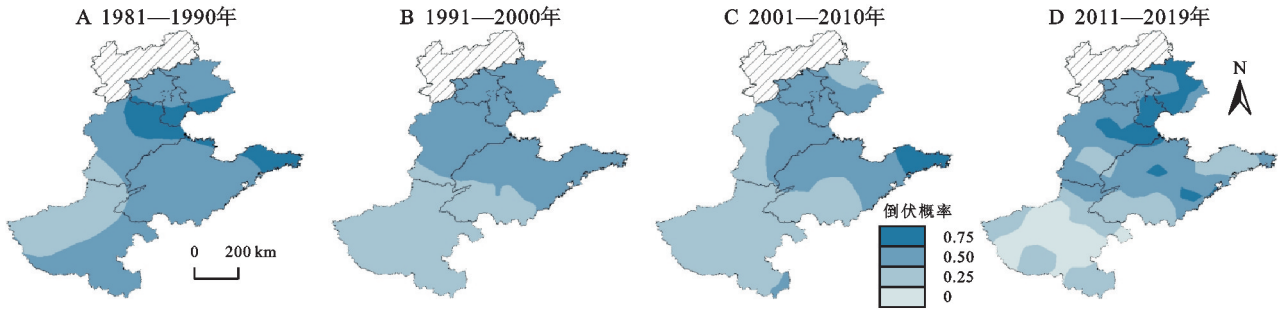


图 7 夏玉米拔节—抽雄期大风倒伏概率年代际分布

Fig. 7 Summer maize jointing—tasseling wind lodging probability interdecadal distribution map

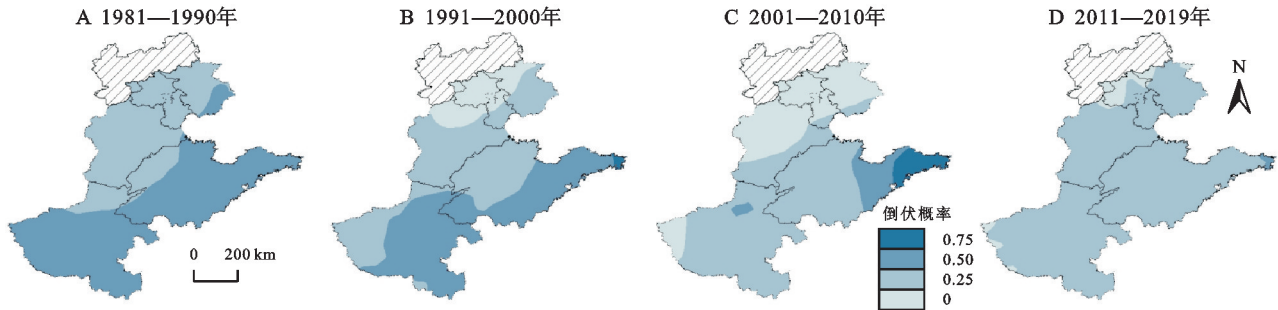


图 8 夏玉米抽雄—乳熟期大风倒伏概率年代际分布

Fig. 8 Interdecadal distribution map of wind lodging probability in tasseling-milk stage of summer maize

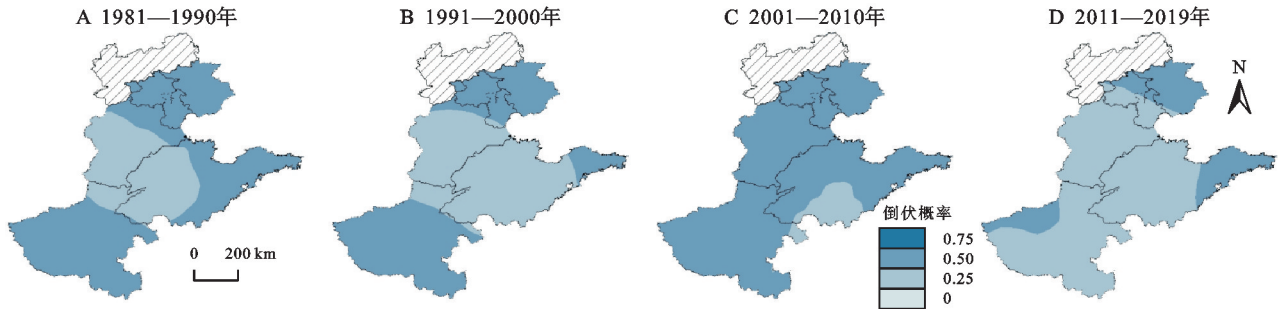


图 9 夏玉米乳熟—成熟期大风倒伏概率年代际分布

Fig. 9 Interdecadal distribution map of wind lodging probability of summer maize in milky-maturity Stage

表 6 夏玉米大风危险性指数等级划分			
Table 6 Grading of wind hazard index of summer maize			
危险性等级	低风险	中风险	高风险
危险指数	<0.3	0.3~0.6	>0.6

图 10 为夏玉米不同生育期大风倒伏危险性指数空

间分布,乳熟期以前大部分地区属于中风险区,西北部为低风险区,仅东部沿海为高风险区(图 10A,B);乳熟期以后,中风险区面积进一步增加,高风险区面积也有所扩大,虽然夏玉米生育期内风速随着生育进程的推进而降低,但该时期植株穗重增加,倒伏风险随之加大。

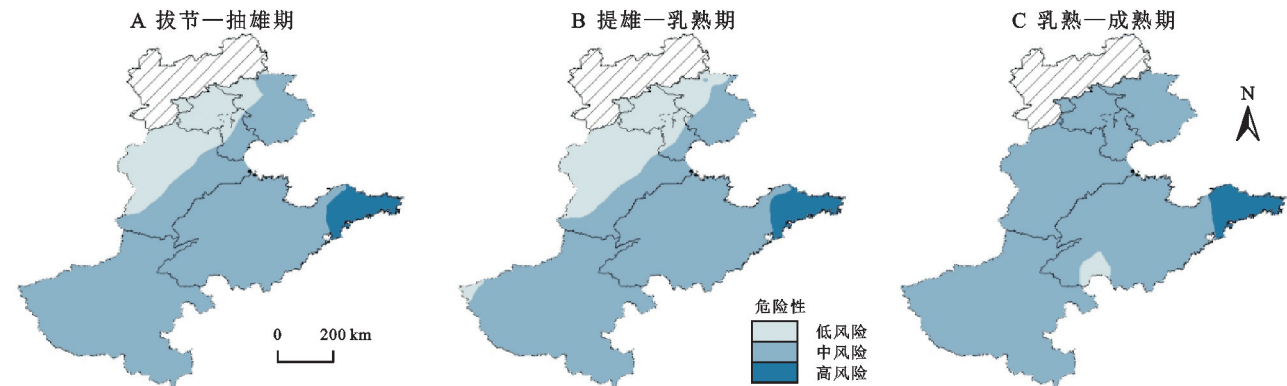


图 10 夏玉米不同生育阶段大风倒伏危险性

Fig. 10 Wind lodging risk of summer maize at different growth stages

根据不同生育期的权重对夏玉米拔节后各生育期的危险性指数进行加权综合后得到夏玉米拔节后生育期大风倒伏危险性指数空间分布图(图 11)。夏玉米大风倒伏的低风险区主要分布在西北地区,京津冀东部和北部的局部地区为中风险区;河南大部分地区为中风险,西部地区属于低风险区;山东约 70% 面积为中风险区,东部沿海地区为高风险区。

城市站点受城市化影响导致风速降低的效应,进一步提升研究工作的准确性和精细度。

在夏玉米倒伏灾害中,大风是主要影响因子,尽管近年来最大风速和大风日数呈下降趋势,但华北平原局部地区 2011 年以后夏玉米拔节—抽雄期大风倒伏概率有极端加剧的趋势,给农业安全生产带来巨大挑战。本研究的结果可为夏玉米大风风险区划提供区域尺度上的参考,有助于合理规划和防护风灾造成的影响,助力夏玉米生产防灾减灾。但由于农作物的生长过程是复杂的,作物倒伏不仅受气象条件的影响,不同品种以及下垫面也会产生差异,未来还需进一步考虑农艺措施、农业技术、农业政策等的影响,以更好地适应现代农业需求。

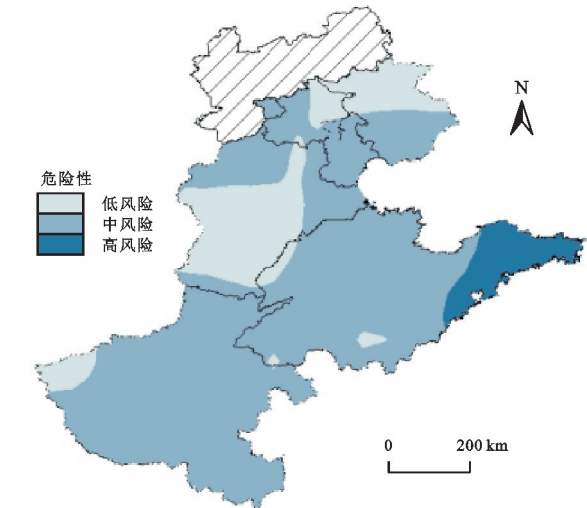


图 11 夏玉米拔节后大风倒伏危险性

Fig. 11 Risk of wind lodging after summer maize jointing

3 讨论

本研究利用气象站点的观测数据分析了华北平原夏玉米倒伏风险,一般而言,气象站观测可以代表该站点附近一定范围内的气象要素值,但受到站点密度的局限<sup>[26]</sup>,往往无法完全反映局地大风的影响。未来的研究中,除了可以通过增加观测密度提高资料精确度外,还需进一步区分城市站和农田站,以剔除

4 结论

(1) 1980—2019 年以来,华北平原夏玉米拔节后最大风速和大风日数均呈显著的波动式下降趋势,下降趋势分别为 0.7 m/(s · 10 a), 1.0 d/10 a,空间上均由东部向中西部逐渐递减。各生育期的最大风速随生育阶段的推进而逐渐降低,拔节—抽雄期最大风速大于 11.0 m/s 的面积最大,山东东部和京津冀东部的局部地区最大风速超过 14.0 m/s;乳熟—成熟期大部分地区的最大风速小于 11.0 m/s。

(2) 日最大风速和过程降水量可以作为华北平原大风倒伏灾害的判别指标。夏玉米轻度倒伏发生的概率最大,华北平原平均为 44.5%,重度倒伏发生概率最小,平均为 7.8%。从生育时期来看,在拔节—抽雄阶段倒伏发生概率最大,平均为 28.0%,抽雄—乳熟期最小,为 19.7%。空间上,拔节—抽雄期京津



冀地区最易发生倒伏,轻度倒伏概率可达 59.4%;抽雄—乳熟期山东各等级倒伏概率均最大;乳熟—成熟期河南轻度倒伏概率最大,超过 50.0%,而山东地区中度和重度倒伏概率最大。

(3) 夏玉米拔节后大风倒伏概率随着年代推进整体逐渐降低,造成该现象的原因主要是夏玉米各生育期的风逐渐降低,但夏玉米拔节—抽雄期的大风倒伏在 2011 年以后有局部极端情况加剧的趋势。

(4) 夏玉米大风倒伏灾害危险性整体上由东向西逐渐递减,东部为高风险地区,中部大部分地区为中风险区,北部和西部部分地区为低风险区。不同生育阶段夏玉米大风灾害危险性分布不同,以中风险区为主。

#### 参考文献 (References):

- [1] Zha J L, Shen C, Li Z B, et al. Projected changes in global terrestrial near-surface wind speed in 1.5 °C—4.0 °C global warming levels[J]. *Environmental Research Letters*, 2021,16(11):114016.
- [2] Deng K Q, Azorin-Molina C, Minola L, et al. Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations[J]. *Journal of Climate*, 2021,34(6):2219-2234.
- [3] Zhang R, Zhang S, Luo J, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958—2015[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019,137:2785-2801.
- [4] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. Maximum wind speed changes over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013,27(1):63-74.
- [5] Li X, Li Q P, Ding Y H, et al. Near-surface wind speed changes in eastern China during 1970—2019 winter and its possible causes[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022,13(2):228-239.
- [6] 俞海洋,李婷,陈笑娟,等.河北省近 30 年大风时空分布及成灾特征分析[J].*灾害学*,2017,32(2):59-63.  
Yu H Y, Li T, Chen X J, et al. The spatio-temporal distribution and disaster characteristics analysis of the gale in Hebei Province for nearly 30 years[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017,32(2):59-63.
- [7] 马焕香,武文安,张昊.浅谈大风降雨对滨州小麦生长的影响[J].*农业与技术*,2017,37(24):219-220.  
Ma H X, Wu W A, Zhang H. Effects of strong wind and rainfall on wheat growth in Binzhou[J]. *Agriculture and Technology*, 2017,37(24):219-220.
- [8] 李德娟.江苏沿海 2021 年水稻倒伏成因及治理对策[J].*农业开发与装备*,2022(7):158-160.  
Li D J. Causes and countermeasures of rice lodging in Jiangsu coastal area in 2021[J]. *Agricultural Development and Equipment*, 2022(7):158-160.
- [9] 李树岩,王宇翔,胡程达,等.抽雄期前后大风倒伏对夏玉米生长及产量的影响[J].*应用生态学报*,2015,26(8):2405-2413.
- Li S Y, Wang Y X, Hu C D, et al. Effects of strong wind lodging at pre-and post-tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(8):2405-2413.
- [10] 李树岩,刘荣花,胡程达.河南省夏玉米大风倒伏气候风险分析[J].*自然灾害学报*,2014,23(1):174-182.  
Li S Y, Liu R H, Hu C D. Climate risk analysis of strong wind lodging of summer maize in Henan Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014,23(1):174-182.
- [11] 程富丽,杜雄,刘梦星,等.玉米倒伏及其对产量的影响[J].*玉米科学*,2011,19(1):105-108.  
Cheng F L, Du X, Liu M X, et al. Lodging of summer maize and the effects on grain yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011,19(1):105-108.
- [12] 刘战东,肖俊夫,南纪琴,等.倒伏对夏玉米叶面积、产量及其构成因素的影响[J].*中国农学通报*,2010,26(18):107-110.  
Liu Z D, Xiao J F, Nan J Q, et al. Effect of different levels lodging on leaf area index, yield and its components of Summer Maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010,26(18):107-110.
- [13] 许莹莹,马青美,宋希云,等.不同玉米品种倒伏抗性与产量相关性状的聚类和相关分析[J].*玉米科学*,2019,27(5):15-21.  
Xu Y Y, Ma Q M, Song X Y, et al. Cluster and correlation analysis of lodging-resistance and yield related traits in different maize varieties[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019,27(5):15-21.
- [14] Yang J S, Geng W J, Zhang J W, et al. Responses of the lodging resistance of summer maize with different gene types to plant density[J]. *Agronomy*, 2021,12(1):10.
- [15] Khan A, Ahmad A, Ali W, et al. Optimization of plant density and nitrogen regimes to mitigate lodging risk in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2020,112(4):2535-2551.
- [16] 何贤彪,吴晓华,马义虎.台州沿海台风所致水稻倒伏对产量的影响[J].*中国稻米*,2015,21(2):28-29.  
He X B, Wu X H, Ma Y H. Effect of lodging caused by typhoon on grain yield of rice in Taizhou[J]. *China Rice*, 2015,21(2):28-29.
- [17] 宋英博.化控剂对不同玉米品种倒伏性及产量影响[J].*农业与技术*,2021,41(20):94-96.  
Song Y B. Effects of chemical regulators on lodging and yield of different maize varieties[J]. *Agriculture and Technology*, 2021,41(20):94-96.
- [18] 高晓容.东北地区玉米主要气象灾害风险评估研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.  
Gao X R. Risk assessment of major meteorological disasters of maize in northeast China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.



- 价值空间分异及其影响因素差异探析:以大南昌都市圈为例[J].生态学报,2023,43(18):1-13.
- Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(18):1-13.
- [32] 严立冬,刘昊昕,邓远建,等.农业生态资本投资水平及其空间溢出效应研究[J].中国地质大学学报:社会科学版,2021,21(6):77-90.
- Yan L D, Liu H X, Deng Y J, et al. Study on the level of agricultural ecological capital investment and its spatial spillover effect[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2021,21(6):77-90.
- [33] 邹亚东,张晓萍,何亮,等.退耕还林(草)背景下黄土丘陵沟壑区农业生态经济系统耦合发展态势:以陕西省吴起县为例[J].水土保持通报,2022,42(3):217-224,238.
- Zou Y D, Zhang X P, He L, et al. Coupling development situation of agricultural eco-economic system in loess hilly and gully areas as farmland is returned to forest(grass)land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):217-224,238.
- [34] 蒋碧瑶,史兴民,秦语晗.水土保持增加了沙漠—黄土过渡带农户福祉吗:基于 PSM 的实证研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):37-44.
- Jiang B Y, Shi X M, Qin Y H. Does soil and water conservation increase the farmer's well-being in desert-loess transition zone? [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(4):37-44.
- [35] Bautista S, Mayor Á G, Bourakhouadar J, et al. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid mediterranean landscape [J]. Ecosystems, 2007,10(6):987-998.
- [36] 刘宇,吕一河,傅伯杰.景观格局—土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J].生态学报,2011,31(1):267-275.
- Liu Y, Lu Y H, Fu B J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(1):267-275.
- [37] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
- Gao Y L, Li H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(6):2248-2260.

~~~~~

(上接第 264 页)

- [19] 齐月,阳伏林,姚玉璧,等.甘肃省春玉米灾损风险评估[J].水土保持研究,2019,26(2):352-358.
- Qi Y, Yang F L, Yao Y B, et al. Risk assessment of spring maize disaster in Gansu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):352-358.
- [20] 刘荣花.河南省冬小麦干旱风险分析与评估技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2008.
- Liu Ronghua. Study on drought risk analysis and evaluation technology of winter wheat in Henan Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [21] 张前东,史春彦,张晓平,等.长清区农业干旱灾害风险评价与区划[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):341-344.
- Zhang Q D, Shi C Y, Zhang X P, et al. Risk assessment and regionalization of agricultural drought disaster in Changqing district[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2016,26(S2):341-344.
- [22] 宫清华,黄光庆,郭敏,等.基于 GIS 技术的广东省洪涝灾害风险区划[J].自然灾害学报,2009,18(1):58-63.
- Gong Q H, Huang G Q, Guo M, et al. GIS-based risk zoning of flood hazard in Guangdong Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2009,18(1):58-63.
- [23] 王惠贞,唐红艳,韩雪,等.内蒙古大豆秋季霜冻风险指数分析及灾害风险区划研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(2):23-32.
- Wang H Z, Tang H Y, Han X, et al. Research of the risk index of disaster and the risk zones of the autumn frost disaster of soybean in the Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(2):23-32.
- [24] 程雪青,孙贝贝,巴馨瑶.阜阳市夏玉米气象灾害及防御措施[J].南方农业,2022,16(4):204-207.
- Cheng X Q, Sun B B, Ba X Y. Meteorological disasters and prevention measures of summer maize in Fuyang [J]. South China Agriculture, 2022,16(4):204-207.
- [25] 彭晓丹.广州市雷雨大风灾害风险区划[J].广东气象,2020,42(1):64-66.
- Peng X D. Risk zoning of thunderstorm and wind disaster in Guangzhou [J]. Guangdong Meteorology, 2020,42(1):64-66.
- [26] 李树岩,薛昌颖,张守林,等.夏玉米倒伏气象等级指标构建[J].中国农业气象,2021,42(12):1042-1056.
- DLi S Y, Xue C Y, Zhang S L, et al. Construction of meteorological grade index for summer maize lodging [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(12):1042-1056.