

基于高粱种植区的倒春寒风险精细化评估 —以贵州仁怀市为例

张波¹, 胡家敏¹, 于飞², 刘宇鹏¹, 陈芳¹, 古书鸿^{1*}

(1. 贵州省生态与农业气象中心, 贵阳 550002; 2. 贵州省山地气象科学研究所, 贵阳 550002)

摘要: 基于贵州省 1991–2020 年 84 个国家观测站资料、DEM 高程数据和高粱产量等数据, 采用自然灾害风险理论, 选取致灾因子危险性、孕灾环境暴露性、载体体脆弱性和防灾减灾能力等评价因子, 构建高粱倒春寒风险评估模型, 开展高粱倒春寒精细化气候风险评估与区划研究。仁怀市轻级、中级、重级和特重级倒春寒平均发生频率分别为 32.25%、19.25%、13.65% 和 7.70%, 整体以轻级和中级灾害为主, 灾害发生频率与海拔呈正相关, 不同等级倒春寒发生频率空间分布上整体一致, 高频发区主要分布在仁怀市东部和南部、低频发区主要分布在西部和北部等地; 倒春寒致灾危险性指数为 0.12~0.24, 敏感性指数为 0.52~0.99; 茅台镇、鲁班街道办事处、茅坝镇、长岗镇、苍龙街道、喜头镇、高大坪镇和火石镇等地单产变异系数为 0.27~0.39; 仁怀市高粱倒春寒高风险区主要分布在苍龙街道北部、学孔镇中部、高大坪镇中部和西南部、长岗镇东部、后山乡南部、火石镇中部局地等地, 约占研究区总面积 13.18%, 中高、中、中低和低风险区分别约占研究区总面积的 26.25%、28.22%、21.12% 和 11.23%。区划结果可以反映出仁怀市倒春寒灾害的分布情况, 对优化高粱产业布局、提升防灾减灾能力具有较好的指导意义。

关键词: 高粱; 倒春寒; 气候风险; 区划; 仁怀市

中图分类号: S426; S514

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)02-0049-11

Risk Assessment of Late Spring Cold Disaster in Sorghum Cultivation Areas — A Case Study of Renhuai City, Guizhou, China

ZHANG Bo¹, HU Jia-min¹, YU Fei², LIU Yu-peng¹, CHEN Fang¹, GU Shu-hong^{1*}

(1. Guizhou Ecological Meteorology and Agrometeorology Center, Guiyang 550002; 2. Guizhou Mountainous Meteorological Science Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: Based on meteorological data from 84 national observation stations in Guizhou Province from 1991 to 2020, DEM elevation data, and sorghum yield data, the study applies the theory of natural disaster risk. Four evaluation factors were selected such as the hazard of disaster-causing factors, the exposure of the disaster-prone environment, the vulnerability of the carrying body, and the capacity for disaster prevention and mitigation. A risk assessment model for sorghum's late spring cold damage is constructed to carry out refined climate risk assessment and zoning research. The average occurrence frequencies of late spring cold damage at different levels in Renhuai City are 32.25%, 19.25%, 13.65%, and 7.70%, respectively. The overall disaster is mainly mild and moderate, with a positive correlation between the frequency of disaster occurrence and altitude. Spatially, the high-frequency areas are mainly distributed in the eastern and southern parts of Renhuai City, while the low-frequency areas are mainly in the western and northern parts. The disaster-causing risk index of late spring cold damage ranges from 0.12 to 0.24, while the sensitivity index ranges from 0.52 to 0.99. In places such as Maotai Town, Luban Sub-district Office, Maoba, Changgang, Canglong Sub-district, Xitou Town, Gaodaping Town, and Huoshi Town, the coefficient of variation in yield is between 0.27 and 0.39. The high-risk areas for sorghum late spring cold damage in Renhuai City are mainly in the northern part of Canglong Sub-district, the central part of Xuekong Town, the central and southwestern parts of Gaodaping Town, the eastern part of Changgang Town, the southern part of Houshan Township, and

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 贵州茅台集团项目 (MTGF2022046); 贵州省气象局创新团队项目 (黔气科合 TD[2024]06 号)

作者简介: 张波 (1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事应用气象研究。

通信作者: 古书鸿, 男, 硕士, 正高级工程师, E-mail: 14718869@qq.com

some areas in the central part of Huoshi Town, accounting for about 13.18% of the total area of the study area. The areas of high, medium-high, medium, medium-low, and low risk account for about 26.25%, 28.22%, 21.12%, and 11.23% of the total area of the study area, respectively. The results can reflect the distribution of late spring cold damage in Renhuai City, providing a reference for optimizing the layout of the sorghum industry and enhancing disaster prevention and mitigation capabilities, which has good practical guidance significance.

Key words: Sorghum; Late spring cold; Climate risk; Zoning; Renhuai City

高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)为禾本科高粱属一年生草本植物,我国最早栽培的禾谷类作物之一,是仅次于玉米、小麦、水稻和大麦的世界第五大粮食作物,属于高产稳产作物,也是酿造酱香型白酒的主要原料之一。酒用高粱产业是仁怀地区特色支柱产业,对仁怀市经济社会发展起着至关重要的作用。春季冷暖空气交替易导致倒春寒发生,倒春寒是危害春季农业生产的气象灾害,对高粱生长、高产、稳产产生较大影响,进而直接影响农户收入和乡村振兴的战略目标^[1-7]。因此,分析倒春寒的发生特征和变化规律,开展倒春寒风险评估研究对指导高粱生产具有重要意义。倒春寒在春季农业生产过程中备受关注,是气象部门重点监测的气象灾害,关于倒春寒研究多集中在灾害指标上。许大全^[8]将春季气温回升之后又突然急剧降温,最低气温达到0℃左右的天气过程定义为倒春寒;杨文刚等^[9]基于灾情数据,前期气温偏暖程度、后期气温偏冷程度和持续时间,建立倒春寒气象指标;李德萍^[10]、童俊^[11]等根据倒春寒国家标准分析了青岛地区和河北省倒春寒的发生规律;徐岩岩^[12]、高操^[13]、赵刚^[14]等根据春季日平均气温或最低气温24 h降幅首次达到3℃的倒春寒指标,分别开展了河南省、山东省和江苏省倒春寒时空分布特征研究;马德栗等^[15]根据湖北省灾害标准业务规范,建立了湖北省倒春寒发生程度评估模型;李勇等^[16]根据贵州倒春寒灾害指标分析了气候变化背景下贵州省倒春寒灾害时空演变特征;尤红^[17]、宋军芳^[18]等开展了典型倒春寒天气过程的分析研究;高艳等^[19]分析倒春寒发生时期和次数对冬小麦产量性状的影响;张璐云等^[20]开展倒春寒与北方冬小麦生育期时空关联特征研究;陈翔等^[21]开展了黄淮麦区小麦倒春寒危害机理及防控措施研究;张乐乐等^[22]比较了冬小麦抗倒春寒性能鉴定方法和指标;敖芹等^[23]分析了遵义市酒用高粱品种红缨子的适宜直播期及其气候风险;赵庆山^[24]对中国北方冬小麦主产区开展倒春寒灾害风险评估。关于倒春寒气象灾害对作物影响的研究,多集中在小麦等作物^[25],关

于高粱倒春寒灾害风险评估的研究未见报道。本研究利用贵州省气象资料、DEM高程数据和高粱经济数据等,根据倒春寒灾害指标,定量化评价倒春寒风险,基于灾害风险理论,构建致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体易损性和防灾减灾能力等多因子倒春寒风险评估模型,开展高粱倒春寒气候风险评估与区划,以期提升仁怀市倒春寒灾害风险管理和决策水平提供依据。

1 资料与研究方法

1.1 资料与来源

仁怀市现有1个国家观测站、34个区域观测站,由于区域观测站建站时间不统一且气象要素时间序列较短,无法用于开展倒春寒气候风险区划研究,故选取贵州省1991–2020年84个国家观测站的日平均气温(T_{avg}),气象资料来源于贵州省气象局天擎气象大数据云平台;数字高程地图(DEM)来源于中国科学院科学数据库,分辨率为30 m×30 m;高粱地块空间分辨率为30 m×30 m;人口和GDP、高粱产量和面积等统计数据来源于统计年鉴;研究区域及气象站点的分布如图1所示,图1中数字1~20分别表示后山乡、久仓镇、五马镇、长岗镇、龙井镇、茅坝镇、鲁班街道、中枢街道、盐津街道、坛厂街道、喜头镇、苍龙街道、学孔镇、茅台镇、高大坪镇、合马镇、大坝镇、美酒河镇、三合镇和火石镇,下同。文中插图所涉及的省界基于审图号为GS(2024)0650号标准地图制作,底图无修改。

1.2 倒春寒灾害指标

仁怀市高粱播期受海拔和小气候环境的影响,海拔600 m以下地区,播期在3月20日–4月5日,海拔600~1 000 m地区,播期一般在4月5日–20日,海拔1 000 m以上地区,采用育苗移栽,移栽期在4月10日–30日,因此结合仁怀市高粱生产情况和倒春寒灾害指标^[26-27],选取每年3月21日–4月30日作为评估时段,该时段内凡出现日平均气温 $T_{avg} \leq 10.0$ ℃,并持续 ≥ 3 d的时段(其中第四天开始,允许有间隔1 d的日均气温 ≤ 10.5 ℃)定义

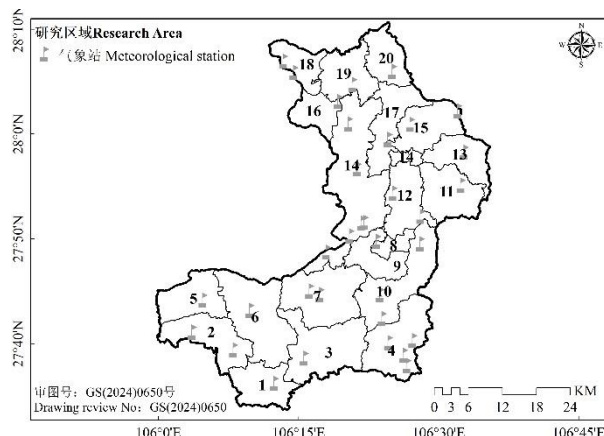


图1 研究区域及气象站点的分布

Fig.1 The distribution of the research area and meteorological stations

为倒春寒,同时定义凡是单站倒春寒持续时间3~4 d,称为轻级倒春寒;持续时间为5~6 d,称为中级倒春寒;持续时间7~9 d称为重级倒春寒;持续时间 ≥ 10 d称为特重级倒春寒。

1.3 致灾因子危险性

1.3.1 倒春寒发生频率

根据研究区域各站出现倒春寒日数,计算各等级倒春寒的发生频率,计算方法见公式(1)。

$$FP_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式(1)中, FP_i 为倒春寒发生频率, n 为各站点倒春寒发生日数, N 为3月21日~4月30日的日数,为41 d; m 为评估区域气象数据的年数, i 表示倒春寒等级(分为轻、中、重和特重4级)。

1.3.2 倒春寒危险性指数

倒春寒危险性指数由不同等级倒春寒发生频率加权得到,计算方法见公式(2)。

$$R = \sum_{i=1}^4 FP_i \times \omega_i \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中, R 为倒春寒危险性指数, FP_i 为各等级倒春寒的发生频率, ω_i 为各等级倒春寒权重,由熵权法确定, i 表示倒春寒等级(分为轻、中、重和特重4级)。

1.4 孕灾环境敏感性指数

孕灾环境敏感性选取海拔高度、坡向作为孕灾环境敏感性因子,一般在北坡受倒春寒灾害风险要高于南坡,因此根据DEM提取的坡向像元值,按照表1对坡向敏感性指数进行赋值,赋值越大表明高粱遭受的风险越高,再结合高程数据建立孕灾环境敏感性评估模型,见公式(3)。

$$S = S_a \times j + S_b \times k \dots\dots\dots (3)$$

式(3)中, S 为孕灾环境敏感性指数; S_a 为海拔高度归一化数值, S_b 为坡度赋值后归一化数值; j 、 k 为权重,由专家打分法确定。

表1 基于坡向像元值的坡向敏感性指数赋值标准

Table 1 Standard for assigning slope sensitivity index based on the pixel value of slope aspect

坡向	赋值	坡向	赋值	坡向	赋值
南坡 (157.5° $\leq A < 202.5^\circ$)S	0	东坡 (67.5° $\leq A < 112.5^\circ$)E	0.5	西北坡 (292.5° $\leq A < 337.5^\circ$)WN	0.5
东南坡 (112.5° $\leq A < 157.5^\circ$)ES	0	西坡 (247.5° $\leq A < 292.5^\circ$)W	0.5	北坡 (0° $\leq A < 22.5^\circ$)N	1
西南坡 (202.5° $\leq A < 247.5^\circ$)WS	0	东北坡 (22.5° $\leq A < 67.5^\circ$)NE	0.5	北坡 (337.5° $\leq A < 360^\circ$)N	1

1.5 承灾体脆弱性

承灾体脆弱性主要考虑高粱种植面积和高粱产量变异系数,并将高粱面积和变异系数数字化

到仁怀市市级行政区划面状矢量图,然后转换成90 m $\times$ 90 m的栅格数据。

变异系数表示样本数据的离散程度,计算方

法见公式(4)。

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)中, CV 为变异系数; σ 为样本标准差; μ 为样本均值。

1.6 防灾减灾能力

防灾减灾能力指人类社会为了保障承灾体少受或免受灾害的威胁而采取的防御措施力度和受灾区的恢复能力的大小。防灾减灾能力越低, 承灾体遭受的潜在损失越大, 灾害风险就越大。选取人口密度、GDP 作为仁怀市倒春寒灾害防灾减灾能力指标因子, 建立倒春寒防灾减灾能力评估模型, 见公式(5)。

$$V = V_a \times p + V_b \times q \dots\dots\dots (5)$$

式(5)中, V 为防灾减灾能力; V_a 为人口归一化数值, V_b 为 GDP 归一化数值; p 、 q 为权重, 由专家打分法确定。

1.7 倒春寒灾害风险指数

倒春寒低温灾害风险指数由倒春寒致灾因子危险性图层、孕灾环境敏感性指数图层、高粱面积图层和单产变异系数图层、防灾减灾能力图层按照权重系数进行加权叠加得到, 权重系数由层次分析法确定, 得到仁怀市高粱种植区倒春寒风

险评估结果。

1.8 空间分析方法

将致灾危险性因子与观测站地理信息(经度、纬度和海拔高度)建立推算模型, 用各站点的实测值与推算值做算术运算得到残差值, 借助 ArcGIS 空间分析工具将残差结果与推算结果进行叠加, 得到致灾因子空间分布图, 利用空间分析工具中的 ExtractByMask 功能提取仁怀市倒春寒各个评估因子空间分布, 分级标准采用自然断点法。

2 结果与分析

2.1 仁怀市高粱单产变化特征

仁怀市高粱单产变化特征如图2所示。由图2可以看出, 2007–2020 年高粱单产波动显著, 整体呈现先减后增最后趋于平稳的变化趋势, 单产变化为 2 555.5~6 303.6 kg/hm², 平均单产为 4 149.8 kg/hm², 单产最大值出现在 2009 年, 最小值出现在 2017 年, 2007–2013 年单产波动最大, 2017–2020 年单产波动最小。拟合曲线显示, 2009–2016 年单产呈递减趋势, 递减速率为 3 226.9 kg/(hm²·10a), 2017–2020 年高粱单产呈递增趋势, 递增速率为 1 749.5 kg/(hm²·10a)。

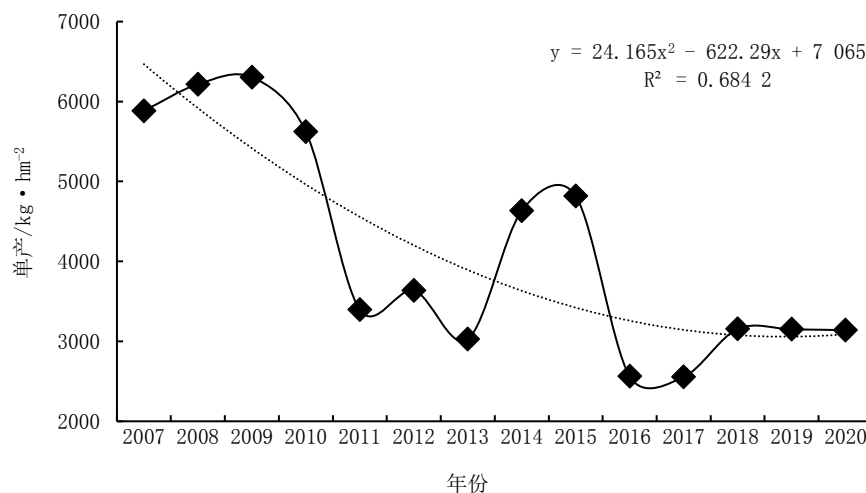


图2 仁怀市高粱单产时间变化特征

Fig.2 Temporal variation characteristics of sorghum yield per unit area in Renhuai City

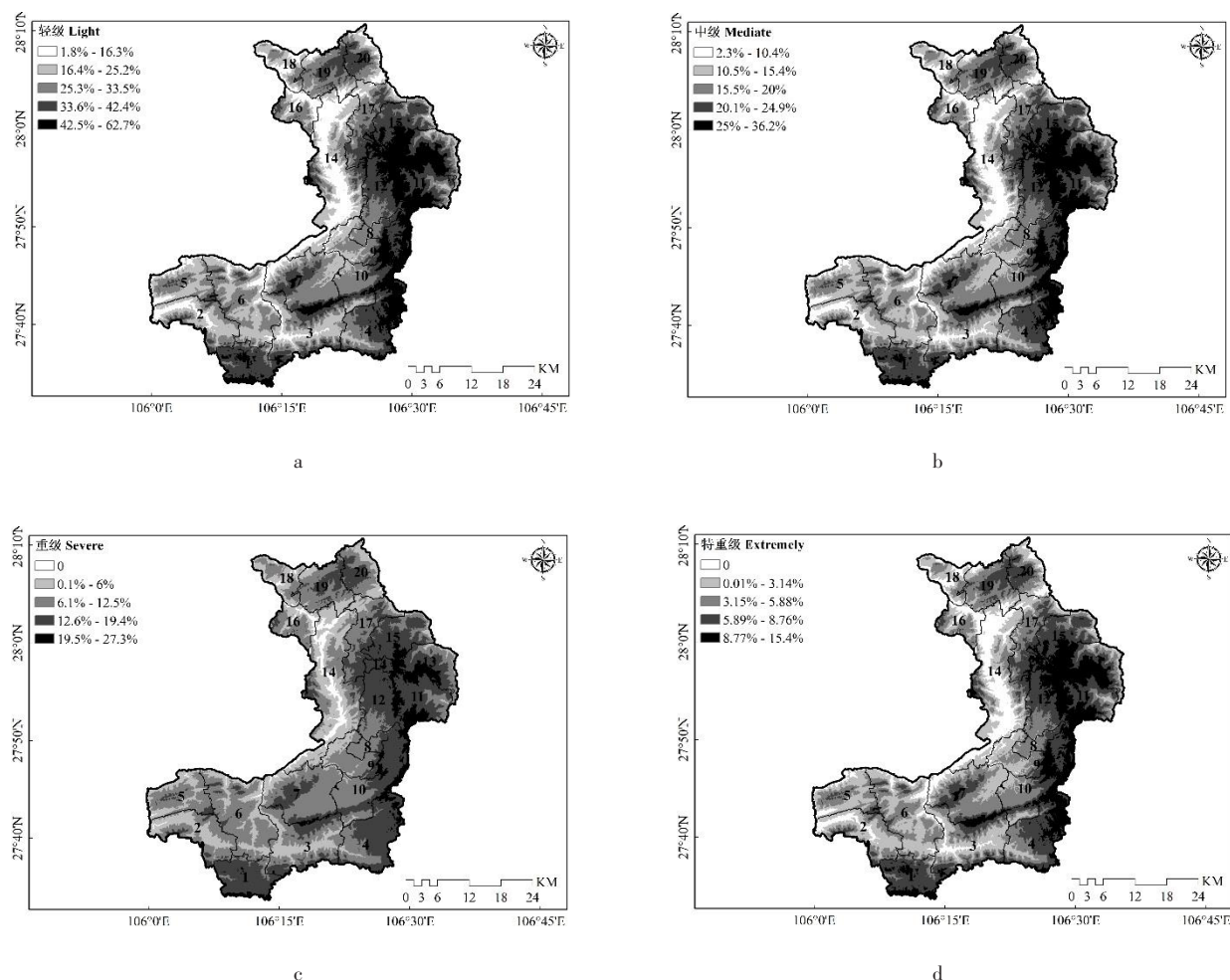
2.2 仁怀市倒春寒频率空间分布

仁怀市倒春寒频率空间分布如图3所示。不同等级倒春寒发生频率空间分布上整体一致, 高频发区主要分布在仁怀市东部和南部、低频发区主要分布在西部和北部等地。轻级倒春寒发生频率为 1.8%~62.7%, 高值区域主要分布在东部高大坪镇、学孔镇、喜头镇和茅台镇、坛厂街道办事处

东部、长岗镇东部、后山苗族布依族乡等地, 发生频率为 33.6%~62.7%, 低值区主要分布在西部茅台镇、美酒河镇、合马镇、九仓镇以及五马镇, 发生频率为 1.8%~25.2%; 中级倒春寒发生频率为 2.3%~36.2%, 高值区域主要分布在东部高大坪镇、学孔镇、喜头镇和茅台镇、坛厂街道办事处东部、长岗镇东部、后山苗族布依族乡等地, 发生频

率为20.1%~36.2%,低值区主要分布在西部茅台镇、美酒河镇、合马镇、九仓镇以及五马镇,发生频率为2.3%~15.4%;重级倒春寒发生频率为0~27.3%,高值区分布较中级倒春寒显著减少;特重

级倒春寒发生频率为0~15.4%,结果表明,仁怀市倒春寒主要以轻级和中级灾害为主且灾害发生区域也相对固定。



注:a:轻级,b:中级,c:重级,d:特重级。

Note: a: light level, b: intermediate level, c: severe level, d: extremely severe level.

图3 仁怀市倒春寒频率空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of late spring cold frequency in Renhuai City

2.3 致灾危险性指数

利用信息熵权法确定4个等级倒春寒权重值分别为0.543、0.252、0.151和0.054,计算得到致灾危险性指数空间分布,如图4所示。从图4可以看出,高危险性指数空间分布上主要集中在仁怀市东部和南部,具体分布在高大坪镇、学孔镇、喜头镇、坛厂街道、长岗镇、后山乡和鲁班街道中部等地,致灾危险性指数为0.12~0.24;低危险性指数主要分布在西部茅台镇、北部美酒河镇、茅坝镇东部、九仓镇等地,致灾危险性指数为0~0.05,其余区域为0.06~0.11。

2.4 孕灾环境敏感性指数

孕灾环境敏感性指数是由海拔高度和坡向加权计算得出,权重系数分别为0.65和0.35。从图5可以看出,孕灾环境敏感性指数高值区域主要分布在高大坪镇、学孔镇、喜头镇、坛厂街道、长岗镇、后山乡和鲁班街道中部等地,敏感性指数为0.52~0.99;孕灾环境敏感性指数低值区域主要分布在西部茅台镇、北部美酒河镇、茅坝镇东部、九仓镇等地,敏感性指数为0~0.38,其余区域为0.39~0.51。

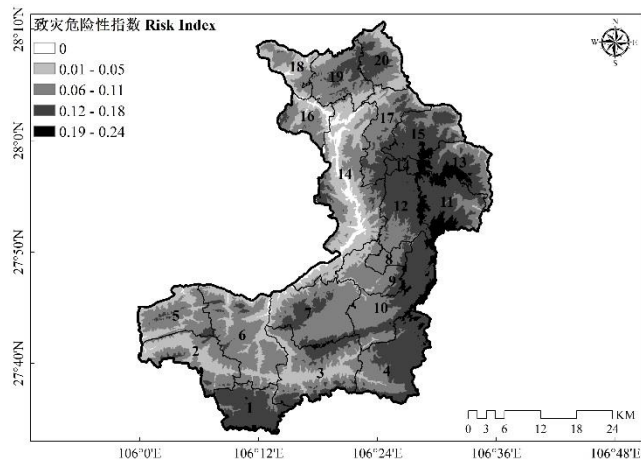
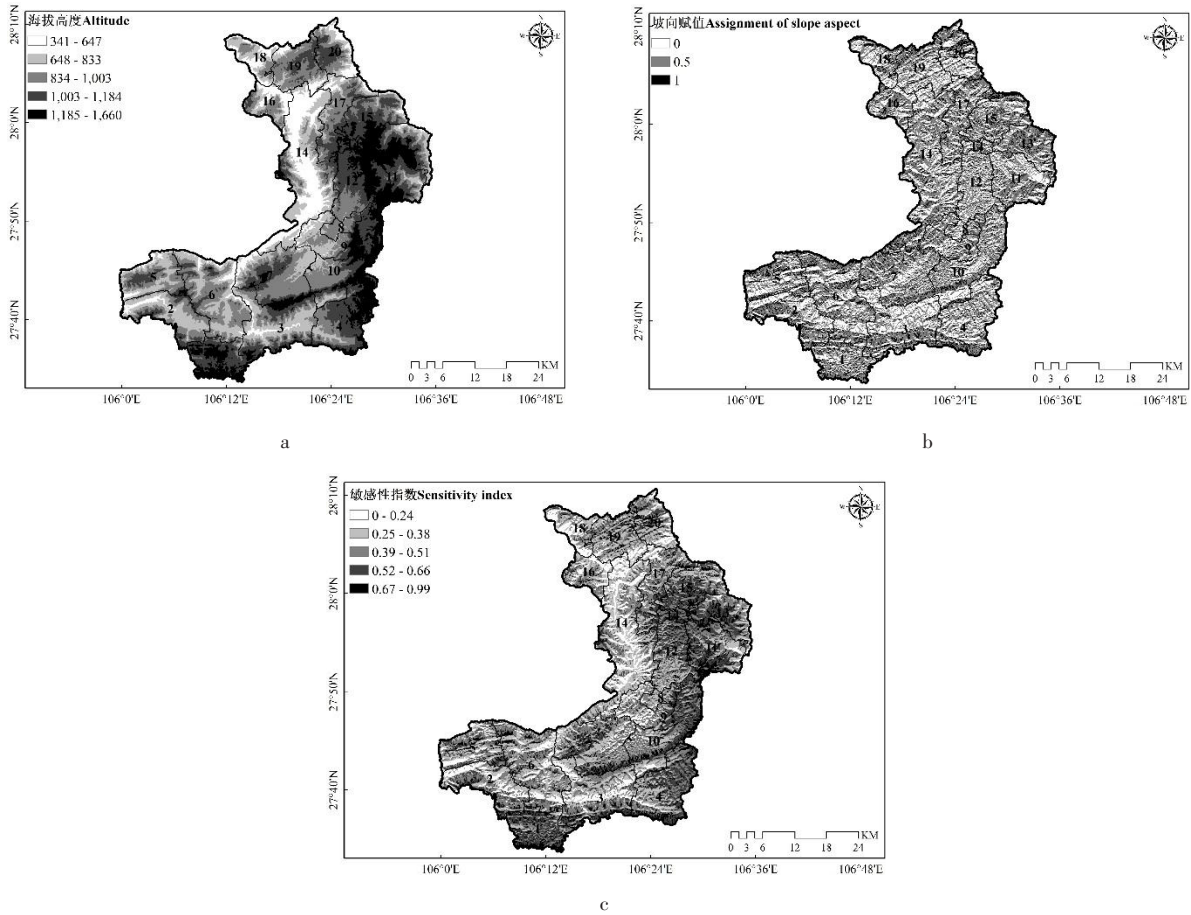


图4 仁怀市倒春寒危险性指数
Fig.4 Risk index of late spring cold in Renhuai City



注：a：海拔高度，b：坡向赋值，c：孕灾环境敏感性指数。
Note: a: altitude, b: assignment of slope aspect, c: sensitivity index of the disaster-forming environment.

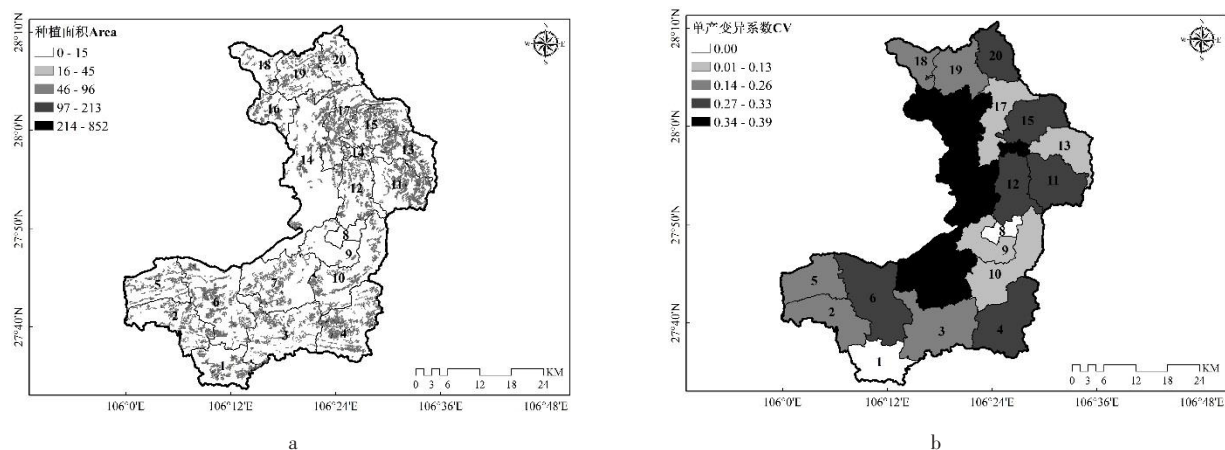
图5 仁怀市孕灾环境敏感性指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the sensitivity index of disaster-forming environment in Renhuai City

2.5 承灾体脆弱性

仁怀市高粱种植面积空间分布如图6所示。从图6a可以看出，仁怀市大部分区域均有高粱种植，区域主要集中在高大坪镇、大坝镇、学孔镇、喜头镇、三合镇、火石镇、长岗镇、五马镇、后山

乡、茅坝镇、九仓镇、鲁班街道和龙井镇等地。从图6b可以看出，高粱单产变异系数高值区域分布在茅台镇、鲁班街道办事处、茅坝镇、长岗镇、苍龙街道、喜头镇、高大坪镇和火石镇等地，变异系数为0.27~0.39，低值区域主要分布在大坝镇、学



注:a:种植面积,b:单产变异系数。

Note: a: planting area, b: coefficient of variation of yield per unit area

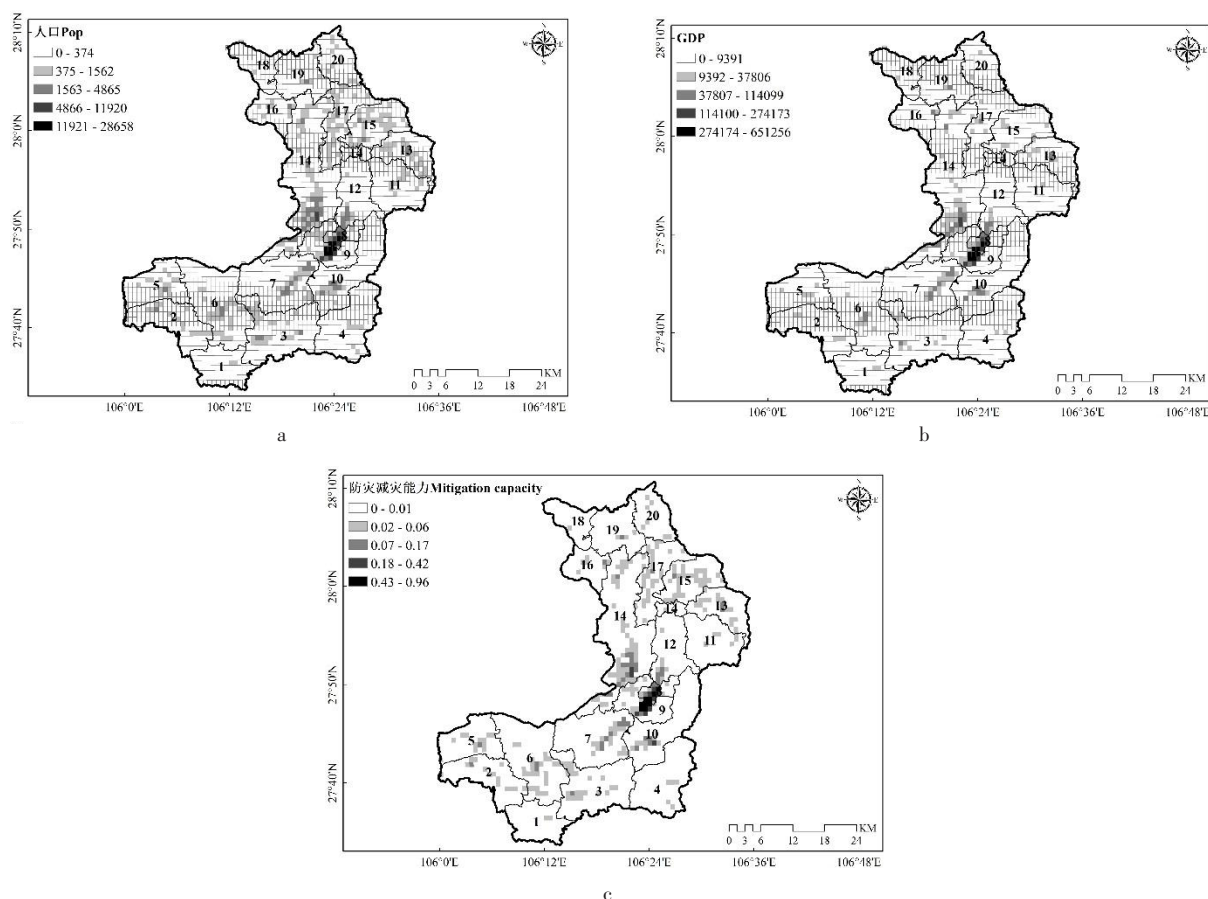
图6 仁怀市高粱种植面积和单量变异系数空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of sorghum planting area and yield coefficient of variation in Renhuai City

孔镇、盐津街道办事处、坛厂街道办事处等地,变异系数为0.01~0.13,美酒河镇和三合镇等地变异系数为0.14~0.26。

2.6 防灾减灾能力

防灾减灾能力由人口和GDP加权计算得出,权重系数分别为0.5和0.5,如图7所示。从图7a中可



注:a:人口,b:GDP,c:防灾减灾能力。

Note: a: Population, b: GDP, c: disaster prevention and mitigation capabilities

图7 防灾减灾能力空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the disaster prevention and mitigation capabilities

以看出,仁怀市人口高值区域主要分布在中枢街道、盐津街道以及各个乡镇中心区域等地;从图7b中可以看出,GDP空间分布和人口密度空间分布一致;图7c所示为防灾减灾能力空间分布,防灾减灾能力较强区域主要分布在中枢街道、盐津街道以及各个乡镇中心区域等地。

2.7 高粱倒春寒风险区划

利用层次分析法确定致灾危险性、孕灾环境敏感性、高粱种植面积、单产变异系数和防灾减灾能力的权重分别为0.476、0.211、0.121、0.121、0.071,计算得出高粱倒春寒气象灾害风险评估与区划结果,如图8所示。高风险区主要分布在苍龙街道北部、学孔镇中部、高大坪镇中部和西南

部、长岗镇东部、后山乡南部以及火石镇中部局地等地,约占仁怀市国土面积13.18%;中高风险区主要分布在高大坪镇、学孔镇、喜头镇、大坝镇、三合镇、合马镇、苍龙街道、坛厂街道、长岗镇、后山乡中部以及龙井镇中部等地,约占仁怀市国土面积26.25%;中风险区主要分布在三合镇、火石镇、大坝镇、合马镇、喜头镇、长岗镇西南部、五马镇北部、鲁班街道中部、茅坝镇中部、龙井镇中部等地,约占仁怀市国土面积28.22%;中低风险区主要分布在仁怀市北部和西南部,集中在茅坝镇、九仓镇、五马镇、茅台镇东北部等地,约占仁怀市国土面积21.12%;其余高粱种植区为低风险区,约占仁怀市国土面积11.23%。

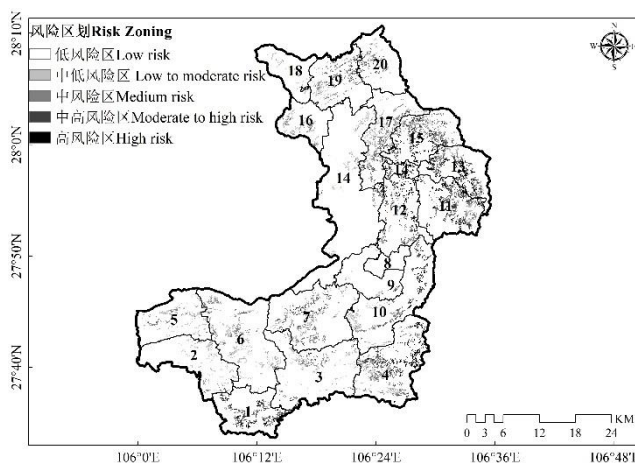


图8 仁怀市高粱倒春寒风险区划

Fig.8 Risk zoning of late spring cold for sorghum used in liquor production in Renhuai City

3 讨论

倒春寒低温灾害对高粱产量的影响极大,严重威胁高粱产业的高质量发展^[28],本研究结果显示,倒春寒平均发生频率随着灾害等级升高呈现降低趋势,这与李勇等^[16]研究结果不一致,其主要原因可能是研究所用气象数据序列和评估范围不同造成的,贵州地形条件复杂多样,气象站点越密集,其区划结果会越精细。此外,全球气候变暖导致气候不稳定,极端天气事件的频率和强度都有所增加,这可能增加倒春寒发生的风险^[29],因此,气象数据序列会对评估结果产生一定影响。对高粱研究大多在产业发展^[30-31]、栽培模式^[32]和品种识别^[33]等研究方向,针对倒春寒灾害风险区划的研究集中在冬小麦、果树^[34]、双季早稻^[35]等作物,少有开展高粱倒春寒气象灾害风险评估。随着农业气象灾害风险的加剧,叠加农业生产方式转型升级与社会需求多元化发展的双重驱

动,亟须通过精细化的灾害区划成果来精准匹配现代农业生产需求,为乡村振兴战略实施提供科学支撑^[31]。

灾害风险评估与区划的核心是区划指标的建立,本研究中综合考虑了致灾因子危险性、敏感性、脆弱性和防灾减灾能力,并以高粱实际种植的地块为评估单元,精细化程度显著高于以省级或市级为评估单元^[36-39]的评估结果,可为高粱种植区进行精准的风险评估。但本研究中的高粱产量数据时间序列较短且未能收集到各个地块的具体产量,故没有形成因倒春寒导致高粱的损失图层,对风险区划的精准度有一定影响,此外,研究中未选取典型灾害年份对风险区划结果进行验证。

贵州高粱品种多样,不同高粱品种对低温的抗性差异受遗传特性、生理机制和环境等多个因素的影响。此外,不同播期对高粱产量产生一定的影响^[40],本研究中未考虑到高粱品种和播期等

因素,可能会导致研究结果存在一定偏差。基于高光谱图像技术进行高粱品种识别技术,识别种植区域高粱品种,根据具体品种生理特性,优化风险评估模型,确保风险评估模型更加精准地反映特定品种的生理特性和生长需求,可为农业生产提供更加科学、精准的区划结果。

4 结 论

(1)轻级、中级、重级和特重级倒春寒平均发生频率分别为32.25%、19.25%、13.65%和7.70%,整体以轻级和中级倒春寒为主,不同等级倒春寒发生频率空间分布基本一致,高频发区主要分布在仁怀市东部和南部、低频发区主要分布在西部和北部等地。轻级倒春寒发生频率为1.8%~62.7%,中级倒春寒发生频率为2.3%~36.2%,重级倒春寒发生频率为0~27.3%,特重级倒春寒发生频率为0~15.4%。

(2)倒春寒致灾危险性指数为0.12~0.24,敏感性指数为0.52~0.99;茅台镇、鲁班街道办事处、茅坝镇、长岗镇、苍龙街道、喜头镇、高大坪镇和火石镇等地单产变异系数为0.27~0.39,茅台镇、鲁班街道办事处、茅坝镇、长岗镇、苍龙街道、喜头镇、高大坪镇和火石镇等地高粱产量变异系数相对较高,受气象灾害影响风险相对较大。

(3)风险评估与区划结果显示,高风险区主要分布在苍龙街道北部、学孔镇中部、高大坪镇中部和西南部、长岗镇东部、后山乡南部、火石镇中部局地等地,约占仁怀市国土面积13.18%,中高风险区约占仁怀市国土面积26.25%,中风险区约占仁怀市国土面积28.22%,中低风险区约占仁怀市国土面积21.12%,低风险区约占仁怀市国土面积11.23%。

参考文献:

- [1] 邓小华,胡朝凤,赵小敏.遵义市酒用高粱绿色高效栽培技术规范[J].耕作与栽培,2020,40(2):54-56.
DENG X H, HU C F, ZHAO X M. Technical specification for green and high-efficiency cultivation of sorghum for liquor in Zunyi City[J]. Tillage and Cultivation, 2020, 40(2): 54-56. (in Chinese)
- [2] 丁延庆,周棱波,汪灿,等.酱香型酒用糯高粱研究进展[J].生物技术通报,2019,35(5):28-34.
DING Y Q, ZHOU L B, WANG C, et al. Research progress of glutinous sorghum for Jiang-flavor Liquor[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(5): 28-34. (in Chinese)
- [3] 娄旭.酒用高粱高产高效栽培技术[J].农业技术与装备,2023(7):170-171.
LOU X. High-yield and high-efficiency cultivation technology of sorghum for liquor[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2023(7): 170-171. (in Chinese)
- [4] 王乐,苏江顺,李春花,等.乡村振兴背景下的吉林省西部杂粮作物育种研究[J].种子,2025,44(1):247-252.
WANG L, SU J S, LI C H, et al. Research on minor grain crop breeding in western Jilin under the background of rural revitalization[J]. Seed, 2025, 44(1): 247-252. (in Chinese)
- [5] 杨秀伟,廖为琴,周安韦,等.酱香型酒用高粱高产高效栽培技术[J].吉林农业,2012(10):115.
YANG X W, LIAO W Q, ZHOU A W, et al. High-yield and high-efficiency cultivation technology of sorghum for Jiang-flavor liquor[J]. Jilin Agriculture, 2012(10): 115. (in Chinese)
- [6] 赵小敏,章洁琼,胡朝凤,等.遵义8个酒用高粱品种的产量及酿酒品质[J].贵州农业科学,2022,50(5):120-125.
ZHAO X M, ZHANG J Q, HU C F, et al. Yield and brewing quality of 8 sorghum varieties for liquor in Zunyi[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 120-125. (in Chinese)
- [7] 赵强,周棱波,汪灿,等.西南高粱产区生态特征与育种目标展望[J].南方农业,2022,16(3):107-109.
ZHAO Q, ZHOU L B, WANG C, et al. Ecological characteristics and breeding objectives prospects of sorghum producing areas in southwest China[J]. South China Agriculture, 2022, 16(3): 107-109. (in Chinese)
- [8] 许大全.光合作用研究进展:从分子机理到绿色革命[J].植物生理学报,2001(2):97-108.
XU D Q. Research progress in photosynthesis: From molecular mechanism to green revolution[J]. Plant Physiology Journal, 2001(2): 97-108. (in Chinese)
- [9] 杨文刚,黄永学,刘可群,等.倒春寒气象指标及等级划分研究[J].湖北农业科学,2018,57(15):49-53.
YANG W G, HUANG Y X, LIU K Q, et al. Research on meteorological indexes and grade classification of the return of cold spell in spring[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(15): 49-53. (in Chinese)
- [10] 李德萍,张凯静,张璐,等.青岛地区倒春寒时空特征及气象指标研究[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(11):1673-1681.
LI D P, ZHANG K J, ZHANG L, et al. Research on temporal and spatial characteristics and meteorological indexes of the return of cold spell in spring in Qingdao area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1673-1681. (in Chinese)
- [11] 童俊,孟旭芹,赵亮,等.1991—2020年河北省倒春寒时空特征及气象指标分析[J].气象与环境学报,2023,39(4):162-168.
TONG J, MENG X Q, ZHAO L, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics and meteorological indexes of the return of cold spell in spring in Hebei Province from 1991 to 2020[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(4): 162-168. (in Chinese)
- [12] 徐岩岩,常军.基于EEMD方法的河南省倒春寒时空分布分析[J].气象与环境科学,2017,40(3):28-32.
XU Y Y, CHANG J. Analysis of temporal and spatial distribu-

- tion of the return of cold spell in spring in Henan Province based on the EEMD method[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(3):28-32. (in Chinese)
- [13] 高操,邢丽珠,张方敏,等.山东省“倒春寒”时空分布特征[J].江苏农业科学,2020,48(12):238-245.
GAO C, XING L Z, ZHANG F M, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of the "return of cold spell in spring" in Shandong Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 238-245. (in Chinese)
- [14] 赵刚,申双和,褚荣浩.江苏省倒春寒发生程度评估[J].江苏农业科学,2018,46(6):243-247.
ZHAO G, SHEN S H, CHU R H. Assessment of the occurrence degree of the return of cold spell in spring in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(6): 243-247. (in Chinese)
- [15] 马德栗,刘敏,李兰,等.湖北省倒春寒发生程度评估模型[J].中国农业气象,2011,32(1):134-138.
MA D L, LIU M, LI L, et al. Evaluation model of the occurrence degree of the return of cold spell in spring in Hubei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(1): 134-138. (in Chinese)
- [16] 李勇,杨晓光,代姝玮,等.气候变化背景下贵州省倒春寒灾害时空演变特征[J].应用生态学报,2010,21(8):2099-2108.
LI Y, YANG X G, DAI S W, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of the return of cold spell in spring disaster in Guizhou Province under the background of climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2099-2108. (in Chinese)
- [17] 尤红,周泓,杨红,等.云南倒春寒天气过程的分析研究[J].气象,2013,39(6):738-748.
YOU H, ZHOU H, YANG H, et al. Analysis and research on the weather process of the return of cold spell in spring in Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(6): 738-748. (in Chinese)
- [18] 宋军芳,刘强军,焦玉玲,等.2018年4月晋城市倒春寒天气及气象服务分析[J].中国农学通报,2019,35(20):65-69.
SONG J F, LIU Q J, JIAO Y L, et al. Analysis of the return of cold spell in spring weather and meteorological services in Jincheng City in April 2018[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(20): 65-69. (in Chinese)
- [19] 高艳,唐建卫,殷贵鸿,等.倒春寒发生时期和次数对冬小麦产量性状的影响[J].麦类作物学报,2015,35(5):687-692.
GAO Y, TANG J W, YIN G H, et al. Effects of the occurrence period and frequency of the return of cold spell in spring on yield traits of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(5): 687-692. (in Chinese)
- [20] 张璐云,王帅,王文晴,等.倒春寒与北方冬小麦生育期时空关联特征分析[J].中国农业资源与区划,2020,41(10):79-88.
ZHANG L Y, WANG S, WANG W Q, et al. Analysis of the temporal and spatial correlation characteristics between the return of cold spell in spring and the growth period of winter wheat in northern China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(10): 79-88. (in Chinese)
- [21] 陈翔,林涛,林非非,等.黄淮麦区小麦倒春寒危害机理及防控措施研究进展[J].麦类作物学报,2020,40(2):243-250.
CHEN X, LIN T, LIN F F, et al. Research progress on the damage mechanism and prevention and control measures of the return of cold spell in spring of wheat in the Huanghuai Wheat Region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(2): 243-250. (in Chinese)
- [22] 张乐乐,陈翔,柯媛媛,等.冬小麦抗倒春寒性能鉴定方法和指标的比较[J].中国农业气象,2021,42(2):146-157.
ZHANG L L, CHEN X, KE Y Y, et al. Comparison of identification methods and indicators for the resistance of winter wheat to the return of cold spell in spring[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(2): 146-157. (in Chinese)
- [23] 敖芹,左晋,周万飞,等.遵义市酒用高粱品种红缨子的适宜直播期及其气候风险[J].贵州农业科学,2023,51(3):126-132.
AO Q, ZUO J, ZHOU W F, et al. Suitable direct seeding period and its climatic risk of Hongyingzi, a sorghum variety for liquor in Zunyi City[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2023, 51(3): 126-132. (in Chinese)
- [24] 赵庆山.中国北方冬小麦主产区倒春寒灾害风险评估[D].南京:南京信息工程大学,2022.
ZHAO Q S. Risk assessment of the return of cold spell in spring disaster in the main winter wheat producing areas in northern China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [25] 陈翔,于敏,蔡洪梅,等.小麦倒春寒研究现状与进展[J].应用生态学报,2021,32(8):2999-3009.
CHEN X, YU M, CAI H M, et al. Research status and progress of the return of cold spell in spring of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2999-3009. (in Chinese)
- [26] 许炳南.贵州气候灾害的划分标准[J].贵州气象,1999,23(3):6.
XU B N. Classification standards of climatic disasters in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 1999, 23(3): 6. (in Chinese)
- [27] 许炳南,张弼州,黄继用,等.贵州春旱、夏旱、倒春寒、秋风的规律、成因及长期预报研究[M].北京:气象出版社,1997:6.
XU B N, ZHANG B Z, HUANG J Y, et al. Research on the laws, causes and long-term forecast of spring drought, summer drought, return of cold spell in spring and autumn wind in Guizhou[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 6. (in Chinese)
- [28] 李登芬.贵州省酒用高粱种植的气候适宜性研究[J].农业开发与装备,2024(5):100-102.
LI D F. Study on the climatic suitability of sorghum planting for liquor in Guizhou Province[J]. Agricultural Development and Equipments, 2024(5): 100-102. (in Chinese)
- [29] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书(2018)

- [M]. 北京:科学出版社,2018:30。
CMA Climate Change Centre. Blue Book on Climate Change in China (2018)[M]. Beijing: Science Press, 2018: 30. (in Chinese)
- [30] 邵明波,周棱波,彭方丽,等.科技支撑贵州酒用高粱产业发展对策[J].贵州农业科学,2021,49(4):156-164.
SHAO M B, PENG F L, et al. Countermeasures for the development of sorghum industry for liquor in Guizhou Province supported by science and technology[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(4): 156-164. (in Chinese)
- [31] 王乐,陈中华,李海红.乡村振兴战略下的白城高粱产业发展问题及对策研究[J].东北农业科学,2021,46(2):108-111.
WANG L, CHEN Z H, LI H H. Research on the development problems and countermeasures of the sorghum industry in Baicheng under the rural revitalization strategy[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(2): 108-111. (in Chinese)
- [32] 彭方丽,周棱波,汪灿,等.高粱间套作栽培模式研究进展[J].贵州农业科学,2020,48(10):20-23.
PENG F L, ZHOU L B, WANG C, et al. Research progress on the intercropping and relay cropping cultivation modes of sorghum[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(10): 20-23. (in Chinese)
- [33] 宋少忠,刘园园,周紫阳,等.基于高光谱图像技术的高粱品种识别研究[J].光谱学与光谱分析,2024,44(5):1392-1397.
SONG S Z, LIU Y Y, ZHOU Z Y, et al. Research on sorghum variety identification based on hyperspectral image technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(5): 1392-1397. (in Chinese)
- [34] 李斌,魏景利,解兴,等.北方落叶果树防控倒春寒技术措施[J].北方园艺,2022(22):155-157.
LI B, WEI J L, XIE X, et al. Technical measures for preventing and controlling the return of cold spell in spring of deciduous fruit trees in northern China[J]. Northern Horticulture, 2022(22): 155-157. (in Chinese)
- [35] 汪晨,陈江锋,毛程燕,等.金衢盆地“倒春寒”时空演变特征及对双季早稻的影响[J].中国稻米,2022,28(3):70-74.
WANG C, CHEN J F, MAO C Y, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of the "return of cold spell in spring" in the Jinqu Basin and its impact on double cropping early rice[J]. China Rice, 2022, 28(3): 70-74. (in Chinese)
- [36] 岳慧欣,何延波,刘崇怀,等.葡萄主产区干旱时空分布特征[J].干旱地区农业研究,2023,41(1):201-211.
YUE H X, HE Y B, LIU C H, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of drought in the main grape producing areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 201-211. (in Chinese)
- [37] 王星明,褚彦琪,杨的山,等.广西干旱灾害风险评估及区划[J].节水灌溉,2024(1):60-68.
WANG X M, CHU Y Q, YANG D S, et al. Risk assessment and zoning of drought disasters in Guangxi[J]. Water Saving Irrigation, 2024(1): 60-68. (in Chinese)
- [38] 杨爱琴,贺芬芬,孙智辉,等.基于GIS的陕西省志丹县苹果花期冻害风险精细区划[J].农业工程,2023,13(6):43-47.
YANG A Q, HE F F, SUN Z H, et al. Fine zoning of apple flowering frost damage risk in Zhidan County, Shaanxi Province based on GIS[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(6): 43-47. (in Chinese)
- [39] 王熙尹,姚瑶,平凡.基于气候变化的内蒙古自治区春玉米主要农业气象灾害风险评估[J].南方农业,2023,17(22):21-24.
WANG X Y, YAO Y, PING F. Risk assessment of main agricultural meteorological disasters of spring maize in Inner Mongolia Autonomous Region based on climate change[J]. South China Agriculture, 2023, 17(22): 21-24. (in Chinese)
- [40] 葛占宇,成慧娟,王立新,等.不同播期对高粱籽粒淀粉积累规律及籽粒产量的影响[J].东北农业科学,2020,45(1):13-16.
GE Z Y, CHENG H J, WANG L X, et al. Effects of different sowing dates on the accumulation law of starch in sorghum grains and grain yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(1): 13-16. (in Chinese)

(责任编辑:范杰英)