

多级格网冰雹灾害遥感监测方法及时空分布特征研究

邵小东¹, 蒋样明², 黄坤¹, 王福涛², 王拓², 赵辉辉², 侯秋强¹,
阮海明¹, 官群荣¹

1. 云南省烟草公司红河州公司, 弥勒 652300;
2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 1961年以来云南省红河哈尼族彝族自治州(红河州)冰雹灾害频发,对当地农业生产造成了重大损失。当前基于气象台站数据采用统计分析方法获得的县市、站点尺度雹灾分布数据无法满足农业防雹需求,少数冰雹灾害监测遥感方法受限于遥感数据源单一及针对全局分析的特点,在山区缺乏适用性。为掌握红河州冰雹灾害发生的时空分布特征与规律,本文选用2009年—2022年红河州防雹点冰雹灾害记录,研究基于Ross-Li与STARFM的多源遥感卫星影像时空融合方法,提出多级格网冰雹灾害遥感监测模型与冰雹灾害识别指数 R_{NDVI-M} 进行雹灾区遥感监测,并采用空间叠加分析与空间相关分析,在耕地地块级别定量分析了不同地貌类型、地形起伏度、坡度、地形类型等冰雹灾害频次,构建冰雹易发性评估模型计算气候、气象、地形、地貌等自然条件造成冰雹灾害易发区空间分布特征。验证结果表明应用该模型的冰雹灾害遥感监测结果最大相对误差为9.08%,平均误差为5.62%,标准偏差为1.66%,山区冰雹灾害空间分布与海拔相关性显著,与坡度、起伏度具有中等相关性,河谷、山谷沿线的耕地更易受雹灾影响。因此,本研提出的多层次格网模型参数自适应的方式,提高了模型适应性,将冰雹灾害监测精度与风险评估精度提高到耕地地块尺度。

关键词: 冰雹灾害, 冰雹遥感识别指数 R_{NDVI-M} , 冰雹灾害遥感监测, 冰雹灾害时空分布, 红河州

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 邵小东, 蒋样明, 黄坤, 王福涛, 王拓, 赵辉辉, 侯秋强, 阮海明, 官群荣. 2024. 多级格网冰雹灾害遥感监测方法及时空分布特征研究. 遥感学报, 28(11): 3002-3015

Shao X D, Jiang Y M, Huang K, Wang F T, Wang T, Zhao H H, Hou Q Q, Ruan H M and Guan Q R. 2024. Multi-grid remote sensing monitoring method of hail disaster and the temporal-spatial distribution characteristics in Honghe. National Remote Sensing Bulletin, 28(11): 3002-3015 [DOI: 10.11834/jrs.20243483]

1 引言

云南省哈尼族彝族自治州(红河州)地处低纬度亚热带高原型湿润季风气候区,境内高山河谷纵横,地形地貌复杂,春季与夏季受大尺度天气系统、不稳定环境条件和局地强烈对流影响,造成冰雹灾害频发。每年直接经济损失占气象灾害损失的15%,如2019年春季红河州冰雹灾害造成直接经济损失4142万元,是影响红河州高原特色农业的第一大气象灾害(张腾飞等, 2021; 赵

红珍和李鑫焱, 2020; 韩迁立等, 2021; 陶云等, 2002; 李智全等, 2013)。因此,分析和研究红河州冰雹空间分布特征和周期性变化特征对调整农作物种植空间分布结构,规划布局人工防雹作业点,做好气象防灾减灾工作具有重要意义。

通过检索Web of Sciences数据库和中国知网发现,基于地面气象观测资料、高空大气探测资料和物理量场、风云卫星云图、雷达卫星产品等可以为红河州冰雹预警及冰雹灾害路径分析提供了有效参考。Murillo和Homeyer(2019)基于雷达回

收稿日期: 2023-12-07; 预印本: 2024-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFB3901201);中国烟草总公司云南省公司重点项目(编号:2021530000241030);科技部专项计划(编号:Y8Q0070034);中国科学院国际合作局对外合作重点项目(编号:131211KYSB20180002)

第一作者简介: 邵小东,研究方向为智慧烟草农业。E-mail: shaoxiaodong@aliyun.com

通信作者简介: 蒋样明,研究方向遥感应用技术。E-mail: jym_wm@126.com

波顶部跟踪客观识别的2013年—2019年近6000次冰雹的雷达观测和卫星产品,发现雷达观测可以很好地区分严重冰雹和非严重冰雹,并修订了冰雹MESH指标。2019年春季红河州冰雹天气0℃层高度在4.5 km左右,-20℃层高度则分布在7—8 km,雷达回波出现回波顶偏移、弱回波区、假尖顶”等回波特征,2 km以下会出现50 dBZ以上强回波中心(赵红珍和李鑫焱,2020);冰雹发展阶段雷达反射率具有明显的指状回波和三体散射特征、回波增强、云团体积变大,冰雹移动阶段雷达反射率因子“钩”状回波结构特征明显、云团径向速度图有与之对应的正负速度对、冰雹云团后侧有“V”型槽口,减弱阶段反射率因子最大值降低、强回波核面积缩小(韩迁立等,2021);雷达卫星基本反射率因子图上冰雹云回波单体的强度值都大于50 dBZ,强回波核高度在8 km左右,卫星云图中发现冰雹过程冰雹云径向速度场呈现逆风区和低层风速的辐合特点(秦香婷等,2015;黄勇等,2013;张腾飞等,2006);他们的研究成果为基于地面气象观测资料、高空大气探测资料和物理量场、风云卫星云图进行红河州冰雹预警及冰雹灾害路径分析提供了有效参考。

文献检索发现传统的冰雹灾害空间分布分析主要依赖气象观测台站数据,但由于观测站点少且冰雹主要发生在远离气象台站的乡村山区,冰雹记录严重缺失,造成分析结论主要停留在县市尺度,在农业种植布局优化方面指导性较差。已有研究基于气象观测台站数据从气候特征角度分析了云南冰雹的时空分布特征(尹丽云等,2022;陶云等,2011;段玮等,2017);王瑾、李蒙、王宝利用气象台站冰雹观测数据,采用GIS空间分析工具研究了冰雹频次的地理分布特征。随着遥感技术的发展,遥感和作物建模相结合为冰雹灾害损失评估提供了新思路(王瑾和刘黎平,2008;李蒙等,2012;王宝等,2012)。如Bell等(2020)应用Sentinel-1A/1B C波段SAR共极化和交叉极化图像识别在生长季节冰雹前后玉米和大豆地后向散射变化,应用相干变化检测评估冰雹受灾区。Gobbo等(2021)基于Landsat 7/8卫星影像,耦合生物量估算模型SEBAL,冰雹损失HDDSSAT模型,研究发现模型误差为-4.0%—-4.9%。Sosa L等(2021)基于遥感植被指数结合无监督机器学习技术,构建了冰雹前后的5个微波和5个光谱指标,构建了一种自动检测冰雹灾害算法,发现双极化SAR植被

指数和归一化叶绿素比指数对冰雹变化最为敏感。贾德伟等(2018)基于MODIS数据提取了河南省平顶山市冬小麦冰雹灾害空间分布信息;胡文(2015)利用连续多时相16 d合成250 m空间分辨率的MODIS植被指数产品进行了黑龙江省冰雹灾害监测研究,监测精度达82.89%。上述模型通常采单一数据来源针对研究区域全局构建模型,造成基于SAR数据监测时植被结构、植被成熟度和土壤水分条件等空间分异对监测精度有较大影响;基于单一可见光遥感数据监测时在云南立体气候显著、阴雨天气较多的条件下,相关模型的适用性较差。

基于2009年—2022年防雷作业点冰雹记录,本研究采用Ross-Li与STARFM的多源遥感卫星影像时空融合方法,提出多级格网冰雹灾害遥感监测模型与冰雹识别指数 R_{NDVI-M} 识别冰雹灾害发生区域,综合利用多源卫星数据优势,解决多云雨山区卫星数据质量差的局限性;采用多层次格网模型参数自适应方式,提高冰雹灾害遥感监测模型在山区立体气候条件下的适应性,以期改进现有模型在山区立体气候条件下适用性不足的问题;并基于冰雹灾害遥感监测结果,在耕地地块尺度定量分析了冰雹灾害频次与海拔、坡度、地形起伏度、地形类型、地貌类型等相关性,构建耕地地块层面的冰雹易发性评估模型,以期使冰雹灾害风险评估从现有采用气象台站数据统计分析获得的县市尺度提高到耕地地块尺度,更有效地指导农业种植布局优化,减少农业冰雹灾害损失。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况

云南省红河哈尼族彝族自治州,位于101°47'E—104°16'E,22°26'N—24°45'N,云南高原向东南倾斜的坡面上,属于低纬高原季风气候区,是热带西南季风和热带东南季风交互出现的过渡地带,在大气环流与复杂立体的下垫面作用下,光、热、水垂直分布差异大,导致冰雹、大风等农业气象灾害频繁。采用传统方式获得的县市尺度冰雹时空分布数据无法满足红河州农业布局优化与冰雹灾害防护需求。

2.2 研究方案

根据云南省红河州及邻近区域218个防雷作业点和32个观测站收集到的冰雹记录及冰雹发生时

的气象数据, 筛选冰雹区多源遥感卫星数据。采用冰雹站点数据融合处理方法制作冰雹路径预估区域, 并裁剪出冰雹发生区的多源遥感卫星数据。采用基于 Ross-Li 核驱动的多源遥感卫星影像归一化方法, 以 Landsat 8 数据为参考, 计算 MODIS、HJ-1A/B、ZY-1/3、Sentinel-2 GF-1/2/4/6 等归一化的多源卫星数据。采用 STARFM 遥感数据时空融合方法, 利用多源遥感影像重构出更高时间分辨率的卫星观测数据, 用以解决多阴雨天气造成数

据时空不连续问题。提出多级格网雹灾遥感监测模型, 计算冰雹灾害事件指数 R_{NDVI_M} , 采用 Kneed 方法提取 R_{NDVI_M} 变化趋势转折点作为阈值识别雹灾区, 基于 2009 年—2022 年冰雹调研数据, 采用现象通用性验证方法验证 R_{NDVI_M} 阈值的有效性, 并进行冰雹监测精度评估。结合耕地空间分布数据与 GIS 空间相关性分析方法, 获得冰雹频次空间分布特征, 基于层次分析法构建冰雹易发性评估模型。具体技术方案如图 1 所示。

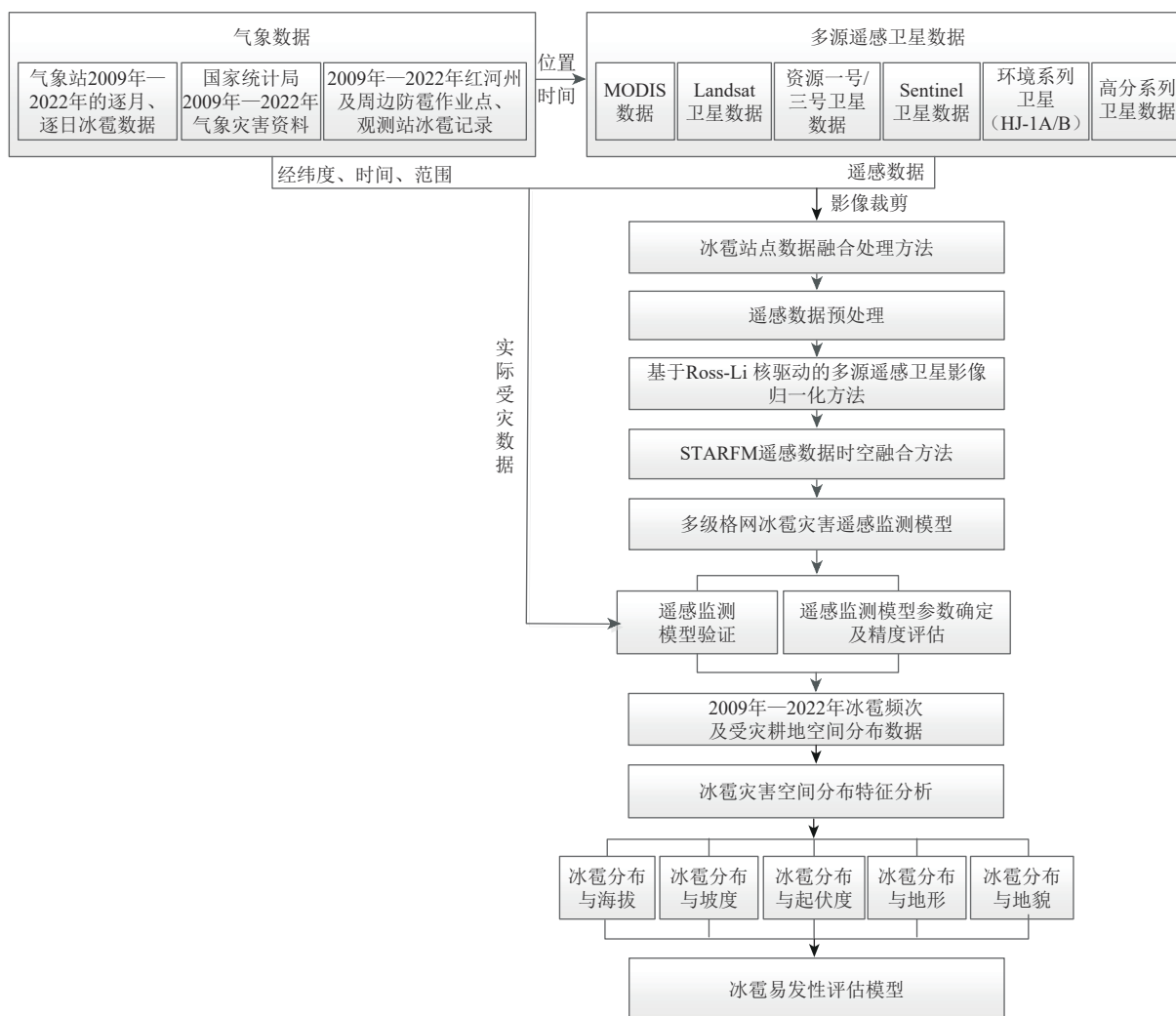


图1 雹灾监测及风险评估技术路线

Fig. 1 Technical routes for hailstorm monitoring and risk assessment

2.3 数据资料

冰雹记录数据: 2009 年—2022 年云南统计资料 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj> [2023-12-07]) 和气象站灾情系统中红河州冰雹灾害灾情资料, 2009 年—2022 年云南省红河州及邻近区域 218 个防雹作业点和 32 个观测站收集到的 1036 条冰雹记录,

包含冰雹落点的县市、乡镇或地址、经纬度、发生时间、持续时间、受灾面积估算等详细记录。

气象数据: 国家气象信息中心的 2009 年—2022 年中国地面基本气象观测逐 3 h 数据 (<http://data.cma.cn> [2023-12-07])。

多源遥感卫星数据: 2009 年—2022 年各次冰

雹发生区的多源遥感卫星数据，包括 MODIS (2009 年—2022 年 5559 景)、Landsat (2009 年—2022 年 1294 景)、HJ-1A/B (2009 年—2022 年 2637 景)、ZY-1/3 (2012 年—2022 年 1932 景)、Sentinel-2 卫星数据 (2015 年—2022 年 4645 景)、GF-1 卫星数据 (2013 年—2022 年 1382 景)、GF-2 卫星数据 (2015 年—2022 年 938 景)、GF-6 卫星数据 (2019 年—2022 年 463 景)。

2.4 冰雹站点数据融合处理方法

基于冰雹形成的气候条件、气象条件、雷达图特征、降雹区及移动路径特征 (秦香婷 等, 2015; 李磊和朱莉, 2013; 徐小红 等, 2022; 李静, 2012; 刘小艳 等, 2020), 根据防雹作业点记录的冰雹落点的地址、经纬度、发生时间、持续时间、受灾面积估算等记录; 综合气象数据中的风向, 地形数据中的山谷、山脊、河谷及地形分类数据; 采用 ARCGIS 空间分析方法, 以冰雹落点中心、冰雹路径结合云图空间分布特征, 制作缓冲距离为 15 km 的正方形面要素作为冰雹预估区域。应用每次冰雹预估区域的面要素, 裁剪冰雹发生临近时相的多源遥感卫星数据。

2.5 基于 Ross-Li 核驱动的多源遥感卫星影像归一化方法

针对 MODIS、HJ-1A/B、ZY-1/3、Sentinel-2、GF-1/2/6 等多源遥感卫星数据, 以 Landsat 8 数据为参考, 采用基于 Ross-Li 核驱动模型的分段线性拟合法, 计算 BRDF 校正系数, 计算归一化多源卫星数据 (Roujean 等, 1992):

$$\begin{cases} R_{ij}(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda) \cdot K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + \\ f_{geo}(\lambda) \cdot K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \\ R_{ij} = R'_{ij} \cdot P_{ij} + Q_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_{ij} 为待校正传感方向反射率均一像元上第 i 类地物在 j 波段的反射率, K_{vol} 为体散射核, K_{geo} 为几何光学核, $f_{iso}(\lambda)$ 、 $f_{vol}(\lambda)$ 、 $f_{geo}(\lambda)$ 分别为 3 个核的核系数, R'_{ij} 为参考传感器方向反射率均一像元上第 i 类地物在 j 波段的反射率, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为该类地物在该波段的 BRDF 校正系数。

2.6 STARFM 遥感数据时空融合方法

采用 Fmask4.0 算法结合基于 STARFM 遥感数据时空融合模型 (Gao 等, 2006; 郭明权 等, 2014; 杨军明 等, 2019; 李思源 等, 2023), 利用多源

遥感影像归一化方法生成的高一致性的多源卫星数据输入到 STARFM 模型中, 生成 10 m 空间分辨率的时序数据, 解决多云雨天天气造成的卫星观测时空不连续问题。STARFM 反射率权重估算函数计算公式为:

$$\begin{cases} C_{ijk} = S_{ijk} \times T_{ijk} \times D_{ijk} \\ W_{ijk} = \frac{(1/C_{ijk})}{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^n (1/C_{ijk})} \\ L(x_{\frac{w}{2}}, y_{\frac{w}{2}}, t_0) = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^n W_{ijk} \times (M(x_i, y_j, t_0) + \\ L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \end{cases} \quad (2)$$

式中, W_{ijk} 为 t_k 时刻获取的坐标 (x_i, y_j) 像元的最终权重, C_{ijk} 为组合权重, S_{ijk} 为光谱距离权重, T_{ijk} 为时间距离权重, D_{ijk} 为空间距离权重, L 为融合后影像的像元值, M 为低空间分辨率影像像元值, w 为窗口大小, t_0 为模拟的融合影像日期, t_k 为模型输入参考影像获取日期。

2.7 冰雹灾害遥感监测模型

冰雹及伴随的狂风、强降水、急剧降温等阵发性灾害造成植物外部形态和内部生理显著变化, 导致植物光谱特征发生显著变化。当发生灾害后, NDVI 时间序列曲线会产生异常, 结合冰雹站点记录分析获得的雹灾预估带, 可以提取受灾范围。考虑到红河州立体气候显著, 不同海拔高度与地形的种植结构及物候期也各不相同, 同一时相、不同区域的植被指数差异显著, 且作物分布具有自然分区、人为干预分区、地类分层等特征。为提高冰雹灾害识别指数的客观性与及时性, 提出根据行政区域、主要农作物分布、气候因素 (年降水量、年均气温)、地形地貌 (DEM、坡度、坡向)、土地利用类型等因素, 采用 ARCMAP 软件计算空间权重矩阵, 耦合 K-Means 聚类方法, 对县市、乡镇、村委会、村小组等多尺度网格进行分类, 生成多级格网 (图2), 使相应格网内作物结构相对稳定, 在此基础上构建基于多级格网的冰雹灾害遥感监测模型:

$$R_{NDVI_M(i,j)} = \frac{NDVI_{(i,j)} - NDVI_{mid(i,j)}}{NDVI_{mid(i,j)}} \quad (3)$$

式中, i 为格网位置编号; j 为时相; $R_{NDVI_M(i,j)}$ 为第 i 格网、第 j 时相的 NDVI 标准化值; $NDVI_{(i,j)}$ 为当年第 i 格网、第 j 时相的 NDVI 值; $NDVI_{mid(i,j)}$ 近 2012 年—2022 年第 i 格网、第 j 时相 NDVI 中值。

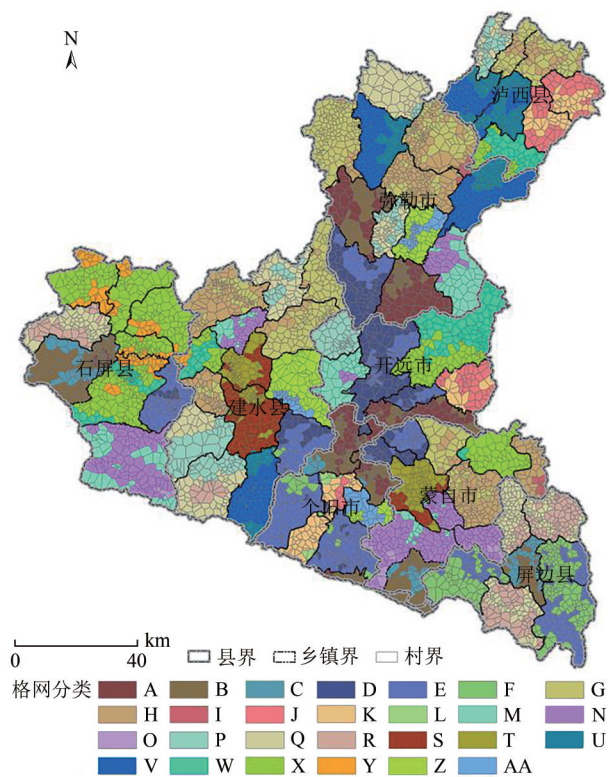


图2 多级格网划分图
Fig. 2 Multi-level grid diagram

采用基于多源遥感卫星数据的多级格网农作物遥感监测模型(邵小东等, 2022)识别红河州2012年—2022年主要农作物——春播玉米、夏播玉米、小麦、早稻、晚稻、烟草、烟草, 耕地、林地、水体与建筑物等的植被指数 $NDVI_{mid}$, 结合冰雹灾害调研数据, 应用式(3)计算 R_{NDVI_M} , 采用Kneed方法提取 R_{NDVI_M} 趋势转折点作为冰雹受灾区域阈值, 采用多现象通用性验证方法验证 R_{NDVI_M} 的有效性。采用相对误差公式进行精度评估与优化阈值参数。

$$E_r = \frac{|S_m - S_r|}{S_r} \tag{4}$$

式中, E_r 为相对误差, S_m 为遥感监测受灾面积, S_r 为实际受灾面积。

2.8 冰雹空间分布与地形的相关性分析

基于DEM数据, 采用GIS地形与水文分析工具, 提取海拔、山脊与山谷、河谷; 应用ArcGIS和ERDAS技术, 根据海拔、地面坡度、地形起伏度量化划分红河州的高寒山区、山区、半山区和坝区(童绍玉, 2011)。将冰雹频次空间分布数据与地形数据进行空间叠加分析, 获得每个像素点的冰雹频次及地形属性。采用Pearson相关分析

方法, 分析冰雹频次和海拔、山地、坝区、山谷、山脊、河谷的相关性, 探讨红河州冰雹带空间分布特征。

2.9 冰雹易发性评估模型

冰雹易发性指数主要反映在气候、气象、地形、地貌等自然条件下冰雹发生的概率。采用层次分析法, 结合极差法数据标准化及主成分分析法, 得出解释的总方差和成分矩阵, 计算权重系数。

$$R_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \tag{5}$$

式中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 为利用海拔高度、地形起伏度、坡度、地貌类型和地形类型拟合出的冰雹频数; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为权重系数。

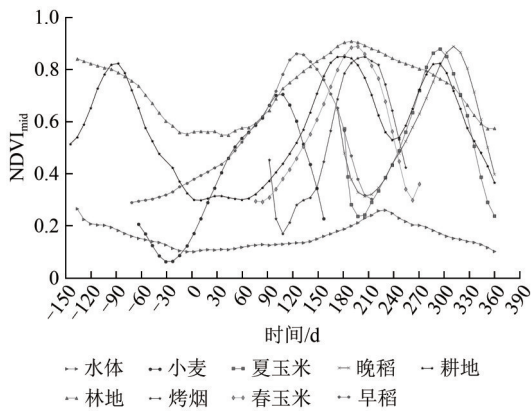
3 结果与分析

3.1 冰雹识别指数 R_{NDVI_M}

基于红河州2009年—2022年多源遥感卫星, 采用基于Ross-Li核驱动的多源遥感卫星影像归一化方法结合基于STARFM遥感数据时空融合模型, 构建红河州植被指数NDVI时间序列数据。采用均方根误差RMSE、决定系数 R^2 进行时间序列数据质量评价, 结果见表1。可见本研究构建的NDVI时间序列数据与基于Sentinel-2的验证NDVI具有高相关性(表1)。基于多级格网计算 $NDVI_{mid}$ 时间序列曲线(图3)。可见: 红河州主要农作物小麦、春玉米、夏玉米、烤烟、早稻、晚稻与耕地、森林等 $NDVI_{mid}$ 时间序列曲线具有显著区别, 应根据冰雹灾害发生的时相选择响应显著的农作物 $NDVI_{mid}$ 进行分析。

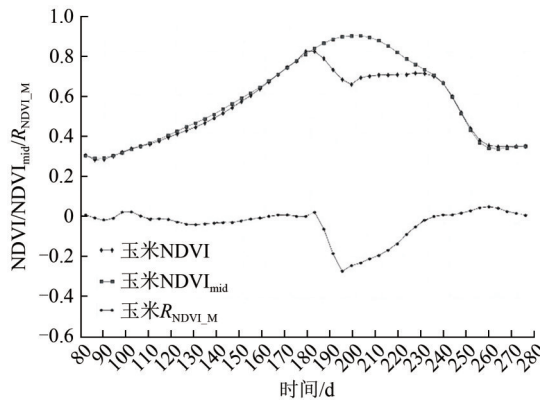
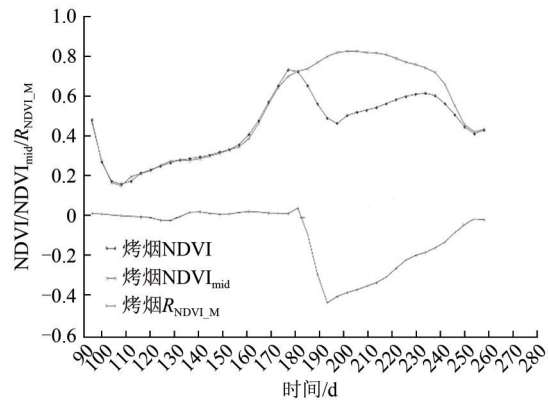
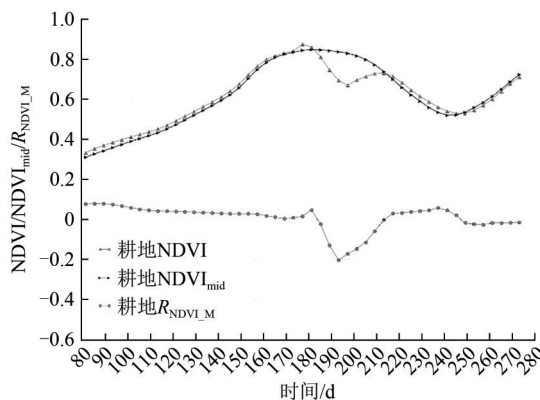
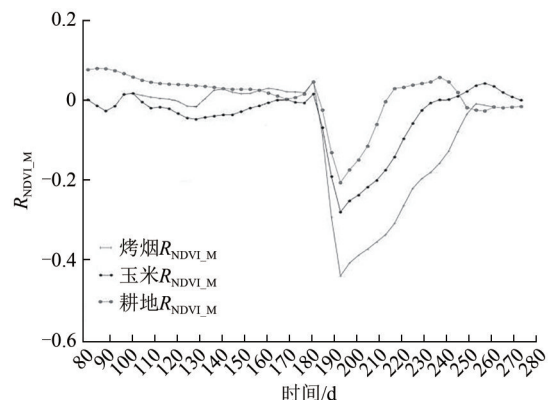
表1 NDVI时间序列数据质量评价

Table 1 Quality evaluation of NDVI time-series data			
日期	Sentinel-2位置	RMSE	R^2
2022-04-01	N0400_R061	0.035	0.89
2022-04-06	N0400_R061	0.043	0.87
2022-04-11	N0400_R061	0.031	0.90
2022-04-16	N0400_R061	0.049	0.84
2022-04-21	N0400_R061	0.053	0.82
2022-04-26	N0400_R061	0.037	0.88
2022-05-26	N0400_R061	0.031	0.91
2022-06-10	N0400_R061	0.036	0.89
2022-06-15	N0400_R061	0.048	0.86
2022-06-20	N0400_R061	0.037	0.89
2022-06-25	N0400_R061	0.041	0.88

图3 泸西县白水镇主要地物NDVI_{mid}时间序列曲线Fig. 3 NDVI_{mid} series curve in Baishui Town, Luxi County

2022年7月7—9日(第185—187时相)泸西县白水镇发生了冰雹灾害。根据调研统计数据及

灾后GF-2遥感卫星反演数据验证,此次雹灾造成农作物受灾1978.81 hm²,成灾958.01 hm²,绝收894.96 hm²。其中,烤烟成灾810.72 hm²,春玉米成灾121.59 hm²。根据雹灾区物候情况,选择春玉米、烟草及耕地,沿着冰雹灾害方向及垂直灾害方向进行NDVI、NDVI_{mid}和 R_{NDVI_M} 的剖切面分析,结果显示时间序列曲线在第187时相出现拐点,有大幅下降趋势,且在随后直至第210时相都显著小于十年均值NDVI_{mid},可确定为第187时相NDVI和 R_{NDVI_M} 显著下降是由雹灾引起(图4)。通过比较可知冰雹灾害对不同作物类型的影响差异较大,如对冠层幅宽大的烟草影响比春玉米更加显著。耕地 R_{NDVI_M} 反映了雹灾区所有农作物的整体响应,能作为冰雹识别指数,但效果不如烟草、春玉米。

(a) 玉米的NDVI、NDVI_{mid}、 R_{NDVI_M}
(a) NDVI, NDVI_{mid} and R_{NDVI_M} of corn(b) 烤烟的NDVI、NDVI_{mid}、 R_{NDVI_M}
(b) NDVI, NDVI_{mid} and R_{NDVI_M} of tobacco change(c) 耕地的NDVI、NDVI_{mid}和 R_{NDVI_M}
(c) NDVI, NDVI_{mid} and R_{NDVI_M} of cultivated land(d) 玉米、烤烟和耕地的 R_{NDVI_M}
(d) R_{NDVI_M} of corn, tobacco and cultivated land图4 泸西县白水镇雹灾(185—187 d)前后植被指数NDVI、NDVI_{mid}与 R_{NDVI_M} 时间序列曲线特征Fig. 4 NDVI, NDVI_{mid} and R_{NDVI_M} series curve change before and after hail disaster (185—187 d) Baishui Town, Luxi County

3.2 冰雹识别指数 R_{NDVI_M} 阈值设置及验证

针对该次泸西县白水镇冰雹灾害方向及垂直灾害方向 R_{NDVI_M} 剖切面数据采用Knead方法分析,获

得烟草、春玉米、耕地的拐点位置分别为(-0.171, -0.175)、(-0.140, -0.130)和(-0.119, -0.119)(图5)。采用拐点数据及等距离分隔设置的阈值提

取雹灾空间分布数据，与实际受灾数据进行空间叠加分析，计算不同阈值的监测精度，结果显示烤烟、春玉米、耕地 R_{NDVI_M} 拐点值作为阈值时，雹

灾遥感监测相对误差分别为5.39%、6.37%、8.18%（表2）。由此可知 R_{NDVI_M} 拐点值可以作为冰雹灾害遥感识别阈值。

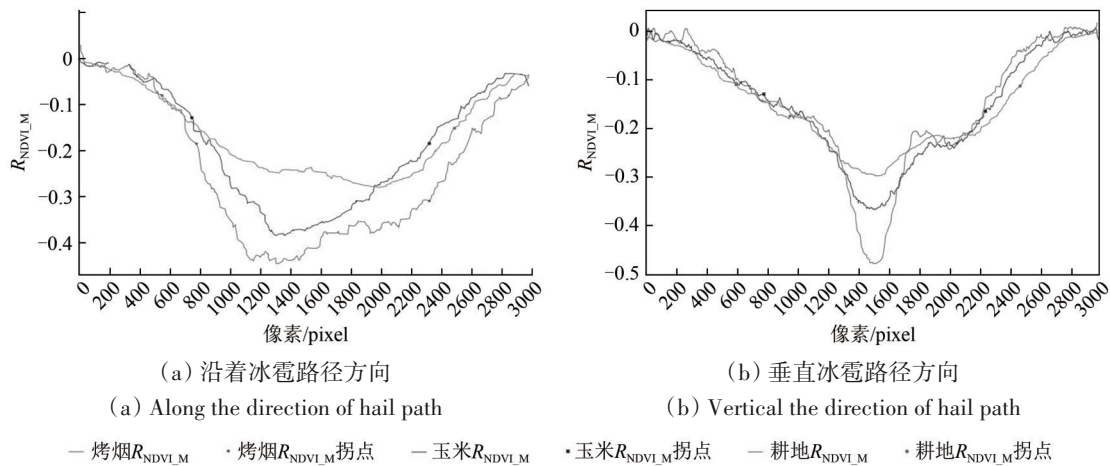


图5 R_{NDVI_M} 剖切面曲线特征及Kneel 拐点分析
Fig. 5 R_{NDVI_M} curves and Kneel inflection points

表2 R_{NDVI_M} 不同阈值的雹灾识别精度对比

Table 2 Comparison of recognition accuracy of hail disaster with different R_{NDVI_M} threshold values					
指标作物	阈值	遥感成灾面积/hm ²	实际成灾面积/hm ²	绝对误差/hm ²	相对误差/%
烤烟	-0.175	854.42	810.72	43.7	5.39%
	-0.4	487.97	810.72	322.75	39.81%
	-0.32	620.53	810.72	190.19	23.46%
	-0.24	678.98	810.72	131.74	16.25%
	-0.16	938.25	810.72	127.53	15.73%
	-0.08	1172.95	810.72	362.23	44.68%
春玉米	-0.14	129.34	121.59	7.75	6.37%
	-0.35	79.34	121.59	42.25	34.75%
	-0.28	90	121.59	31.59	25.98%
	-0.21	100.63	121.59	20.96	17.24%
	-0.14	129.34	121.59	7.75	6.37%
	-0.07	180.63	121.59	59.04	48.56%
耕地	-0.119	1036.36	958.01	78.35	8.18%
	-0.3	579.89	958.01	378.12	39.48%
	-0.24	769.57	958.01	188.44	19.67%
	-0.18	1037.81	958.01	79.8	8.33%
	-0.12	1035.89	958.01	77.88	8.13%
	-0.06	1507.14	958.01	549.13	57.32%

3.3 冰雹受灾区遥感监测模型应用及精度评估

采用2009年—2022年各次冰雹发生前后的多源遥感卫星数据，根据不同时相选择合理的农作物，以 R_{NDVI_M} 拐点值为阈值，提取雹灾区。采用栅格数据空间叠加分析，获得2009年—2022年冰雹

频次空间分布专题数据，如图6所示。可见：泸西县全局、弥勒市西北部、石屏县北部和牛街镇、建水县面甸镇、开远市中和营镇、个旧市大屯镇、蒙自市西北勒乡、芷村镇和鸣鹭镇等地区的耕地遭受冰雹灾害的频次较高，为雹灾易发区，因此

需要加强防雹作业。

根据2019年1月—2022年12月冰雹站点记录，与气象台记录相互验证，确定可靠性最高的冰雹天气共计50 d，冰雹落点记录82个，筛选出37个雹灾前后时段有高精度遥感卫星数据（GF-1/2/6）的记录。基于冰雹记录数据、实地调查、统计数据，通过监督识别方式，获取冰雹实际受灾数据，与遥感监测结果进行空间叠加分析。应用式（4）评估遥感监测精度，发现最大相对误差为9.08%，最小相对误差为1.85%；平均误差为5.62%，标准偏差为1.66%。

3.4 冰雹空间分布特征分析

基于冰雹频次空间分布遥感监测数据、耕地数据地形地貌数据，采用空间叠加分析与Pearson相关分析，获得红河州耕地冰雹频次空间分布特征。

3.4.1 冰雹频次及海拔的空间分布关系

冰雹频次与海拔相关性为0.869，且通过显著性检验 $P=0.01$ ，表明冰雹活动与海拔有高相关性。图7为各海拔梯度（50 m/梯度）对应的冰雹频次及二次拟合曲线，由图可知海拔1200 m以下冰雹频次较少，且随海拔变化不明显；海拔1200 m—1850 m冰雹频次缓慢增加，受灾面积显著增加，在1850 m处受灾面积达到峰值。冰雹频次和海拔

高度的拟合曲线方程如下：

$$Y_{DEM} = 0.0011x^2 + 0.0361x + 0.9474 \quad (6)$$

式中， Y_{DEM} 为冰雹频次， $a=0.0011$ ， $b=0.0361$ ， $c=0.9474$ ， x 为海拔梯度（50 m/梯度），拟合优度 $R^2=0.8073$ 。

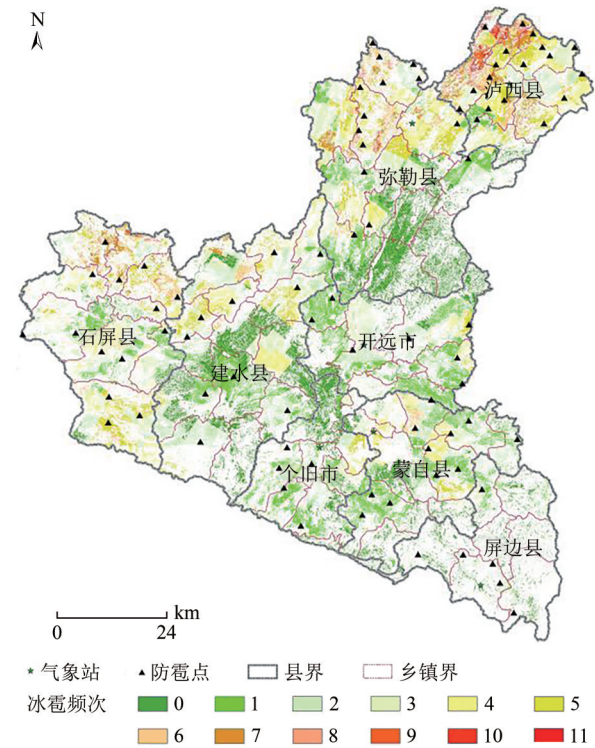


图6 2009年—2022年冰雹频次空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of hail frequency from 2009 to 2022

表3 实验区历史雹灾遥感监测精度评估

Table 3 Accuracy evaluation of remote sensing monitoring of historical hail disaster in experimental area									
冰雹时间	时相	成灾面积/hm ²	监测面积/hm ²	相对误差/%	冰雹时间	时相	成灾面积/hm ²	监测面积/hm ²	相对误差/%
2016-04-20	112	106.7	111.5	4.54%	2020-04-22	114	137.2	134.7	1.85%
2016-07-10	193	167.9	178.9	6.52%	2020-04-24	116	127.4	134.2	5.39%
2016-08-10	224	40.8	37.9	7.25%	2020-04-24	115	1140.5	1184.3	3.84%
2017-03-18	79	170.9	178.0	4.16%	2020-04-27	119	284.6	301.6	6.00%
2017-06-12	165	331.3	349.2	5.43%	2020-06-03	165	6482.3	6887.4	6.25%
2017-06-15	167	279.2	291.2	4.28%	2020-07-26	209	132.6	123.1	7.13%
2019-04-15	107	1600.0	1705.8	6.61%	2020-08-24	238	406.7	429.8	5.69%
2019-04-15	107	251.4	265.9	5.77%	2020-08-25	239	397.4	414.6	4.33%
2019-07-19	202	1978.8	2158.5	9.08%	2020-10-17	262	252.2	261.2	3.56%
2019-08-16	230	105.8	97.5	7.86%	2021-08-18	232	120.2	126.6	5.29%
2019-08-19	233	167.4	172.7	3.20%	2022-03-23	84	331.7	351.8	6.07%
2020-03-04	63	671.3	693.3	3.28%	2022-03-24	85	90.6	84.3	6.91%
2020-03-24	85	240.3	258.6	7.63%	2022-05-26	148	1552.7	1677.5	8.04%
2020-03-24	85	919.0	963.4	4.83%	2022-07-09	185	958.0	1021.7	6.65%

3.4.2 冰雹频次及坡度的空间分布关系

冰雹频次与坡度相关性为 0.460, Sig=0.002, 通过显著性检验 $P=0.01$, 表明冰雹活动与坡度具有中等相关性。图 7 为各坡度冰雹频次及二次拟合曲线, 由图可知坡度 0—30° 时冰雹频次缓慢增加, 但雹灾耕地面积增加显著; 坡度 25—30° 时冰雹频次最大, 雹灾耕地面积最大; 坡度超过 30° 时冰雹频次及雹灾耕地面积显著下降, 但超过 40° 时受灾耕地面积极少。冰雹频次和坡度的拟合曲线方程如下:

$$Y_{\text{slope}} = -0.0001x^3 + 0.008x^2 - 0.0895x + 2.172 \quad (7)$$

式中, Y_{slope} 为冰雹频次, x 为坡度, 拟合优度 $R^2=0.8073$ 。

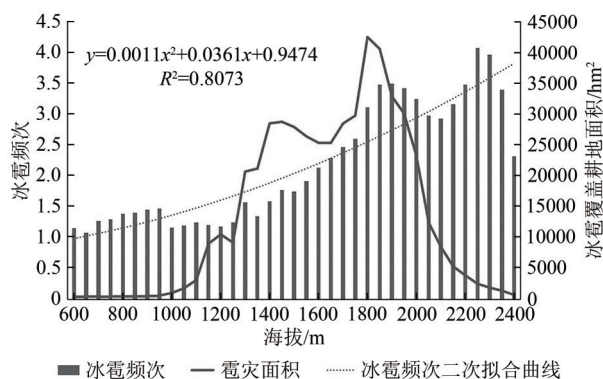


图 7 冰雹频次与海拔高度的相关性

Fig. 7 Correlation between hail event frequency and altitude

3.4.3 冰雹频次及地形起伏度空间分布关系

冰雹频次与起伏度相关性为 0.583, Sig=0.000, 通过显著性检验 $P=0.01$, 表明冰雹活动与起伏度具有中等相关性。图 8 为各起伏度冰雹频次及拟合曲线, 可知起伏度低于 15 m 和超过 255 m 雹灾耕地面积很少; 雹灾耕地集中在起伏度 15—150 m; 其中起伏度 35—45 m 处雹灾耕地面积达到峰值。式 (8) 为冰雹频次与起伏度的拟合曲线方程为

$$Y_{\text{Amplitude}} = (5E-07)x^5 - (7E-05)x^4 + 0.0035x^3 - 0.0782x^2 + 0.6791x + 0.9295 \quad (8)$$

式中, $Y_{\text{Amplitude}}$ 为冰雹频次, 拟合优度 $R^2=0.7699$ 。

3.4.4 冰雹空间分布与地形类型的关系

2009 年—2022 年山谷沿线、河谷沿线耕地受 1—7 次冰雹的耕地面积显著大于山脊沿线雹灾耕地面积; 受 8—11 次冰雹的耕地面积较少。以各地形类别的雹灾耕地面积比例为基础进行统计分析,

可知 1—2 次冰雹风险等级为: 山谷>河谷>山脊>其他地形; 3—7 次冰雹风险等级为: 河谷>山谷>山脊>其他地形。式 (9) 为冰雹频次与不同地形雹灾耕地面积比例的拟合函数:

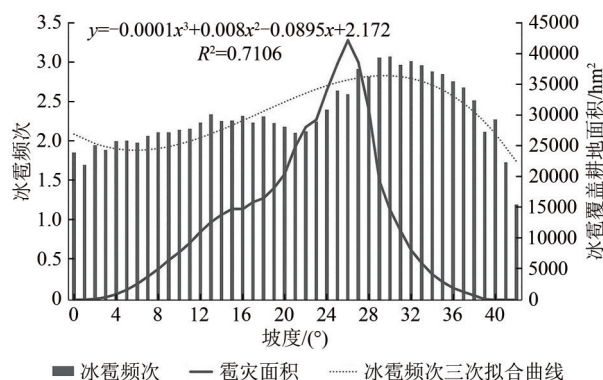


图 8 冰雹频次与坡度的相关性

Fig. 8 Correlation between hail event frequency and slope

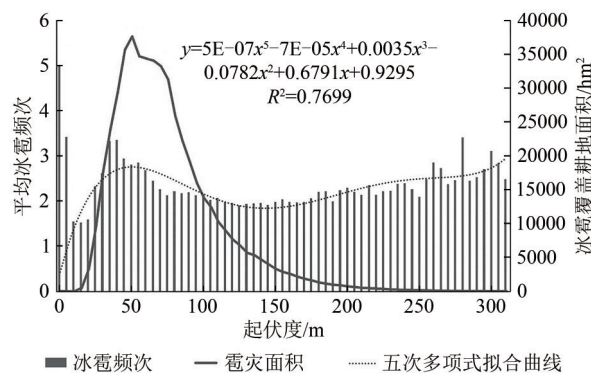


图 9 冰雹频次与起伏度的相关性

Fig. 9 Correlation between hail event frequency and fluctuation

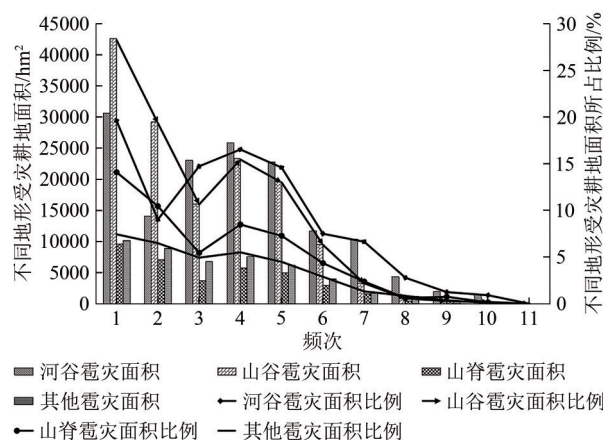


图 10 2009 年—2022 年不同地形/频次冰雹灾害耕地面积分析

Fig. 10 Statistics of hail disaster area in different terrains from 2009 to 2022

$$\left\{\begin{aligned} Y_1 &= 0.0027x^2 - 0.0591x + 0.3164 \\ &\quad (R^2 = 0.9215) \\ Y_2 &= 0.0004x^3 - 0.007x^2 + 0.0198x + 0.1451 \\ &\quad (R^2 = 0.8219) \\ Y_3 &= 0.001x^2 - 0.025x + 0.1544 \\ &\quad (R^2 = 0.9113) \\ Y_4 &= 0.003x^2 - 0.0118x + 0.0878 \\ &\quad (R^2 = 0.9601) \end{aligned}\right.$$

(9)

式中， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 分别为河谷、山谷、山脊和其他地形雹灾耕地所占比例， x 为冰雹频次， R^2 为拟合优度。根据式（10）可以计算各类地形年均雹灾频次 T ：

$$T = \left(\sum_{j=1}^N Y_{ij} \times x \right) / N$$

(10)

式中， N 为统计分析年数， $Y_{i,j}$ 分别为河谷、山谷、山脊和其他地形雹灾次数 j 对应的耕地面积比例。采用该公式计算河谷、山谷、山脊和其他地形年均雹灾频次分别为0.273，0.222，0.137，0.090次/a。

3.4.5 冰雹空间分布与地貌类型的关系

高寒山区耕地很少（449.78 hm²），期间1—4次雹灾耕地面积有265.81 hm²，5次雹灾耕地面积有0.87 hm²；1—2频次坝区雹灾耕地面积与半山区雹灾耕地面积相近，且远大于山区雹灾耕地面积，但坝区雹灾耕地面积比例略大于半山区、山区雹灾耕地面积比例，说明受1—2次雹灾的风险坝区略大于半山区与山区。3—7频次半山区雹灾耕地面积显著大于坝区、山区雹灾耕地面积，且半山区、山区雹灾耕地面积比例显著大于坝区，说明受3—7次雹灾的风险半山区>山区>坝区（图11）。冰雹频次超过8次的耕地面积很少。式11为冰雹频次与不同地貌雹灾耕地面积比例的拟合函数：

$$\left\{\begin{aligned} Y_1 &= 0.0002x^4 - 0.0063x^3 + 0.069x^2 - \\ &\quad 0.3264x + 0.6299 \quad (R^2 = 0.9881) \\ Y_2 &= 0.0001x^4 - 0.0026x^3 + 0.0186x^2 - \\ &\quad 0.0603x + 0.2186 \quad (R^2 = 0.9325) \\ Y_3 &= 0.0003x^4 - 0.0087x^3 + 0.00842x^2 - \\ &\quad 0.3499x + 0.6169 \quad (R^2 = 0.9537) \\ Y_4 &= -0.0006x^3 + 0.0185x^2 - 0.1775x + \\ &\quad 0.5542 \quad (R^2 = 0.9426) \end{aligned}\right.$$

(11)

式中， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 分别为坝区、半山区、山区和高寒山区雹灾耕地比例， x 为冰雹频次， R^2 为拟合优度。用式11计算坝区、半山区、山区和高寒山区年均雹灾频次 T 分别为0.155，0.225，0.155，0.090次/a。

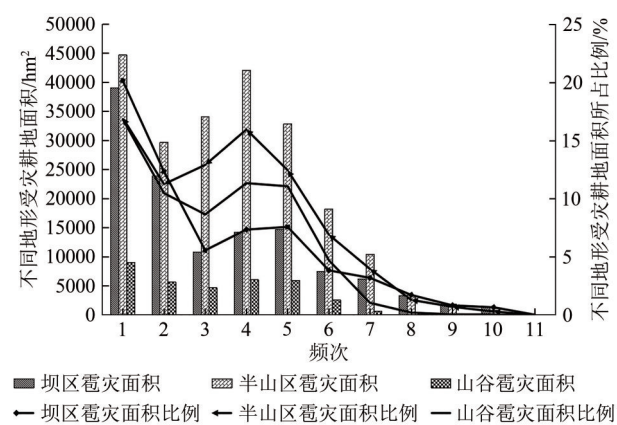


图11 坝区山区半山区冰雹频次分析
Fig. 11 Hail frequency in dams, mountains, semi-mountainous

3.5 雹灾易发性指数空间分布

根据冰雹频次与地形的相关性分析可知海拔、地貌类型、地形起伏度、坡度、地形类型等对冰雹的形成有显著影响。基于式（5），采用层次分析法、极差法数据标准化、主成分分析法，计算权重系数，结合多重线性回归方法，获得冰雹易发性指数评估方程的相关参数：

$$R_1 = 0.0403X_1 + 0.3058X_2 + 0.2605X_3 + 0.2956X_4 + 0.098X_5$$

(12)

式中， X_1 、 X_2 、 X_3 为利用海拔、地形起伏度、坡度多元回归数曲线方程拟合出冰雹频次；根据各类地貌类型的平均冰雹频次设置坝区、半山区、山区和高寒山区等地貌类型 X_4 分别为2.011、2.924、2.015、1.178；根据各类地形类型的平均冰雹频次设置河谷、山谷、山脊、其他等地形类型 X_5 分别为3.550、2.880、1.775、1.172。采用式12计算冰雹易发性指数空间分布，采用百分位法确定各指标，用数值0.5—0.9来表征其影响程度（表4），并采用Natural Breaks自然间隔分类法进行等级划分（图12）。由图可知泸西县全局，弥勒市西北部，石屏县北部和少量南部的牛街镇，建水县面甸镇，开远市中和营镇，个旧市大屯镇，蒙自市西北勒乡、芷村镇、鸣鹭镇等地为雹灾敏感区。

表4 基于冰雹易发性指数等级分类

Table 4 Classification based on the sensitivity index of hail disaster					
指标	$R_1 \leq 2.04$	$2.04 < R_1 \leq 2.71$	$2.71 < R_1 \leq 3.72$	$3.72 < R_1 \leq 5.14$	$R_1 > 5.14$
等级	低 Low	次低 Less Low	中等 Medium	次高 Less high	高 High
影响度值	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

注： R_1 为冰雹易发性指数。

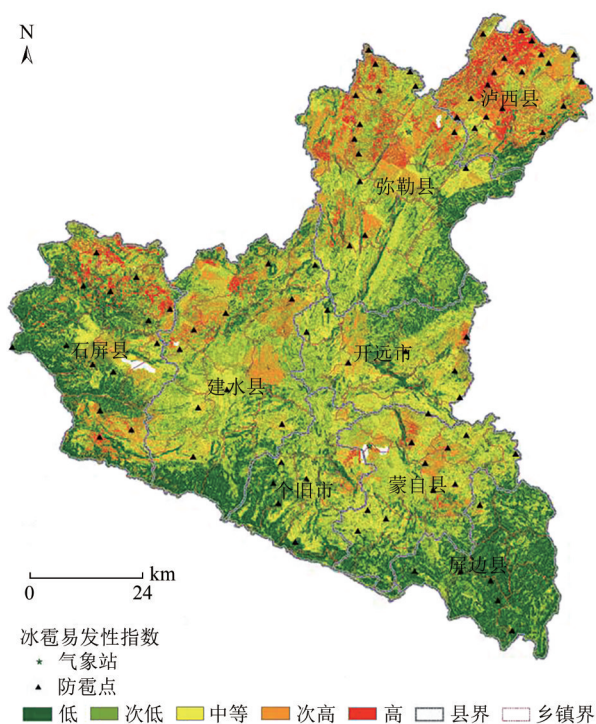


图12 冰雹易发性指数空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of hail susceptibility index

4 讨论

研究发现冰雹发生后NDVI出现异常变化,这与贾德伟利用MODIS数据研究发现雹灾前后植被指数变化特征相似(贾德伟等, 2018)。基于此发现提出了多级格网雹灾遥感监测模型,结合邵小东提出的农作物遥感监测模型(邵小东等, 2022),计算了主要农作物——春播玉米、夏播玉米、小麦、早稻、晚稻、烟草、耕地等的冰雹识别指数 R_{NDVI_M} ,提出用Kneed方法提取 R_{NDVI_M} 拐点作为冰雹事件识别阈值。应用2019年—2022年冰雹事件案例数据与 R_{NDVI_M} 拐点进行Pearson双侧相关性分析,验证了 R_{NDVI_M} 拐点值可以作为雹灾遥感识别阈值($R^2=0.899$, $P=0.01$)。基于泸西县白水镇雹灾的遥感监测结果与实际调研数据,评估监测精度,结果显示以烤烟、春玉米、耕地 R_{NDVI_M} 拐点值为阈值的遥感监测相对误差分别为5.39%、6.37%、8.18%;监测精度相较于胡文采用全局MODIS数据归一化植被指数中值为指标的监测精度(平均相对误差为17.11%)有较明显的提高(胡文, 2015),且采用多级格网方式提高了模型的适应性,使其更适用于立体气候及农业结构空间分异显著的山区。

基于空间叠加分析与相关分析发现冰雹频次与海拔具有显著相关性($R^2=0.869$, $P=0.01$),海拔

1200 m以下冰雹频次较少;海拔1200—1850 m冰雹频次缓慢增加,受灾面积显著增加;1850—2150 m冰雹频次较多,但受灾面积显著减少;海拔2150—2350 m冰雹频次显著增加,且在2300 m达到峰值;但受灾面积较少;研究结果与尹丽云研究的结论相似,她发现云南省海拔高度>800 m以上的区域冰雹频次缓慢增加,海拔高度增加到1650 m以上冰雹频次显著增加,其中海拔高度在1950—2 000 m区域的冰雹频次达到峰值,随后线性减少(尹丽云等, 2022)。

研究发现冰雹频次与坡度具有中等相关性($R^2=0.460$, $P=0.002$),坡度0—30°冰雹频次缓慢增加,但雹灾耕地面积增加显著,坡度25—30°时冰雹频次最大,雹灾耕地面积最高;坡度超过30°时雹灾耕地面积显著下降,超过40°时雹灾耕地面积极少;该研究结果与尹丽云研究发现云南省冰雹主要出现在0°—30°坡度相符,但与其认为冰雹活动在0—5°坡度范围最为活跃的结论有偏差(尹丽云等, 2022)。本研究从雹灾遥感监测结果与坡度叠加分析,综合考虑了各频次雹灾耕地面积,空间分辨率与可靠性相较于尹丽云从防雹点、气象台的冰雹记录及区域平均坡度统计分析结果更高。

研究发现冰雹频次与起伏度有中等相关性($R^2=0.583$, $P=0.000$);雹灾耕地集中在起伏度15—150 m处,其中起伏度35—45 m处冰雹频次及雹灾耕地面积达到峰值;起伏度超过150 m冰雹频次没有显著变化,且雹灾耕地面积极少。李蒙、王秀珍通过研究平原、丘陵、小起伏度山地、中起伏度山地和大起伏度山地等冰雹频次分布特点,发现了起伏度对冰雹空间分布具有一定影响(李蒙等, 2012; 王秀珍, 2021);但没有分析各起伏度与冰雹频次、雹灾耕地面积的空间关系。

研究发现河谷、山谷比山脊更容易受雹灾影响,受1—2次冰雹风险等级为:山谷>河谷>山脊>其他;受3—7次冰雹风险等级为:河谷>山谷>山脊>其他。河谷、山谷、山脊和其他地形年均雹灾频次分别为:0.273次/年,0.222次/年,0.137次/年,0.090次/年。当前未查到关于冰雹空间分布与河谷、山谷、山脊等地形相关性方面的研究,本研究定量分析了冰雹通常是沿着山脉、河谷移动的特征。

坝区、半山区、山区和高寒山区年均雹灾频次分别为:0.155次/a, 0.225次/a, 0.155次/a, 0.090次/a。在冰雹频次方面与杨家康基于站点地

形环境分析发现山区站点的降雹次数明显多于坝区站点（杨家康和杞明辉，2005）一致。从雹灾耕地面积方面考虑，研究结果与尹丽云认为的云南冰雹过程多出现在地形较为缓和的丘陵、坝子和小盆地（尹丽云等，2022）相似。本研究优势是采用了地块级耕地空间分布数据，从冰雹频次、受灾耕地面积及占各类耕地面积的比例等方面综合分析，相比于杨家康、尹丽云基于站点局部地形均值的统计分析方法，在空间精度方面有显著提高，且从耕地受灾情况方面进行评估更具实际应用价值。

5 结 论

为提高冰雹风险评估精度，加强冰雹灾害防治，本文开展了冰雹遥感监测方法与应用研究，构建了基于多级格网雹灾遥感监测模型与了耕地地块尺度的冰雹易发性评估模型，并对模型进行检测。主要结论如下：

（1）基于多级格网雹灾遥感监测模型计算冰雹识别指数 R_{NDVI_M} ，并用Kneed方法提取 R_{NDVI_M} 拐点作为雹灾识别阈值，可以有效识别雹灾范围。根据不同时相选择合适的冰雹识别指数 R_{NDVI_M} 能有效保障监测精度。该方法解决了多云雨山区卫星数据质量差的局限性，改进了现有模型在山区立体气候条件下适用性不足的问题。

（2）基于耕地地块尺度的定量分析发现了山区冰雹灾害空间分布与海拔相关性显著，与坡度、起伏度具有中等相关性；冰雹通常是沿着山脉、河谷移动造成了河谷、山谷沿线的耕地更易受雹灾影响；同时有利于促进对流云抬升的半山区冰雹风险较大。

（3）基于雹灾遥感监测获得了各频次雹灾耕地的空间分布数据，采用耕地地块尺度的冰雹易发性评估模型，分析确定了红河州雹灾易发区。空间分辨率与可靠性相较于从防雹点、气象台冰雹记录的“点”数据及区域平均坡度统计分析结果更高，将冰雹风险评估精度从行政区、气象站点级别提高到地块级别，且从耕地受灾情况方面进行评估，可以用于指导加强防雹点建设、优化农业种植模式或种植结构，降低冰雹灾害危害程度，在冰雹灾害防治方面具有重要实际应用价值。

参考文献(References)

Bell J R, Gebremichael E, Molthan A L, Schultz L A, Meyer F J, Hain

- C R, Shrestha S and Payne K C. 2020. Complementing optical remote sensing with synthetic aperture radar observations of hail damage swaths to agricultural crops in the central United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(4): 665-685 [DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0124.1]
- Duan W, Hu J, Zhao N K, Yin L Y, Liu C W and Shen Y. 2017. Climatic characteristics and changes of hail disasters in Yunnan. *Journal of Catastrophology*, 32(2): 90-96 (段玮, 胡娟, 赵宁坤, 尹丽云, 刘春文, 沈鹰. 2017. 云南冰雹灾害气候特征及其变化. *灾害学*, 32(2): 90-96) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.016]
- Gao F, Masek J, Schwaller M and Hall F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2207-2218 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872081]
- Gobbo S, Ghiraldini A, Dramis A, Dal Ferro N and Morari F. 2021. Estimation of hail damage using crop models and remote sensing. *Remote Sensing*, 13(14): 2655 [DOI: 10.3390/rs13142655]
- Han Q L, Zhu F H and Zheng J. 2021. Analysis of convective weather case characteristics of a spring super cell storm in Honghe prefecture Yunnan Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 33(4): 48-55 (韩迁立, 朱府鸿, 郑皎. 2021. 云南红河一次春季超级单体风暴强对流天气特征分析. *云南地理环境研究*, 33(4): 48-55) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7852.2021.04.009]
- Hu W. 2015. Remote Sensing Monitoring and Spatiotemporal Characteristics Analysis of Hail Disaster in Heilongjiang Province. Harbin: Northeast Agricultural University (胡文. 2015. 黑龙江省雹灾遥感监测及时空特征分析. 哈尔滨: 东北农业大学) [DOI: 10.7666/d.Y2771750]
- Huang Y, Wang X Q, Su A F, Feng Y and Zhai J. 2013. Hail monitoring of Heilongjiang by remote sensing and analysis of spatial and temporal characteristics. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 17(2): 350-360 (黄勇, 王雪芹, 苏爱芳, 冯妍, 翟菁. 2013. 江淮夏季强天气过程中对流云合并现象的卫星观测. *遥感学报*, 17(2): 350-360) [DOI: 10.11834/jrs.20132008]
- Jia D W, Zhou L, Huang C H and Liu J. 2018. Spatial distribution information extraction of winter wheat hail disaster based on MODIS data: a case study of Pingdingshan City, Henan Province. *Areal Research and Development*, 37(6): 134-138 (贾德伟, 周磊, 黄灿辉, 刘佳. 2018. 基于MODIS数据的冬小麦雹灾空间分布信息提取研究——以河南省平顶山市为例. *地域研究与开发*, 37(6): 134-138) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2018.06.024]
- Li J. 2012. The Comprehensive Observation Analysis on the Structure and Evolution Characteristics of Hail Cloud by Satellite and Radar. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (李静. 2012. 冰雹云结构及其演变特征的卫星和雷达等综合观测分析. 南京: 南京信息工程大学)
- Li L and Zhu L. 2013. Analysis on an extra territorial hail event happened on June 29th, 2009 in Yunnan Province. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 35(2): 199-207 (李磊, 朱莉. 2013. “20110629”云南特大区域性冰雹天气过程分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 35(2): 199-207) [DOI: 10.7540/j.ynu.20120156]
- Li M, Zhu Y and Ji W J. 2012. Risk evaluation of hail disaster in Yunnan

- tobacco planting areas based on GIS. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 33(1): 129-133 (李蒙, 朱勇, 吉文娟. 2012. 基于 GIS 的云南烟区冰雹灾害风险评价. *中国农业气象*, 33(1): 129-133) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2012.01.021]
- Li S Y, Ye Z N, Mao Y W, Chen Y L and Zeng N. 2023. Comparison of four fusion models for generating high spatio-temporal resolution NDVI. *Journal of Zhejiang A and F University*, 40(2): 427-435 (李思源, 叶真妮, 毛勇伟, 陈玉玲, 曾纳. 2023. 4 种遥感数据时空融合模型生成高分辨率归一化植被指数的对比分析. *浙江农林大学学报*, 40(2): 427-435) [DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20220381]
- Li Z Q, Li X M and Bai X W. 2013. Analysis on the influence of meteorological disasters on the economic development of Honghe Prefecture. *Journal of Green Science and Technology*, (8): 264-266 (李智全, 李学梅, 白学文. 2013. 气象灾害对红河州经济发展的影响探析. *绿色科技*, (8): 264-266) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9944.2013.08.114]
- Liu X Y, Liu G Q, Wang X J and Suo Y. 2020. Hail cloud index analysis in Guizhou based on satellite cloud parameter monitoring products. *Mid-Low Latitude Mountain Meteorology*, 44(1): 10-14 (刘小艳, 刘国强, 王兴菊, 索勇. 2020. 基于卫星云参数监测产品的贵州冰雹云指标分析. *中低纬山地气象*, 44(1): 10-14) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-6598.2020.01.002]
- Murillo E M and Homeyer C R. 2019. Severe hail fall and hailstorm detection using remote sensing observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(5): 947-970 [DOI: 10.1175/JAMC-D-18-0247.1]
- Qin X T, Zhang C L and Lai Y H. 2015. Radar products analysis of a regional hail event in Northwest Yunnan Plateau. *Yunnan Geographic Environment Research*, 27(2): 25-30 (秦香婷, 张崇莉, 赖云华. 2015. 滇西北高原区域性冰雹过程的雷达产品分析. *云南地理环境研究*, 27(2): 25-30) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7852.2015.02.005]
- Roujean J L, Leroy M and Deschamps P Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D18): 20455-20468 [DOI: 10.1029/92jd01411]
- Shao X D, Jiang Y M, Wang T, Zhao H H, Hou Q Q, Li L P, Du X, Li X F, Guan Q R, Shi G W, Tong Y M, Fan R, Ding P and Li Q W. 2022. Study on remote sensing monitoring model of tobacco yield based on GLOPEM-CEVSA. *Chinese Tobacco Science*, 43(6): 95-103 (邵小东, 蒋样明, 王拓, 赵辉辉, 侯秋强, 李利平, 杜鑫, 李贤峰, 官群荣, 石冠伟, 童耀民, 凡荣, 丁鹏, 李庆伟. 2022. 基于 GLOPEM-CEVSA 的烟叶产量遥感监测模型研究. *中国烟草科学*, 43(6): 95-103) [DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2022.06.014]
- Sosa L, Justel A and Molina Í. 2021. Detection of crop hail damage with a machine learning algorithm using time series of remote sensing data. *Agronomy*, 11(10): 2078 [DOI: 10.3390/agronomy11102078]
- Tao Y, Duan X, Duan C C and Duan W. 2011. Change characteristic of Yunnan hail. *Plateau Meteorology*, 30(4): 1108-1118 (陶云, 段旭, 段长春, 段玮. 2011. 云南冰雹的变化特征. *高原气象*, 30(4): 1108-1118)
- Tao Y, Duan X and Yang M Z. 2002. Study on spatial/temporal distribution and climate causes of hail formation in Yunnan. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 25(6): 837-842 (陶云, 段旭, 杨明珠. 2002. 云南冰雹的时空分布特征及其气候成因初探. *南京气象学院学报*, 25(6): 837-842) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7097.2002.06.016]
- Tong S Y. 2011. Analysis on division methods of mountain area and flatland area in Yunnan. *Guizhou Agricultural Sciences*, 39(11): 89-91 (童绍玉. 2011. 云南山区与坝区农业利用划分方法探析. *贵州农业科学*, 39(11): 89-91) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2011.11.025]
- Wang B, Zhao S and Zhou H. 2012. Characteristics of hailstone disaster and the risk zoning in central Yunnan Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 24(6): 87-92 (王宝, 赵爽, 周泓. 2012. 滇中冰雹灾害特征及风险区划. *云南地理环境研究*, 24(6): 87-92) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7852.2012.06.014]
- Wang J and Liu L P. 2008. Hail distribution and topographical factors in Guizhou Province based on GIS technique. *Journal of Applied Meteorological Science*, 19(5): 627-634 (王瑾, 刘黎平. 2008. 基于 GIS 的贵州省冰雹分布与地形因子关系分析. *应用气象学报*, 19(5): 627-634) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.05.015]
- Wang X Z. 2021. Study on Meteorological Disaster Risk and Crop Model Applicability of Yuxi Flue-Cured Tobacco. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (王秀珍. 2021. 玉溪烤烟气象灾害风险及作物模型适用性研究. 南京: 南京信息工程大学) [DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2021.000294]
- Wu M Q, Niu Z and Wang C Y. 2014. Assessing the accuracy of spatial and temporal image fusion model of complex area in South China. *Journal of Geo-Information Science*, 16(5): 776-783 (邬明权, 牛铮, 王长耀. 2014. 多源遥感数据时空融合模型应用分析. *地球信息科学学报*, 16(5): 776-783) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00776]
- Xu X H, Yu X, Liu G H, Yue Z G and Zhu Y N. 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 46(1): 98-110 (徐小红, 余兴, 刘贵华, 岳治国, 朱延年. 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警. *大气科学*, 46(1): 98-110) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21010]
- Yang J K and Qi M H. 2005. Temporal and spatial characteristics of hail distribution in Yunnan Province. *Meteorological Science and Technology*, 33(1): 41-44 (杨家康, 杞明辉. 2005. 云南省冰雹的时空分布特征. *气象科技*, 33(1): 41-44) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2005.01.009]
- Yang J M, Wu Y, Wei Y X, Wang B, Ru C, Ma Y Y and Zhang Y. 2019. A model for the fusion of multi-source data to generate high temporal and spatial resolution VI data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(5): 935-943 (杨军明, 吴昱, 魏永霞, 王斌, 汝晨, 马瑛瑛, 张奕. 2019. 多源数据融合的高时空分辨率植被指数生成. *遥感学报*, 23(5): 935-943) [DOI: 10.11834/jrs.20198204]
- Yin L Y, Mei H, Zhang T F, Liu X T, Jin W J and Xu Y Y. 2022. Analysis of fine hail hazard zoning in Yunnan Province. *Journal of Catastrophology*, 37(3): 99-105 (尹丽云, 梅寒, 张腾飞, 刘雪涛, 金文杰, 许彦艳. 2022. 云南省精细化冰雹灾害危险性区划分析. *灾害学*, 37(3): 99-105) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.03.016]
- Zhang T F, Duan X, Lu Y B and Hai Y S. 2006. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and

- its Dopplar radar echo features. Plateau Meteorology, 25(3): 531-538 (张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 海云莎. 2006. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析. 高原气象, 25(3): 531-538) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.022]
- Zhang T F, Yin L Y, Mei H and Su Y Y. 2021. Study on Characteristics and Identification Methods of Severe Convective Hail Weather Activity in Yunnan Province. Beijing: China Meteorological Press
- (张腾飞, 尹丽云, 梅寒, 苏伊伊. 2021. 云南强对流冰雹天气活动特征和识别方法研究. 北京: 气象出版社)
- Zhao H Z and Li X Y. 2020. Analysis of three hail-storms in spring 2019 in Honghe prefecture. Journal of Agricultural Catastrophology, 10(1): 63-67 (赵红珍, 李鑫焱. 2020. 红河州 2019 年春季 3 次冰雹天气特征分析. 农业灾害研究, 10(1): 63-67) [DOI: 10.19383/j.cnki.nyzhjy.2020.01.024]

Multi-grid remote sensing monitoring method of hail disaster and the temporal-spatial distribution characteristics in Honghe

SHAO Xiaodong¹, JIANG Yangming², HUANG Kun¹, WANG Futao², WANG Tuo², ZHAO Huihui²,
HOU Qiuqiang¹, RUAN Haiming¹, GUAN Qunrong¹

1. Yunnan Tobacco Company Honghe Company, Mile 652300, China;
2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Hail has occurred frequently and caused significant losses to local agricultural production in Honghe Prefecture, Yunnan Province, since 1961. Hail disaster distribution data at the county or weather station scale, which are obtained by using a statistical analysis method, cannot meet the requirements of agricultural hail prevention. Several hail disaster remote sensing monitoring methods, which are limited by single remote sensing data sources and the characteristics of designing for the global scale, lack applicability in mountainous areas. To capture the spatial and temporal distribution characteristics of hail and build a hail remote sensing monitoring model at the parcel level, this study used hail record data from hail suppression operation stations from 2009 to 2022 and conducted research on a multisource data fusion approach based on Ross Li and STARFM. It then proposed a multilevel grid normalized vegetation index standardization model and a hail remote sensing monitoring recognition index R_{NDVI_M} . The Knead method was used to extract the trend turning points of R_{NDVI_M} as the threshold for extracting hail disaster areas. Then, the phenomenon universality verification method was applied to verify the effectiveness of the R_{NDVI_M} threshold and evaluate the accuracy of hail monitoring. On the basis of hail survey data from 2009 to 2022, the maximum relative error is 9.08%, the average error is 5.62%, and the standard deviation is 1.66%. The spatial overlay analysis and spatial correlation analysis methods were used to quantitatively analyzed hail frequency in different disaster-prone environments, such as landform types, terrain undulations, slopes, and terrain types, at the level of cultivated land plots. The proposed hail disaster risk assessment model calculates the spatial distribution characteristics of hail risk caused by natural conditions, such as climate, meteorology, terrain, and topography. Hail disasters in mountainous areas are significantly correlated with altitude and exhibit moderate correlation with slope and undulation. Hailstones typically move along mountain ranges and valleys, making farmlands along these valleys susceptible to hail disasters. The advantages of this model are as follows. (1) Parameter adaptation for multilevel grid models is used to improve model adaptability under 3D climate conditions of mountainous areas, increasing the accuracy of hail monitoring and risk assessment from county scale to cultivated land plot scale. (2) Spatial correlation quantitative analysis is conducted between the spatial distribution of hail disasters and terrain, such as altitude, slope, undulation, river valleys, valleys, and ridges at the scale of cultivated land plots. (3) The hail susceptibility assessment model is constructed at the cultivated land plot scale. Research results contribute to the rational adjustment of the crop planting structure, the planning and layout of artificial hail control operation points, and the reduction of hail disaster losses.

Key words: hail disaster, hail remote sensing identification index (R_{NDVI_M}), hail disasters remote sensing monitoring, temporal and spatial distribution of hail disasters, Honghe

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3901201); Key Project of China National Tobacco Corporation Yunnan Province (No. 2021530000241030); Special Program for Key Basic Research of the Ministry of Science and Technology (No. Y8Q0070034); International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (No. 131211KYSB20180002)