

江西省森林冰冻灾害风险时空特征

焦鸿渤¹, 叶清^{2,3*}, 彭琳玉^{2,3}, 许方岳^{2,3}, 幸娇萍^{2,3}, 王立夫^{2,3}, 邢宇^{2,3}

(1. 新余市渝水区林业局, 江西 新余 338000; 2. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045;
3. 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业局重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘 要:雨雪冰冻事件是影响中国南方地区农林业生产的主要气象灾害之一。本研究基于负积温与气温低于 0℃ 的降水量与实际观测的冰雪冻害发生频次之间相关关系分析基础上, 确定影响江西省森林冰冻灾害的主要气象因子, 并采用模糊数学的方法, 计算森林冰冻灾害风险评估因子。同时, 应用 Morlet 小波分析和 Mann-Kendall 突变分析方法, 分析江西省森林冰冻灾害风险的年际变化规律。基于负积温与最低气温低于 0℃ 的当日降水量的平均隶属度、纬度和海拔的相关关系, 构建了江西森林冰冻灾害风险区划地理函数, 利用 ArcGIS 空间分析工具, 采用自然断点法对风险等级进行区划。结果表明, 1955—2018 年, 江西省冰冻灾害发生次数总体呈现减少趋势, 冰冻灾害发生与负积温和当日降水量密切相关, 利用负积温与低于 0℃ 的降水量的平均隶属度可以有效地评估森林冰冻灾害风险; 江西省森林冰冻灾害风险最为严重的区域主要位于武夷山脉、九岭山脉、罗霄山脉、雩山山脉以及庐山等平均海拔>1 000 m 的山区。该结论可为江西省森林资源管理提供科学依据。

关键词:冰冻雪灾; 时空分布; 隶属函数; 区划; 极端气候

中图分类号:S761.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0158-10

Spatial-temporal Characteristics of Forest Freezing Disasters in Jiangxi Province

JIAO Hong-bo¹, YE Qing^{2,3*}, PENG Lin-yu^{2,3}, XU Fang-yue^{2,3}, XING Jiao-ping^{2,3},
WANG Li-fu^{2,3}, XING Yu^{2,3}

(1. Forestry Bureau of Yushui District, Xinyu 338000, Jiangxi, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed (JXAU), Nanchang 330045, Jiangxi, China)

Abstract: Freezing rain and snow that occurs frequently in the southern China is one of the main meteorological disasters in the region. Based on a multiple regression model, this study established the relationship between actually recorded frequency of freezing rain and snow and environmental factors, including negative accumulative temperature, present-day precipitation, elevation, latitude and other factors. Based on the relationship, this study further developed the freezing damage risk distribution maps and identified the leading factors affecting freezing damage risks. In addition, the Morlet wavelet analysis and Mann-Kendall trend test were applied to analyze the interannual variation patterns of freezing damage risks. The results indicated that the frequency of freezing disasters in Jiangxi Province declined from 1955 to 2018. The occurrence of freezing disasters was positively correlated with negative accumulative temperature and the precipitation blow 0℃. Based on the membership degree of freezing disasters, this study developed the geographic zoning function for freezing disaster risks of forests in Jiangxi Province, and further classified five levels of

收稿日期:2020-06-04 修回日期:2020-07-24
基金项目:国家自然科学基金重点项目:亚热带人工林补植树种根叶功能属性环境可塑性及其对生产力的影响(31730014)。
作者简介:焦鸿渤。研究方向:森林保护学。E-mail:67342522@qq.com
* 通信作者:叶清, 博士, 副教授。研究方向:气候资源利用与农业减灾。E-mail:yeqing@jxau.edu.cn

freezing disaster risks using spatial analysis tools in ArcGIS. The most serious risk of freezing disaster occurred mainly in the region above 1 000 m in the Wuyi Mountains, Jiulin Mountains and Luoxiao Mountains, Yushan Mountains and Lushan Mountain. This study will provide scientific guidance to manage forest resources and reduce the impacts of extreme climate events in Jiangxi Province.

Key words: freezing damage; spatial and temporal pattern; membership function; zoning; extreme climate

自 20 世纪 50 年代以来全球变暖的趋势下,极端灾害事件频发^[1]。2008、2011 年中国南方绝大部分地区都相继出现了历史上罕见的大范围低温雨雪冰冻灾害,造成了巨大的经济损失和社会影响,特别是 2008 年 1 月初至 2 月初中国大部分尤其是南方出现 50 a 一遇的低温雨雪冰冻灾害天气,全国 2/3 的省(区,市)的交通运输、电力运输、通信设施、农业、林业、渔业、畜牧业和人民生活都受到了严重影响和损失,据民政部门统计,此次低温雨雪冰冻灾害共造成直接经济损失高达 1 516.5 亿元,其中华南地区(广东、广西)直接经济损失就超过 488 亿元。这次冰冻雨雪灾害对森林生态环境造成影响的更为严重,损失更加难以估计^[2]。低温雨雪冰冻灾害对中国南方森林生态系统造成极大破坏,不仅造成林业商品生产的直接经济损失,更为严重的是造成森林生态系统功能严重退化或丧失的间接损失,并且森林生态系统受到损害后,有可能引发次生灾害,如病虫害、旱灾、森林火灾等,它所带来负面的生态环境影响可能延续数十年^[3-6]。

大范围低温雨雪冰冻过程造成灾害的严重性,引起了诸多学者的关注并展开研究。王凌等^[7]分析了极端冰灾事件的气候特征及其所造成的影响,诸多学者^[8-11]从不同角度对 2008 年的低温雨雪冰冻灾害的形成机理及其致灾原因进行分析;姚蓉等^[12]将 2011 年年初的低温雨雪冰冻天气与 2008 年年初的冰冻灾害过程从天气学成因、气候影响评估等方面进行综合对比分析。此外,还有一些学者着眼于对历史上的低温雨雪事件的分析,建立区域性事件的识别方法及评估指标,分析评估区域性低温雨雪事件的特征及灾害影响,如 X. Qian *et al*^[13]利用 H. Zhang *et al*^[14]定义的冷湿指数 PT 作为评定低温雨雪冰冻事件强弱的指标,定义了单站和区域持续性低温雨雪事件的标准,对 1951—2011 年全国持续性雨雪冰冻过程进行普查分析,指出中国南方区域是低温雨雪冰冻事件发生频次较多的区域;龚志强等^[15]从空间分布和时间变化趋势等角度研究了区域性极端低温事件的时空变化特征,并揭示了近 50 a 来区域性极端低温事件总体的变化趋势;毛淑君等^[16]使用模糊信息分配方法划分中国南方出现低温雨雪冰冻天气时各气象要素的等级,计算各等级

出现的概率,选取合理的气象要素条件建立了低温雨雪冰冻综合评估指数,并给出了中国南方发生低温雨雪冰冻的风险区划。国外对低温冻害及其对森林及其生态的影响研究的比较多,主要集中于不同树种对低温冻害的脆弱性^[17-20]、不同森林类型在低温灾害中的受损程度^[21-22]和低温冻害对森林生态演替的影响^[23]等。综上,低温冻害主要通过对林木的机械损伤,并产生林隙,进一步影响当地植被动态变化。

江西省森林覆盖率高,并呈增长趋势。江西省抗灾能力较强的阔叶林面积仅占森林总面积的 24%,且幼龄林面积占比较高,致使江西省森林对灾害的抵抗能力较低^[4]。由于“三面环山,北面开口”的独特地形,冬季冷空气易进难出,森林易受到雨雪冰冻灾害的影响。当前有关低温冻害对森林植被的影响研究主要侧重于低温冻害对森林及其生态环境造成的损失状况以及森林灾后修复与生态重建等方面^[24-26],江西省地区森林低温冻害风险评估与区划的研究较少。因此,基于历史低温冻害资料,对江西省森林低温冻害发生频次、时间序列变化以及空间分布特征,并结合气象数据分析,建立江西省负积温与最低气温低于 0℃的降水量的隶属度函数,以此为森林冰冻雪灾风险评价指标,结合江西省的纬度和海拔,应用 DEM 分析江西省低温冻害与纬度海拔之间的多元回归方程,建立江西省森林冰冻雪灾可能发生的地理空间关系,分析江西省森林冰冻雪灾事件时空分布特征,以及为局地森林冰冻雪灾事件的影响评估和预测提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸,113°34′36″—118°28′58″E,24°29′14″—30°04′41″N,与湖北、湖南、广州、福建、浙江、安徽六省接壤。境内最大河流为长江支流赣江,自南向北纵贯全境,由鄱阳湖注入长江。境内地形复杂,山地丘陵起伏,省境边陲群山环绕,武夷山居东,武功、罗霄诸山居西,南岭、九连山居南,幕阜山和怀玉山分居西北和东北。鄱阳湖处赣北中心,形成一个东、南、西三面环山,赣、抚、信、饶、修 5 大河流汇向鄱阳湖的向心水系,流注长江(图 1)。

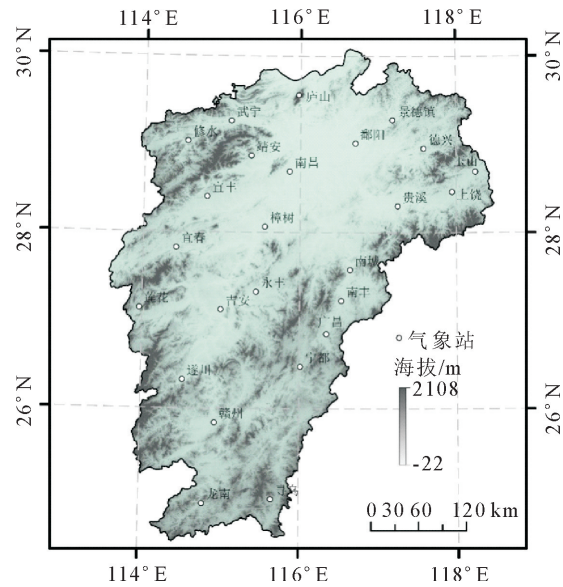


图1 研究区海拔及气象站点分布

Fig. 1 Geographical location and administrative map of Jiangxi Province

气候属中亚热带温暖湿润季风气候,年均温 $16.3^{\circ}\text{C}\sim 19.5^{\circ}\text{C}$,极端最低温度 -15°C ;年降水量 $1\,341\sim 1\,943\text{ mm}$,南多北少,东多西少,山地多,盆地少。由于江西地势狭长,南北气候差异较大,森林覆盖率高达 63.1% 。冬春两季受大陆高压和南支槽的影响,不断有冷空气入侵,多低温阴雨,雨雪冰冻天气,低温冻害造成的林木灾害时有发生。

1.2 数据来源与处理

以《中国气象灾害大典·江西卷》^[27]等资料对江西1950年以来的霜冻、低温、大雪事件和树木受灾情况进行汇总、统计。气象数据来源于中国气象局气象数据网(<http://data.cma.cn>),下载江西省1955—2018年日降水量、日最低气温等数据(图1)。气象数据经过了较为严格的质量控制,包括极值检验、时间一致性检验和缺失数值插值。

用来构建森林冰冻灾害风险地理空间分布函数的DEM数字高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 森林冰冻灾害风险指标选择 借鉴前人对冰冻灾害的研究结果^[16,28-29],采取负积温,即从冬季最低气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 开始至次年最低气温 $>0^{\circ}\text{C}$ 为止,此期间的负积温和该期间的温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 的降水量作为评价冰冻雪灾的气象指标,来评估森林冰冻的发生风险。负积温的计算方法如式(1)。

$$\text{FDD}=\begin{cases} 0 & ti\geq 0^{\circ}\text{C} \\ \frac{\sum_{i=1}^n ti}{24} & ti<0^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

式中,FDD为负积温, ti 为第 i 小时气温。参考Q. Ye,et al^[30]的24 h的气温模拟方法对江西省25个气象站的小时温度进行模拟计算。其中,FDD值越小,冰冻的可能性越高。

1.3.2 Morlet小波分析 Morlet小波是常用小波函数之一,它可以判别时间序列中所包含多时间尺度周期性的大小及这些周期在时域中的分布同时给出时间序列变化的振幅和位相信息^[31]。Morlet小波函数的一般公式为:

$$\varphi(t)=e^{ict}e^{\frac{-t^2}{2}} \quad (2)$$

小波变换系数计算公式:

$$\omega_f(a,b)=|a|^{\frac{-1}{2}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt=[f(t),\varphi_{a,b}(t)] \quad (3)$$

式中, $\omega_f(a,b)$ 称为小波变换系数; a 是尺度伸缩因子; b 是时间平移因子; $\varphi_{a,b}(t)$ 是由 $\varphi(t)$ 伸缩和平移而成的一组函数,称为连续小波。即:

$$\varphi_{a,b}=|a|^{\frac{-1}{2}}\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

其中, $a,b\in R,a>0$ 。小波方差定义为小波系数的平方值在 b 域上积分,反映了波动的能量随尺度 a 的分布,可用于确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度^[32-33]。利用小波方差对各序列的主要周期进行判断,小波方差计算公式为:

$$\text{Var}(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}|\omega_f(a,b)|^2db \quad (5)$$

小波变换图形很容易看出物理量时空变化周期性特征,适合于研究信号不同时空层次的结构,本研究应用Morlet小波函数研究低温冻害时间尺度以及周期性特征,更好地理解其过去变化,推测未来演变。

1.3.3 M-K突变分析 由于Mann-Kendall突变分析方法在运用时不用考虑样本的分布形态,即使出现异常值,也不会出现干扰,具有检验范围宽、计算简单以及定量化程度高的优点,所以自1945年Mann-Kendall突变检验分析提出以来,这个突变检验方法就在气象学中被广泛运用^[34-37]。本研究采用这个方法对江西省1955—2018年冰冻灾害进行突变分析,过程如下:

当某一个时间序列 x_i 中拥有 n 个样本,构建这个时间序列的秩序列:

$$S_k=\sum_{i=1}^k r_i \quad (k=1,2,\cdots,n) \quad (6)$$

其中,

$$r_i=\begin{cases} 1,X_i>X_j \\ 0,X_i<X_j \end{cases} \quad (j=1,2,\cdots,n) \quad (7)$$

其中秩序列 S_k 表示的是第 i 时刻序列值大于 j 时刻序列值的个数之和。

当 X_1, X_2, \dots, X_n 连续并且互相独立分布时,定义统计量为:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (K=2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (K=2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (K=2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

(8)–(10)式中: n 是样本数; UF_k 表示 M-K 统计量,且当 $UF_1=0$ 时; $E(S_k)$ 表示累计数 S_k 的均值; $Var(S_k)$ 表示累计数 S_k 的方差。运用 Mann-Kendall 统计值进行趋势显著性检验时,通过两尾检验于正态分布表中查出显著性水平下的临界检验值 U (本研究运用是 $U_{0.05}=\pm 1.96$)。分析是,如果临界检验值大于 M-K 统计值,则认为该序列在时间序列变化上趋势显著。同时,M-K 统计值的绝对值越大,表明趋势越显著。且当 M-K 统计值 >0 时,表明序列变化趋势是上升的,反之,则是下降。如果趋势曲线有超过临界值,且 2 组曲线有且仅有 1 个交点,并且这个交点是处于临界值间,那么这个点就是突变点,就是突变的开始。如果 2 组曲线出现了多个交点且都位于临界值间或者在临界值外出现了交点,那么这些点都是不能够确定的,可能存在伪突变点,就要运用其他方法对其进行检验,分析研究其突变点的显著性。

1.3.4 森林冰冻灾害隶属度函数 森林冰冻灾害的发生与 $<0^{\circ}\text{C}$ 低温强度与期间降水量有着密切的关系。低温强度越大、降水量越高,森林冰冻灾害的风险越高。为此,本研究采用负积温与气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 降水量的平均隶属度来评价森林冰冻灾害发生的风险。该方法是根据模糊数学的原理,利用隶属函数分别计算各评价指标的隶属度,再利用算术平均法计算总隶属度^[38-41]。隶属度计算公式:

$$U(x_j) = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

如果指标呈负相关,则:

$$U(x_j) = 1 - \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12)$$

平均隶属度:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U(x_j) \quad (13)$$

式中, $U(x_j)$ 为单个指标的隶属度; U_i 为各指标平均隶属度; x_j 为第 j 年负积温值或降水量; x_{\min} 为区域最小值; x_{\max} 为区域最大值; n 指标数量,本研究只有 2 个指标, n 为 2。隶属函数值越大,越有可能发生低温冻害。本研究基于平均隶属度来评价负

积温与气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 的降水量关系,平均隶属度越低,反映该区域联系较好,反之较差。

1.3.5 森林冰冻灾害的风险区划方法 根据海拔、经纬度与负积温与降水量的平均隶属度的回归关系,构建森林冰冻灾害风险地理空间分布函数,借助 ArcGIS 的空间分析工具对负积温与降水量的平均隶属度进行小网格处理,获取森林冰冻灾害的空间分布特征图。采用自然断点法将江西省森林冰冻灾害分轻、较轻、中、较重和重 5 个等级^[42]。

2 结果与分析

2.1 江西省低温冻害发生情况

2.1.1 低温冻害事件统计 根据对《中国气象灾害大典·江西卷》^[27] 等资料的整理,统计了 1950–2000 年江西省低温冻害导致的灾害事件发生的情况,从图 2 可以看出,江西省几乎每年都受到低温冻害的影响,在全球气候变暖,极端气候频发的背景下,随着时间的推移,灾害事件的记载也越来越多,这可能与低温冻害对人类生活生产影响越来越大有关。在 1991 年,江西全省记载的低温冻害事件就有 49 次,1996 年为 32 次,对农业和林业造成巨大的损失,影响社会经济发展。

水稻(*Oryza sativa*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、茶(*Camellia sinensis*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)等都是主要受灾的农作物、经济林。在赣南,低温冻害大多导致柑橘等经济树种的损失;在赣北,低温冻害大多导致农作物的损失。将低温冻害事件按照发生地点进行统计(图 3),江西全省各地都有发生低温冻害,其中导致树木受灾的低温冻害平均约占总低温冻害的 30%,受害较为严重的地区主要位于九岭山脉、罗霄山脉、武夷山脉等山区。

2.1.2 冰冻灾害事件相关因素分析 对负积温及降水量进行统计后,用历史低温冻害事件进行验证。结果表明,低温灾害事件的发生与负积温和降水量具有显著的相关性:负积温越高、气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 降水量越高,冰冻风险越大;负积温虽小,但气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 降水量大,发生冰冻灾害的可能性也会升高。选取江西省的庐山、修水、赣州、南城 4 个灾害发生较多的站点,对 4 个站点的年负积温和气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 降水量进行对比分析。庐山位于江西省北部,负积温为全省最低,平均负积温 $-293.82^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最高负积温 $-135.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最低负积温 $-473.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。低于 $-200^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 的负积温年数占 87.5%。修水的平均负积温 $-82.45^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最高负积温 $-17.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最低负积温 $-207.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。赣州的平均负积温 $-6.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最高负积温 $-0.1^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最低负积温

-39℃·d。南城的平均负积温-26.22℃·d,最高负积温-0.1℃·d,最低负积温-94.4℃·d。

由图 4 发现,重大的低温冻害发生都不仅仅受负积温的影响,与降水量也有很大关系。如庐山市 1964 年 2 月 16-24 日平均负积温仅为-9.4℃·d,日平均降水量却达到了 74 mm,发生了雪灾,积雪导致杉木、毛竹等林木断梢、枝条折断;修水县

1991 年负积温仅为-9.4℃·d,但是由于降水量高,为 402 mm,12 月 27-29 日出现积雪、雪淞灾害;南城县 2006 年的冰雪灾害时负积温也仅为-24.2℃·d;赣州市 1970 年的大雪冰冻灾害其负积温仅为-18.7℃·d。因此,负积温较低,气温低于 0℃降水量较高时也会发生冰冻灾害。

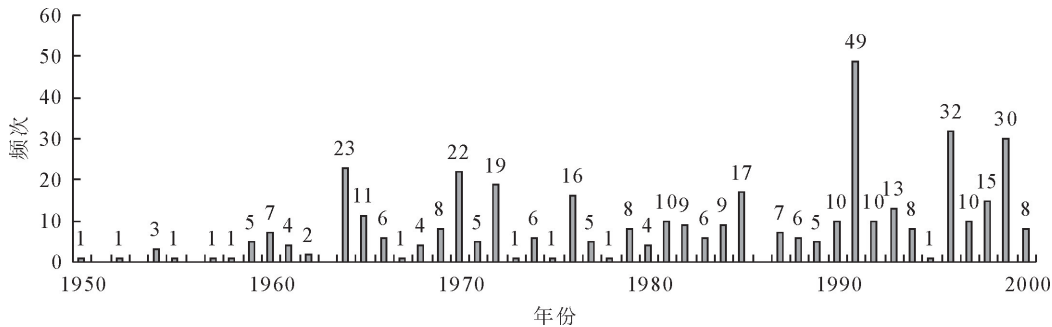


图 2 江西省 1950—2000 年的低温冰冻灾害发生频次

Fig. 2 Occurrence frequency of freezing disasters in Jiangxi Province during 1950—2000

时间序列的变化,隶属度在不断减小,即低温冻害概率在不断的减少。

2.2.2 森林冰冻灾害周期变化 小波分析和 M-K 突变分析是研究周期变化常用的方法,本研究用 2 种方法,对隶属度进行周期变化分析。图 6 为江西省负积温和降水在 1955—2018 年的周期变化及其时间域的分布情况,由全区域小波等值线可知,江西省的负积温降水存在不同时间尺度上的周期震荡。图 6 中大小不同的小波系数对应强度不同的信号。在 2~3 a 的时间尺度上,存在明显的周期震荡,负积温和降水经历由少到多的多次交替循环,在 10~15 a 的时间尺度上,负积温也同样经历多次交替循环。同时在 20~30 a 间有较大的高低负积温的周期变化。对比江西省灾害发生的时间发现前年的负积温程度对后一年的灾害发生的严重程度有一定的相关性。

采用 Mann-Kendall 突变检验法对 1955—2018 年广昌县年平均气温进行突变检验,结果见图 7。Mann-Kendall 趋势分析结果显示,森林冰冻灾害风险隶属度呈下降趋势,且通过 0.05 置信水平的显著性检验,说明森林冰冻灾害风险下降趋势显著。1987 年之后,UF 曲线超过临界直线(-1.96),下降趋势显著。UF 和 UB 曲线在 1985 年附近相交,交点位于 2 个信度之间,之后 UF 持续下降且远远超过 0.05 置信水平的信度线,说明该地区森林冰冻灾害风险存在着明显的下降突变,突变开始年份为 1985 年。

2.3 森林冰冻雪灾风险区划

2.3.1 负积温、最低气温<0℃当日的降水量空间

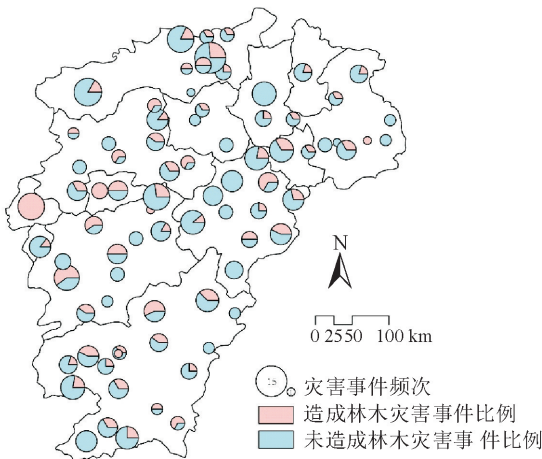


图 3 江西省 1950—2000 年的各地低温冰冻灾害事件发生频次

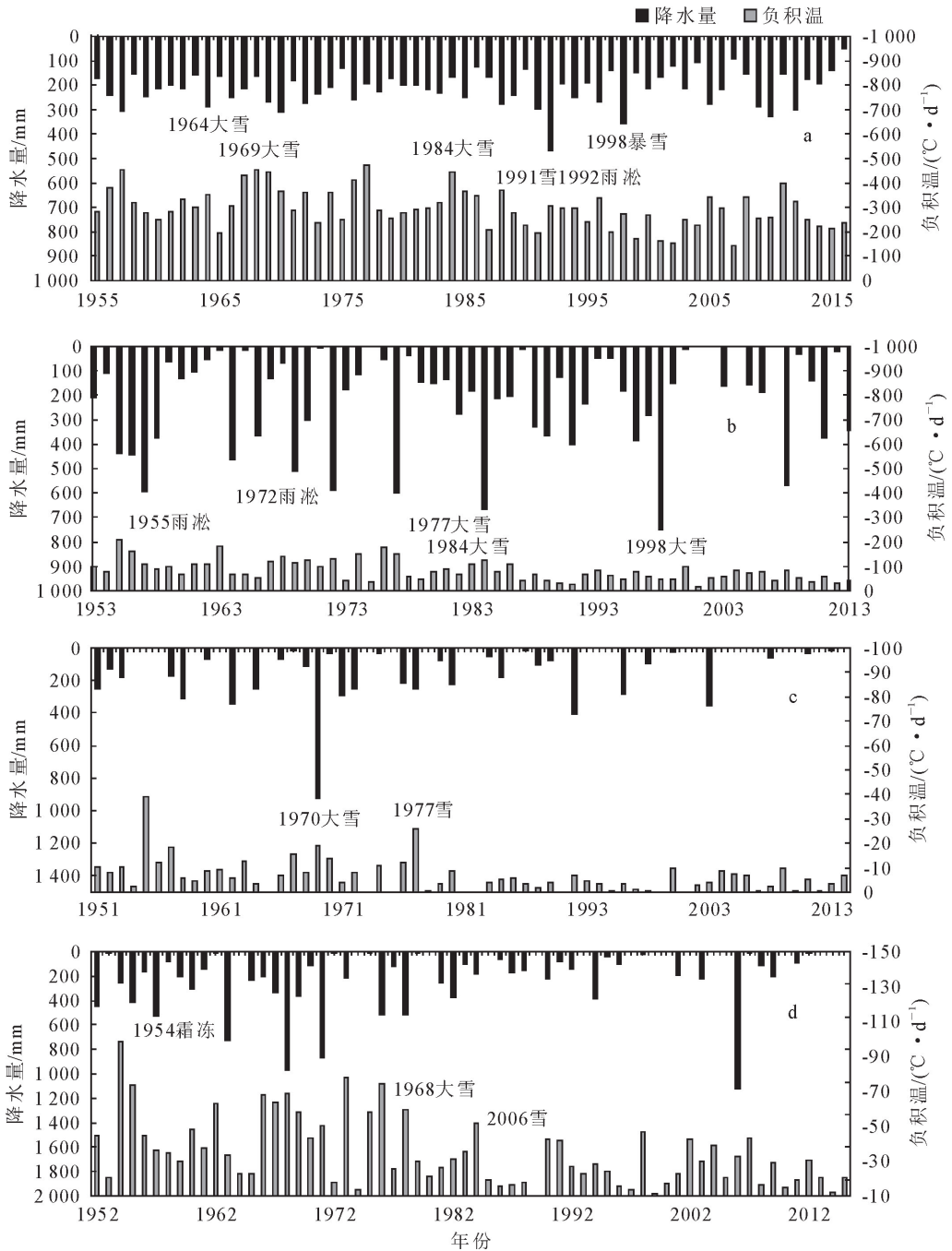
Fig. 3 Occurrence frequency of freezing disasters in Jiangxi Province during 1950—2000

2.2 森林冰冻灾害时间变化特征

2.2.1 森林冰冻灾害年际变化 用隶属度来表示森林冰冻灾害发生的概率。负积温越小、降水量越大,隶属度越高,可能发生的冰冻灾害的概率就越大,反之,隶属度越低,则发生概率越小。对 1955—2018 年负积温及<0℃的降水量以及隶属度进行年际变化分析(图 5),结果表明:负积温随着时间序列呈增加趋势,即负积温绝对值在不断减少,倾向率为 6.51℃·10a⁻¹,负积温出现的越来越少,说明气候在不断变暖;随着负积温变化,同期降水量也在减少,即出现冻雨等灾害的情况也在减少,降水量变化倾向率-2.6 mm·10a⁻¹;综合考虑负积温与降水量 2 个因素,通过 2 个因素计算的隶属度显示,随着

分布 图 8 为江西省 1955—2018 年负积温和降雨的等级分布,为了能够避免特殊地形对负积温和当日降水量的影响,将删除负积温最高的庐山站点和井冈山站点的数据。可以看出,江西省的低温冻害等级分布最低点位于景德镇和修水 2 个地区,负积温当日的降水量呈带状分布,其中以九江市,宜春市,临川市和南昌市范围的最低温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 当日降水

量为江西省最高分布地区。南部以峡江县,南丰县为分界,由北向南最低温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 的当日降水量呈明显的带状分布,并逐渐降低。结合《中国气象灾害大典·江西卷》的江西省地区的受灾数据和图 3 江西省 1950—2000 年的各地低温冰冻灾害事件发生频次发现,低温冻害的次数由多发的中部地区向南逐渐减少,与负积温当日的降水量分布密切相关。



注:a. 庐山、b. 修水、c. 赣州和 d. 南城。

图 4 区域温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 降水量与负积温的 annual 变化

Fig. 4 Inter-annual variations of precipitation (left axis) and negative accumulative temperature (right axis) at observation sites

2.3.2 森林冰冻灾害风险空间分布特征 考虑到不同纬度不同海拔对空间分布的影响,在研究低温冻害隶属度空间分布的时候,采用多元回归分析方

法对经纬度、海拔与隶属度进行拟合,得到隶属度的地理空间分布函数(14),在用 ArcGIS 对隶属度进行空间插值计算。

$$U(x,y)=0.133\ 204x+0.002\ 719y-3.638\ 752$$

(14)

式中, x 为纬度/(°), y 为海拔/m, $R^2=0.708$ 。从式(14)可以看出,纬度、海拔与江西省森林冰冻灾害风险的空间分布具有一定的相关性,纬度每升高1°,隶属度增加0.133 204,说明所有低温冻害均具有较明显的纬向分布特征;海拔每增加100 m,隶属度增加0.271 9。

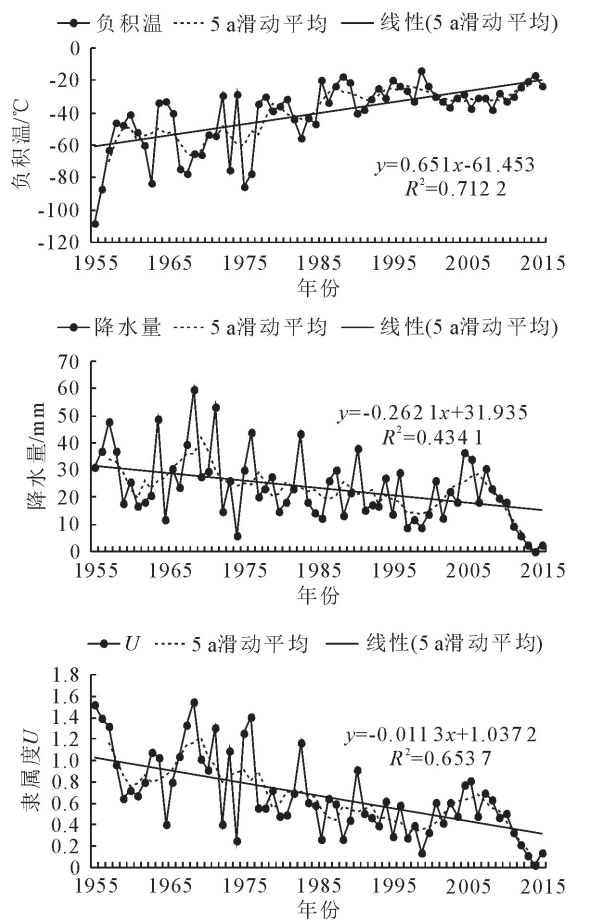


图5 负积温、降水量和隶属度的年际变化

Fig.5 The interannual variations of negative accumulative temperature,precipitation and degree of membership

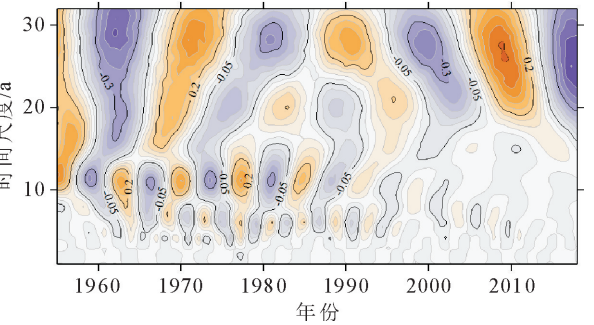


图6 低温冻害隶属度小波分析等值线

Fig.6 The isoline map for freezing disasters membership degree based on the wavelet analysis

采用 ArcGIS10.4 的栅格计算工具,将经纬度

栅格数据、DEM 数字高程栅格数据代入式(14),获取负积温与低于0℃的降水量平均隶属度空间分布特征,并采用自然断点法对平均隶属度进行等级划分,获取冰冻灾害风险等级(表1),说明江西省森林冰冻灾害风险等级的空间分布特征(图9)。

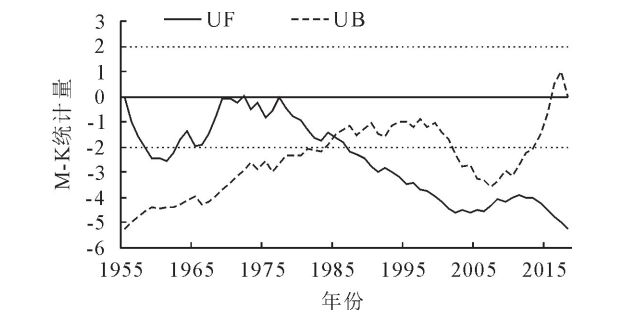


图7 低温冻害隶属度 M-K 突变分析

Fig.7 The Mann-Kendall trend analysis for the membership degree of freezing disasters during 1955—2018

表1 江西省冰冻灾害风险等级指标

Table 1 Classification index of low temperature freezing disasters in Jiangxi Province

冰冻灾害等级	隶属度	冻害程度
1	—0.03—0.48	轻度
2	0.49—0.97	较轻
3	0.98—1.63	中度
4	1.64—2.58	较重
5	2.59—5.18	重度

从图9可以看出,江西省的负积温与降水量的平均隶属度的空间分布情况与江西省1950—2000年江西省各地的森林冰冻灾害发生情况相吻合。重度森林冰冻灾害风险主要位于武夷山脉、九岭山脉、罗霄山脉、雩山山脉以及庐山等平均海拔>1 000 m的山区;较重森林冰冻灾害风险的地区主要位于上述山脉平均海拔在700~1 000 m的山区;中度森林冰冻灾害风险主要位于平均海拔在500~700 m的山区;轻度森林冰冻灾害风险区主要位于平均海拔在300~500 m的山区。

3 结论与讨论

3.1 结论

历史上(1950—2000年)江西省低温冻害事件中林木受灾的次数约占总次数的30%。近64 a来(1955—2018年)江西省负积温值呈增加趋势,最低气温<0℃的降水量则呈下降趋势,导致森林冰冻灾害的发生风险总体呈现下降趋势,特别是1985年以后,下降趋势明显。

不同地理要素中,纬度和海拔对江西省的森林冰冻灾害风险空间分布均具有显著相关性,基于森

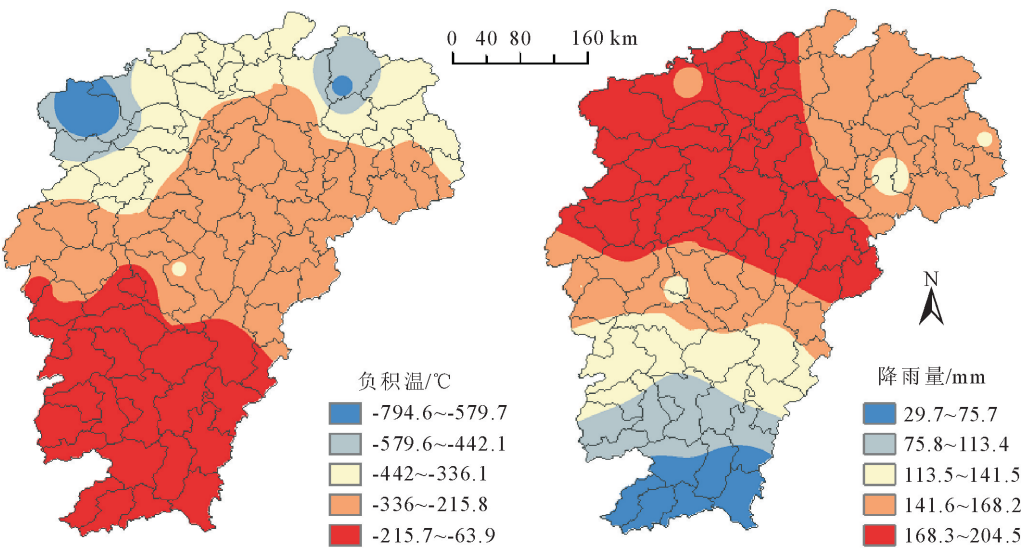


图 8 负积温、低于 0℃ 的降水量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of negative accumulated temperature and precipitation below 0℃

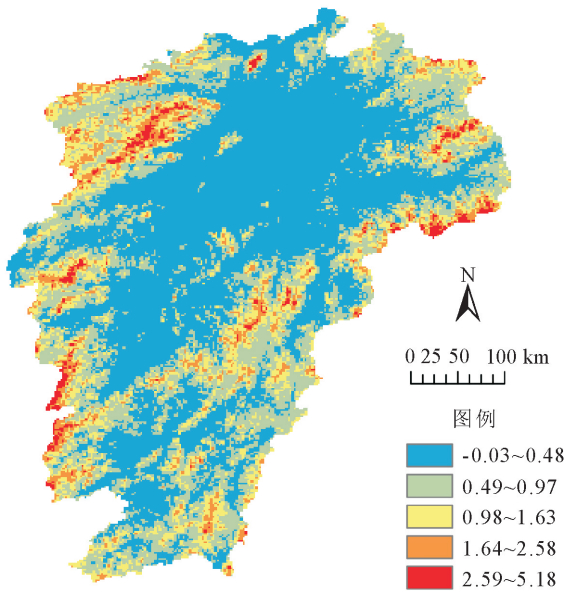


图 9 森林冰冻灾害风险隶属度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the membership degree for freezing disasters of forest

林冰冻灾害指标与纬度和海拔构建的森林冰冻灾害风险地理分布函数,可有效对江西省森林冰冻灾害风险进行区划。

江西省森林冰冻灾害风险较重的区域主要位于海拔>1 000 m 的山区。

3.2 讨论

依据江西省各地区低温冻害事件数据与负积温、最低气温<0℃的降水量的相互关系,采用模糊数学的方法构建森林冰冻灾害风险评估模型,分析了江西省森林冰冻灾害风险的时空特征。该方法可以有效评估森林冰冻灾害风险。负积温在一定程度

上体现了低温的强度,负积温越小,低温强度越高,形成冰冻灾害的风险越高。降水量则是形成冰冻灾害的关键。负积温低、降水量大的地区发生森林冰冻灾害的风险最高;负积温高、降水量小的地区不易发生低温冻害或发生的低温冻害对林业生产影响较小;负积温低、降水量小或负积温大、降水量高的地区发生冰冻灾害的风险居中。本研究根据前人的研究,负积温与降水量 2 个气象因素去评估森林冰冻灾害风险,但影响树木低温冻害的气象因素还有风速、空气湿度等,另外,地形因素,如坡位、坡度、坡向、海拔,林分因子如树种、立地条件、林龄、林分密度等均在一定程度上会影响森林冰冻灾害风险,本文未作分析,有待未来深入研究。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 261.

[2] 肖子牛. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2009.

[3] 薛建辉, 胡海波. 冰雪灾害对森林生态系统的影响与减灾对策[J]. 林业科学, 2008, 44(4): 1-2.

XUE J H, HU H B. Influence of ice storm on forest ecosystem and countermeasures for disaster reduction[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(4): 1-2. (in Chinese)

[4] 卢平英, 谢传金. 江西省森林资源现状分析和提高质量对策[J]. 福建林业科技, 2008, 35(3): 259-262.

[5] 朴金波, 王玉涛. 我国南方低温雨雪冰冻灾害对森林生态安全的影响与消除对策[J]. 中国应急管理, 2009(1): 26-29.

[6] 徐雅雯, 吴可可, 朱丽蓉, 等. 中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1485-1494.

XU Y W, WU K K, ZHU L R, et al. A review of freezing rain and snow impacts on forests in southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6): 1485-1494. (in Chinese)

[7] 王凌,高歌,张强,等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象,2008(4):95-100.

[8] 陶诗言,卫捷. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):337-350.

TAO S Y, WEI J. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the Southern China[J]. Climatic and Environmental Research,2008,13(4):337-350. (in Chinese)

[9] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,2008,66(5):808-825.

DING Y H, WANG Z Y, SONG Y F, *et al.* Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteorologica Sinica,2008,66(5):808-825. (in Chinese)

[10] 李崇银,杨辉,顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(2):113-122.

[11] 王东海,柳崇健,刘英,等. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报,2008,66(3):405-422.

WANG D H, LIU C J, LIU Y, *et al.* A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January 2008[J]. Acta Meteorologica Sinica,2008,66(3):405-422. (in Chinese)

[12] 姚蓉,许霖,张海,等. 湖南 2008/2011 年两次低温雨雪冰冻灾害成因与影响对比分析[J]. 灾害学,2012,27(4):75-79,91.

YAO R, XU L, ZHANG H, *et al.* A comparative study of causes and effects of two cryogenic freezing rains in Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology,2012,27(4):75-79,91. (in Chinese)

[13] QIAN X, MIAO Q, ZHAI P, *et al.* Cold-vet spells in mainland China during 1951—2011[J]. Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards,2011,74(2):931-946.

[14] ZHANG H, QIN J, LI Y. Climatic background of cold and wet winter in southern China: part I observational analysis[J]. Climate Dynamics,2011,37(11):2335-2354.

[15] 龚志强,王晓娟,任福民,等. 亚欧中纬度关键区正位势高度距平场配置与中国冬季区域性极端低温事件的联系[J]. 大气科学,2013,37(6):1274-1286.

[16] 毛淑君,李栋梁. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估[J]. 冰川冻土,2015,37(1):14-26.

MAO S J, LI D L. Comprehensive assessment of low temperature, snow and freezing weather in southern China based on meteorological elements[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(1):14-26. (in Chinese)

[17] BOERNER R E J, RUNGE S D, CHO D, *et al.* Localized glaze storm damage in a Appalachian plateau watershed[J]. The American Midland Naturalist,1988,19(1):199-208.

[18] SEISCHAB F K, BERNARD J M, EBERLE M D. Glaze storm damage to western New York forest communities[J]. Bulletin of the Torrey Botanical Club,1993,120(1):64-72.

[19] 陈凯,江秀章,马松亚,等. 望天树苗苗叶片对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北林学院学报,2019,34(3):67-73.

CHEN K, JIANG X Z, MA S Y, *et al.* Physiological response and cold resistance evaluation of the leaves of *Parashorea chinensis* seedlings to low temperature stress[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(3):67-73. (in Chinese)

[20] 樊江斌,张金龙,许新平,等. 陕西 2013 年核桃晚霜冻害发生情况调查与分析[J]. 西北林学院学报,2014,29(5):120-124.

FAN J B, ZHANG J L, XU X P, *et al.* An investigation on frozen damage of walnut trees in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(5):120-124. (in Chinese)

[21] NICHOLAS N S, ZEDAKER S M. Ice damage in spruce - fir forests of the Black Mountains, north Carolina[J]. Canadian Journal of Forest Research,1989,19(11):1487-1491.

[22] DE STEVEN D, KLINE J, MATTHIAE P E. Long-term changes in a Wisconsin Fagus-Acer forest in relation to glaze storm disturbance[J]. Journal of Vegetation Science,1991,2(2):201-208.

[23] WHITNEY H E, JOHNSON W C. Ice storms and forest succession in southwestern Virginia[J]. Bulletin of the Torrey Botanical Club,1984,111(4):429-437.

[24] 何茜,李吉跃,陈晓阳,等. 2008 年初特大冰雪灾害对粤北地区杉木人工林树木损害的类型及程度[J]. 植物生态学报,2010,34(2):195-203.

HE Q, LI J Y, CHEN X Y, *et al.* Types and extent of damage to *Cunninghamia lanceolata* plantations due to unusually heavy snow and ice in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(2):195-203. (in Chinese)

[25] 苏志尧,刘刚,区余端,等. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估[J]. 植物生态学报,2010,34(2):213-222.

SHU Z Y, LIU G, QU Y D, *et al.* Storm damage in a montane evergreen broadleaved forest of Chebaling national nature reserve, south China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(2):213-222. (in Chinese)

[26] 许业洲,孙晓梅,宋丛文,等. 鄂西高山日本落叶松人工林雪灾调查[J]. 林业科学,2008,44(11):11-17.

[27] 陈双溪,温克刚. 中国气象灾害大典:江西卷[M]. 北京:气象出版社,2006:470.

[28] 万锦铨,谭骏珊,邝祝芳,等. 湖南省 14 个市州冰冻灾害风险区划研究[J]. 内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2018,47(2):160-165.

WANG J Q, TAN J S, KUANG Z F, *et al.* Risk regionalization of freezing disasters In 14 cities of Hunan Province[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition,2018,47(2):160-165. (in Chinese)

[29] 刘晓红,谭著明,袁跃林,等. 湖南冰雪灾害致森林毁损的气象原因[J]. 林业科学,2008,44(11):134-140.

LIU X H, TAN Z M, YUAN Y L, *et al.* Meteorological reasons for forest damage by ice and snow in Hunan Province[J]. Scientia Silvae Sinicae,2008,44(11):134-140. (in Chinese)

[30] YE Q, LIN X, ADEE E, *et al.* Evaluation of climatic variables as yield-limiting factors for maize in Kansas[J]. International Journal of Climatology,2017,37(S1):464-475.

[31] 汤小槽,金晓斌,盛莉,等. 基于小波分析的粮食产量对气候变化的响应研究——以西藏自治区为例[J]. 地理与地理信息科学,2008,24(6):88-92.

TANG X L, JING X B, SHENG L, *et al.* Research on response of grain output to climate change based on wavelet a-

analysis;a case study of Tibet[J]. Geography and Geo-Information Science,2008,24(6):88-92. (in Chinese)

[32] 朱德生,方茸. 长江中下游地区未来 10~15 年旱涝趋势预测[J]. 预测,2002,21(4):36-39.

[33] 曹永强,张兰霞,张岳军,等. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析[J]. 资源科学,2012,34(2):265-272.

[34] 郭小芹,刘明春,钱莉,等. 从 Mann-Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律[J]. 干旱区地理,2010,33(4):593-599. GUO X Q,LIU M C,QIAN L,*et al.* Evolution regularity of precipitation in the Shiyang River basin on Mann-Kendall features[J]. Arid Land Geography,2010,33(4):593-599. (in Chinese)

[35] 王新平,张景光,李新荣,等. 沙坡头地区多年降水分布特征、趋势及其变率[J]. 中国沙漠,2001,21(3):260-264. WANG X P,ZHANG J G,LI X R,*et al.* Distribution, trends and variability of precipitation in Shapotou Region[J]. Journal of Desert Research,2001,21(3):260-264. (in Chinese)

[36] 杨余辉,魏文寿,杨青,等. 新疆三工河流域山地、平原区气候变化特征对比分析[J]. 干旱区地理,2005,28(3):320-324. YANG Y H,WEI W S,YANG Q,*et al.* Analysis on the climate change in the mountainous region and plain in the Sangong river basin, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2005,28(3):320-324. (in Chinese)

[37] 王国庆,张建云,贺瑞敏,等. 黄河兰州上游地区降水、气温变

化及趋势诊断[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(1):77-81. WANG G Q,ZHANG J Y,HE R M,*et al.* Variation and trends detection of precipitation and temperature in the upper reaches of Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2009,23(1):77-81. (in Chinese)

[38] 陶向新. 模糊数学在农业科学中的初步应用[J]. 沈阳农学院学报,1982(2):96-107.

[39] 段海来,千怀遂,李明霞,等. 中国亚热带地区柑桔的气候适宜性[J]. 应用生态学报,2010,21(8):1915-1925. DUAN H L,QIAN H S,LI M X,*et al.* Climatic suitability of citrus in subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(8):1915-1925. (in Chinese)

[40] 任东宇,刘滨辉,廉陆鹂,等. 大兴安岭地区降水量变化及干湿期特征分析[J]. 森林工程,2020,36(5):16-23.

[41] 王笑峰,郭显锋,蔡体久,等. 松花江干流治理工程生态护坡覆土改良研究[J]. 森林工程,2020,36(3):1-6.

[42] 范擎宇,何福红,马国斌,等. 基于过程降雨的暴雨灾害危险性评估——以松花江流域为例[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(2):100-104,110. FAN Q Y,HE F H,MA G B,*et al.* Risk assement of rain-storm disaster based on process rainfall:a case study of Songhua River basin[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(2):100-104,110. (in Chinese)

(上接第 139 页)

[14] 姜志强. 榉树扦插繁殖技术与生根机理的研究[D]. 南京:南京林业大学,2008.

[15] 李大威,景森,李伟. 不同时期插穗内营养物质含量对榛子扦插生根的影响[J]. 山东林业科技,2012,42(2):27-29.

[16] 张玉臣. 白木香扦插繁殖技术及生根机理研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2010.

[17] 郭素娟. 林木扦插生根的解剖学及生理学研究进展[J]. 北京林业大学学报,1997,19(4):64-69. GUO S J. Progress of study on rooting anatomy and physiology of forest tree cuttings[J]. Journal of Beijing Forestry University,1997,19(4):64-69. (in Chinese)

[18] 郑涛,樊军锋,张海燕. 秦白杨 3 号扦插繁育技术研究[J]. 西北林学院学报,2019,34(5):122-126. ZHENG T,FAN J F,ZHANG H Y. Cutting technology of the poplar cultivar ‘Qin Baiyang No. 3’ [J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(5):122-126. (in Chinese)

[19] 史锋厚,郑晨,罗帅,等. 南京椴嫩枝扦插技术研究[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(8):6-10. SHI F H,ZHENG C,LUO S,*et al.* Study on softwood cutting propagation techniques for *Tilia miqueliana*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2017,37(8):6-10. (in Chinese)

[20] DOLOR D E,IKIE F O,NNAJI G U. Effect of propagation media on the rooting of leafy stem cuttings of *Irvingia wombolu* (Vermoesen)[J]. Research Journal Agriculture and Biology Sciences,2009,5(6):1146-1152.

[21] 杨晓红,付宇辰,张民民,等. 2 个胡枝子新品种嫩枝扦插繁殖技术研究[J]. 江西农业大学学报,2019,41(1):99-106.

[22] 张若晨. 大果榉硬枝扦插繁殖技术研究[J]. 山西农业科学,2013,41(10):1082-1084.

[23] 郭玮龙,岳春雷,胡国伟,等. 细叶水团花种子萌发特性及扦插繁殖[J]. 浙江农林大学学报,2015,32(2):319-323. GUO W L,YUE C L,HU G W,*et al.* Seed germination and cottage of *Adina rubella* [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2015,32(2):319-323. (in Chinese)

[24] MUMTAZ M,KHAN M A,MUGHAL A H. Vegetative propagation of *Aesculus indica* through stem cuttings treated with plant growth regulators[J]. Journal of Forestry Research,2009,20(2):171-173.

[25] 施能浦. 正交试验筛选杂交稻最优栽培方案[J]. 福建农业科技,1985(4):4-7.

[26] 马晓辉,何坤,刘燕,等. 大果榉扦插繁育研究[J]. 安徽农学通报,2013,19(12):17-18,37.

[27] 张云龙,李博扬,卫星. 覆膜滴灌对青杨扦插苗生长的影响[J]. 森林工程,2019,35(5):1-8.

[28] 乔虹,王雪珂,白晋华,等. 基质种类对大果榉硬枝扦插生根的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(12):2037-2039. QIAO H,WANG X K,BAI J H,*et al.* Effects of substrate type on rooting of hardwood cutting of *Zelkova sinica* [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2018,46(12):2037-2039. (in Chinese)

[29] 李俊楠,李莲芳,熊新武,等. 插穗母树年龄和粗度对薄壳山核桃硬枝扦插的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(4):94-97. LI J N,LI L F,XIONG X W,*et al.* Effects of parent tree and the thickness of cutting on rooting capability of *Carya illinoensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(4):94-97. (in Chinese)