

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.12.005

张利平,周泽英,彭云,等.四川渠江中上游羊肚菌低温冷害风险分析[J].中国农业气象,2020,41(12):794-806

四川渠江中上游羊肚菌低温冷害风险分析*

张利平^{1,2}, 周泽英², 彭云², 王庆莉³, 赖自力⁴, 王明田^{1,5,6**}

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072; 2. 达州市气象局, 达州 635000; 3. 甘孜藏族自治州气象局, 康定 626000; 4. 泸州市气象局, 泸州 646000; 5. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066; 6. 四川省气象台, 成都 610072)

摘要: 利用达州、巴中及周边 21 个站点 1991-2020 年气象资料, 选取最低气温和积寒作为区划指标, 分析渠江中上游海拔 600m 以下地区 2-3 月羊肚菌子实体期间冷害指标的时空分布, 建立冷害指标的地理空间分布模型, 基于气象灾害风险评估原理, 运用 ArcGIS10.1 进行冷害风险等级区划。结果表明: (1) 羊肚菌冷害风险指标为日最低气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$, 冷害风险预警基础指标为日平均气温 $< 6.0^{\circ}\text{C}$ 。(2) 羊肚菌冷害频率为 10 年 7 遇以上, 主要发生在 2 月上旬-3 月上旬, 发生频次和强度逐旬减小, 其中 2 月上中旬约占 70%; 冷害过程持续日数以 1~3d 为主, 占总过程数的 82%~89%, 最长过程日数 6~8d, 最大积寒 $3.64^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。(3) 羊肚菌冷害风险等级自南向北、自低海拔向高海拔增大, 以中低风险区为主。中低风险区主要分布在渠江中上游中南部海拔 520m 以下的浅丘河谷平坝区, 面积约占 2/3; 次高和高风险区分布零散, 主要分布在中北部海拔 520-600m 的低山河谷区, 面积约占 1/3。(4) 将羊肚菌原基分化期调控至 2 月下旬以后, 冷害频次降至约 3 年 2 遇, 冷害强度明显降低, 其危害明显减小。(5) 利用黑色遮阳网搭建的栽培设施会降低环境最低温度约 0.3°C , 加重冷害过程对羊肚菌的损害。渠江中上游低海拔地区羊肚菌顺季栽培时应控制在海拔 520m 以下地区, 并根据天气状况, 将原基分化期调控至 2 月下旬以后, 注意防范冷害过程中局地小气候和黑色镂空大棚的不利影响, 以避免或减轻冷害风险及危害。

关键词: 羊肚菌; 低温冷害; 气候风险; 渠江中上游

Risk Analysis of Chilling Injury of *Morchella* in Middle and Upper Reaches of Qu River in Sichuan Province

ZHANG Li-ping^{1,2}, ZHOU Ze-ying², PENG Yun², WANG Qing-li³, LAI-Zhi-li⁴, WANG Ming-tian^{1,5,6}

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China; 2. Dazhou Meteorological Bureau, Dazhou 635000; 3. Meteorological Bureau of Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Kangding 626000; 4. Luzhou Meteorological Bureau, Luzhou 646000; 5. Water-Saving Agriculture in Southern Hill Area Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610066; 6. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072)

Abstract: Chilling injury is one of the main climatic problems affecting the cultivation and production of *Morchella*. However, there are few reports about the mechanism of chilling injury, meteorological index and climate risk zoning of *Morchella*, and there is lack of necessary technical support to carry out the weather services for *Morchella* chilling injury. It provides scientific basis for the production planning of *Morchella* in the study area, the dynamic assessment of the risk of chilling injury and the meteorological service of disaster prevention and reduction, and facilitates the development of agricultural industry in mountainous areas. Taking the upper and middle reaches of the Qu River below 600m above sea level as the study area, DEM data of this area and climatic data of 21 stations in and around

* 收稿日期: 2020-06-22

** 通讯作者王明田, E-mail: Wangmt0514@163.com

基金项目: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目 (省重点实验室 2018-重点-05-05)

第一作者联系方式: 张利平, E-mail: 854874815@qq.com

the basin from 1991 to 2020, and experimental data of *Morchella* production from 2018 to 2019 were used, based on the chilling injury types and disaster-causing factors of *Morchella*, extreme minimum air temperature and accumulated cold were selected as zoning indices to analyze the relationship between air temperature and ground temperature from February and March in the study area, to determine the threshold of extreme minimum air temperature; to statistically analyze the temporal and spatial distributions of extreme minimum air temperature, cold accumulation, chilling injury frequency and its lasting days. The spatial distribution data of index factors were standardized by establishing the spatial distribution model of chilling damage index. Analytic hierarchy process and natural breakpoint method were used to determine the influence weight and risk level thresholds of chilling injury indexes respectively. Based on the principle of comprehensive meteorological disaster risk assessment, ArcGIS10.1 was used to make a classification in *Morchella* chilling risk. The results showed that: (1) the average difference between air and ground temperature from February and March was about 1.0°C (0.7~1.4°C) in the study area, smaller in the south and larger in the north. The risk index of chilling injury of *Morchella* was the daily minimum temperature that was less than or equal to 2.0°C, and the basic index of early-warning of chilling injury risk was daily average temperature that was less than 6.0°C. (2) The chilling injury frequency of *Morchella* was more than 7 times in 10 years, mainly occurred from early February to early March, and the occurrence frequency and intensity decreased every 10 days, among which 70% occurred in early and middle February. The duration of chilling injury process was 1–3 days, accounting for 82%–89% of the total number of processes, the longest duration was 6–8 days, and the maximum accumulated cold was 3.64°C·d. (3) The risk levels of chilling injury of *Morchella* increased from south to north and from low altitude to high altitude, mainly in the middle and low risk areas. The middle and low risk areas are mainly distributed in the shallow hills and valleys below 520m above sea level in the middle and upper reaches of the Qu River, accounting for about 2/3 of the total area. The secondary high and high risk areas were scattered, mainly distributed in the low-mountain valley area with an altitude of 520–600m in the central and northern part, accounting for about 1/3 of the area. (4) After controlling the differentiation stage of *Morchella* to late February, the chilling injury frequency was reduced to about 2 times in 3 years, the chilling injury intensity was significantly reduced, and the harm was significantly reduced. (5) The planting site selection and the establishment of greenhouses had different effects on the chilling injury of *Morchella*. the influence of local topography on microclimate can be judged comprehensively according to the altitude and whether it is conducive to the southward cold air flow and aggregation, the cultivation facilities built with black sunshade net can reduce the environmental minimum temperature by about 0.3°C and aggravate the chilling damage to *Morchella*. In the study area, the suitable season cultivation of *Morchella* should be controlled below 520m above sea level. According to the weather conditions, the primary basal differentiation period should be adjusted after late February. Attention should be paid to the adverse effects of local microclimate and black hollowed-out greenhouse in the process of chilling injury, so as to avoid or reduce the risk and harm of chilling injury.

Key words: *Morchella*; Chilling injury; Climate risk; The middle and upper reaches of the Qu River

羊肚菌(*Morchella*)是一种珍稀的野生食用菌^[1], 有丰富的营养价值和很高的保健功能。中国 20 世纪 80 年代开始羊肚菌人工栽培驯化研究^[2-3]。2000 年四川省林业科学院首次采用外营养添加技术, 突破羊肚菌的室外栽培技术难题^[4-7], 之后, 羊肚菌优良菌株的引进与筛选、人工栽培技术的改进和商业化应用等得到快速发展, 相关仿生态栽培技术已在国

内多省(市、自治区)得到大面积推广。在实际栽培生产中, 不同品种、不同地区、不同年份的羊肚菌产量表现极不稳定, 主要原因有菌种不稳定、抗逆性差以及对环境条件的依赖性强等, 其中最大的制约因素是天气与气候条件的不稳定性^[4]。羊肚菌主要气象灾害有冷害、热害、干旱和低温连阴雨等, 其中影响最大的是冬末春初羊肚菌原基分化-子囊

果生长期的低温冷害，如四川省甘孜州康定市 2016 年春季发生的强寒潮低温冷冻灾害，导致当年羊肚菌绝收。

羊肚菌冷害是指当环境温度低于某一临界值时，子实体生长发育不良甚至受冻死亡的减产现象。国外对冷害机理研究较多^[8-11]。国内冷害研究主要集中在水稻、东北玉米、新疆棉花以及热带经济林木。王远皓等^[12]将冷害指标归纳为生长季温度距平^[13]、生长季积温^[14]、生长发育关键期冷积温^[15]、作物发育期距平^[16]、热量指标^[17]和综合指标^[18]等六类，霍治国等^[19-21]分别研究确定了香蕉和荔枝、龙眼、莲雾苗的低温寒害指标等级，王春乙等^[22-24]基于自然灾害风险理论对作物冷害风险评估方法进行了深入研究，梁立江等^[25-29]利用 GIS 技术分别对东北水稻、湖北马铃薯、华南香蕉和荔枝、福建芒果等开展了冷害风险区划。羊肚菌生产是一种新兴的特色与设施农业，各地栽培历史短，栽培总面积较小，目前关于羊肚菌冷害的致害机理、气象指标和气候风险与种植气候区划的研究少见报道，开展冷害气象服务缺乏必要的技术支撑。

近年来，因产品需求旺盛、经济效益显著，渠江中上游羊肚菌栽培面积逐年增加，是山区农户脱贫和农村产业发展的主要项目之一，但冷害是影响其安全生产和快速发展的主要气候问题。本研究基于现有粮经作物冷害分析和风险区划研究方法，在不考虑社会经济与管理水平等影响的前提下，以四川渠江中上游羊肚菌主要栽培区出菇期冷害为研究对象，结合田间试验和生产调查，研究羊肚菌冷害致灾因子及风险指标，运用 GIS 技术开展

羊肚菌冷害气候风险精细区划，以期为本地区羊肚菌生产规划、冷害动态评估和防灾减灾对策提供科学依据，促进山区农户脱贫致富和农村产业发展。

1 材料与方 法

1.1 研究区域与时段

渠江中上游地处四川东北部、大巴山-米仓山南麓，106.35~108.54°E、30.32~32.74°N，海拔 222.0~2512.9m，主要包括达州和巴中两市。地势北高（大巴山区）南低（盆地丘区），以山地和丘陵为主，属亚热带湿润季风气候类型。由于地形复杂，山地气候特征明显。海拔 800m 以下的低山、丘陵、河谷地区，气候温和，四季分明，无霜期长；海拔 800-1000m 的低、中山区，气候温凉、阴湿，回春迟，夏日热，秋凉早，冬寒长；海拔 1000m 以上的中山区，光热资源不足，寒冷期较长，春寒和秋霜突出。

羊肚菌一般从低海拔的平原地区到 3200m 的高海拔地区都有分布^[3]，但各地生育期不同。据调查和试验（表 1），目前渠江中上游区域内羊肚菌主要种植于海拔 300~600m 的河谷、低山浅丘及平坝区，600m 以上山区种植极少，且子实体生长季明显延后。该区域内羊肚菌栽培季一般为 10 中下旬-翌年 3 月底或 4 月初。一般在 10 月中下旬播种，1 月下旬-2 月上旬为原基分化期，3 月上旬随着子实体生长成熟，开始采收，4 月上中旬结束，采收期 30d 左右。可见，2-3 月为羊肚菌生长的关键期。据此，确定研究区域为渠江中上游海拔 600m 以下地区（以下简称“研究区”），研究统计时段为 2-3 月。研究区地形与资料站点分布见图 1。

表 1 研究区内羊肚菌生育期调查结果

Table 1 Investigation result of the growth period of *Morchella* in research station

地点	海拔	播种期	原基分化	收获始期	收获盛期	收获末期
Site	Altitude (m)	Sowing stage	Primordium differentiation	Begin of harvest	Bloom of harvest	End of harvest
渠县 Quxian	295.1	10 月下旬末	1 月下旬初	3 月上旬初	3 月中旬初	3 月末
		Late in L-Oct.	Early in L-Jan.	Early in E-Mar.	Early in M-Mar.	End in Mar.
宣汉 Xuanhan	389.4	10 月下旬初	2 月上旬初	3 月上旬中	3 月中	4 月初
		Early in L-Oct.	Early in E-Feb.	Middle in E-Mar.	M-Mar.	E-Apr.
南江 Nanjiang	579.3	10 月中旬中	2 月上旬末	3 月上旬末	3 月中旬末	4 月上旬末
		Middle in M-Oct.	Late in E-Feb.	Late in E-Mar.	Late in M-Mar.	Late in E-Apr.
万源 Wanyuan	674.0	10 月中旬初	2 月下旬初	3 月中	3 月下旬末	4 月中
		Early in M-Oct.	Early in L-Feb.	M-Mar.	Late in L-Mar.	M-Apr.

Note: E- is the first ten-day of a month; M- is the middle ten-day of a month; L- is the last ten-day of a month. The same as below.

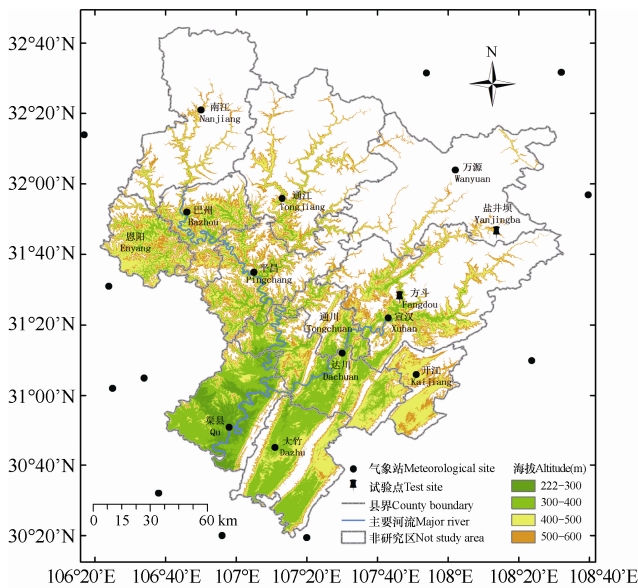


图 1 研究区域 (海拔 600m 以下) 地形与站点分布

Fig. 1 Topography and site distribution in the study area (altitude $\leq 600\text{m}$)

1.2 资料及其来源

DEM 高程数据。分辨率 30m 的 DEM 高程数据来源于地理空间云 (<http://www.gscloud.cn/>), 1:100 万行政区划边界 shp (2017 版) 数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/ngcc/>), 用于空间分析。

气候数据。渠江中上游及其周边 21 个县气象站 1991–2020 年逐日地面气象观测资料来源于四川省气象探测数据中心、重庆市气象科学研究所和陕西省汉中市气象局, 用于对研究区域内典型站点冷害指标的统计分析。

试验数据。2018 年 10 月–2019 年 4 月, 在宣汉县双河镇方斗村 (31.463°N, 107.772°E, 494.0m) 和万源县井溪镇盐井坝村 (31.772°N, 108.229°E, 500.0m) 同时开展羊肚菌生产试验, 方斗村为丘陵台地, 盐井坝村为河谷, 土壤类型均为水稻土。试验在遮光率为 75% 黑色遮阳网搭建的 2m 高简易大棚中进行, 试验品种为六妹羊肚菌 (*M. sextelata*) 栽培种, 每个小区面积为 10m², 设 1 个重复 5 个播期, 播期间隔 5d, 首播期为 10 月 29 日, 试验区外生产对照地块播期为 11 月 8 日。棚内安装便携式自动气象观测仪 (高度 1.5m) 和土壤多参数速测仪 (外接电源), 主要观测气温、空气湿度、日照时数以及 0–10cm 土壤温湿度。棚外 800m 范围内建有 1 个区

域自动气象站, 自动定时收集气象资料, 结合羊肚菌生育期观测, 分析气象条件和栽培设施内外温差及其变化对羊肚菌生长发育的影响。

1.3 冷害指标选择

羊肚菌子实体期发生冷害, 原基和子囊果会因冻而受损或死亡, 受害程度与地面最低气温直接相关, 还与降温幅度和持续时间等密切相关。根据降温天气条件的不同, 冷害可分成辐射型冷害、平流型冷害和混合型冷害^[30], 其中, 辐射型冷害主要由极端最低气温造成, 平流型冷害主要由持续低温造成, 混合型冷害主要是由平流型冷害转为辐射型冷害所致。冷害致灾因子可以概括为极端最低气温、最大降温幅度、持续日数和有害积寒。降温幅度和极端最低气温可较好地表示强冷空气入侵引起的上述 3 种冷害类型的剧烈程度, 低温持续日数和过程有害积寒可较好地表示中弱冷空气多次补充造成的平流型冷害的累积作用。

据研究^[27], 过程有害积寒与过程持续日数、最低温度和降温幅度呈显著相关, 能综合反应不同类型冷害过程的时长与强度。因此, 选择极端最低气温和过程有害积寒作为羊肚菌的冷害指标。

1.4 统计口径与计算方法

(1) 羊肚菌低温冷害过程: 羊肚菌原基分化–子实体期间, 当日最低气温 (T_{\min}) \leq 冷害临界温度 (T_c)、且持续 1 d 或以上时, 定义为 1 次羊肚菌低温冷害过程。

(2) 冷害频率 (P): 统计年 (N) 内冷害发生次数 (n) 的百分比。

$$P = n / N \times 100\% \quad (1)$$

(3) 冷害过程日平均气温 (T_k): 冷害过程中日平均气温的平均值。

$$T_k = \sum T / m \quad (2)$$

式中, T 为最低气温 \leq 界限温度之日的平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), m 为最低气温 \leq 界限温度的日数 (d)。

(4) 过程有害积寒 (ACHT, accumulated cold harmful temperature, 简称积寒): 指冷害过程中, 低于临界温度的逐时温度与临界温度之差的绝对值累积量。

计算方法: 根据确定的羊肚菌发生低温冷害临界温度指标, 统计低温冷害过程数据。由于没有逐时温度资料, 参考文献^[19]中公式, 计算每次低温冷

害过程的积寒值。计算式为

$$A = \begin{cases} 0 & T_{\min} \geq T_c \\ \frac{1}{4} \sum_{m=1}^{x_2} \frac{(T_c - T_{\min})^2}{T_m - T_{\min}} & T_{\min} < T_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, A 为积寒 (°C·d); m 为过程持续日数 (1, 2, ..., x₂); T_{min} 为日最低气温 (°C); T_m 为日平均气温 (°C); T_c 为冷害临界温度, 其数值需要根据当地低温气象条件和羊肚菌试验结果综合确定。

(5) 温差 (T_m): 同日最低气温 (T_{min}) 与地面最低温度 (T_{0min}) 之差, 即

$$T_m = T_{\min} - T_{0\min} \quad (4)$$

1.5 数据标准化处理

为消除不同指标量纲的影响, 采用 z-score 法进行转换, 转换后的数据符合标准正态分布, 即均值为 0, 标准差为 1, 转换式为

$$x_i^* = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

式中, μ 为样品的均值, σ 为样品的标准差。

采用 min-max 标准化对数据进行线性变化, 使数据落在 [0, 1], 即

$$X_i = \frac{x_i^* - x_{\min}^*}{x_{\max}^* - x_{\min}^*} \quad (6)$$

式中, X_i 为某一致灾因子第 i 年的标准化值 (0 ≤ X_i ≤ 1), x_i^{*} 为相应致灾因子第 i 年 z-score 法转换后的值, x_{max}^{*}、x_{min}^{*} 分别为相应致灾因子 z-score 法转换后的最大值和最小值, i 为年份。

为了与极端最低气温的相关性方向保持一致, 积寒值标准化时应先作负值处理。

1.6 综合冷害指数计算

采用加权综合评价法计算逐年冷害指数^[23-24], 即

$$H_i = \sum_{i=1}^n (A_i W_i) \quad (7)$$

式中, H_i 为羊肚菌综合冷害指数; n 为评价因子个数, n=2 (极端最低气温和积寒值); W_i 为第 i 项评价因子的权重 (W_i > 0, ∑_{i=1}ⁿ W_i = 1), 采用层次分析法确定。

1.7 空间分布数理模型建立

运用多元回归法建立各指标或要素的空间分布数理模型, 即

$$A_i = a_i \delta + b_i \varphi + c_i h + d_i + \omega \quad (8)$$

式中, A_i 为第 i 项气象灾害指标的回归频次, δ、φ、h 分别代表经度、纬度和海拔, a_i、b_i、c_i 为回归系数, d_i 为常数, ω 为残差。

利用 ArcGIS10.1 绘图, 残差采用反距离权重法插值订正。

1.8 风险等级划分与区划图绘制

利用 ArcGIS10.1 的空间分析模块制作区划图。采用层次分析法确定冷害指标的权重系数, 分别对冷害指标图层进行标准化处理, 按权重对指标图层进行叠加计算, 绘制风险栅格图层。按照自然断点法确定低、次低、中、次高、高 5 级风险分级阈值, 对风险栅格图层分级。最后, 叠加行政边界和主要河流等地图信息, 绘制冷害风险区划图。

2 结果与分析

2.1 羊肚菌低温冷害指标确定

2.1.1 地温临界值

羊肚菌是低温菌, 不同品种的适宜生长发育温度范围略有差异^[2-4,31-32]。一般而言, 菌丝体发育温度在 5.0~30.0°C 均可, 最适温度为 15.0~22.0°C, 能耐 0.0°C 以下低温; 当温度稳定在 8.0°C 以上 3d 后, 原基开始分化; 子囊果含水量在 90% 以上, 环境温度在 6.0~25.0°C 区间均能生长, 低于 15.0°C 品质较好。原基分化-子囊果初期是低温敏感期, 研究区多处于冬末春初, 该时段内环境温度为 0.0~6.0°C 时, 原基与子囊果生长缓慢甚至停止分化、生长; 当环境温度 < 0.0°C 时, 原基或子囊果会因受冻结冰而死亡, 严重时导致羊肚菌大量减产甚至绝收。羊肚菌主要生长在地表 0-15cm 范围内, 可用地表温度表示其生长的环境温度, 因此, 确定 2-3 月羊肚菌低温冷害的地面温度临界值为 0.0°C。

2.1.2 气温临界值

地温受环境影响因素较多, 加之一般种植地区并没有观测或预报, 所以实际应用中地温不如气温 (H=1.5m) 方便。因此, 需将 0.0°C 的地面温度临界值转换为对应的气温值。

(1) 以南江、宣汉和大竹 3 个国家气象观测站, 分别代表研究区的北、中、南 3 个区位, 选取 2010-2019 年 2-3 月日最低气温 (T_{min}) ≤ 3.0°C 观测资料与同日地面最低温度 (T_{0min}) 观测资料为一个数据组 (T_m ≤ 3.0°C 的频率在 98% 以上)。利用上述资料进行线性回归分析, 结果见表 2。

由表 2 可见，研究站点最低气温与地面最低温度呈极显著正相关，但回归系数较小 (<0.1)，常数项 (\approx 平均温差) 在 0.90~1.35，从南至北增大，最低气温与地面最低温度之差相对恒定。

(2) 统计同日最低气温 (T_{min}) 与地面最低温度 (T_{0min}) 之差 (T_m) 和当 $T_{min} \leq$ 临界值 (临界值取 0.0、1.0、2.0 和 3.0 $^{\circ}C$) 时、 $T_{0min} \leq 0.0^{\circ}C$ 的频率 $P_{临界值}$ ，结果见表 3。由表中可见，日最低气温与地面最低温度关系较复杂，二者平均差值在 0.7~1.4 $^{\circ}C$ ，温差范围在 -1.9~3.5 $^{\circ}C$ ，其中最低气温高于地面最低温度的频率为 82.2%~94.1%。当最低气温 $\leq 0.0^{\circ}C$ 时，一般都有冷害发生；最低气温 $\leq 1.0^{\circ}C$ 时，冷害频率

50.0%~91.0%；最低气温 $\leq 2.0^{\circ}C$ 时，冷害频率 41.2%~77.3%；最低气温 $\leq 3.0^{\circ}C$ 时，冷害频率 31.1%~59.3%。

(3) 统计当 $T_{0min} \leq T_{min}$ 时， T_{min} 小于 1.0、2.0 和 3.0 $^{\circ}C$ 等临界值的频率 $P_{临界值}$ 和温差 T_m ，结果见表 4。由表中可见，当冷害发生时，最低气温高于地面最低温度的频率在 90% 以上，平均温差为 1.2~1.6 $^{\circ}C$ ，最低气温 $\leq 2.0^{\circ}C$ 的频率均在 95.0% 以上。

从地理区位上看，随着纬度北移和海拔升高，研究区内冷害日数明显增加，且最低气温与地面最低温度之差增大。

表 2 代表站点 2~3 月日最低气温 (T_{min}) 与地面最低温度 (T_{0min}) 间回归分析结果 (2010~2019 年)

Table 2 Regression analysis between the minimum air temperature (T_{min}) and minimum ground temperature (T_{0min}) at three representative stations from Feb. to Mar. (2010~2019)

站点 Station	数据组 Data array	a_0	a_1	R	F	ω
南江(北部)Nanjiang(northern)	101	1.35	0.09022	0.847**	257.2**	-2.2~2.0
宣汉(中部)Xuanhan(middle)	62	1.11	0.06608	0.730**	68.49**	-2.0~1.3
大竹(南部)Dazhu (southern)	45	0.90	0.06127	0.678**	36.63**	-1.6~1.8

注: $T_{min} = a_0 + a_1 T_{0min} + \omega$; **表示方程通过 0.01 水平显著性检验。下同。

Note: $T_{min} = a_0 + a_1 T_{0min} + \omega$; ** indicated that the equation passed the significance test of $P < 0.01$. The same as below.

表 3 不同临界气温水平下地温 $T_{0min} \leq 0^{\circ}C$ 的频率及不同条件下的气-地温差统计 (2010~2019 年)

Table 3 Statistics of the ground - air temperature difference and frequency of $T_{0min} \leq 0^{\circ}C$ under different condition (2010-2019)

站点 Station	海拔 Altitude(m)	数据组 Data array	当 $T_{min} \leq$ 不同值时 $T_{0min} \leq 0^{\circ}C$ 的频率				温差 \pm 标准差 $T_m \pm SD(^{\circ}C)$	$T_{min} \geq T_{0min}$		$T_{min} < T_{0min}$	
			Frequency of $T_{0min} \leq 0^{\circ}C$ when $T_{min} \leq$					$P_1(\%)$	$T_{m1}(1)$	$P_2(\%)$	$T_{m2}(2)$
			different value(%)								
			$P_{\leq 0.0}$	$P_{\leq 1.0}$	$P_{\leq 2.0}$	$P_{\leq 3.0}$					
南江 Nanjiang	579.3	101	100.0	91.0	77.3	59.3	1.4 \pm 0.84	94.1	1.4	3.9	-0.6
宣汉 Xuanhan	389.4	62	100.0	77.8	52.3	36.5	0.9 \pm 0.85	83.9	1.2	16.1	-0.4
大竹 Dazhu	418.0	45	80.0	50.0	41.2	31.1	0.7 \pm 0.84	82.2	0.9	17.8	-0.4

注: $T_m = T_{min} - T_{0min}$, T_m 为同日最低气温 (T_{min}) 与地面最低温度 (T_{0min}) 之差的平均值即气-地温差, T_{m1} 和 T_{m2} 为不同条件下的温差, P 、 P_1 和 P_2 为相应的频率。下同。

Note: $T_m = T_{min} - T_{0min}$, T_m is the average difference between T_{min} and T_{0min} , i.e. temperature difference, and T_{m1} and T_{m2} are mean temperature difference under different condition, P , P_1 and P_2 are their frequency. SD is standard deviation. The same as below.

表 4 冷害发生时的气-地温差 ($^{\circ}C$) 和不同临界气温下 $T_{0min} \leq 0^{\circ}C$ 的频率 (%) (2010~2019 年)

Table 4 Statistics of the ground - air temperature difference($^{\circ}C$) and frequency(%) under different critical air temperature when chilling injury occurs in 2010~2019

站点 Station	数据组 Data array	$P_{1.0^{\circ}C}(\%)$	$P_{2.0^{\circ}C}(\%)$	$P_{3.0^{\circ}C}(\%)$	温差 \pm 标准差 $T_m \pm SD(^{\circ}C)$	$T_{min} \geq T_{0min}$		$T_{min} < T_{0min}$	
						$P_1(\%)$	$T_{m1}(^{\circ}C)$	$P_2(\%)$	$T_{m2}(^{\circ}C)$
南江 Nanjiang	43	77.7	95.1	100.0	1.5 \pm 0.83	94.8	1.6	5.2	-0.3
宣汉 Xuanhan	21	61.9	95.2	100.0	1.4 \pm 0.82	90.5	1.5	9.5	-0.3
大竹 Dazhu	14	64.3	100.0	100.0	1.0 \pm 0.81	92.9	1.2	7.1	-0.7

2.1.3 低温冷害指标确定

统计方斗和盐井坝站羊肚菌试验大棚内外 2019 年 2 月的最低气温和地温情况, 结果见表 5。由表中可见, 两个试验大棚内外 2 月平均最低气温与平均最低地面温度之差 0.6~0.9℃, 极端最低气温与极端最低地面温度之差 1.4~1.7℃, 棚内外温差变化方向与此一致但有差异。

2 月 19~20 日, 渠江中上游发生了一次辐射型冷害天气过程, 18 日下午天气转晴以后, 19 日试验大棚内外平均气温 5.0℃左右, 比前一天降低约 1.5℃, 而极端最低气温由前一天的 2.0℃左右下降到 0.0℃以下, 地面极端最低温度降至-2.5~-1.7℃, 差值 1.4~1.7℃; 20 日, 方斗站冷害结束, 盐井坝站平均气温回升约 1.0℃, 极端最低气温仅回升 0.2~0.4℃, 棚内地面极端最低温度比棚外偏低 -0.4~-0.3℃。

宣汉站 2019 年 2 月 19 日冷害日的气温和地温实时变化情况见图 2。由图可见, 受云天状况变化影响, 当日 2:00 后地温和气温迅速下降, 4:00、5:00 先后降至最低, 然后逐步回升, 8:00 后受太阳辐射影响, 地温迅速上升。日极端最低气温(0.8℃)与极端最低地面温度(-1.0℃)之差为 1.8℃。

综上, 研究区 2~3 月最低气温与地面最低温度的平均差值在 0.7~1.4℃, 当最低气温≤2.0℃时, 虽不一定出现冷害, 但当有冷害出现时, 最低气温一般在 2.0℃以下。综合考虑羊肚菌风险管理、栽培环境复杂性等, 确定 2~3 月羊肚菌冷害风险指标为日最低气温≤2.0℃。

2.2 羊肚菌冷害发生情况统计

按照日最低气温≤2.0℃标准, 统计羊肚菌 2~3 月冷害发生情况, 结果见图 3、表 6~表 8。由图 3 和表 6 可见, 不同年份各地冷害差异明显, 除个别年

表 5 2019 年 2 月两个试验站简易大棚内外气温与地面温度

Table 5 Air temperature and ground temperature(0cm) inside and outside the simple greenhouse at two test stations in February, 2019

站点 Station	项目 Project	平均最低温度 Mean minimum temperature (°C)			极端最低温度 Extreme minimum temperature (°C)		
		气温 Mean T _{min}	地温 Mean T _{0min}	温差 T _m	气温 Mean T _{min}	地温 Mean T _{0min}	温差 T _m
		方斗 Fangdou	棚内 Inside	3.5	2.8	0.7	-0.3
	棚外 Outside	4.1	3.2	0.9	-0.1	-1.7	1.6
	内外温差 Td	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	0.1
盐井坝 Yanjingba	棚内 Inside	3.3	2.7	0.6	-1.0	-2.5	1.5
	棚外 Outside	3.7	3.0	0.7	-0.8	-2.2	1.4
	内外温差 Td	-0.4	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	0.1
	平均温差 Mean Td	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	0.1

Note: Td is the temperature difference between inside and outside the simple greenhouse.

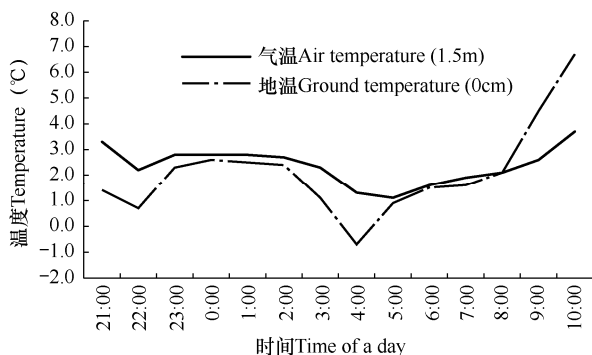


图 2 宣汉站 2019 年 2 月 19 日气温和地温的日内变化
Fig. 2 Diurnal variation of air temperature and ground temperature in Xuanhan station on Feb. 19, 2019

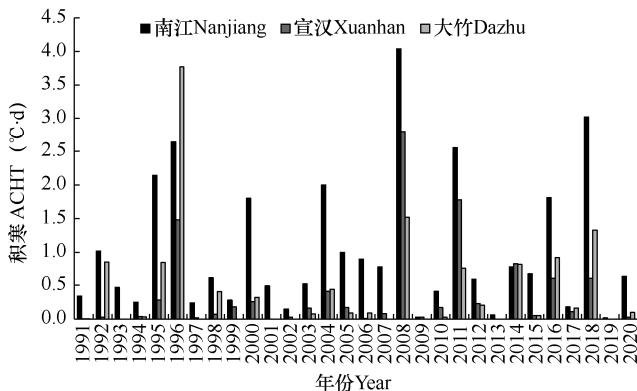


图 3 1991~2020 年各站点积寒值的年际变化
Fig. 3 Annual changes of accumulated cold harmful temperature (ACHT) in each station in 1991~2020

份外，北部的冷害发生频次和积寒明显高于中部和南部，最大积寒南江和宣汉站出现在 2008 年，大竹站出现在 1995 年；因大竹海拔略高于宣汉且处于川东平行岭谷的槽区，更易受南下冷空气影响，导致大竹积寒略大于宣汉。

由表 6 可见，从冷害的月发生情况看，2 月偏多偏重，平均发生频次约为 2.0 次，平均积寒约为 0.51℃·d；3 月冷害偏少偏轻，平均发生频次约为 0.3 次，平均积寒约为 0.03℃·d。从旬发生情况看，2 月上旬以后，旬频次与积寒均逐旬降低或减小，到 3 月中旬以后，北部山区偶有冷害，中南部极少有冷害发生；2 月上中旬冷害频次约为 1.6 次·a⁻¹，占总频次的 70.2%，积寒约为 0.44℃·d，冷害频次较高、强度较大；2 月下旬以后冷害频次约为 0.7 次·a⁻¹，占总

频次的 29.8%，积寒约为 0.09℃·d，冷害频次明显降低，危害明显减小。

由表 7 可见，各地羊肚菌冷害发生年频次自南向北增多，由大竹的 10 年 7 遇增多至南江的 1 年 1 遇。不同持续日数冷害过程年频次合计分别为 3.53(南江)、1.87(宣汉)、1.67 次(大竹)，各站冷害日数以持续 1~3d 为主，占 82%~89%；持续 3~5d 的较少，占 9%~15%；持续 5d 以上的很少，仅占 2%~3%。

由表 8 可见，各地 2-3 月羊肚菌冷害多年平均日数为 2.7~6.4d，冷害日平均气温 5.7~5.8℃，极端最低气温 -2.5~-1.0℃，多年平均积寒 0.35~1.01℃·d，冷害平均日数和平均积寒随纬度和海拔的增加而增加；冷害最长过程日数可达 6~8d，最大积寒 2.20~3.64℃·d。

表 6 1991-2020 年 2-3 月研究站点冷害发生频率 (P, %) 和积寒 (ACHT, °C·d)

Table 6 Chilling injury frequency(P, %) and accumulated cold(ACHT, °C·d) in research stations in Feb.-Mar. in 1991-2020

站点 Station	2 月 February								3 月 March							
	上旬 E-		中旬 M-		下旬 L-		月 Month		上旬 E-		中旬 M-		下旬 L-		月 Month	
	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT	P	ACHT
南江 Nanjiang	1.43	0.51	0.87	0.25	0.57	0.07	2.87	0.83	0.43	0.05	0.10	0.01	0.07	0.00	0.60	0.07
宣汉 Xuanhan	0.90	0.22	0.47	0.07	0.30	0.03	1.67	0.32	0.17	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.20	0.01
大竹 Dazhu	0.80	0.19	0.40	0.10	0.27	0.09	1.47	0.38	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
平均 Average	1.04	0.31	0.58	0.14	0.38	0.07	2.00	0.51	0.24	0.02	0.07	0.01	0.07	0.00	0.31	0.03

表 7 1991-2020 年冷害年频次和不同持续日数冷害过程年发生频次

Table 7 Frequency of chilling injury in years and annual frequency of chilling injury in different duration days from 1991 to 2020

站点 Station	年频次 Annual frequency			过程持续日数 The process lasts of days								
	南江 Nanjiang	宣汉 Xuanhan	大竹 Dazhu	1~3d			3~5d			>5d		
				南江 Nanjiang	宣汉 Xuanhan	大竹 Dazhu	南江 Nanjiang	宣汉 Xuanhan	大竹 Dazhu	南江 Nanjiang	宣汉 Xuanhan	大竹 Dazhu
年频次 Annual frequency	1.00	0.83	0.70	2.90	1.67	1.47	0.53	0.17	0.17	0.10	0.03	0.03
占比 Proportion(%)				82	89	88	15	9	10	3	2	2

表 8 1991-2020 年研究站点冷害日数、气温和积寒统计

Table 8 Statistics of chilling injury days, air temperature and ACHT in research station in 1991-2020

站点 Station	冷害平均日数 Average chilling injury days(d)	冷害日平均气温 Cold injury days mean temperature(°C)	极端最低气温 Extreme min temperature(°C)	平均积寒 Average ACHT (°C·d)	最长冷害日数 Longest cold injury days(d)	最大积寒 Max ACHT (°C·d)
南江 Nanjiang	6.4	5.7	-2.5	1.01	8	2.55
宣汉 Xuanhan	2.8	5.8	-1.9	0.35	6	2.20
大竹 Dazhu	2.7	5.7	-1.0	0.43	8	3.64

鉴于研究区内 3 个气象站近 30a 每年 2-3 月冷害日的平均气温稳定在 5.7~5.8℃，故认为，可将 2-3 月日平均气温 <6.0℃ 作为研究区羊肚菌出菇期的冷害风险预警基础指标，此指标与羊肚菌子囊果生长的下限温度一致，实际应用时根据冷害类型和天气状况适当调整后，可开展相关气象服务。

2.3 渠江中上游羊肚菌冷害综合风险区划

2.3.1 指标因子空间分布

利用 21 个站点 2-3 月的极端最低气温 T_d 、多年平均积寒 A_h 与各站点地理位置进行多元回归，建立空间分布模型，结果如式 (9)、式 (10)，经残差订正后两指标的空间分布见图 4。

$$T_d = -0.831\delta - 0.91227\phi - 0.00487h + 117.59 + \omega$$

(R=0.836**, F=13.2**) (9)

$$A_h = 0.06508\delta + 0.0929\phi + 0.00291h - 10.6323 + \omega$$

(R=0.937**, F=38.5**) (10)

由图 4 可见，研究区极端最低气温为 -4.4~ -0.3℃，平均积寒为 0.0~1.17℃·d，绝对值均呈自南向北、自西向东、自低海拔向高海拔增大的空间变化规律，其中受纬度和海拔影响较明显。受大巴山阻挡，冬春季冷空气南下通道多数位于研究区东

部，西部地区冷空气活动相对偏少、强度偏轻是这两个指标的空间分布绝对值自西向东增加的主要原因。

2.3.2 综合风险区划

采用层次分析法确定极端最低气温 (T_d) 和 2-3 月冷害过程多年平均积寒 (A_h) 的权重系数 (表 9)，分别对 T_d 和 A_h 进行标准化处理，按权重对指标图层进行叠加运算。运用自然断点法，按低、次低、中、次高和高 5 级确定分级阈值 (表 10)。叠加行政边界和主要河流等信息，绘制冷害风险区划图 (图 5)，计算各风险分区面积与占比 (表 10)。

由图 5 可见，羊肚菌冷害风险等级自南向北、自低海拔向高海拔增加。低、次低风险区主要分布于达州的渠县、大竹、达川大部、通川区东南部、宣汉南部河谷和巴中的巴州、恩阳、平昌等海拔 450m 以下的低山河谷、浅丘平坝区，面积约占 46.6%；中风险区主要分布于大竹前槽北部、开江后厢等海拔 400~520m 的低山高丘区，面积约占 20.4%；次高或高风险区主要分布于开江前厢、通川北部、宣汉、万源、通江、南江等海拔 520~600m 的低山河谷区，面积约占 33.0%。

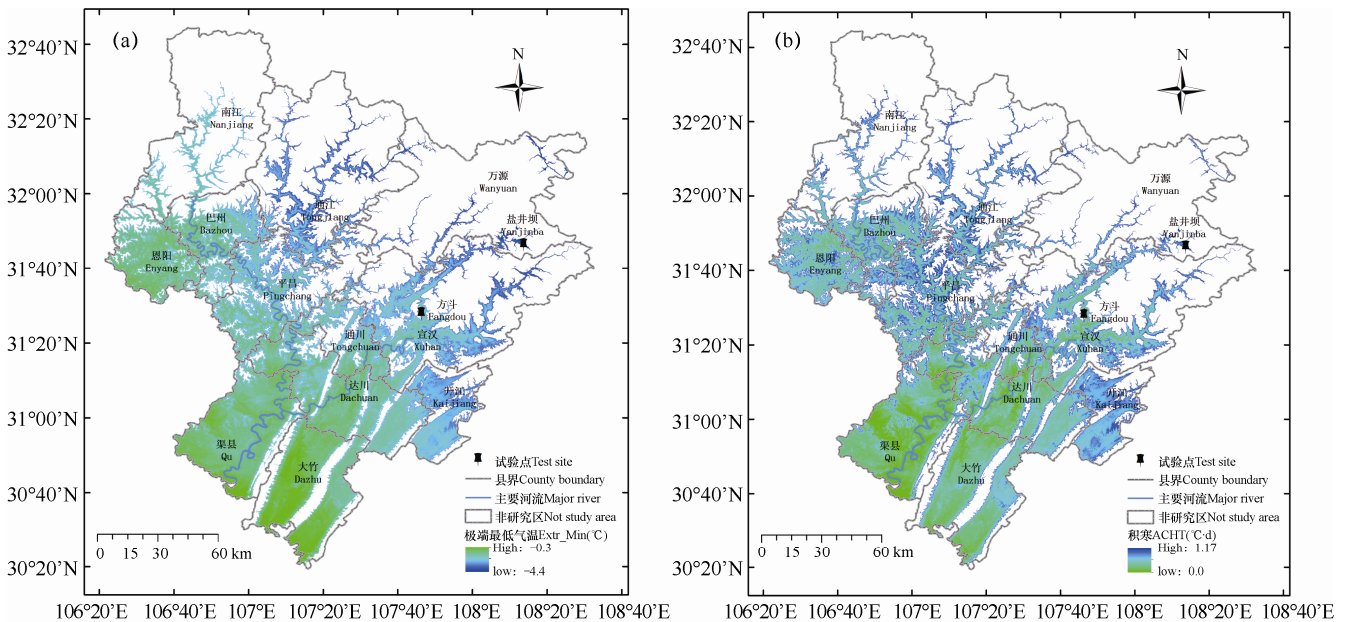


图 4 渠江中上游区域 2-3 月极端最低气温 (a) 和平均积寒值 (b) 的空间分布 (1991-2020 年)

Fig. 4 Spatial distribution of extreme minimum temperature(a) and average ACHT(b) in the middle and upper reaches of the Qu river in Feb.-Mar.(1991-2020)

表 9 冷害指标因子影响权重

Table 9 Influence weight of chilling injury index factors

	极端最低气温 Extreme minimum temperature (Td)	积寒 Accumulated cold harmful temperature (A _n)
权重 Weight(W _i)	0.38	0.62

表 10 羊肚菌低温冷害综合风险等级与面积

Table 10 The grade and area of comprehensive risk index of chilling injury of *Morchella*

	高 High	次高 Sub-high	中 Medium	次低 Sub-low	低 Low
分级指标 Classification index	0~0.294	0.294~0.455	0.455~0.608	0.608~0.761	0.761~1
面积(hm ²)Area(ha)	168457.3	260383.6	265416.8	316575.7	288547.9
占比 Proportion(%)	13.0	20.0	20.4	24.4	22.2

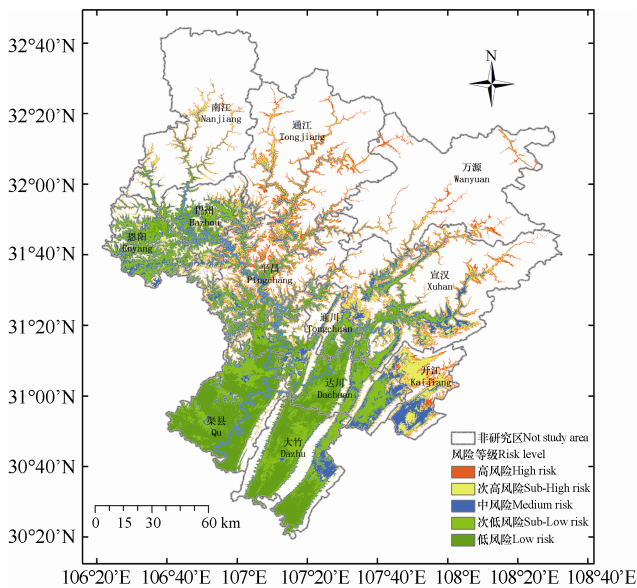


图 5 渠江中上游区域羊肚菌冷害风险区划

Fig. 5 Risk zoning of *Morchella* chilling injury in middle and upper reaches of Qu river

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)渠江中上游海拔 600m 以下地区 2-3 月空气与地面的最低温度差值平均为 1.0℃左右 (0.7~1.4℃)，南部小北部大，羊肚菌冷害风险温度指标为日最低气温≤2.0℃。羊肚菌冷害风险预警指标为日平均气温<6.0℃，此指标与羊肚菌生长的下限温度基本一致，数据资料易获取，便于开展羊肚菌专业气象服务。

(2)羊肚菌冷害年发生频次为 10 年 7 遇至 1 年 1 遇，主要发生在 2 月上旬-3 月上旬，冷害过程发生频次和强度逐旬减小，其中 2 月上中旬发生频次

较高，约占总频次的 70%。冷害过程持续日数以 1~3d 为主，占总过程数的 82%~89%，最长过程日数 6~8d；极端最低气温-4.4~-0.3℃，平均积寒 0.0~1.17℃·d，最大积寒值 2.20~3.64℃·d。

(3)羊肚菌冷害风险等级自南向北、自低向高增加。中低风险区主要分布在中南部海拔 520m 以下的低山浅丘河谷区，面积约占 2/3；次高和高风险区主要分布在北部海拔 520-600m 的低山高丘河谷区，面积约占 1/3。

(4)将羊肚菌原基分化期调控至 2 月下旬以后，冷害频次降至约 3 年 2 遇，冷害强度明显降低，其危害明显减小。

(5)栽培地选址和设施大棚搭建方式对羊肚菌冷害有不同的影响效应。局地地形对小气候的影响可根据海拔高度和是否有利于南下冷空气流动与聚集进行综合判断，而利用黑色遮阳网搭建的栽培设施，因辐射降温幅度增大，冷害降温过程会加重对羊肚菌的损害。

3.2 讨论

(1)研究确定了渠江中上游海拔 600m 以下地区羊肚菌的冷害致灾因子、风险指标和安全生产的平均气温下限，划分了羊肚菌冷害气候风险等级，相关结果与实际基本相符，可以作为研究区内羊肚菌生产规划、冷害动态评估、防灾减灾的气象依据。

就生物特性和栽培技术而言，羊肚菌可以种植在渠江中上游海拔 600m 以上山区，因出菇季节较晚，昼夜温差随海拔升高而增大，冷害、春季连阴雨、风害等灾害增多，强度增大，商品化栽培风险较高，海拔越高，风险越大，这些灾害风险还有待进一步调查研究。

(2) 由于不同地域的气候背景、栽培小气候环境、羊肚菌生育期等存在差异以及冷害过程的多样性和复杂性,研究确定的羊肚菌冷害指标和风险等级指标在不同地区不一定完全适用,应用时需根据当地实际和冷害天气状况进行适度调整。

(3) 受资料不足所限,未分析羊肚菌产量或品质与致灾因子、综合指数之间的相关性,冷害指标和风险等级与实际情况可能存在一定误差,有待通过收集生产资料、增加试验,进一步开展验证分析,提高相关指标的可靠性和准确性。

(4) 羊肚菌不同冷害类型的气候特征及影响程度存在一定差异,差异大小可能与温度动态变化、水分、土壤热容量、风等多种因素有关,有待通过试验收集资料,开展相关影响研究,为羊肚菌冷害预警预报服务提供更有指导意义的结论。

参考文献 References

- [1] 卯晓岚.中国大型真菌[M].郑州:河南科学技术出版社,2000:315.
Mao X L.Chinese large fungi[M].Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2000: 315.
- [2] 于冬梅,尤文忠,张悦,等.羊肚菌人工栽培研究进展[J].辽宁林业科技,2018(2):48-51.
Yu D M,You W Z,Zhang Y,et al.Progress in artificial cultivation of *Morchella* spp.[J].Liaoning Forestry Science and Technology,2018(2): 48-51.
- [3] 杜习慧,赵琪,杨祝良,等.羊肚菌的多样性、演化历史及栽培研究进展[J].菌物学报,2014,33(2):183-197.
Du X H,Zhao Q,Yang Z L,et al.Research progress on diversity,evolutionary history and cultivation of *Morchella* spp[J].Mycosystema,2014,33(2): 183-197.(in Chinese)
- [4] 彭卫红,唐杰,何晓兰,等.四川羊肚菌人工栽培的现状分析[J].食药菌,2016,24(3): 145-150.
Peng W H,Tang J,He X L,et al.Analysis on the current situation of artificial cultivation of *Morchella* spp.in Sichuan[J].Edible and Medicinal Mushrooms,2016,24(3): 145-150.(in Chinese)
- [5] 赵琪,徐中志,程远辉,等.尖顶羊肚菌仿生栽培技术[J].西南农业学报,2009,22(6): 1690-1693.
Zhao Q,Xu Z Z,Cheng Y H,et al.Bionic cultivation of *Morchella conica*[J].Southwest China Journal of Agriculture Science, 2009,22(6): 1690-1693.(in Chinese)
- [6] 程远辉,赵琪,杨祝良,等.利用圆叶杨菌材栽培羊肚菌初报[J].中国农学通报,2009,25(21): 170-172.
Cheng Y H,Zhao Q,Yang Z L,et al.Brief of *Morchella* spp. planting by *Populus bonatii* Material[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(21): 170-172.(in Chinese)
- [7] 刘伟,张亚,何培新,等.我国羊肚菌人工大田栽培新技术[C].中国菌物学会 2015 年学术年会,2015:252.
Liu W,Zhang Y,He P X,et al.New technology of artificial field cultivation of *Morchella* spp.in China[C].2015 Annual Academic Conference of Chinese Academy of Fungi,2015: 252.(in Chinese)
- [8] Murata T.Physiological and biochemical studies of chilling injury in bananas[J].Physiologia Plantarum,1969(22): 401-411.
- [9] Ding C K,Wang C Y,Growth K C,et al.Jasmonate and salicylate induce the expression of pathogenesis-related protein genes and increase resistance to chilling injury in tomato fruit[J].Planta,2002,214: 895-901.
- [10] Pesis E,Marinansky R,Zauberman G,et al.Prestorage low oxygen atmosphere treatment reduces chilling injury symptoms in 'Fuerte' avocado fruit[J].Hort Science,1994,29: 1042-1046.
- [11] Lyons J M,Raison J K.Oxidative activity of mitochondria isolated from plant tissues sensitive and resistant to chilling injury[J].Plant Physiology,1970,45: 386-389.
- [12] 王远皓,王春乙,张雪芬.作物低温冷害指标及风险评估研究进展[J].气象科技,2008,36(3):310-317.
Wang Y H,Wang C Y,Zhang X F.Research progress of crop chilling injury index and risk assessment[J].Meteorology Science and Technology,2008,36(3): 310-317.(in Chinese)
- [13] 王春乙,毛飞.东北地区低温冷害分布特征[M]//农作物低温冷害防御技术.北京:气象出版社,1999:9-15.
Wang C Y,Mao F.Distribution characteristics of low temperature chilling injury in northeast China[M]// Defense technology of crop low temperature chilling injury.Beijing: China Meteorological Press,1999:9-15.(in Chinese)
- [14] 元元福.东北低温冷害的分析研究[J].气象科技,2008,36(3): 310-317.
Qi Y F.Analysis and study of chilling injury in northeast China[J].Meteorological Science and Technology,2008, 36(3): 310-317.(in Chinese)
- [15] 马树庆,王琪,王连敏,等.水稻开花期不育评估模式的试验

- 研究[J].气象,2000,58(增刊):954-960.
- Ma S Q,Wang Q,Wang L M,et al.Experimental study on the evaluation model of rice sterility in flowering stage[J].Meteorology Monthly,2000,58(suppl): 954-960.(in Chinese)
- [16] 刘布春,王石立,庄立伟,等.基于东北区域动力模型的低温冷害预报应用研究[J].应用气象学报,2003,14(5):616-625.
- Liu B C,Wang S L,Zhuang L W,et al.Application research of chilling injury prediction based on Northeast regional dynamic model[J].Chinese Journal of Applied Meteorology, 2003,14(5): 616-625.(in Chinese)
- [17] 郭建平,高素华.东北地区农作物热量年型的划分与指标的确定[M]//农作物低温冷害防御技术.北京:气象出版社,1999:158-164.
- Guo J P,Gao S H.Division and determination of crop caloric year type and index in Northeast China [M]//Technology for preventing crop damage in low temperature.Beijing: China Meteorological Press,1999:158-164.(in Chinese)
- [18] 李祎君.吉林省玉米低温冷害预测技术研究[D].北京:中国气象科学研究院,2005.
- Li H J.Research on prediction technology of maize chilling injury at low temperature in Jilin Province[D].Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences,2005.(in Chinese)
- [19] 霍治国,杜尧东,姜燕,等.QX/T 80-2007 香蕉和荔枝的冻害等级[S].北京:中国气象出版社,2007.
- Huo Z G,Du Y D,Jiang Y,et al.QX/T 80-2007 Frost damage grade of banana and litchi[S].Beijing: China Meteorological Press,2007.(in Chinese)
- [20] 匡昭敏,容军,李莉,等.QX/T 168-2012 龙眼寒害等级[S].北京:中国气象出版社,2012.
- Kuang Z M,Rong J,Li L,et al.QX/T 168-2012 classification of chilling injury in Longan[S].Beijing: China Meteorological Press,2012.(in Chinese)
- [21] 熊弦子,唐力生,王华,等.莲雾苗低温危害等级划分标准初探[J].中国农业气象,2016,37(6):700-710.
- Xiong X Z,Tang L S,Wang H,et al.Effects of low temperature stress on *Syzygiums amarangense* seedlings and its cold(frozen)injury grades index[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(6): 700-710.(in Chinese)
- [22] 王春乙,蔡菁菁,张继权.基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]农业工程学报,2015,(6): 238-245.
- Wang C Y,Cai J J,Zhang J Q.Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China[J].Transactions of the CSAE,2015,(6):238-245.(in Chinese)
- [23] 霍治国,李世奎,王素艳,等.主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J].自然资源学报,2003,18(6):692-703.
- Huo Z G,Li S K,Wang S Y,et al.Study on the risk evaluation of main agrometeorological disaster and their application[J].Journal of Natural Resources,2003,18(6): 692-703.(in Chinese)
- [24] 张建敏.农业气象灾害风险估算方法初探[C]//中国农业灾害风险评价与对策.北京:气象出版社,1999:176-182.
- Zhang J M.Preliminary study on the risk estimation method of agricultural meteorological disasters[C] //Risk assessment and strategies of agricultural disasters in China.Beijing: China Meteorological Press,1999: 176-182. (in Chinese)
- [25] 梁立江,武永峰,刘聪,等.东北地区不同熟性水稻适宜种植区障碍型冷害时空变化[J].中国农业气象,2020,41(5): 308-319.
- Liang L J,Wu Y F,Liu C,et al.Temporal and spatial distribution of sterile-type chilling damage in rice growth-suited areas with different maturity in Northeast China [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(5): 308-319. (in Chinese)
- [26] 叶佩,刘可群,申双和,等.湖北省冬播马铃薯苗期冻害风险区划[J].中国农业气象,2020,41(3):162-172.
- Ye P,Liu K Q,Shen S H,et al.Seedling freezing risk regionalization of winter-sowing potato in Hubei province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(3): 162-172.(in Chinese)
- [27] 李娜,霍治国,贺楠,等.华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划[J].应用生态学报,2010,21(5):1244-1251.
- Li N,Huo Z G,He N,et al.Climate risk zoning of banana and litchi's chilling injury in South China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(5): 1244-1251.(in Chinese)
- [28] 刘锦奎,杜尧东,毛慧琴.华南地区荔枝寒害风险分析与区划[J].自然灾害学报,2003,12(3):126-130.
- Liu J L,Du Y D,Mao H Q.Risk analysis and regionalization of litchi chilling injury in South China[J].Chinese Journal of Natural Disasters,2003,12(3): 126-130.(in Chinese)
- [29] 杨凯,陈彬彬,陈惠,等.基于寒害过程的福建芒果种植气候风险区划[J].中国农业气象,2019,40(11):723-732.
- Yang K,Chen B B,Chen H,et al.Climatic risk regionalization of

- mango planting in Fujian province based on cold injury process[J].Chinese Journal of Agrometeorology ,2019,40(11): 723-732.(in Chinese)
- [30] 崔读昌.关于冻害、寒害、冷害和霜冻[J].中国农业气象,1999,20(1):56-57.
- Cui D C.On freezing injury,cold injury,cold injury and frost damage[J].Chinese Journal of Agrometeorology,1999,20(1): 56-57.(in Chinese)
- [31] 刘伟,张亚,何培新.羊肚菌生物学与栽培技术[M].长春:吉林科学技术出版社,2017:34.
- Liu W,Zhang Y,He P X.Biology and cultivation techniques of *Morchella* spp.[M].Changchun:Jilin Science and Technology Press,2017: 34.(in Chinese)
- [32] 尹卫东,张江萍,付丽娇,等.北方羊肚菌人工栽培技术[J].山西林业科技,2017(2):49-50.
- Yin W D,Zhang J P,Fu L J ,et al.Artificial cultivation technology of North *Morchella* [J].Shanxi Forestry Science and Technology,2017(2): 49-50.(in Chinese)