Spatio-Temporal Characteristics and Hazard Assessment of Chilling Injury on Millet in Northern China

Sicheng Wei[1], Yueting Yang[1], Kaiwei Li[1], Jiquan Zhang[1,*]

[1] *School of Environment, Northeast Normal University, Changchun, 130024, China*
[*]*Corresponding author. Email: zhangjq022@nenu.edu.cn*

ABSTRACT
Under the background of climate change, agricultural meteorological disasters occur frequently in northern China, which has seriously threatened the production safety of millet in this area. Therefore, it is urgent to find out the danger of major agricultural meteorological disasters in millet, and provide reference for the formulation of measures for preventing and reducing millet disasters. The chilling injury which has great influence on millet was selected as the disaster-causing factor, and based on the meteorological data of 314 meteorological stations in the first millet planting area of northern China from 1960 to 2019, combined with the data of millet growth period, the chilling injury was identified and quantified. Using the method of index discrimination combined with disaster data, the weight coefficient was extracted from the influence differences of different growth periods and different chilling injury degrees in typical disaster years, and the risk assessment of millet chilling injury in northern China was carried out to preliminarily explore its response to climate change. The results show that: (1) In the whole growth period of millet, severe chilling injury mainly occurred, with the highest frequency in the early growth period and the lowest frequency in the late growth period. The high incidence areas of chilling injury were located in Northeast China and Gansu Province. (2) The areas with high risk of chilling injury in each growth period are similar to those with high disaster value. From the whole growth period, the risk of chilling injury in most areas in the study area is below moderate, and it shows the spatial distribution characteristics of high in the north and low in the south, high in the west and low in the east. (3) The interdecadal change of millet chilling injury risk is basically consistent with the change of climate resources, showing negative feedback response.

Keywords: *millet, Chilling injury, hazard assessment.*

中国北方谷子低温冷害时空特征及危险性评价

魏思成 [1], 杨月婷 [1], 李凯伟 [1], 张继权 [1,*]

[1] *东北师范大学环境学院*
[*] *通讯作者. 电子邮箱：zhangjq022@nenu.edu.cn*

摘要
在气候变化背景下中国北方农业气象灾害频发、连发，已经严重地威胁到该地区谷子的生产安全，因此亟需弄清谷子主要农业气象灾害的危险性，为谷子防灾、减灾措施的制定提供参考。选取对谷子影响较大的冷害作为致灾因子，以中国北方谷子一作区 314 个气象站点 1960-2019 年的气象资料为基础，结合谷子生育期资料，判别并量化冷害；利用指标判别与灾情资料结合的方法，从典型灾害年中提取不同生育期不同程度冷害的影响差异构成权重系数，开展中国北方谷子冷害危险性评价，并初步探究其对气候变化的响应。结果表明：（1）谷子全生育期内总体以重度冷害为主，在生育前期发生频率最高，生育后期发生频率最低，冷害高发区

© The Author(s) 2023
S. Qiao et al. (Eds.): RAC 2022, AEBMR 248, pp. 239–246, 2023.
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-194-4_34

位于中国东北地区和甘肃省。（2）各生育期冷害高危险性地区与灾害值高值区范围相似，从全生育期危险性来看，研究区内绝大多数地区低温冷害危险性在中度以下，并且呈现出北高南低、西高东低的空间分布特征。（3）谷子低温冷害危险性的年代际变化与平均温度的变化情况基本一致，表现出负反馈的响应。

关键字：*谷子，低温冷害，危险性评价.*

1. 引言

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告中指出，全球温度持续升高，气候系统发生了广泛而快速的变化，低温冷害等极端天气事件发生概率增加[1-2]。作为农业大国，中国的自然灾害事件对农业生产有着严重的影响。由于中国北方纬度较高，极端天气气候事件增多，使该地区成为了粮食产量波动最大的区域之一[3-4]。

谷子是重要的经济作物，有着广泛的用途，对提高经济、脱贫攻坚方面都有着重要作用。中国北方谷子的播种面积和产量均占全国 90%以上[5]。然而低温冷害给谷子的生长发育以及产量都带来了严重影响[6]。因此，识别谷子低温冷害特点，定量评估低温冷害危险性是谷子防灾减灾环节中迫切需要解决的问题。

灾害危险性是灾害风险体系中重要的组成部分，指对农作物造成危险的气象因子的异常程度[7]。目前有关低温冷害危险性评价的研究主要分为以下两类。一是采用气象指标作为致灾因子识别指标进行危险性评价。朱红蕊等根据霜冻灾害的形成机制，选取日最低气温 ≤ 0 ℃作为水稻霜冻害指标，综合运用 GIS 空间分析和灾害风险评估等方法，分析黑龙江省水稻初霜冻灾害的灾情特征和危险性分布[8]；王秀珍等选择冷积温作为低温冷害指标，并通过不同生长时期的冷积温与气象因子、地形因子的相关性确定各阶段的权重系数，并以此进行危险性评价[9]。然而气象指标没有考虑作物本身，所以开发一种针对特定作物进行灾害识别的指标就显得十分重要。杨若子等选择热量指数、水分亏缺指数和 Z 指数作为低温冷害、干旱灾害和洪涝灾害的识别指标，结合最大熵模型对东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性进行评估[10]；然而，即使目前已结合特定作物开发出了对其适用的灾害指标，能够准确识别灾害特征。但是作物不同生育阶段受到的不同程度的灾害对最终产量的形成存在差异，忽略这些将会影响危险性评价结果的准确性。

综上所述，对粮食作物危险性的研究逐渐趋于完善[11-13]，但对经济作物的研究较少。为了填补这一研究空白，本研究以中国北方谷子为研究对象，从灾害风险体系中的农业气象灾害危险性这一角度出发，结合谷子生长发育特征选取指标分析研究低温冷害的发生规律和时空分布特征，并在此基础上根据灾害发生的强度和频率，结合不同生育期不同程度冷害的影响差异，构建谷子低温冷害危险性评价模型，并进行危险性评价，研究结果可为科学规划和管理谷子生产，提高气象防灾、减灾效果提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区选择中国北方谷子主产区，地理位置介于北纬 31° 23′ ～53° 33′ 和东经 93° 13′ ～135° 05′ 之间，覆盖了东北春谷区、华北夏谷区以及西北春谷区，总面积约 338.75 万 km^2。谷子通常于 5 月播种，9 月收获。此阶段研究区内大部分地区热量资源丰富，日照充足，降水充沛，具有适合谷子种植的气候条件[14]。

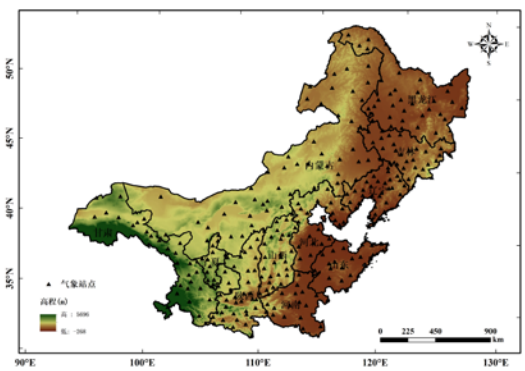

图 1 研究区气象站点分布

2.2. 数据

研究区域的气象数据来源于国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)，包括中国北方地区 11 个省份 314 个气象站 1960-2019 年观测所得的逐日平均温度(℃)、日最高温(℃)、日最低温(℃)等。历史灾情数据主要来自研究区各省《气象灾害大典》及中国气

象灾害年鉴。作物数据来源于研究区内各省市 1961-2020 年统计年鉴，包括 1960-2019 年中国北方地区谷子的播种面积、年产量、年平均单产数据。生育期数据采用多年同一生育期平均值反映当地生育期的一般日期。

2.3. 方法

2.3.1. 低温冷害指标

低温冷害是中国北方地区对喜温作物谷子生长发育及产量造成直接影响的因素之一，一般会造成谷子减产、品质下降、颗粒不饱满等，严重时甚至可导致谷子绝收[15]。而目前北方各地区关于谷子低温冷害指标的相关研究报道较少，且多局限于某一区域的研究，但中国北方地区纬度跨越较大，地形地势、海拔高度的不同，气候要素存在一定的地域差异，因此本研究选择热量指数距平百分率作为谷子的低温冷害指标，判断分析不同生育阶段冷害的发生情况。具体计算过程和公式如下：

第一步：计算不同生育阶段的热量指数

热量指数结合谷子的生长发育特性，考虑谷子不同生育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度，能够反映农作物对环境热量状况的响应。将逐日热量指数的平均值作为生育阶段的热量指数，反映不同生育阶段热量条件对作物生长发育的影响[16]。

$$F(T)=\frac{(T-T_1)(T_2-T)^B}{(T_0-T_1)(T_2-T_0)^B} \tag{1}$$

$$B=\frac{T_2-T_0}{T_0-T_1} \tag{2}$$

式中：T 为日平均温度；T_0、T_1、T_2 分别为某日所在生育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度。

第二步：计算热量指数距平百分率

$$Ici=\frac{F(T)_i-\overline{F(T)}}{\overline{F(T)}}\times 100\% \tag{3}$$

式中：I_{ci} 为第 i 阶段冷害指数，$F(T)_i$ 为第 i 阶段热量指数，$\overline{F(T)}$ 为该站历年热量指数平均值。

采用聚类分析将各站各年的冷害指标分成 4 类，以此确定冷害等级划分标准（表 1）。

表 1 热量指数距平百分率冷害等级划分标准

冷害等级	I_{ci}
无冷害	$I_{ci}>-0.05$
轻度冷害	$-0.1<I_{ci}\leq-0.05$
中度冷害	$-0.15<I_{ci}\leq-0.1$
重度冷害	$I_{ci}\leq-0.15$

2.3.2. 冷害特征指标

(1) 冷害频率

冷害频率(P_i)[17]指发生冷害的年数占总年数的百分比，可代表冷害发生的频繁程度，本研究利用 I_{ci} 对冷害发生情况进行识别，以此计算不同生育阶段不同程度冷害发生的频率，具体计算公式如下：

$$Pi=\frac{n}{N}\times 100\% \tag{4}$$

式中：n 为某站点在某生育阶段发生某种程度灾害的年数，N 为总年数。

(2) 减产率

一般农作物的实际产量 Y 可以分离为三个部分，即随社会生产水平提高的趋势产量，随历史气象条件波动的气象产量和一般忽略不计的随机“噪声”[18]。

$$y=y_t+y_w+\varepsilon \tag{5}$$

式中：y 为谷子单产，y_t 为趋势产量，y_w 为气象产量，ε 为随机“噪声”。

利用直线滑动平均法对趋势产量进行模拟，并根据公式（6）计算相对气象产量 y_r。相对气象产量是一个相对值，表明实际粮食单产偏离趋势产量的程度。当实际产量低于趋势产量，即相对气象产量为负值时为减产，实际单产低于趋势产量的百分率称为“减产率”。

$$y_r=\frac{y_w}{y_t}\times 100\% \tag{6}$$

2.3.3. 危险性评价模型的建立

对于谷子低温冷害危险性而言，冷害发生的强度越大，频次越高，危险性就越高。所以用强度和频次的乘积来表示危险性，其中灾害强度用灾损系数表示。由于谷子在不同生育阶段遭受不同程度冷害对于谷子产量的影响是不同的，本研究利用冷害指标判定的研究区各站点冷害发生的情况为基础，结合各站点的历年灾情资料，筛选出单独于生育前期、生育中期和生育后期发生轻、中、重度冷害导致减产(减产率≥5%)的年份，以此计算各生育阶段各等级冷害出现时的平均减产率，并定义某一生育阶段某等级冷害的灾损系数（表 2）为某一生育阶段某等级冷害出现时的平均减产率比各生育阶段各等级冷害造成的平均减产率之和，即

$$W_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}y_{ij}} \tag{7}$$

式中：W_{ij} 为第 i 生育阶段第 j 等级冷害的灾损系数，Y_{ij} 为第 i 生育阶段第 j 等级冷害造成的平均减产。

因此，各生育阶段冷害危险性模型表示为：

$$H_{xi} = \sum_{j=1}^{3} P_{ij} \times W_{ij} \tag{8}$$

$$H_x = \sum_{i=1}^{3} H_{xi} \tag{9}$$

式中：H_{xi}为第 i 生育期冷害危险性，P_{ij}为第 i 生育阶段第 j 等级冷害发生的频率，W_{ij}为第 i 生育阶段第 j 等级冷害的灾损系数，H_x为谷子全生育期冷害危险性。

表 2 谷子不同生育阶段低温冷害灾损系数

	轻度冷害	中度冷害	重度冷害
生育前期	0.08	0.20	0.36
生育中期	0.01	0.06	0.11
生育后期	0.03	0.06	0.12

3. 结果分析

3.1. 低温冷害分布特征

为了分析中国北方谷子生长季低温冷害空间分布特征，利用热量指数距平百分率对谷子冷害进行识别，并结合等级划分对谷子不同生育阶段不同程度冷害频率进行计算。空间分布图由 ArcGIS 中的反距离权重插值法完成，设置空间插值分辨率为 0.1°×0.1°。

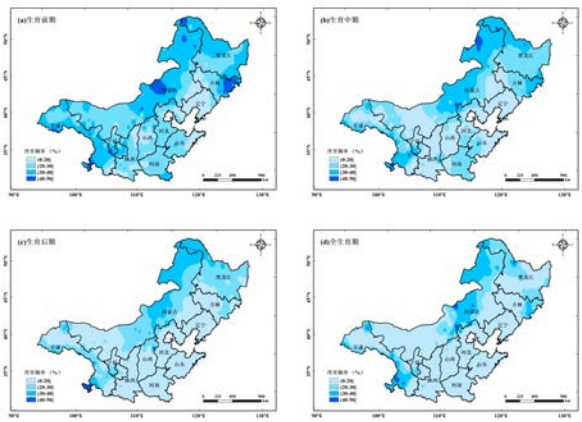

图 2 1960-2019 年中国北方谷子不同生育阶段低温冷害发生频率

1960-2019 年，中国北方谷子低温冷害的发生频率总体上较低，除生育前期外绝大多数地区发生低温冷害的频率在 30%以下。较高频率多出现在研究区北部的寒冷地区和甘肃西部的祁连山区、青藏高原边缘地带、六盘山地等高海拔地区。其中，在生育前期，低温冷害发生频率最高，发生频率在 30%-40%的地区分布广泛，占研究区总面积的 38.94%，内蒙古、黑龙江、吉林和甘肃分布较多；发生频率在 40%-50%的地区相对较少，仅占研究区总面积的 4.05%，主要分布在内蒙古北部、黑龙江北部和吉林东部。在生育中期，发生频率在 30%-40%的地区较生育前期有所减少，其占研究区总面积的 25.28%，仍主要分布在内蒙古、黑龙江、吉林和甘肃四省；发生频率在 40%-50%的地区零星分布，仅占研究区总面积的 1.11%。在生育后期低温冷害发生频率最低，53.30%的地区低温冷害发生频率低于 20%；发生频率在 30%以上的地区主要分布在内蒙古北部、黑龙江北部和甘肃西部，面积占研究区总面积的 15.23%。在整个生育期内，低温冷害发生频率在 30%-40%的地区占研究区总面积的 13.82%，主要分布在内蒙古、甘肃两地；发生频率在 40%-50%的地区几乎没有，仅占研究区总面积的 0.66%。

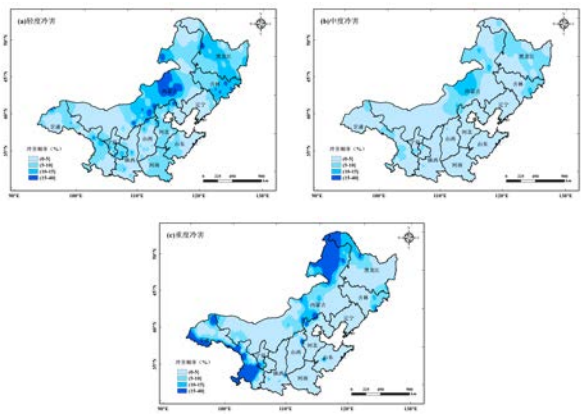

图 3 1960-2019 年中国北方谷子全生育期不同程度低温冷害发生频率

1960-2019 年，中国北方谷子全生育期不同程度低温冷害发生的频率均在 0-40%之间。其中，轻度冷害发生频率最高，研究区 22.67%的区域发生频率在 10%以上，分布较为分散，发生频率在 15%-40%的区域以内蒙古中部为主，发生频率在 10%-15%的区域以内蒙古、黑龙江、吉林和甘肃四地为主。中度冷害发生频率最低，研究区全域发生频率在 15%以下；发生频率在 10%-15%的区域仅占研究区总面积的 3.15%，零散分布在内蒙古、吉林两地；发生频率在 5%-10%的区域所占面积较大，主要分布在甘肃中部、内蒙中部、黑龙江中部和吉林东部。重度冷害发生频率较高，研究区 21.02%的区域发生频率在 10%以上，主要分布在内蒙古北部、黑龙江北部和甘肃西部；其他区域发生频率多数在在 0-5%之间。

3.2. 低温冷害危险性评价

根据冷害危险性模型，计算得到研究区冷害的危险度，利用 ArcGIS 软件中的反距离权重插值（IDW）进行空间插值，设置空间插值分辨率为 0.1°×0.1°，得到中国北方谷子冷害危险性空间分布图。随后对其进行归一化处理，利用自然断点法将研究区谷子低温冷害危险性划分为低危险性、中危险性和高危险性 3 个等级。分析谷子各生育阶段的冷害危险性，等级划分标准如表 3 所示。

表 3 干旱、冷害危险性等级划分标准

灾害类型	冷害
轻危险性	$H_x<0.40$
中危险性	$0.40\leq H_x<0.60$
高危险性	$H_x\geq 0.60$

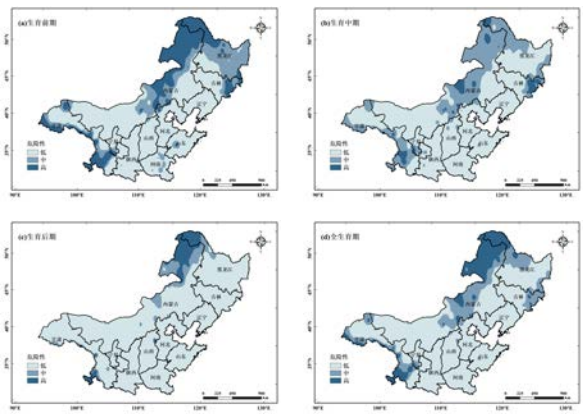

图 4 1960-2019 年中国北方谷子不同生育阶段低温冷害危险性分布

在生育前期，研究区内谷子低温冷害以中、低危险性为主，其所占面积达研究区总面积的 79.42%；谷子低温冷害高危险性区域主要分布在内蒙古、黑龙江、吉林和甘肃四省，面积相对较小。在生育中期，研究区内谷子低温冷害低危险性区域较生育前期有所增大，其面积占研究区总面积的 66.61%，以研究区南部为主；中、高危险性区域分布在内蒙古北部、黑龙江北部、吉林东部和甘肃西部，其中高危险性区域所占面积极小，仅占研究区总面积的 4.00%。在生育后期，研究区内谷子低温冷害以低危险性为主，其所占面积达研究区总面积的 85.47%,；中、高危险性区域主要存在于内蒙古北部、黑龙江北部与甘肃西南部等地，其中高危险性区域所占面积较小，面积仅占研究区面积的 7.00%。总体而言，在谷子全生育期内，谷子低温冷害危险性呈现北高南低、西高东低的空间分布特征；高危险性区域零星分布在内蒙古、黑龙江、吉林和甘肃。中危险性区域分布较为集中，多数存在于东北地区北部和甘肃西部，约占研究区总面积的 17.81%；低危险性区域分布最为广泛，所占面积达总面积的 68.45%。

3.3. 低温冷害危险性评价结果验证

利用历年平均受冷害影响面积与谷子历年平均减产率来验证危险性区划结果的可靠性。

（1）历年平均受灾面积

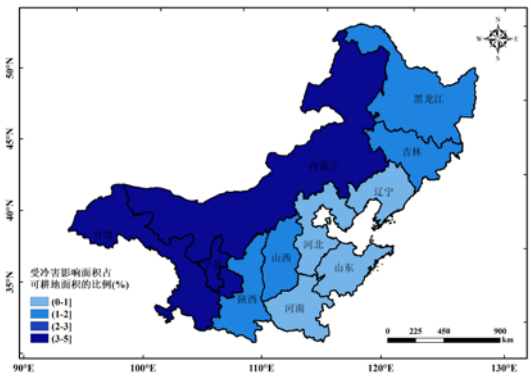

图 5 1960-2019 年中国北方冷害平均受灾面积比分布

图 5 为 1960-2019 年中国北方平均受冷害影响面积比分布。可以看出，受冷害面积比低的地区主要分布在研究区中东部，受冷害面积比高的地区主要分布在内蒙、甘肃两省，与冷害危险性评价结果基本一致。冷害受灾面积是指因冷害减产一成以上的农作物播种面积，农作物包括玉米、小麦、水稻等。与上述农作物相比，谷子的种植面积相对较小，冷害受灾面积主要原因不是谷子受冷害所导致的，因此其空间分布与谷子冷害危险性评价结果存在一定差异。

（2）历年平均减产率

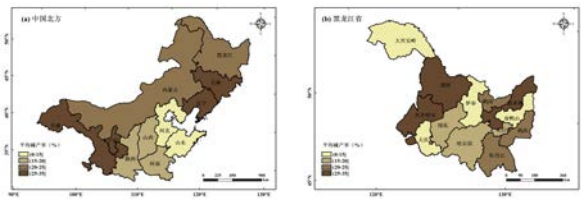

图 6 1960-2019 年中国北方谷子平均减产率分布

图 6 为 1960-2019 年中国北方谷子平均减产率分布，由图 6（a）可见，中国北方谷子平均减产率与谷子冷害危险性评价结果基本一致。然而，由于谷子在其生长发育过程中会受多种灾害的影响，如干旱等。因此，个别地区谷子减产率的直接影响因素是干旱灾害，这也导致了其空间分布与谷子冷害危险性评价结果存在一定差异。随后，为了更精细化的评价冷害危险性评价结果，选取受冷害影响严重的黑龙江省进行进一步的验证。由图 6（b）可见，黑龙江省平均减产率高的地区主要分布在西北部与东南部地区，与冷害高危险性区域基本一致，其中北部的大兴安岭地区处于多年冻土带，未有谷子种植，因此无减产率。

以上的两种验证结果和建立的谷子冷害危险性指标、模型及危险性所得到的结论虽局地存在差异，但整体上比较合理，与实际发生情况吻合，评价结果较为准确。

3.4. 谷子低温冷害危险性对气候变化的响应

中国北方主要属于温带季风气候区，各区域地貌类型差异大，受大气环流和季风影响复杂[19]。复杂的热量资源差异中国北方谷子低温冷害危险性分布格局复杂的主要因素之一。因此分 1960-1989 年、1990-2019 年 2 个时间段对中国北方谷子低温冷害危险性的空间分布和对气候变化的年代际响应进行分析。

（1）热量资源空间变化特征

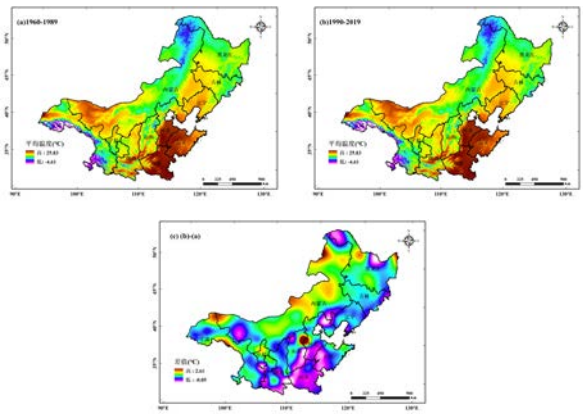

图 7 1960-1989 年与 1990-2019 年中国北方谷子生长季平均温度空间分布对比

1960-2019 年谷子生长季平均温度在空间上总体表现出南高北低的分布。随着全球气候变化，中国北方地区气温存在明显的上升趋势，但升温具有明显的区域性差异，增温最明显的是内蒙古北部，其次是甘肃南部，在研究区南部温度出现小幅度下降。

（2）谷子低温冷害危险性空间变化特征

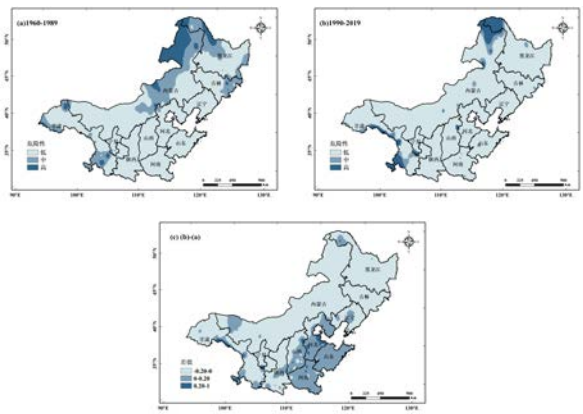

图 8 1960-1989 年与 1990-2019 年中国北方谷子生长季低温冷害危险性空间分布对比

两个时间段谷子低温冷害危险性变化与对应地区谷子生长季平均温度的年代际变化趋势大体一致。由于气候变暖，中国北方谷子低温冷害危险性总体呈减弱趋势，东北地区低温冷害高危险性区域显著减少。而对于研究区南部地区来说，1990-2019 年（后 30a）谷子生长季平均温度较 1960-1989 年（前 30a）有小幅度减少，其谷子低温冷害危险性有所增大，但因其前30a危险性极小，所以该地区仍为谷子低温冷害低危险性地区。

（2）谷子低温冷害危险性与气候资源的相关关系

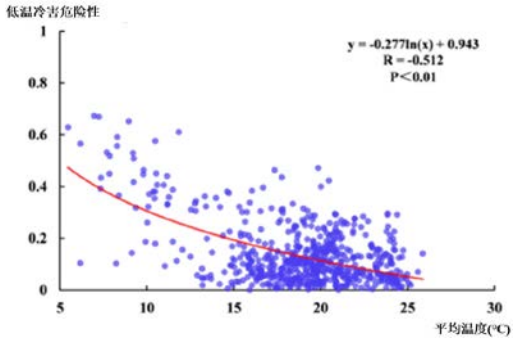

图 9 谷子低温冷害危险性与平均温度的相关关系

谷子低温冷害危险性与平均温度表现出负反馈的响应，并均达到极显著水平(P＜0.01)。谷子生长季平均温度的波动范围在 5-26℃之间，大部分地区平均温度处于 15-25℃之间，谷子低温冷害危险性随着生长季平均温度的升高呈现明显的减小趋势。总体而言，随着气候变暖，中国北方地区趋于暖干化，低温冷害危险性有所降低。

4. 讨论

冷害是中国北方典型的自然灾害，发生频率高，影响范围广，对农业生产会造成严重影响。本研究通过选取合理的灾害识别指标，对中国北方谷子冷害进行了危险性评价。基于热量指数的冷害指标，结合作物的生长发育特性，考虑作物不同生育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度，能够反映作物对环境热量状况的响应，并且利用热量指数距平率能够避免地区间差异给冷害指标判别带来的影响。

在危险性模型的构建上，考虑到不同生育阶段不同程度冷害对谷子生长发育的影响不同，因此引入权重系数，从而可以更加细致地描述危险性的构成因素。在权重的确定上，采用指标判别与灾情资料结合的方法，利用典型年份的冷害发生情况和减产率资料，得出某一生长阶段某一等级冷害所造成的减产情况，能够更加准确地描述谷子低温冷害。通过历年平均受冷害面积与历年平均减产率的空间分布对谷子冷害危险性评价结果进行对比验证，结果表明评价结果与实际发生情况较为吻合，构建的危险性模型较为可靠。

本研究结果显示，中国北方谷子冷害危险性总体较低，但部分地区仍具有较高的危险性。其中内蒙古、黑龙江、吉林、甘肃四省是冷害高危险区。内蒙古、黑龙江、吉林地处于中国东北地区，由于纬度较高，东北地区热量资源有限，且年际变化较大，易发生低温冷害，造成农作物减产；而甘肃西部的

祁连山区、青藏高原边缘地带、六盘山地等地区海拔高，热量资源匮乏，冷害频发。除此之外，从谷子不同生育阶段来看，冷害在生育前期危险性最大。这是因为谷子生育前期无法忍受1~2℃低温，使出苗的谷子出现死亡[20]。在气候变化背景下，极端农业气象灾害事件频发、连发，使得谷子在生长过程中经常遭遇不少于一种农业气象灾害的威胁。目前已有研究表明[21]，干旱和低温冷害同时发生的影响大于两种灾害单独发生造成影响的总和。在未来的研究中，应对谷子干旱、冷害的综合危险性进行评估，从而为科学地规划和管理谷子生产，最大限度地提高气象防灾、减灾效果提供依据。

农业气象灾害风险是指农业气象灾害发生情况及其给农业生产造成损失的可能性大小，既有自然属性，又有社会属性。灾害风险体系论认为农业气象灾害风险的大小是由农业气象灾害危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力这 4 个要素共同作用的结果[22]。文中重点分析了谷子各生育阶段冷害的危险性，未考虑谷子品种、研究区地理特点和人为因素的影响，未来拟结合谷子本身的脆弱性、承灾体的暴露性和防灾减灾能力进行更加全面的风险评估。

致谢

本研究由国家重点研究开发计划 “主要经济作物气象灾害风险评估与气候保障技术”（2019YFD1002201）支持。

参考文献

[1] Tollefson J. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years[J]. Nature, 2021, 596. DOI: https://doi.org/10.1038/d41586-021-02179-1

[2] Lesk, C., Rowhani, P., Ramankutty, N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J].Nature, 2016, 529(7584):84. DOI: https://doi.org/10.1038/nature16467

[3] Chen, Y., Zhang, Z., Wang, P., et al. Identifying the impact of multi-hazards on crop yield-A case for heat stress and dry stress on winter wheat yield in northern China[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 55-63. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.10.009

[4] Deng Z., Wang Q., Zhang Q., et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22):6278-6288. DOI: https://doi.org/10.1016/S1872-5813(11)60001-7

[5] 杨月婷,李凯伟,张继权,等.气候变暖背景下中国北方地区谷子生长季气候适宜性分析[J].中国农业气象,2022,43(03):215-228.

[6] 张敏,张剑.山西省谷子低温冷害风险评估与区划[J].科技与创新,2020(01):70-71+73.

[7] 王连喜,肖玮钰,李琪,孟丹,孔坚文.中国北方地区主要农作物气象灾害风险评估方法综述[J].灾害学,2013,28(02):114-119+130.

[8] 朱红蕊,于宏敏,姚俊英,等.黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J].灾害学,2012,27(02):96-99.

[9] 王秀珍,景元书,谢新乔,杨继周,李湘伟,朱云聪,胡保文,田育天,梅玲丽.玉溪烤烟低温冷害风险评价与区划[J].河南农业大学学报,2020,54(04):704-710.

[10] 杨若子,周广胜.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,2015,73(06):1141-1153.

[11] 郭晓梅,袁淑杰,王劲松,等.四川春玉米气象干旱致灾因子危险性[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(01):79-87+92.

[12] 李香颜,张金平.基于 GIS 的河南省小麦干热风时空分布特征及危险性分析[J].气象与环境科学,2017,40(02):49-54.

[13] 郭翔,赵金鹏,王茹琳,等.四川盆区直播和移栽水稻的连阴雨灾害危险性[J].应用生态学报,2021,32(09):3213-3222.

[14] 邓振镛,王强,张强,等.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J].生态学报,2010,30(22):6278-6288.

[15]崔婷茹,姚林玲,杨永星,等.高光低温气候条件下三种禾谷类作物的光合特性研究[J].湖北农业科学,2017,56(03):429-434.

[16] 王春乙,郭建平.农作物低温冷害综合防御技术的研究[J]. Annual Report of CAMS,1997(00):31-32.

[17] Hu Z., Wu Z., Islam, A., et al. Spatiotemporal characteristics and risk assessment of agricultural drought disasters during the winter wheat-growing season on the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143(3-4):1-15.

[18] 蔡菁菁,王春乙,张继权.东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价[J].气象学报,2013,71(05):976-986.

[19] 俄有浩,霍治国,马玉平.北方春小麦种植区小麦种植结构变化的气候依据与冻害风险[J].自然灾害学报,2015,24(05):149-159.

[20] 李国瑜,丛新军,陈二影,等.积温和降水量对夏谷生长发育的影响[J].核农学报,2018,32(01):165-176.

[21] 史培军,孙劭,汪明,等.中国气候变化区划(1961~2010 年)[J].中国科学:地球科学,2014,44(10):2294-2306.

[22] 王春乙,张继权,霍治国,等.农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J].气象学报,2015,73(01):1-19.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.