

寒地水稻开花期多雨寡照复合逆境灾损评估指标

吕佳佳^{1,2}, 初征^{1,2}, 郭立峰^{1,2}, 李宇光³, 刘旭⁴, 丁海玖⁵, 王秋京^{1,2}, 周宝才^{1,2}⁽¹⁾中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030; ⁽²⁾黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030;⁽³⁾黑龙江省生态气象中心, 哈尔滨 150030; ⁽⁴⁾黑龙江省气象数据中心, 哈尔滨 150030;⁽⁵⁾克山县气象局, 黑龙江齐齐哈尔 161600

摘要:黑龙江省是中国优质粳稻生产核心种植区, 开花期多雨寡照复合发生, 严重影响寒地水稻结实率和产量。为了保障国内优质稻米的供应及国家粮食安全, 本研究旨在构建一个针对多雨寡照复合发生的判别指标, 并定量评估其对产量的损失。通过整合气象数据、水稻生育期信息、产量资料以及历史灾情记录, 运用多层灰色关联分析法探究致灾因子、作物产量结构与相对气象产量之间的灰色映射关系。据此, 建立了寒地水稻多雨寡照复合指数(RSCI)和一个描述复合逆境与产量损失率关联度的模型。利用K-均值聚类分析方法和历史典型灾害年份数据确定了灾害的临界值和等级, 进而形成了评估多雨寡照复合发生导致产量损失的评估指标体系。本研究明确了寒地水稻在不同等级(轻度、中度、重度)多雨寡照条件下的临界阈值和相应的产量损失率, 历史灾情验证显示多雨寡照判别率达到100%, 产量损失率判别准确率超过80%。在1958—2021年间, 全省水稻不同程度多雨寡照的发生频率呈轻度高于中度高于重度的趋势, 且北部农区的发生频率高于南部农区。该研究成功构建了一套多雨寡照复合发生的判别指标, 为量化评估产量损失提供了重要的技术支撑。

关键词:黑龙江省; 寒地水稻; 优质粳稻; 开花期; 多雨寡照; 复合指数; 产量损失; 灰色关联分析; K-均值聚类分析

中图分类号: P467

文献标识码: A

论文编号: cjas2023-0189

Evaluation Index of Composite Adversity Disaster Damage of Rainy and Low Light at Rice Flowering Period in Cold Region

LV Jiajia^{1,2}, CHU Zheng^{1,2}, GUO Lifeng^{1,2}, LI Yuguang³, LIU Xu⁴,DING Haijiu⁵, WANG Qiujing^{1,2}, ZHOU Baocai^{1,2}⁽¹⁾Innovation and Opening Laboratory of Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin 150030, Heilongjiang, China; ⁽²⁾Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, Heilongjiang, China;⁽³⁾Heilongjiang Ecometeorological Center, Harbin 150030, Heilongjiang, China;⁽⁴⁾Meteorological Data Center of Heilongjiang Province, Harbin 150030, Heilongjiang, China;⁽⁵⁾Keshan Meteorological Station, Qiqihaer 161600, Heilongjiang, China)

Abstract: Heilongjiang Province serves as the primary cultivation region for high-quality japonica rice production in China. The occurrence of heavy rainfall during the flowering period significantly impacts the seed setting rate of rice in cold regions, resulting in a decrease in yield. It is important to establish the identification

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目“气候变化背景下黑龙江玉米生育期气候资源利用率评估研究”(LH2021D020); 黑龙江省气象局科技创新发展项目“寒稻生殖生长期冷涡型复合灾害产量损失评估指标”(HQ2023016); 中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金课题资助“东北冷涡对农业生产影响预报和风险预警研究”(2022SYIAEKFZD04-02)。

第一作者简介: 吕佳佳, 女, 1983年出生, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 生态与农业气象。通信地址: 150030 黑龙江省哈尔滨市香坊区电碳路71号黑龙江省气象科学研究所, Tel: 0451-55101013, E-mail: wfljj@163.com。

通信作者: 王秋京, 女, 1979年出生, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 生态与农业气象。通信地址: 150030 黑龙江省哈尔滨市香坊区电碳路71号黑龙江省气象科学研究所, Tel: 0451-55101013, E-mail: wfljj@163.com。

收稿日期: 2023-08-22, **修回日期:** 2024-03-21。

index of the occurrence of rainy and low light conditions and quantitatively assess the yield loss for ensuring the domestic supply of high-quality rice and national food security. In this study, a multi-layer grey correlation analysis method was adopted to investigate the grey relationship among disaster factors, crop yield structure and final yield by combining meteorological, growth period, yield data and disaster historical data, and to construct the rice rainy and low light composite index (*RSCI*) in cold region, and establish the correlation degree model between complex adversity and yield loss rate. Based on K-mean clustering analysis method and historical typical disaster years, the critical value and grade of disaster were determined, and the evaluation index of yield loss caused by rainy and low light weather was established. The critical threshold and yield loss rate of rice with mild, moderate and severe rainfall were studied. The results of historical disaster verification showed that the identification rate of rainy and low light was 100%, and the identification accuracy rate of yield loss rate was higher than 80%. From 1958 to 2021, the frequency of rice rainy and low-light disasters in different degrees in the province was as follows: mild was higher than moderate and severe, and the frequency of rice rainy and low-light disasters in the northern agricultural area was higher than that in the southern agricultural area. In this study, the identification index of the occurrence of rain and light combination was constructed to provide technical support for quantitative evaluation of yield loss.

Keywords: Heilongjiang Province; japonica rice; high-quality japonica rice; flowering period; rainy and low light combined damage; composite index; yield loss; grey relational analysis; K-means clustering analysis

0 引言

黑龙江省是中国最大的粳稻主产区,2019—2021年水稻播种面积均超过 $3.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总产量更是逐年提高,2021年达到 $2.91 \times 10^{10} \text{ kg}^{[1]}$,位居全国第一。独具优势的寒地黑土资源使其成为中国优质粳稻生产核心种植区^[2-4]。寒地水稻高产稳产在保障国内优质稻米供应和国家粮食安全方面意义重大。夏季是寒地水稻产量形成的关键生长期,然而,在全球气候变暖及大陆性季风气候影响下,多雨和寡照成为寒地水稻生产过程中频发的自然灾害^[5]。7月下旬—8月上旬是黑龙江省主汛期降水集中期,此时恰逢寒地水稻开花授粉期,是受气象因子影响的敏感时期。降雨主要造成花粉粒破裂和花药被雨水冲刷而影响受精;寡照主要影响水稻的库容,表现为颖花分化数减少、退化数增加^[6]。此时遭受多雨寡照复合逆境会使颖花退化和降低正常颖花的受精率,严重影响水稻结实率,导致减产^[7-8]。研究表明,抽穗后5 d内有超过(或等于)3 d出现日降水量大于等于5 mm会危害水稻结实^[9]。2009年黑龙江省出现多雨寡照天气,导致水稻空壳率增加,部分地区水稻减产。开花期多雨寡照复合发生,对寒地水稻生产稳定性造成严重威胁,使粳稻生产风险进一步增加。

关于水稻洪涝的致灾因子、评估指标、变化趋势与特征、风险区划已开展许多研究。在定量化影响评估方面,常用的致灾临界气象阈值指标识别技术有建立灾害指示因子对水稻产量结构(或产量)影响模式、基于灾情史料反演冷害灾变过程的指标构建方法^[2]、基

于淹水胁迫试验的指标确定方法等^[10]。其中Z指数、标准化降水指数(*SPI*)、降水距平以及基于生育期的水稻涝害过程雨量^[2]等可作为水稻洪涝等级划分和特征指标。关于水稻抽穗扬花期寡照胁迫的影响研究获得较明确的结论,即寡照在抽穗扬花期对水稻花的育性有负向影响,影响花粉和受精质量,降低水稻结实率^[11-16]。朱萍^[17]在花期对水稻遮光处理15 d,发现寡照降低叶片的净光合速率,抑制光合产物向籽粒运输,产量降低显著。学者们围绕阴雨对水稻生长发育特性、产量及其构成因素、品质性状的具体影响开展研究。张玉烛等^[7]利用人工模拟条件开展阴雨对早稻开花及受精结实的影响研究,发现阴雨条件下水稻开花率、受精率和结实率均明显降低。赵海燕等^[8]研究认为中稻空壳率随着平均日降水量的升高而升高,开花期阴雨天气对中稻产生的负面影响较大。陆魁东等^[18]以抽穗扬花期高温热害和播种育秧期连阴雨灾害的年次概率为指标,对湖南省一季超级稻进行种植区划。

纵观以往关于多雨寡照对水稻的影响研究,研究多集中于国内南方的籼稻^[18-20],而位于高纬度地区的粳稻在开花期遭受多雨寡照复合逆境的影响研究鲜见报道,寒地水稻开花期多雨寡照复合发生缺乏判识和定量化指标,对最终产量的损失评估难度较大。因此,有效应对多雨寡照复合发生对寒地水稻生产带来的威胁,亟需对多雨寡照复合发生对产量的影响机制进行深入研究。鉴于此,本研究以寒地水稻开花期为切入点,考虑多雨寡照2种灾害复合逆境,构建寒地水稻多

雨寡照复合指数(RSCI),通过建立致灾因子和水稻产量结构、产量结构和相对气象产量2个灰色系统,建立复合逆境与产量损失率的关联度模型。基于K-均值聚类分析方法及历史典型灾害年的实际灾情资料确定灾害临界值,划分灾害等级,建立多雨寡照复合发生产量损失评估指标并验证,在此基础上分析其时空变化规律。以期为寒地水稻开花期多雨寡照复合发生的判断、定量精细化产量损失评估和预估提供技术参考。

1 资料来源

1.1 气象资料

气象资料来源于黑龙江省气象局整编资料,包括黑龙江省水稻种植区内82个气象站点1958—2021年的逐日降水、日照资料。

1.2 水稻生育期及产量资料

1980—2020年黑龙江省水稻种植主产区的庆安、方正、宝清、虎林、穆棱、宁安、尚志、汤原、五常、肇源10个农业气象观测站水稻发育期数据及产量结构资料来自于黑龙江省气象数据中心,水稻单产资料来自于黑龙江省统计局。

1.3 多雨寡照资料

多雨寡照灾情资料来源于《中国气象灾害大典·黑龙江卷》^[21]。收集其中关于研究区水稻多雨寡照的相关记录,提取灾害事件。

1.4 水稻开花期

本研究选取水稻开花期为研究时段,整理分析研究区内全部水稻观测站历年发育期数据发现,黑龙江省水稻开花期出现在7月下旬—8月上旬(80%保证率)。因此,选取7月21日—8月10日时段开展寒地水稻开花期多雨寡照研究。

2 研究方法

本研究基于多雨寡照复合发生的特点,兼顾多雨和寡照的累积影响,构建多雨寡照复合指数(RSCI)。

2.1 多雨日数

多雨寡照复合指数综合考虑寒地水稻开花期多雨寡照复合发生的2个关键影响因子。结合寒地水稻生产过程中实际特点,考虑水稻开花期的多雨日数,以其为致灾因子其一,构建多雨寡照复合指数。依据前人研究成果^[8-9],本研究将开花期内 $\geq 5\text{mm/d}$ 降水量的日数作为表征多雨的致灾因子。计算见式(1)。

$$D_i = \begin{cases} 0, & P_i < 5 \\ 1, & P_i \geq 5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中, D_i 为某年某日某研究站点水稻开花期(7月21日—8月10日)内符合条件的日数,取值为0或1, P_i 为 D_i 表征的这一日的降水量(mm)。

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中, D 为某年水稻开花期内日降水量大于等于5mm日数和。

2.2 寡照日数

根据许吟隆等^[22]和吕厚荃^[23]的研究,参考其中的“日照时数 $\leq 3\text{ h}$ 日数”,本研究将其作为多雨寡照复合发生的致灾因子其一,构建多雨寡照指数。水稻开花期寡照日数计算见式(3)。

$$d_i = \begin{cases} 0, & S_i > 3 \\ 1, & S_i \leq 3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中, d_i 为某年某日某研究站点水稻开花期(7月21日—8月10日)内符合条件的日数,取值为0或1, S_i 为 d_i 表征的这一日的日照时数(h),计算见式(4)。

$$d = \sum_{i=1}^n d_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中, d 为某年水稻开花期内日日照时数小于等于3 h日数和。

2.3 数据归一化

本研究采用线性函数归一化(Min-Max scaling)方法将 D 和 d 归一化至[0,1],归一化后用 D' 和 d' 表示。计算公式见文献[4]。

2.4 多雨寡照复合指数构建

本研究基于寒地水稻开花期对多雨和寡照耐受性的差异,定义了寒地水稻开花期多雨寡照复合指数(RSCI)。本研究采用灰色关联方法^[24-25],通过建立多雨寡照致灾因子和水稻产量结构、产量结构和相对气象产量2个灰色系统,揭示它们的灰色映射关系,从而建立复合逆境与产量损失率的关联度模型。

2.4.1 多雨寡照与空壳率的关联度 本研究采用多层次灰色关联分析方法,利用1980—2020年黑龙江省水稻种植主产区10个农业气象观测站水稻发育期数据及产量结构资料,由于开花期多雨寡照主要危害水稻结实,因此,本研究用空壳率 I 表征多雨寡照对寒地水稻的综合影响,并基于水稻开花期多雨、寡照2个致灾因子与空壳率的灰色关系度,确定开花期2个致灾因子的权重系数,以此寻找到复合指数与多雨寡照2个致灾因子的关系,从而构建能够表征开花期多雨寡照复合致灾因子的多雨寡照复合指数(RSCI)。灰色关联度的计算公式见文献[24-25]。

开花期多雨寡照与空壳率的关系模型如式(5)。

$$I = \omega_1 \cdot D + \omega_2 \cdot d \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: I 为水稻空壳率, ω_1, ω_2 为多雨和寡照2个评估因子的权重, D 为多雨日数, d 为寡照日数。

2.4.2 最终产量与空壳率的关联度 本研究将不同产量结构作为表征水稻不同生育期的产量特征因子(见表1)。基于各产量结构与相对气象产量的灰色关系度,确定4个生育期产量特征因子的权重系数,确定空壳率(开花期产量特征因子)对最终产量的贡献率,最终通过多层次灰色关联法,寻找对开花期多雨寡照复合指数与最终产量的关系。

表1 寒地水稻各生育期的产量结构特征量

生育期	产量结构特征量
营养生长期(出苗—孕穗期)	株成穗数
营养生殖生长并进期(孕穗—抽雄期)	平均穗粒数
授粉结实期(开花期)	空壳率
灌浆期(成熟期)	千粒重

空壳率对最终产量的影响评估模型见式(6)。

$$Y = \omega_1 \cdot I_s + \omega_2 \cdot I_L + \omega_3 \cdot I + \omega_4 \cdot I_Q \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中: Y 为相对气象产量, I_s 为株成穗数, I_L 为平均穗粒数, I 为空壳率, I_Q 为千粒重, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为 I_s, I_L, I, I_Q 等4个评估因子的权重。

2.4.3 多雨寡照复合发生产量损失率的确定 作物统计产量包括趋势产量、气象产量和随机产量。趋势产量表达了生产中社会生产力的发展,气象产量是气候波动的贡献^[26]。为更科学的分离出多雨寡照因素的产量损失率,本研究利用相对气象产量来表示气候波动对水稻产量的影响。利用水稻历年单产资料分离出相对气象产量,产量分离计算方法参考文献[26]。提取相对气象产量为负值的年份,视为当年的灾害损失率^[27-28]。

3 结果与分析

3.1 多雨寡照复合指数

基于2.4部分的研究方法,构建开花期多雨寡照复合指数,计算见式(7)。

$$RSCI = 0.497D + 0.502d \cdots \cdots \cdots (7)$$

开花期多雨寡照复合指数与相对气象产量的关联度模型,计算见式(8)。

$$Y = 0.271I_s + 0.265I_L + 0.247RSCI + 0.218I_Q \cdots (8)$$

由此,建立起致灾因子与最终产量的关系,为灾害等级划分提供条件。

3.2 灾害等级划分标准

利用K-均值聚类分析方法,给定聚类数目,依据聚类最优原则确定相对气象产量和复合指数($RSCI$)的聚类中心^[29-30],以此确定多雨寡照复合逆境灾损评估等级指标。将多雨寡照复合指数($RSCI$)的计算结果与历史典型灾害年的实际灾情资料进行对比,确定灾害临

界值。以临界值与第1类聚类中心的平均值和相邻聚类中心的平均值为界限^[30],确定多雨寡照复合发生产量损失评估等级指标。

依据公式(7)和(8),建立寒地水稻多雨寡照复合灾害样本集,挑选出相对气象产量为负值($Y < 0$)的样本作为灾损样本。应用SPSS软件对灾害样本中 $RSCI$ 和 Y 进行K-均值聚类分析,设定聚类数为3类,用有限次逼近法,按照聚类最优原则^[30],得到不同程度气象减产年的相对气象产量和多雨寡照复合评估指数 $RSCI$ 的3个聚类中心以及每个聚类中心的案例数(表2)。可以看出,气象减产程度重的类中,复合致灾指数值也较高,案例数相对较少。

表2 不同程度气象减产年的相对气象产量和多雨寡照复合评估指数($RSCI$)的聚类中心值和案例数

聚类	I	II	III
多雨寡照复合评估指数 $RSCI$	0.22	0.42	0.47
相对气象产量 Y	-0.06	-0.09	-0.36
案例数	73	75	28

以 $RSCI$ 的计算结果与历史典型灾害年的实际灾情资料进行对比,确定灾害最低等级临界值下限和最高等级临界值上限,以临界上下限及聚类中心为界限,将水稻开花期多雨寡照复合灾损等级划分为轻度、中度、重度共3个等级(表3)。

表3 寒地水稻开花期多雨寡照复合灾害产量损失评估等级指标

等级	轻度	中度	重度
多雨寡照复合评估指数 $RSCI$	$0.3 \leq RSCI < 0.4$	$0.4 \leq RSCI < 0.5$	$0.5 \leq RSCI < 0.7$
相对气象产量 Y	$-0.0247 \leq Y < -0.0124$	$-0.037 \leq Y < -0.0247$	$-0.17 \leq Y < -0.037$

3.3 指标验证

提取《中国气象灾害大典·黑龙江卷》及黑龙江省气象灾害普查数据中的关于水稻多雨寡照相关灾害事件。由于多雨寡照复合发生记录较少,因此,提取7月上旬—8月下旬水稻开花期的全部多雨寡照事件记录20条作为验证样本,查询历史记录多雨寡照事件发生时间、地点当年当地的实际单产,计算出气象产量和相对气象产量,开展指标验证。多雨寡照判识能力验证结果显示,指标计算的多雨寡照发生地点涵盖所有20个样本,判识率为100%;基于此20个样本,查询其相

对气象产量,16个样本的相对气象产量为负值,2个为正值,2个(青冈、方正)无水稻单产数据,产量损失率判别准确率高于80%(表4)。可见,指标判定的多雨寡照结果及造成的产量损失率均比较符合寒地水稻开花期多雨寡照发生及产量损失的实际情况,指标具有有效性。

表4 验证结果

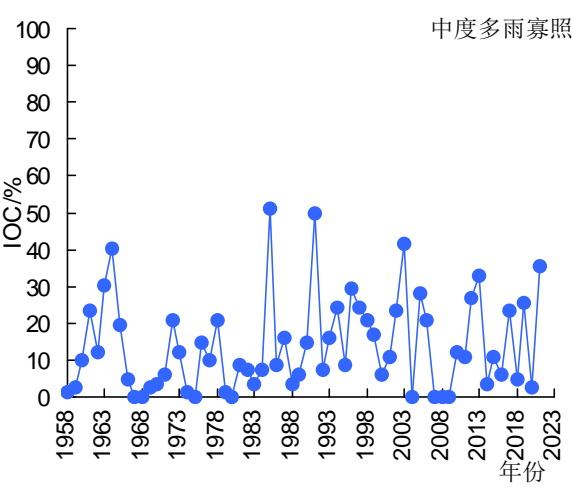
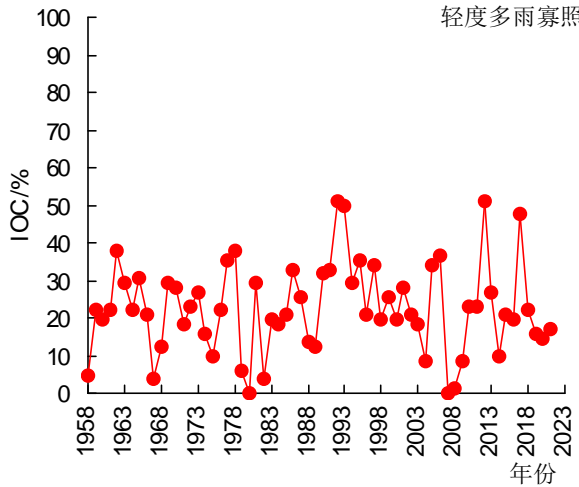
发生年份	史料灾害发生地点	指标计算发生地点	多雨日数	寡照日数	<i>RSCI</i>	气象产量	相对气象产量
1960	尚志	尚志	9	3	0.39	-1023.6	-0.026
1963	汤原	汤原	5	8	0.37	284.1	0.13
1964	宁安	宁安	6	7	0.38	-595.6	-0.021
1964	海伦	海伦	6	9	0.43	-465.5	-0.025
1964	绥棱	绥棱	10	7	0.52	-75.4	-0.04
1964	绥化	绥化	8	8	0.48	-105.2	-0.03
1964	肇东	肇东	9	6	0.46	-379.6	-0.027
1964	庆安	庆安	8	8	0.48	-130.8	-0.032
1971	同江	同江	6	4	0.31	-694.8	-0.014
1981	同江	同江	6	7	0.38	-1126.5	-0.017
1981	汤原	汤原	7	6	0.39	-1652.7	-0.016
1981	青冈	青冈	6	4	0.3		
1981	全省		全省34个水稻主产县中33个县相对气象产量为负值				
1998	绥滨	绥滨	5	7	0.34	-224.3	-0.024
1998	密山	密山	6	6	0.35	-397.5	-0.021
1992	绥滨	绥滨	6	5	0.33	-92.5	-0.019
1990	绥化	绥化	5	7	0.34	-2121	-0.018
1990	同江	同江	6	8	0.40	-159	-0.025
1990	尚志	尚志	6	8	0.40	220.3	0.04
1990	方正	方正	8	12	0.57		

3.4 寒地水稻开花期多雨寡照的时间变化特征

采用黑龙江省某年复合发生多雨寡照的站数与总站数的比值(*IOC*)表征该年黑龙江省多雨寡照复合发生的范围^[4]。将多雨寡照复合发生分为3级:局部发生: $IOC<20\%$;区域性发生: $20.1\%<IOC\leq50\%$;大范围

发生: $IOC>50\%$ ^[4]。

由图1可见,1958—2021年,黑龙江省水稻轻度多雨寡照复合发生 $IOC>50\%$ 的年份有1992、2012年。表明这2 a黑龙江省水稻产区出现大范围的轻度多雨寡照复合发生。 IOC 为0的年份有1980、2007年,表明这



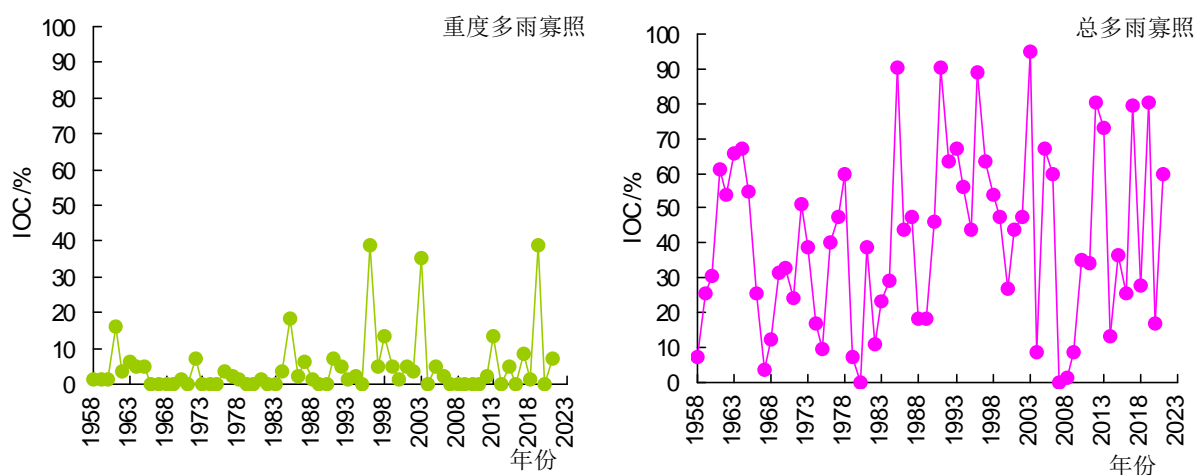


图1 寒地水稻开花期轻、中、重及总多雨寡照复合发生的IOC变化

两年无轻度多雨寡照复合发生。1958—2021年间,仅1985年 $IOC > 50\%$,属于大范围发生年份,64 a中19 a出现了区域性中度多雨寡照复合发生,44 a发生了局部中度多雨寡照。64 a间重度多雨寡照复合发生普遍处于局部水平,其中61 a $IOC < 20\%$,普遍低于10%,仅1996、2003、2019年发生了区域性多雨寡照。1958—

1984年总多雨寡照复合发生范围总体小于1985—2021年。

3.5 寒地水稻开花期多雨寡照的空间变化特征

图2a、2b、2c、2d分别表示轻度、中度、重度、总多雨寡照的空间分布。由图2可以看出,研究期间全省不同程度水稻多雨寡照发生频率特点为:轻度高于中

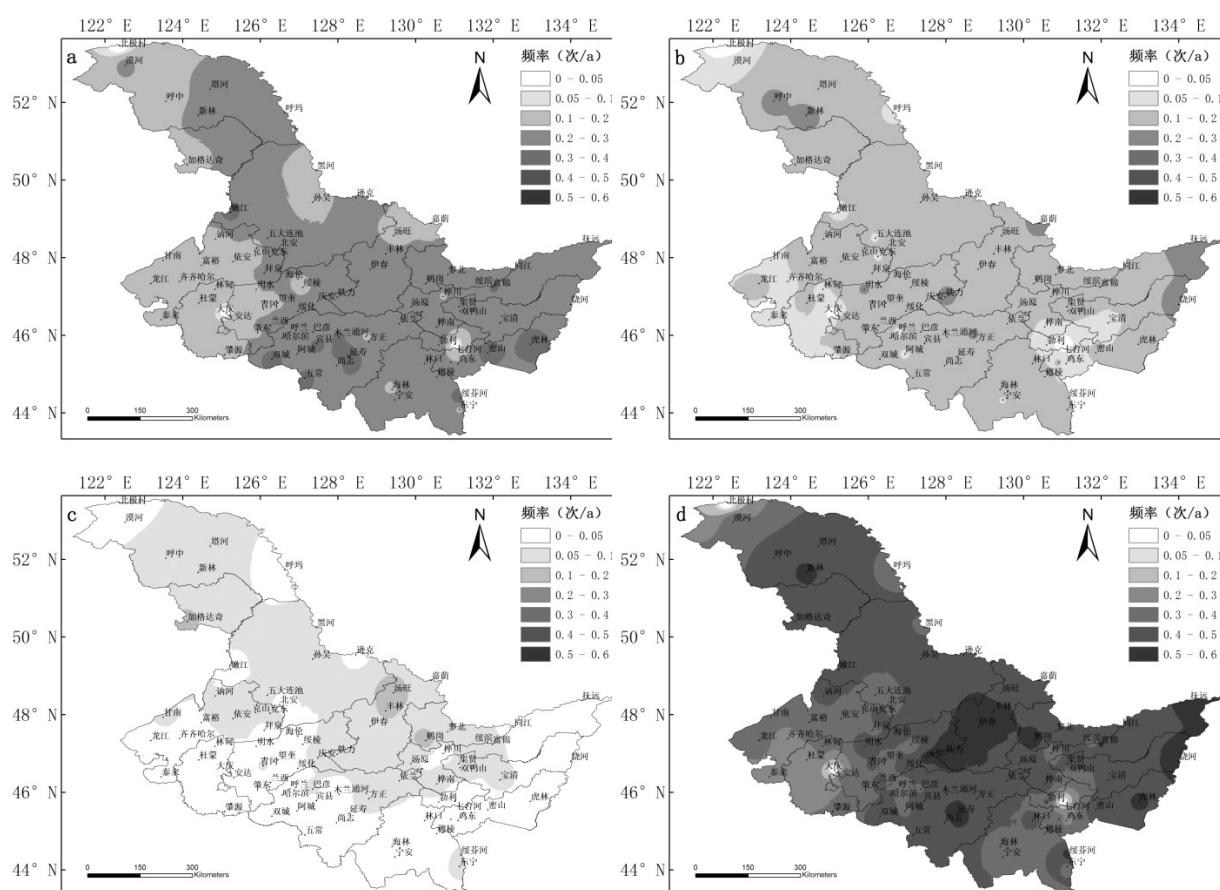


图2 寒地水稻开花期不同程度多雨寡照复合发生频次空间分布

度高于重度。轻度多雨寡照发生频率小于0.2次/a的区域分布于松嫩平原西部、大小兴安岭局部及海林、七台河等29个站,延寿发生频率大于0.4次/a,其它地区发生频率在0.2~0.4次/a(图2a)。

全省69个站中度多雨寡照发生频率小于0.2次/a,其中松嫩平原西南部、三江平原西南部及呼兰、阿城、宁安等地发生频率小于0.1次/a;其它13个站点发生频率在0.2~0.4次/a,零星分布于抚远、饶河、铁力、明水、通河等地(图2b)。

全省82个站点重度多雨寡照发生频率均小于0.2次/a,其中78个站点发生频率小于0.1次/a,北部农区发生频率高于南部农区(图2c)。

从总多雨寡照发生频率空间分布来看,松嫩平原西部、三江平原西南部、牡丹江大部发生频率小于0.4次/a;其他大部地区在0.4~0.6次/a(图2d)。

4 结论

本研究以天气—灾害—作物—产量间的相互影响关系为着眼点,以水稻开花期为切入点,考虑多雨寡照2种灾害复合逆境,利用生育期资料、气象资料、产量资料及灾情史料,通过建立致灾因子和水稻产量结构、产量结构和相对气象产量2个灰色系统,构建寒地水稻多雨寡照复合指数(RSCI),建立复合逆境与产量损失率的关联度模型。将该复合指数作为多雨寡照判识指数,基于K-均值聚类分析方法及历史典型灾害年的实际灾情资料确定灾害临界值和等级,建立多雨寡照复合发生产量损失评估指标。并运用该指标体系分析黑龙江省1958—2021年寒地水稻开花期多雨寡照时空变化规律。主要结论如下。

(1)基于复合指数的寒地水稻轻度、中度、重度多雨寡照指标临界阈值分别为:[0.3,0.4)、[0.4,0.5)、[0.5,0.7),产量损失率分别为[-0.0247, -0.0124)、[-0.037, -0.0247)、[-0.17, -0.037)。

(2)利用史料记载的20个水稻多雨寡照样本进行指标验证,多雨寡照判识率为100%,产量损失率判识准确率高于80%,表明该指标能够很好的判识复合灾害并有较好产量损失判识准确性。

(3)1958—2021年,黑龙江省水稻发生大范围、区域性和局部多雨寡照的特征为:轻度为2、36、26 a;中度为1、19、44 a;重度为0、3、61 a。空间上,仅延寿轻度多雨寡照发生频率大于0.4次/a,其它地区发生频率在0~0.4次/a;13个站点中度多雨寡照发生频率在0.2~0.4次/a,零星分布于抚远、饶河、铁力、明水、通河等地,其它地区发生频率小于0.2次/a;78个站点重度多雨寡照发生频率小于0.1次/a,北部农区发生频率高于

南部农区。

5 讨论

由于多雨寡照2种灾害单一发生、复合发生对水稻的影响情况较为复杂,区别于单一灾害指标,本研究构建的复合指标为2种致灾因子的组合赋权,因此不仅能够反映并判识单一灾害的影响,还能判识出2种致灾因子不同程度的组合影响,更能体现灾害发生的实际状况。

基于灰色关联分析法,建立多雨、寡照2个致灾因子与水稻空壳率的灰色关系度,确定2个致灾因子的权重系数,与专家打分法相比^[4],该复合指数的科学性和定量化程度明显提高。

将株成穗数、平均穗粒数、空壳率和千粒重与相对气象产量视为一个灰色系统,确定不同生育期的产量结构因子对相对气象产量的贡献率,寻找到开花期空壳率对最终产量的贡献率。最终建立开花期多雨寡照复合指数与最终产量的定量关系。因此,多雨日数和寡照日数赋予了灾损复合等级指标的气象学特征。而依托多层灰色系统,建立不同生育期的产量结构因子与相对气象产量的关联度,兼顾了指标的气象学、生物学和农学指示意义;采用K-means聚类分析^[27-28]和历史典型灾害年的实际灾情相结合的方法判别灾害临界阈值和等级;提高了指标的精细化和科学性程度,更加全面且接近实际情况。

然而,除气候因素外,合理的移栽时间、品种选择、农作物生产技术等也可以改变多雨寡照对水稻结实率及最终产量的影响^[31]。张玉焯等^[7]发现相同阴雨处理的不同水稻品种之间差异很大,闭花受精品种对阴雨适应性最强。张林等^[32]研究表明再生稻可作为头季稻抽穗开花期受阴雨天气影响所致减产的产量补充,施氮可提高抗逆性。因此,在后续的指标构建过程中,需综合考虑并量化多因素对水稻产量损失的贡献率,探索开发融合多源技术的精细化灾损指标。

参考文献

- [1] 黑龙江省统计局,国家统计局黑龙江调查总队编. 黑龙江统计年鉴-2022[M]. 北京:中国统计出版社,2022:215-218
- [2] 吕佳佳,王晾晾,石磊,等. 寒地水稻关键生育期涝害的过程雨量指标构建[J]. 生态学杂志,2019,38(5):1402-1409.
- [3] 闫萌萌,闫平,吕守义,等. 遮光对水稻生长发育及稻米品质的影响[J]. 农学学报,2019(4):22-25.
- [4] 吕佳佳,朱海霞,曲辉辉,等. 高寒区大豆关键生育期低温冷害指标构建[J]. 应用生态学报,2022,33(6):1581-1588.
- [5] 于艳敏,闫平,武洪涛,等. 黑龙江省2019年新育成水稻品种品质性状分析[J]. 农学学报,2022,12(4):1-5.
- [6] 陈宇眺,闫川,洪晓富. 花前、花后遮阴对粳籼杂交稻产量形成特性

- 的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(5): 79-83.
- [7] 张玉烛, 张桂和, 朱国奇, 等. 阴雨对早稻开花及受精结实的影响[J]. 中国水稻科学, 1995(3): 173-178.
- [8] 赵海燕, 姚凤梅, 张勇, 等. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析[J]. 中国农业科学, 2006(9): 1765-1771.
- [9] 陶炳炎, 汤志成, 彭钊安, 等. 杂交水稻与气象[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1983: 52-54.
- [10] 朱海霞, 姜丽霞, 吕佳佳, 等. 淹水胁迫对寒地水稻产量构成因子的作用[J]. 自然灾害学报, 2019(5): 198-206.
- [11] FAGERIA N K. Yield physiology of rice[J]. Journal of plant nutrition, 2007, 30(6): 843-879.
- [12] SADRAS V O, CALDERINI D F, SADRAS V O, et al. Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy [M]. San Diego: Academic press, 2009: 56-57.
- [13] RESTREPO D, HERMANN, GARCES V, et al. Response of rice plants to heat stress during initiation of panicle primordia or grain-filling phases[J]. Journal of stress physiology & biochemistry, 2013 (9): 318-325.
- [14] DUTTA S S, TYAGI W, RAI M. Physiological and molecular response to low light intensity in rice: A review[J]. Agricultural reviews, 2017, 38(3): 209-215.
- [15] BHARALI B, CHANDRA K. Genotypic variation in solar energy use efficiency of kharifrice (*Oryza Sativa* L.) under low light situation of assam[J]. New agriculturist, 1994, 5(1): 53-57.
- [16] 杜彦修, 季新, 张静, 等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1307-1317.
- [17] 朱萍, 杨世民, 马均, 等. 遮光对杂交水稻组合生育后期光合特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 2003-2009.
- [18] 陆魁东, 黄晚华, 申建斌, 等. 湖南一季超级稻种植气候区划[J]. 中国农业气象, 2006(2): 79-83.
- [19] 王素艳, 郭海燕, 邓彪, 等. 四川省中稻低温阴雨冷害风险评估方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(5): 48-55.
- [20] 王卫, 谢小立, 陈安磊. 阴雨寡照地区高产水稻的生物学特征研究[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(3): 52-57.
- [21] 孙永罡, 宋英华, 马旭清, 等. 中国气象灾害大典·黑龙江卷[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [22] 许吟隆, 郑大玮, 刘晓英, 等. 中国农业适应气候变化关键问题研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [23] 吕厚荃. 中国主要农区重大农业气象灾害演变及其影响评估[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [24] 杨霏云, 张玉书, 李文科, 等. 水稻低温冷害综合评估方法[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3281-3288.
- [25] 钮力亚, 于亮, 张玉杰, 等. 水分胁迫与小麦产量性状及籽粒容重的关联度研究[J]. 农学报, 2022(8): 6-9.
- [26] 王蔚丹, 孙丽, 裴志远, 等. 东北三省地区生长季旱涝对春玉米产量的影响[J]. 智慧农业(中英文), 2021(2): 126-137.
- [27] 李德, 景元书, 祁宦. 安徽省冬小麦灌浆期连阴雨灾害等级指标的确定[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 56-62.
- [28] 蒙华月, 王兆林, 姚佩, 等. 农业涝渍灾害评估中不同气象产量分离方法的比较研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(6): 976-989.
- [29] 代立芹, 王猛, 李春强, 等. 河北省棉花连阴雨灾害定量化评估指标与风险分析[J]. 气象与环境学报, 2019(5): 108-114.
- [30] 刘瑞娜, 杨太明, 陈鹏, 等. 安徽省油菜花期连阴雨灾害损失评估指标[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 471-478.
- [31] PRIYANKA G, B L, K A N, et al. Inter-relationship between intercepted radiation and rice yield influenced by transplanting time, method, and variety[J]. International journal of biometeorology, 2019, 63: 337-349.
- [32] 张林, 徐富贤, 熊洪, 等. 杂交中稻头季稻花期阴雨下产量与再生稻产量的关系[J]. 作物研究, 2017, 31(1): 1-6.