

李美萱, 霍治国, 孔瑞, 等. 黄淮海冬小麦春季低温灾害等级指标构建. 应用气象学报, 2024, 35(1): 45-56.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240104

黄淮海冬小麦春季低温灾害等级指标构建

李美萱¹⁾ 霍治国^{1)2)*} 孔瑞¹⁾³⁾ 江梦圆¹⁾²⁾ 米前川¹⁾²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学, 南京 210044)

³⁾(中国地质大学, 武汉 430074)

摘要

为了明确黄淮海冬小麦春季低温胁迫与产量及其构成因素的定量关系, 基于减产率构建小时尺度低温灾害等级指标。通过检索及筛选的 34 篇试验文献中的 1924 组试验组数据和对照组数据, 采用 Meta 分析方法分析黄淮海地区返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期低温胁迫对小麦产量及其构成因素的影响, 以过程最低温度、积冷量为判识因子, 根据约登指数确定减产率为 0、10% 和 30% 的临界阈值, 构建并验证低温灾害等级指标。结果表明: 冬小麦产量及其构成因素受低温胁迫过程低温强度和持续时间共同影响, 因所处发育阶段不同存在差异。按照减产率(0, 10%]、(10%, 30%]和(30%, 100%]为分级标准, 分别以过程最低温度和过程积冷量为判识因子构建并验证低温灾害等级指标, 过程积冷量指标在不同发育期的判识准确率均高于过程最低温度指标。因此, 基于过程低温强度和持续时间的综合影响构建的判识因子能更好地表征冬小麦遭受低温灾害的严重程度。

关键词: 冬小麦; 低温灾害; 产量; Meta 分析

引言

黄淮海地区是我国冬小麦主产区, 其中河南、山东、河北、安徽、江苏的冬小麦产量占全国冬小麦总产量的 78%, 也是我国冬小麦春季低温灾害的高发区、重发区, 部分地区发生频率超过 30%, 最高可达 70%^[1]。随着气候变暖, 冬小麦春季发育期提前, 叠加气候波动加剧、作物脆弱性增加, 冬小麦春季低温灾害发生风险增加, 导致冬小麦高产、稳产存在严重风险^[1-4]。

冬小麦对温度变化较为敏感, 低温影响冬小麦发育进程、生理机能, 进而造成减产^[5-7]。春季低温胁迫对冬小麦穗部发育影响较大, 通过影响成穗数、穗粒数、千粒重 3 个要素, 导致冬小麦产量下降, 对冬小麦产量的影响因所处发育阶段不同而不同^[5, 8-9]。基于控制试验研究春季低温胁迫对冬小麦产量及其

构成因素的影响, 因受到试验地点、品种和试验温度设计等因素限制, 得到结果的区域代表性有待进一步检验。Meta 分析又称整合分析, 是一种对若干独立研究统计结果进行综合分析的定量统计方法, 通过增大样本量, 减少随机误差, 打破独立试验结果的局限性, 获得区域水平的一般性规律^[10]。

农业气象灾害指标是基于历史灾情记录^[11-13]、典型灾害过程观测数据^[14]、模拟试验^[15-17]等, 结合观测气象数据, 筛选表征灾害过程的主要致灾因子, 实现灾害的分级判识。以往灾害等级指标的构建常基于日尺度数据, 基于小时尺度数据构建指标鲜见报道。本研究以黄淮海冬小麦主产区为研究区域, 采用 Meta 分析方法定量评估黄淮海地区春季不同发育期低温胁迫(过程最低温度、低温持续时间)对冬小麦产量及其构成因素的影响, 构建冬小麦低温灾害小时尺度等级指标, 以期为准评估冬小麦春季低温灾害的影响和区域冬小麦低温灾害防灾减灾

2023-08-22 收到, 2023-11-27 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2022YFD2300202)

* 通信作者, 邮箱: huozg@cma.gov.cn

提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

从中国知网、维普、万方、科学引文数据库(Web of Science)检索及筛选相关方向文献,初检出文献 1311 篇,通过阅读文题和摘要初筛出文献 150 篇,按特定标准:①试验范围属于本研究所规定的区域,考虑指标应用的省级代表性,本研究纳入安徽、江苏区域内全部试验样本;②试验必须包含相同条件下

的低温处理组和对照组;③必须包含处理组和对照组的产量、穗数、穗粒数和千粒重数据,相关参数数值、标准差及样本量能够直接从图、表或文字中提取或通过计算获得;④不同刊物出现相同试验数据时,选择数据信息较为全面的文献复筛,将符合条件的 34 篇文献(表 1)纳入分析,按“第 1 作者-发表时间-过程最低温度-低温持续时间-试验组数据(平均值、样本量、标准差)-对照组数据(平均值、样本量、标准差)”格式提取文献中数据,经过整理最终得到单株产量、单株穗数、穗粒数和千粒重数据分别为 506 组、500 组、475 组和 443 组。

表 1 纳入文献的试验地点和供试品种信息

Table 1 Information of experimental sites and varieties in selected literatures

参考文献	试验地址及试验年份	供试品种
[18]	河南农业大学科教示范园区,2008/2009	百农矮抗 58、豫麦 49-198、偃展 4110 等
[19]	山东农业大学试验田,2009/2010	济麦 19、济麦 20、济麦 21、济麦 22 等
[20]	北京市农林科学院,2012	京 9843
[8]	扬州大学农学院盆栽场,2009	扬麦 16
[21]	周口市农科院试验田,2012	45 种黄淮麦区主要推广品种和苗头品系
[22]	山东济宁市农业科学研究院	济麦 22、济南 17、鲁原 502、周麦 18 等
[23]	商丘市农林科学院试验中心	周麦 22
[24]	河南省郑州市农业气象试验站,2014/2015	郑麦 366、豫麦 34、偃展 4110、郑麦 9023
[25]	河南农业大学科教示范园区,2015	郑麦 366、郑麦 7698 等 12 个供试品种
[5]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2014/2015	扬麦 16、徐麦 30
[26]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2011	扬麦 16、徐麦 30
[27]	河南省农业科学院	周麦 18、众麦 1 号
[9]	江苏省如皋市国家信息农业工程技术中心试验基地,2014/2015	扬麦 16、徐麦 30
[28]	江苏省如皋市国家信息农业工程技术中心试验基地,2015/2016	扬麦 16、徐麦 30
[29]	河南师范大学小麦试验田,2016	周麦 18、良星 99、济麦 22 等 11 个供试品种
[30]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2016/2017	扬麦 16、徐麦 30
[31]	山东泰安市农业科学研究院试验基地,2013/2014	泰山 6426、泰山 4033、济麦 22
[32]	安徽农业大学校内试验基地农萃园,2016/2017	扬麦 18、烟农 19
[33]	河南省新乡市河南科技学院试验田,2018	矮抗 58、郑麦 366
[34]	漯河市农业科学院试验基地,2018	漯麦 6010
[35]	安徽科技学院种植园(安徽凤阳),2019	宁麦 13、华成 3366
[36]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2019	扬麦 23、徐麦 33
[37]	保定市农业科学院徐水试验基地,2020	保麦 10 号、河农 130、远大 1 号等
[38]	河南省漯河市农业科学院试验田网室,2019	漯麦 163、漯麦 6010、偃展 4110 等
[39]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2016/2017	扬麦 16、徐麦 30
[40]	河南省商丘市农林科学院小麦试验基地,2019/2020	偃展 4110、兰考 198、郑麦 366 等
[41]	河南省现代农业研究开发基地,2018/2019	郑麦 366、新麦 26
[42]	安徽农业大学农萃园基地,2020	烟农 19、新麦 26
[43]	安徽农业大学农萃园,2020	烟农 19、新麦 26
[44]	安徽科技学院种植科技园,2019	华成 3366、扬麦 13、生选 6 号、 扬麦 19、安农 1589、烟农 5185、宁麦 13
[45]	河南省漯河市农业科学院试验田网室,2021	漯麦 47、漯麦 906、周麦 18 等
[46]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室,2017	扬麦 16、徐麦 30
[47]	扬州大学江苏省作物遗传生理实验室盆栽试验场,2020/2021	宁麦 13、镇麦 12
[48]	安徽农业大学校内试验基地农萃园,2019	烟农 19、皖麦 52

1.2 分析方法

1.2.1 Meta 分析

1.2.1.1 效应值的计算

本研究选取生态学领域常用反应比的对数($\ln R$)作为效应值衡量低温对冬小麦产量及其构成因素的影响,该效应值基于平均值,要求试验组与对照组平均值不为 0,其计算公式为

$$\ln R = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) = \ln X_t - \ln X_c. \quad (1)$$

式(1)中: $\ln R$ 为效应值, X_t 与 X_c 分别为低温胁迫处理组与对照组冬小麦产量及其构成因素平均值。

效应值的大小反映低温对特征量的影响程度。将数据分析结果转化为相对变化率,直观解释低温胁迫对冬小麦产量及其构成因素的影响。当相对变化率的 95% 上下限不与横轴相交时,则认为 $P < 0.05$,即低温对小麦产量及其构成因素影响显著,否则表示影响不明显。

1.2.1.2 Meta 回归

Meta 回归分析指通过建立回归方程,反映自变量与因变量间的关系,筛选出导致异质性的影响因素。以效应值 $\ln R$ 为因变量,过程最低温度、低温持续时间为自变量,分析不同发育阶段过程最低温度及低温持续时间对产量及其构成因素影响的显著程度。

1.2.1.3 敏感性分析

采用单项研究逐项剔除,判断合并效应量改变是否明显进行敏感性分析,若改变量小于 5%,认为敏感性低,合并效应量结果具有稳定性;改变量大于 5%,则剔除该项研究。

1.2.1.4 亚组分析

基于试验样本,按过程最低温度、低温持续时间进行亚组分析,探讨不同低温强度、持续时间引起的产量及其构成因素变化的差异。

1.2.2 冬小麦春季低温灾害等级指标的构建

1.2.2.1 冬小麦低温受灾样本集构建

冬小麦受低温胁迫影响与低温强度、低温持续时间密切相关^[20,49]。随着温度降低、胁迫时间延长,冬小麦产量下降幅度增大^[50]。本研究选取控制试验中,冬小麦受低温胁迫过程的最低温度(过程最低温度)和积冷量(过程积冷量)作为判识因子构建低温灾害等级指标。统计低温胁迫样本发现冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期低温胁迫试验设计的过程最低温度主要集中在 $-10 \sim -3$ °C、 $-10 \sim 2$ °C、 $-7 \sim 4$ °C 和 $2 \sim 8$ °C,参照文献^[51-52]记载的小麦不同发育期三基点温度,选取 0 °C、3 °C、7 °C 和 9 °C 作为黄淮海地区冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期生长下限温度。低温试验样本包括恒温控制、变温控制两类,不同于降温天气过程温度的动态变化:对于恒温控制的低温试验样本,选取控制过程中的温度最小值作为过程最低温度 T_{\min} ,采用式(2)计算过程积冷量 X_h 以表征低温累积效应;对于变温控制的低温试验样本,选取控制过程中温度设置最小值作为过程最低温度 T_{\min} ,根据气象行业标准^[53]的有害积寒定义,采用式(3)计算过程积冷量 X_h 。根据 Meta 分析剔除敏感样本,按照“过程最低温度-过程积冷量-减产率”不同发育阶段得到的受灾样本量为 501,其中返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期的样本量分别为 21、331、100 和 49(表 2)。

$$X_h = \begin{cases} (T_{\min} - T_c)t, & T_{\min} < T_c; \\ 0, & T_{\min} \geq T_c. \end{cases} \quad (2)$$

$$X_h = \int_{N=1}^{N=X_2} \int_{t=0}^{t=24} (T_c - T) dt dN \\ = \frac{1}{4} \sum \frac{(T_c - T_{\min})^2}{T_m - T_{\min}} (T_{\min} < T_c). \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: X_h 为遭受低温胁迫的过程积冷

表 2 无灾及受灾样本量

Table 2 Number of damage-free and damage samples

发育期	无灾样本			受灾样本		
	恒温样本	变温样本	合计	恒温样本	变温样本	合计
返青期	0	15	15	21	0	21
拔节期	4	112	116	275	56	331
孕穗期	10	34	44	47	53	100
抽穗-开花期	0	29	29	13	36	49

量,单位为 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$; T_{\min} 为过程最低温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_c 为对应发育阶段的生长下限温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_m

为过程平均温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; t 为低温持续时间,单位为 h 。

1.2.2.2 冬小麦低温无灾样本集构建

本研究收集试验研究中低温胁迫的对照组试验数据作为无灾样本,得到明确记载过程温度情况及持续时间的样本量为 204,其中返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期的样本量分别为 15、116、44 和 29(表 2)。

1.2.2.3 低温灾害判识阈值的确定

接收者操作特征曲线(receiver operating characteristics curve, ROC 曲线)被广泛用于评估判识因子性能,确定分类临界阈值。将无灾样本和受灾样本设置为两类事件,通过设定不同阈值得到正确判识受灾样本的数量(T_P)、错误判识受灾样本的数量(F_N)、错误判识无灾样本的数量(F_P)、正确判识无灾样本的数量(T_N),计算真阳性率 T_{PR} (式(4))和假阳性率 F_{PR} (式(5)),以假阳性率为横坐标、真阳性率为纵坐标绘制 ROC 曲线。

$$T_{PR} = \frac{T_R}{T_P + T_N}, \quad (4)$$

$$F_{PR} = \frac{F_P}{F_P + T_N}. \quad (5)$$

曲线下方面积(area under the curve, AUC)是度量 ROC 曲线下面积的指标, AUC 越接近 1.0,判识因子性能越好; AUC 为 0.5,随机猜测; AUC 为(0.5, 0.7],判识因子性能一般; AUC 为(0.7, 0.9],判识因子性能良好; AUC 大于 0.9,判识因子性能优秀。

低温胁迫阈值由约登指数确定。约登指数(J)也称为正确指数,用于评价判识结果真实性,值越大表示判识准确的可能性越大,选定阈值判识效果越好,其计算公式为

$$J = T_{PR} - F_{PR}. \quad (6)$$

1.2.2.4 低温胁迫等级指标的构建及验证

利用无灾样本和受灾样本,基于约登指数确定减产率为 0、10%和 30%对应的最佳分类阈值。按照等级划分标准: I 级低温胁迫,减产幅度为(0, 10%]; II 级低温胁迫,减产幅度为(10%, 30%]; III 级低温胁迫,减产幅度为(30%, 100%],构建黄淮海地区冬小麦春季低温灾害等级指标。

依据构建的冬小麦低温灾害等级指标,统计预留的 20%受灾样本及无灾样本对应的判识等级,与实际等级对比,将验证结果分为完全符合、基本符合和不符合 3 类,其中基本符合为判识等级和实际等

级相差 1 级。

2 结果与分析

2.1 Meta 回归

将冬小麦产量及其构成因素与不同发育期低温胁迫过程最低温度及持续时间进行 Meta 回归,发现单株产量受返青期-孕穗期过程最低温度,返青期、拔节期以及抽穗-开花期受低温持续时间影响显著;单株穗数受返青期-孕穗期过程最低温度,返青期低温持续时间影响显著;穗粒数变化与返青期、拔节期和抽穗-开花期过程最低温度,返青期、抽穗-开花期低温持续时间关系显著;千粒重变化与拔节期低温持续时间、孕穗期过程最低温度和低温持续时间显著相关。

2.2 效应值计算及敏感性分析

低温胁迫对产量及其构成因素的影响因所处发育阶段不同而存在差异,冬小麦产量及其构成因素在低温胁迫下总体显著减小,单株穗数和每穗粒数对低温胁迫的敏感性大于千粒重。由图 1 可以看到,返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期低温胁迫减产幅度分别为 67.29%、54.27%、57.96%和 24.37%;单株穗数减小幅度分别为 46.04%、26.38%、22.96%、8.85%;每穗粒数减小幅度分别为 39.13%、33.15%、33.24%、9.67%;千粒重减小幅度分别为 25.12%、10.06%、11.40%、15.48%。对过程最低温度,除了拔节期 2℃下产量变化外,拔节期、抽穗-开花期 2℃以及抽穗-开花期 6℃的低温胁迫下的单株穗数变化,拔节期 1℃及 2℃低温胁迫下的千粒重变化受低温强度影响均不显著;拔节期除了 1℃低温胁迫下的单株穗数显著增加外,产量及其构成因素在不同发育期不同低温强度下显著减小。随着过程最低温度的下降,除了拔节期穗粒数、抽穗-开花期千粒重降幅下降外,产量及其构成因素总体呈减小趋势。由于返青期千粒重变化样本最低温度均为 -6℃,无法进行亚组分析。敏感性分析表明:孕穗期 2℃单株产量样本和拔节期 2℃穗粒数样本在排除文献[42]新麦 26 的数据后,孕穗期 2℃下单株产量相对变化率由 -31.35%变为 -17.41%,拔节期 2℃下穗粒数相对变化率由 -38.7%变为 -16.87%,剔除敏感样本后合并效应量保持稳定(小于 5%),其余研究在逐一剔除研究样本后,合并效应无显著

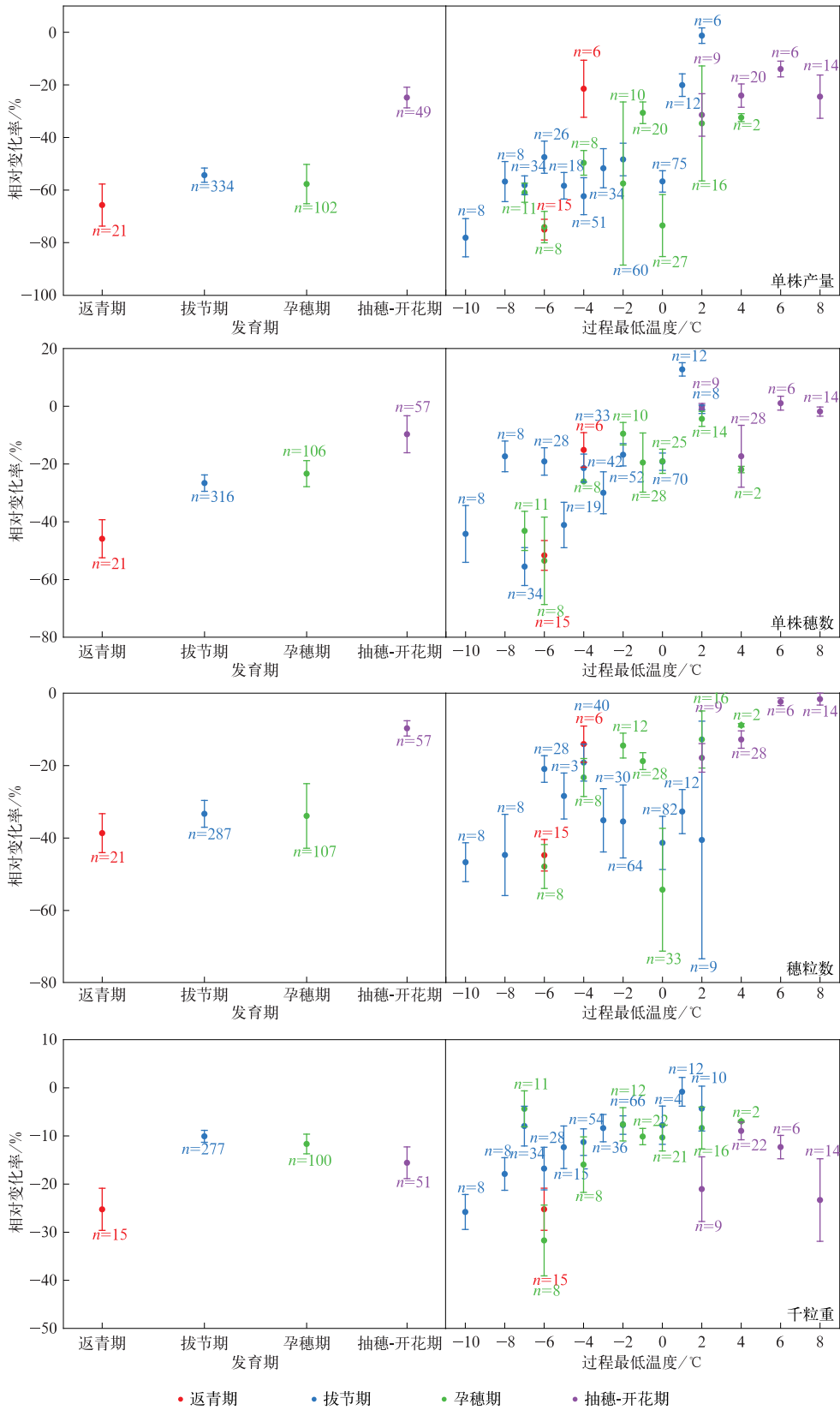


图 1 过程最低温度对冬小麦产量及其构成因素的影响

Fig. 1 Effect of minimum temperature stress on winter wheat yield and its components

变化,表明统计结果稳健性较好。

黄淮海冬小麦低温胁迫样本在返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期的低温持续时间主要集中在 24~72 h、1~108 h、4~72 h 和 12~72 h;产量及其构成因素总体上受低温持续时间影响显著。在不同低温持续时间条件下,抽穗-开花期在 36 h 的穗数变化,拔节期在 9 h 和孕穗期在 4 h、8 h 的低温胁迫下千粒重变化不显著;拔节期在 1 h、3 h、6 h 和 18 h 的低温胁迫下千粒重显著增加,产量及其构成因素在不同发育期不同低温持续时间下显著减小。随着低温持续时间延长,拔节期、抽穗-开花期穗数、拔节期穗粒数降幅下降,产量及其构成因素在不同发育期总体呈减小趋势。敏感性分析表明合并效应量在逐一剔除样本后无显著变化(小于 5%),结果与剔除前总体趋势一致,研究结果稳定可靠。

2.3 冬小麦低温灾害等级指标构建及验证

2.3.1 以过程最低温度为判识因子的等级指标构建及验证

设置无灾样本和受灾样本为两类事件,设置判识因子在样本集最大值和最小值间的所有取值(步长为 0.1)为测试阈值,选取最大约登指数对应的测

试阈值为最佳分类阈值,当最大约登指数对应多个连续测试阈值时,最佳阈值为平均值(表 3)。由表 3 可知,以过程最低温度为判识因子,返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期低温灾害发生(减产率为 0)的临界阈值分别为 -2.0、3.0、5.1 °C 和 7.0 °C,对应的 AUC 分别为 1.00、1.00、1.00 和 0.94,判识因子分类性能皆为优秀,说明过程最低温度适用于判识不同发育期冬小麦是否发生低温灾害。

将受灾样本按减产率不大于 10% 和大于 10% 分为两类,冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期发生低温灾害造成 10% 减产时对应的判识阈值分别为 -5.0、-1.0、1.1 °C 和 5.0 °C,对应 AUC 分别为 0.94、0.94、0.81 和 0.75,即以过程最低温度为判识因子的性能分别为优秀、优秀、良好和良好。

将受灾样本按减产率不大于 30% 和大于 30% 分为两类,冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期发生低温灾害造成 30% 减产时对应的判识阈值为 -5.0、-2.5、-3.0 °C 和 3.0 °C,对应 AUC 分别为 0.97、0.78、0.74 和 0.69,即以过程最低温度为判识因子确定减产 30% 的临界阈值性能分别为优秀、良好、良好和一般。

表 3 冬小麦不同发育期春季低温灾害的临界阈值

Table 3 Critical threshold of spring low temperature disaster in different growth stages of winter wheat

发育期	减产率/%	测试阈值范围/°C	最佳阈值范围/°C	最佳阈值/°C	约登指数	AUC	判识因子性能
返青期	0	[-6.0,1.0]	[-3.9,0.0]	-2.0	1.00	1.00	优秀
	10	[-6.0,-4.0]	[-5.9,-4.0]	-5.0	0.88	0.94	优秀
	30	[-6.0,-4.0]	[-5.9,-4.0]	-5.0	0.93	0.97	优秀
拔节期	0	[-10.0,8.0]	[2.1,4.0]	3.0	0.99	1.00	优秀
	10	[-10.0,5.0]	[-1.9,0.0]	-1.0	0.87	0.94	优秀
	30	[-10.0,5.0]	[-2.9,-2.0]	-2.5	0.51	0.78	良好
孕穗期	0	[-7.0,15.0]	[4.1,6.0]	5.1	1.00	1.00	优秀
	10	[-7.0,4.0]	[0.1,2.0]	1.1	0.58	0.81	良好
	30	[-7.0,4.0]	[-3.9,-2.0]	-3.0	0.44	0.74	良好
抽穗-开花期	0	[2.0,20.0]	[6.0,7.9]	7.0	0.70	0.94	优秀
	10	[2.0,8.0]	[4.0,5.9]	5.0	0.38	0.75	良好
	30	[2.0,8.0]	[2.1,3.9]	3.0	0.50	0.69	一般

由于仅按减产率无法判别返青期低温灾害等级,利用返青期单株穗数、穗粒数(千粒重样本过程最低温度均为 -6 °C,无法利用过程最低温度进行分类判别)计算不同相对变化率(步长为 10%)对应的分类阈值,由表 4 可知,过程最低温度在判别穗粒数相对变化率不大于 50% 和大于 50% 时的判识因子性能最佳(AUC 为 1.00),因此选用 -8.5 °C 作为返青期 I 级、II 级低温灾害分类阈值,辅助构建返青

期低温灾害等级指标。

按照等级划分标准,以过程最低温度为判识因子构建冬小麦不同发育期春季低温灾害等级指标,并基于预留的 20% 样本验证,结果见表 5。对于返青期,判识等级与实际等级完全相符的样本量为 5,占总样本的 71.43%;完全符合和基本符合的样本量为 6,占总样本的 85.71%。对于拔节期,完全符合的样本量为 63,占总样本的 70.79%;完全符合和

基本符合的样本量为 75, 占总样本的 84.27%。孕穗期完全符合的样本为 20, 占总样本的 71.43%; 完全符合和基本符合的样本量为 27, 占总样本的

96.43%。抽穗-开花期完全符合的样本量为 9, 占总样本的 64.29%; 完全符合和基本符合的样本量为 14, 占总样本的 92.86%。

表 4 冬小麦返青期低温胁迫产量构成因素不同相对变化率分类阈值
Table 4 Classification thresholds of different relative change rates of yield components of winter wheat under low temperature stress in green-up stage

产量构成因素	变化率/%	测试阈值范围/℃	最佳阈值范围/℃	最佳阈值/℃	约登指数	AUC	判识因子性能
单株穗数	10	[-6.0, -4.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.79	0.89	良好
	20	[-6.0, -4.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.88	0.94	优秀
	30	[-6.0, -4.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.86	0.93	优秀
	40	[-6.0, -4.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.75	0.88	良好
	50	[-6.0, -4.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.43	0.71	良好
穗粒数	10	[-10.0, -3.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.57	0.75	良好
	20	[-10.0, -3.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.73	0.82	良好
	30	[-10.0, -3.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.73	0.84	良好
	40	[-10.0, -3.0]	[-5.9, -4.0]	-5.0	0.64	0.89	良好
	50	[-10.0, -3.0]	[-9.9, -7.0]	-8.5	1.00	1.00	优秀

表 5 冬小麦不同发育期春季低温灾害过程最低温度等级指标及验证
Table 5 Grade indicator construction and validation of spring low temperature disaster process based on minimum temperature in different growth stages of winter wheat

发育期	等级指标/℃			验证结果		
	I	II	III	完全符合样本量	基本符合样本量	不符样本量
返青期	[-5.0, -2.0)	[-8.5, -5.0)	<-8.5	5	1	1
拔节期	[-1.0, 3.0)	[-2.5, -1.0)	<-2.5	63	12	14
孕穗期	[1.1, 5.1)	[-3.0, 1.1)	<-3.0	20	7	1
抽穗-开花期	[5.0, 7.0)	[3.0, 5.0)	<3.0	9	4	1

2.3.2 以过程积冷量为判识因子的等级指标的构建及验证

以过程积冷量为判识因子构建并验证等级指标(表 6)。由表 6 可知, 返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期低温灾害发生(减产率为 0)的临界阈值分别为 -72.0、-1.2、-16.8 ℃·h 和 -19.6 ℃·h, 对应 AUC 分别为 1.00、1.00、1.00 和 0.98, 指标

性能皆为优秀。

冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期发生低温灾害造成 10% 减产时的分类阈值分别为 -216.1、-41.0、-101.6 ℃·h 和 -38.5 ℃·h, 对应 AUC 分别为 0.73、0.83、0.87 和 0.77, 以过程积冷量为判识因子的指标性能均为良好。

冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和抽穗-开花期

表 6 冬小麦不同发育期春季低温灾害的临界阈值
Table 6 Critical threshold of spring low temperature disaster in different growth stages of winter wheat

发育期	减产率/%	测试阈值范围/(℃·h)	最佳阈值范围/(℃·h)	最佳阈值/(℃·h)	约登指数	AUC	性能
返青期	0	[-432.0, 0.0]	[-144.0, -0.1]	-72.0	1.00	1.00	优秀
	10	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.47	0.73	良好
	30	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.50	0.75	良好
拔节期	0	[-768.0, 0.0]	[-2.4, -0.1]	-1.2	1.00	1.00	优秀
	10	[-768, -2.4]	[-42.0, -40.1]	-41.0	0.73	0.83	良好
	30	[-768, -2.4]	[-72.0, -60.1]	-66.0	0.38	0.72	良好
孕穗期	0	[-608.4, 0.0]	[-30.0, -3.7]	-16.8	1.00	1.00	优秀
	10	[-608.4, -30.0]	[-106.0, -97.3]	-101.6	0.83	0.87	良好
	30	[-608.4, -30.0]	[-170.6, -168.1]	-169.3	0.65	0.87	良好
抽穗-开花期	0	[-504.0, 0.0]	[-36.0, -3.3]	-19.6	0.85	0.98	优秀
	10	[-504.0, -1.8]	[-75.0, -1.9]	-38.5	0.51	0.77	良好
	30	[-504.0, -1.8]	[-112.5, -75.1]	-93.8	0.46	0.83	良好

发生低温灾害造成30%减产时的分类阈值分别为-216.1、-66.0、-169.3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 和-93.8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$,对应AUC分别为0.75、0.72、0.87和0.83,指标性能均为良好。

由于仅按减产率无法判别返青期低温灾害等级,利用返青期单株穗数、穗粒数、千粒重计算不同

相对变化率(步长10%)对应的分类阈值,由表7可知,过程积冷量在判别单株穗数相对变化率不大于70%和大于70%样本时判识因子性能最好(AUC为0.90),因此选用-360.0 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 作为返青期Ⅱ级、Ⅲ级低温灾害分类阈值,辅助构建返青期低温灾害等级指标。

表7 冬小麦返青期低温胁迫产量构成因素不同相对变化率分类阈值
Table 7 Classification thresholds of different relative change rates of yield components of winter wheat under low temperature stress in green-up stage

产量构成因素	变化率/%	测试阈值范围/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$	最佳阈值范围/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$	最佳阈值/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$	约登指数	AUC	判识因子性能
单株穗数	10	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.53	0.76	良好
	20	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.59	0.79	良好
	30	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.71	0.86	良好
	40	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.77	0.88	良好
	50	[-432.0, -144.0]	[-431.9, -288.1]	-360.0	0.71	0.89	良好
	60	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.61	0.85	良好
	70	[-432.0, -144.0]	[-431.9, -288.1]	-360.0	0.80	0.90	优秀
穗粒数	10	[-432.0, -24.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.43	0.65	一般
	20	[-432.0, -24.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.50	0.68	一般
	30	[-432.0, -24.0]	[-288, -144.1]	-216.1	0.59	0.71	良好
	40	[-432.0, -24.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.66	0.81	良好
	50	[-432.0, -24.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.56	0.81	良好
千粒重	10	[-432.0, -144.0]	[-288.0, -144.1]	-216.1	0.10	0.50	无效
	20	[-432.0, -144.0]	[-431.9, -288.1]	-360.0	0.57	0.84	良好

以过程积冷量为判识因子构建并验证冬小麦不同发育期春季低温灾害等级指标(表8)。由表8可见,返青期完全符合的样本量为6,占总样本的85.71%;完全符合和基本符合的样本量为7,占总样本的100%。拔节期完全符合的样本量为80,占总样本的89.89%;完全符合和基本符合的样本量

为87,占总样本的97.75%。孕穗期完全符合的样本量为25,占总样本的89.29%;完全符合和基本符合的样本量为28,占总样本的100%。抽穗-开花期完全符合的样本量为11,占总样本的78.57%;完全符合和基本符合的样本量为14,占总样本的100%。

表8 冬小麦不同发育期春季低温灾害过程积冷量等级指标及验证

Table 8 Grade indicator construction and validation of spring low temperature disaster process based on accumulated cooling in different growth stages of winter wheat

发育期	等级指标/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$			验证结果		
	I	II	III	完全符合样本量	基本符合样本量	不符合样本量
返青期	[-216.1, -72.0]	[-360.0, -216.1]	<-360.0	6	1	0
拔节期	[-41.0, -1.2]	[-66.0, -41.0]	<-66.0	80	7	2
孕穗期	[-101.6, -16.8]	[-169.3, -101.6]	<-169.3	25	3	0
抽穗-开花期	[-38.5, -19.6]	[-93.8, -38.5]	<-93.8	11	3	0

3 结论与讨论

以我国黄淮海地区冬小麦为研究对象,采用Meta分析方法探讨不同发育阶段春季低温胁迫对冬小麦产量及其构成因素的影响。将收集的试验数据分为无灾样本和受灾样本,以过程最低温度、过程积冷

量为判识因子,按减产率等级划分标准构建冬小麦低温胁迫等级指标,主要结论如下:

1) 冬小麦产量及其构成因素在春季低温胁迫下总体上显著减小,单株穗数和每穗粒数对低温胁迫的敏感性要大于千粒重;春季低温胁迫下,产量及其构成因素变化与低温强度和持续时间有关,并因所处发育阶段不同存在差异。

2) 以过程最低温度和过程积冷量为判识因子,按减产率为(0,10%]、(10%,30%]和(30%,100%]构建Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级低温灾害等级指标。过程积冷量判识指标的验证准确率高于过程最低温度判识指标,能更好地表征冬小麦遭受低温灾害的严重程度。

本文的等级指标构建是基于研究区域内多地点、多品种试验数据,得到的结果具有一定普适性;按特定减产标准,量化灾害等级指标与作物产量变化的关系;基于小时尺度判识因子表征低温灾害,为填补冬小麦春季低温灾害等级指标的小时尺度空白提供参考。冬小麦春季低温灾害的发生与温度条件和水分条件关系密切^[20,49],围绕低温灾害灾变过程,综合考虑温度条件和水分条件的耦合影响,构建冬小麦春季低温灾害逐时综合指数等级指标是未来冬小麦春季低温灾害研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] 罗新兰,张彦,孙忠富,等. 黄淮平原冬小麦霜冻害时空分布特点的研究. 中国农学通报,2011,27(18):45-50.
Luo X L, Zhang Y, Sun Z F, et al. Spatial and temporal distribution of winter wheat frost injury in Huanghuai Plain. *Chinese Agric Sci Bull*, 2011, 27(18): 45-50.
- [2] 钟秀丽,王道龙,李玉中等. 黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估. 应用气象学报,2007,18(1):102-107.
Zhong X L, Wang D L, Li Y Z, et al. Risk assessment of frost damage in wheat. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(1): 102-107.
- [3] 宋艳玲,周广胜,郭建平,等. 气候变暖对冬小麦徐麦 33 产量和品质影响. 应用气象学报,2023,34(5):552-561.
Song Y L, Zhou G S, Guo J P, et al. Influences of global warming on yield structure and quality of winter wheat Xumai 33. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 552-561.
- [4] 任三学,赵花荣,周广胜,等. 郑麦 98 对播种期变化的响应. 应用气象学报,2023,34(3):362-372.
Ren S X, Zhao H R, Zhou G S, et al. Response of winter wheat Tanmai 98 to sowing date adjustments. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 362-372.
- [5] 刘立伟. 药隔、减数分裂、开花期低温对小麦产量的影响与补救研究. 扬州:扬州大学,2016.
Liu L W. Effects of Low Temperature at Anther Connective Formation, Meiosis and Anthesis Stages on Grain Yield in Wheat and Remedial Techniques. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [6] 宋艳玲,周广胜,郭建平,等. 北方冬小麦冬季冻害及播期延迟应对. 应用气象学报,2022,33(4):454-465.
Song Y L, Zhou G S, Guo J P, et al. Freezing injury of winter wheat in northern China and delaying sowing date to adapt. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 454-465.
- [7] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报,2015,26(1):1-11.
Guo J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(1): 1-11.
- [8] 陈思思,李春燕,杨景,等. 拔节期低温冻害对扬麦 16 光合特性及产量形成的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2014,35(3):59-64.
Chen S S, Li C Y, Yang J, et al. Effect of low temperature at jointing stage on photosynthetic characteristics and yield in wheat cultivar Yangmai 16. *J Yangzhou Univ(Agric Life Sci Ed)*, 2014, 35(3): 59-64.
- [9] 纪洪亭. 拔节期和孕穗期低温胁迫对小麦产量形成影响的研究. 南京:南京农业大学,2017.
Ji H T. Effects of Low Temperature Stress at Jointing and Booting on Yield Formation in Wheat. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [10] 彭少麟,郑风英. Meta 分析:综述中的一次大革命. 生态学杂志,1999,18(6):65-70.
Peng S L, Zheng F Y. Meta-analysis: A graet revolution in review. *Chinese J Ecol*, 1999, 18(6): 65-70.
- [11] 毛红丹,霍治国,张蕾,等. 环渤海葡萄涝渍指标构建及风险评估. 应用气象学报,2022,33(1):92-103.
Mao H D, Huo Z G, Zhang L, et al. Indicator construction and risk assessment of grape waterlogging in the Bohai Rim. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 92-103.
- [12] 李海楠,朱丽杰,李明倩,等. 东北地区大豆冷害指标构建及变化特征. 应用气象学报,2021,32(4):491-503.
Li H N, Zhu L J, Li M Q, et al. Construction of soybean chilling damage indicator and its evolution characteristics in Northeast China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 491-503.
- [13] 陈雨焯,王培娟,张源达,等. 基于 3 种遥感指数的东北春玉米干旱识别对比. 应用气象学报,2022,33(4):466-476.
Chen Y Y, Wang P J, Zhang Y D, et al. Comparison of drought recognition of spring maize in Northeast China based on 3 remote sensing indices. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 466-476.
- [14] 屈振江,周广胜,魏钦平. 苹果花期冻害气象指标和风险评估. 应用气象学报,2016,27(4):385-395.
Qu Z J, Zhou G S, Wei Q P. Meteorological disaster index and risk assessment of frost injury during apple florescence. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(4): 385-395.
- [15] 于玲. 河北省冬麦冻害指标的初步分析. 农业气象,1982,3(4):10-13.
Yu L. Preliminary analysis of freezing injury index of winter wheat in Hebei Province. *Chinese J Agrometeor*, 1982, 3(4): 10-13.
- [16] 刘静,张宗山,张立荣,等. 银川枸杞炭疽病发生的气象指标研究. 应用气象学报,2008,19(3):333-341.
Liu J, Zhang Z S, Zhang L R, et al. Climatic characteristics of disease by colletotrichum gloeosporioides penz on China wolfberry in Yinchuan. *J Appl Meteor Sci*, 2008, 19(3): 333-341.

- [17] 李化龙,王景红,张维敏,等. 模拟低温下主产品种猕猴桃结果母枝冻害指标. 应用气象学报,2021,32(5):618-628.
Li H L, Wang J H, Zhang W M, et al. Freezing injury index of kiwifruit branches for main varieties under simulated low temperature. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(5): 618-628.
- [18] 刘平湘. 不同类型冬小麦品种抗晚霜冻能力鉴定及相关生理指标研究. 郑州:河南农业大学,2010.
Liu P X. Studies on Evaluation of Frost Resistance of Winter Wheat Varieties and the Correlative Physiological Characteristics. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010.
- [19] 王树刚. 不同冬小麦品种对低温胁迫的生理生化反应及抗冻性分析. 泰安:山东农业大学,2011.
Wang S G. Analysis on Wheat Freezing Resistance Based on the Responses of the Physiological Indices to Low Temperature Stress. Taian: Shandong Agricultural University, 2011.
- [20] 王慧芳. 基于多源数据冬小麦冻害遥感监测研究. 杭州:浙江大学,2013.
Wang H F. Winter Wheat Freeze Injury Research Based on Multi-sources Remote Sensing Data. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [21] 高艳,唐建卫,殷贵鸿,等. 倒春寒发生时期和次数对冬小麦产量性状的影响. 麦类作物学报,2015,35(5):687-692.
Gao Y, Tang J W, Yin G H, et al. Effect of different periods and frequency of late spring coldness on winter wheat yield related traits. *J Triticeae Crops*, 2015, 35(5): 687-692.
- [22] 陈贵菊,陈明丽,王福玉,等. 药隔期低温对小麦生长发育的影响. 山东农业科学,2015,47(2):25-28.
Chen G J, Chen M L, Wang F Y, et al. Influences of low temperature in connectivum period on wheat growth and development. *Shandong Agric Sci*, 2015, 47(2): 25-28.
- [23] 任德超,胡新,陈丹丹,等. 不同低温处理对小麦光合特性和产量性状的影响. 中国农学通报,2016,32(21):44-50.
Ren D C, Hu X, Chen D D, et al. Effects of different low temperature treatments on photosynthetic characteristics and yield traits of wheat. *Chinese Agric Sci Bull*, 2016, 32(21): 44-50.
- [24] 张溪荷. 冬小麦拔节期低温对叶片光合和衰老特性及产量的影响. 南京:南京信息工程大学,2016.
Zhang X H. Effects of Frost Injury in Jointing Stages on Photosynthetic, Caducity Characteristics and Yield Structure of Four Winter Wheat Cultivars. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [25] 孙苗苗,王志强,高翔,等. 河南主推小麦品种对低温胁迫的生理响应及耐寒性分析. 麦类作物学报,2016,36(3):316-324.
Sun M M, Wang Z Q, Gao X, et al. Cold tolerance evaluation of wheat varieties in Henan based on their physiological response to low temperature stress. *J Triticeae Crops*, 2016, 36(3): 316-324.
- [26] 李春燕,徐雯,刘立伟,等. 药隔至开花期低温对小麦产量和生理特性的影响. 麦类作物学报,2016,36(1):77-85.
Li C Y, Xu W, Liu L W, et al. Effect of short-time low temperature from anther connective stage to anthesis on wheat yield and physiological characteristics. *J Triticeae Crops*, 2016, 36(1): 77-85.
- [27] 张磊,李国领,张建周,等. 拔节期低温胁迫对小麦生理特性和产量的影响. 河南农业科学,2017,46(11):13-18.
Zhang L, Li G L, Zhang J Z, et al. Effects of low temperature stress on physiological characters and yield of two wheat varieties at jointing stage. *J Henan Agric Sci*, 2017, 46(11): 13-18.
- [28] 夏煜民. 拔节期和孕穗期双重低温对小麦生长发育及产量形成影响的研究. 南京:南京农业大学,2017.
Xia Y M. Effects of Double-stage Low Temperature Stress at Jointing and Booting on Development, Growth and Yield Formation in Wheat. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [29] 张豫. 黄淮海地区不同小麦品种低温抗性比较研究. 新乡:河南师范大学,2017.
Zhang Y. Comparison for Cold Resistance of Different Wheat Cultivars in Huang-Huai-Hai Plain. Xinxiang: Henan Normal University, 2017.
- [30] 张玉雪. 春季低温对小麦产量的影响及施氮的防御补救效应研究. 扬州:扬州大学,2018.
Zhang Y X. Effects of Low Temperature in Spring on Wheat Yield and Defensive Remedy of Fertilize Nitrogen. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [31] 王瑞霞,闫长生,张秀英,等. 春季低温对小麦产量和光合特性的影响. 作物学报,2018,44(2):288-296.
Wang R X, Yan C S, Zhang X Y, et al. Effect of low temperature in spring on yield and photosynthetic characteristics of wheat. *Acta Agron Sinica*, 2018, 44(2): 288-296.
- [32] 米璐. 孕穗期低温胁迫对不同基因型小麦穗部发育的影响. 合肥:安徽农业大学,2018.
Mi L. Effect of Low Temperature Stress on Spike Development in Different Genotype Wheat at Booting Stage. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [33] 张自阳,王智煜,王斌,等. 春季穗分化阶段低温处理对不同小麦品种幼穗结实性及生理特性的影响. 华北农学报,2019,34(4):130-139.
Zhang Z Y, Wang Z Y, Wang B, et al. Effects of low temperature treatment at spring spike differentiation stage on young ear fruiting and physiological characteristics of different wheat varieties. *Acta Agric Boreali Sinica*, 2019, 34(4): 130-139.
- [34] 郭春强,王君,张振永,等. 低温胁迫条件下深麦6010产量及其农艺性状研究. 山西农业科学,2019,47(2):188-190.
Guo C Q, Wang J, Zhang Z Y, et al. Study on yield and agronomic characters of Luomai 6010 under low temperature stress. *J Shanxi Agric Sci*, 2019, 47(2): 188-190.
- [35] 谭滇. 拔节期低温对小麦小花发育与籽粒生长的影响及氮素调节. 滁州:安徽科技学院,2020.
Tan Z. Effects of Low Temperature at Elongation Stage on

- Flower Development and Grain Growth of Wheat and Response to Nitrogen Application. Chuzhou: Anhui Science and Technology University, 2020.
- [36] 高芸. 不同生育进程小麦对春季低温的生理响应及产量差异. 扬州:扬州大学, 2020.
Gao Y. Physiological Responses and Yield Differences of Wheat Subjected to Low Temperature at Different Growth Stages in Spring. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [37] 李晓静, 刘立军, 徐海娜, 等. 拔节期低温胁迫对不同水处理小麦生物产量和籽粒产量的影响. 农业科技通讯, 2021(7): 98-101.
Li X J, Liu L J, Xu H N, et al. Effects of low temperature stress at jointing stage on biological yield and grain yield of wheat under different water treatments. *Bull Agric Sci Technol*, 2021(7): 98-101.
- [38] 曹燕燕, 张宏套, 郭春强, 等. 不同冬小麦品种拔节期低温生理生化反应及其灰色关联度分析. 山东农业科学, 2021, 53(8): 37-42.
Cao Y Y, Zhang H T, Guo C Q, et al. Physiological and biochemical reactions of different winter wheat varieties at jointing stage under low temperature and their grey correlation analysis. *Shandong Agric Sci*, 2021, 53(8): 37-42.
- [39] 高芸, 张玉雪, 马泉, 等. 春季低温对小麦花粉育性及粒数形成的影响. 作物学报, 2021, 47(1): 104-115.
Gao Y, Zhang Y X, Ma Q, et al. Effects of low temperature in spring on fertility of pollen and formation of grain number in wheat. *Acta Agron Sinica*, 2021, 47(1): 104-115.
- [40] 王洋洋. 春季低温对小麦生理和产量的影响及冻害评价. 郑州:河南农业大学, 2021.
Wang Y Y. Effect of Spring Low Temperature on Wheat Physiology and Yield and Evaluation of Freezing Injury. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [41] 岳俊芹, 张素瑜, 李向东, 等. 低温胁迫对小麦叶绿素荧光参数及产量的响应. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 105-110.
Yue J Q, Zhang S Y, Li X D, et al. Effect of low temperature stress on chlorophyll fluorescence parameters and yield of wheat. *J Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 105-110.
- [42] 柯媛媛, 陈翔, 张乐乐, 等. 药隔期低温胁迫对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响. 安徽农业大学学报, 2021, 48(5): 701-706.
Ke Y Y, Chen X, Zhang L L, et al. Effects of low temperature stress at anther connective stage on dry matter accumulation, translocation and distribution and grain yield of wheat. *J Anhui Agric Univ*, 2021, 48(5): 701-706.
- [43] 张乐乐. 药隔期低温胁迫对小麦上部节间、穗部形态及单穗重的影响. 合肥:安徽农业大学, 2021.
Zhang L L. Effects of Low-temperature Stress on Upper Internode, Spike Morphology, and Yield per Spike of Wheat at the Anther Interval Phase. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.
- [44] 付延松, 谭植, 李文阳. 拔节期低温对小麦籽粒产量与灌浆期旗叶荧光参数的影响. 生态科学, 2022, 41(6): 33-40.
Fu Y S, Tan Z, Li W Y. Effects of low temperature at jointing stage on grain yield and fluorescence parameters of flag leaves in wheat grain filling. *Ecol Sci*, 2022, 41(6): 33-40.
- [45] 曹燕燕, 葛昌斌, 齐双丽, 等. 不同冬小麦品种(系)拔节期低温胁迫生理反应及抗寒性评价. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 59-66.
Cao Y Y, Ge C B, Qi S L, et al. Physiological response to low temperature stress and evaluation of cold resistance of different winter wheat varieties (lines) at jointing stage. *Jiangsu Agric Sci*, 2022, 50(17): 59-66.
- [46] 马泉, 张玉雪, 陶源, 等. 春季不同时期低温对小麦光合特性和粒重形成的影响. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 226-235.
Ma Q, Zhang Y X, Tao Y, et al. Effects of low temperature at different stages in spring on photosynthetic characteristics and grain weight formation of wheat. *J Triticeae Crops*, 2022, 42(2): 226-235.
- [47] 赵凯敏. 花后短暂高、低温对小麦产量与品质形成的影响. 扬州:扬州大学, 2022.
Zhao K M. The Effects of Temporary High and Low Temperature after Anthesis on Yield and Quality Formation of Wheat. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [48] 杨丽, 李洋, 王佳勤, 等. 孕穗期低温对小麦幼穗发育及产量的影响. 核农学报, 2022, 36(12): 2490-2500.
Yang L, Li Y, Wang J Q, et al. Effects of low temperature at booting stage on young ears development and yield of wheat. *J Nucl Agric Sci*, 2022, 36(12): 2490-2500.
- [49] 郑冬晓. 不同冬春性小麦低温灾害指标和可种植界限变化研究. 北京:中国农业大学, 2019.
Zheng D X. Studies on Indices of Freezing Injury and Changes of Possible Planting Boundaries for Different Winter-spring Wheat. Beijing: China Agricultural University, 2019.
- [50] 徐雯, 杨景, 邓乐乐, 等. 低温胁迫对扬麦 16 产量的影响及缓解措施研究. 核农学报, 2015, 29(2): 375-382.
Xu W, Yang J, Deng L L, et al. Effects of low temperature on grain yield of 'Yangmai 16', prevention and disaster relief measures. *J Nucl Agric Sci*, 2015, 29(2): 375-382.
- [51] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究. 作物学报, 1997, 23(4): 418-424.
Feng L P, Gao L Z, Jin Z Q, et al. Studies on the simulation model for wheat phenology. *Acta Agron Sinica*, 1997, 23(4): 418-424.
- [52] 贡复俊. 农业气象学. 北京:农业出版社, 1993.
Gong F J. Agrometeorology. Beijing: Agriculture Press, 1993.
- [53] 中国气象局. 气象. 香蕉、荔枝寒害等级(QX/T 80—2007). 2007.
Chinese Meteorological Administration. Grade of Cold Damage for Banana and Litchi(QX/T 80—2007). 2007.

Indicator Construction of Spring Low-temperature Disaster Affecting Winter Wheat of Huang-Huai-Hai Based on Meta-analysis

Li Meixuan¹⁾ Huo Zhiguo¹⁾²⁾ Kong Rui¹⁾³⁾ Jiang Mengyuan¹⁾²⁾ Mi Qianchuan¹⁾²⁾

¹⁾(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

³⁾(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

The low temperature disaster in spring is one of the main agro-meteorological disasters affecting the yield and quality of winter wheat by affecting the development process and physiological function, resulting in yield reduction. In order to clarify the quantitative relationship between spring low temperature stress and winter wheat yield and its components in Huang-Huai-Hai Region, an indicator is constructed based on yield reduction rate. Based on 1924 sets of experimental data and control data in 34 retrieved literatures, effects of low temperature stress on wheat yield and its components at green-up stage, jointing stage, booting stage and heading-flowering stage are analyzed by Meta-analysis. Using the minimum temperature and accumulated cold of the process as identification factors, the critical thresholds of 0, 10% and 30% of yield reduction rate are determined by using the Youden's Index to establish and verify the low temperature disaster grade indicator. Results show that the yield and its components of winter wheat are jointly affected by the intensity and duration of low temperature to different extent in different developmental stages. The yield and all its components decrease significantly under low temperature stress, and the sensitivity of panicle number per plant and grain number per panicle to low temperature stress is greater than that of thousand kernel weight. The low temperature disaster grade indicators are constructed according to the yield reduction rate of (0,10%], (10%,30%], (30%,100%]. Taking the minimum temperature (unit: °C) of the process as identification factor, ranges for low temperature disaster grade (Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ) during the green-up stage are [-5.0, -2.0), [-8.5, -5.0), < -8.5; during the jointing period, they are [-1.0, 3.0), [-2.5, -1.0), < -2.5; during the booting stage, they are [1.1, 5.1), [-3.0, 1.1), < -3.0. With the accumulated cold (unit: °C · h) of the process as identification factor: Indicators during the green-up stage are [-216.1, -72.0), [-360.0, -216.1), < -360.0; during the jointing stage, they are [-41.0, -1.2), [-66.0, -41.0), < -66.0; during the booting stage, they are [-101.6, -16.8), [-169.3, -101.6), < -169.3; during the heading to flowering period, they are [-38.5, -19.6), [-93.8, -38.5), < -93.8. The accuracy of the indicator constructed with process accumulated cold volume is higher than that of process minimum temperature in all growth stages, indicating that the identification factor (accumulated cold of the process) based on the comprehensive influence of low temperature intensity and duration of the process could better characterize the severity of winter wheat suffering from low temperature disaster.

Key words: winter wheat; low temperature disaster; yield; Meta-analysis