doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.002

农业气象灾害主要指标研究进展与展望

王　茜　林若薇　赵　闯　王若诗　邱渝欣　缪宇庭　叶众依　杨晓光
(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 气候变化加剧极端天气事件发生的频率与强度,导致农业气象灾害对我国粮食安全构成严重威胁。灾害指标作为连接气象胁迫与农业响应的量化工具,在风险管理中居核心地位。本文围绕我国主要作物农业气象灾害指标的发展与应用,系统梳理了干旱、渍涝、高温热害、低温冷害与霜冻害,以及高温干旱、干热风、连阴雨和低温寡照等典型单一与复合灾害指标演进特征,并总结人工控制试验、统计模型和作物生长模型等主要指标构建方法及其适用性。结果表明,农业气象灾害指标总体经历了由单一气象阈值向多要素综合指数、由灾害环境表征向作物响应刻画、由单一灾害识别向复合灾害评估发展的过程。当前指标体系仍存在监测、预警与风险评估功能配置不均衡,动态演变过程表征能力不足,以及灾害指标与作物生理生态响应、产量和品质损失之间衔接不足等问题。未来需明确区分监测-预警-风险评估功能,构建基于作物敏感期的动态指标,并推动"遥感-作物模型-AI"多源融合,对提升农业气象服务水平和维护国家粮食供给稳定具有重要意义。

关键词: 农业气象灾害; 灾害指标; 复合灾害; 作物敏感期; 指标体系
中图分类号: S16　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0015-15　　**OSID**:

Advances and Prospects in Research on Agrometeorological Disaster Indices for Major Crops

Wang Xi　Lin Ruowei　Zhao Chuang　Wang Ruoshi　Qiu Yuxin　Miu Yuting　Ye Zhongyi　Yang Xiaoguang
(*College of Resource and Environmental Science*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*)

Abstract: Climate change is increasing the frequency and intensity of extreme weather events, posing serious threats to food security in China through increasingly severe agrometeorological disasters. Disaster indicators, as quantitative tools linking meteorological stresses with agricultural responses, play a central role in disaster risk management. It focused on the development and application of agrometeorological disaster indicators for major crops in China, systematically summarized the evolution of indicators for typical single and compound disasters, including drought, waterlogging, heat stress, chilling injury and frost damage, as well as compound heat-drought events, dry-hot wind, persistent cloudy and rainy weather, and combined low-temperature and low-light stress. The major approaches for constructing disaster indicators, including controlled experiments, statistical models, and crop growth models, were also reviewed in terms of their applicability. The results showed that agrometeorological disaster indicators had generally evolved from single meteorological thresholds to multi-factor integrated indices, from characterization of hazardous environmental conditions to representation of crop responses, and from identification of individual hazards to assessment of compound disasters. However, current indicator systems still suffer from imbalanced functional development among monitoring, early warning, and risk assessment, insufficient capacity to characterize the dynamic evolution of disaster processes, and inadequate linkages between disaster indicators and crop physiological and ecological responses, yield losses, and quality deterioration. Future research should clearly distinguish the functions of monitoring, early warning, and risk assessment, develop dynamic indicators based on crop-sensitive growth stages, and promote multi-source integration of remote sensing, crop models, and artificial intelligence. These advances were of great significance for improving agrometeorological services and maintaining the stability

收稿日期: 2026-05-17　修回日期: 2026-05-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2301302)
作者简介: 王茜(1999—),女,博士生,主要从事气候变化对作物影响及适应研究,E-mail: xiwang@cau.edu.cn
通信作者: 赵闯(1988—),男,教授,博士生导师,主要从事气候变化与粮食安全研究,E-mail: zhaochuang@cau.edu.cn

of the national food supply.

Key words: agricultural meteorological disasters; disaster indicators; compound events; crop critical period; indicator system

0 引言

粮食安全是“国之大者”。由极端天气气候事件引发的农业气象灾害,是威胁我国主要粮油作物稳产增产的重要自然风险[1-5]。我国地域广阔、气候类型复杂,主要农业气象灾害具有明显的区域性、作物差异性和生育阶段敏感性特点。根据主要致灾气象要素,农业气象灾害大致分为 3 类:水分胁迫灾害(如干旱、涝渍)、温度胁迫灾害(如高温热害、低温冷害)以及复合灾害(如高温干旱、干热风、连阴雨、低温寡照),各类农业气象灾害具有特定的空间分布规律,其危害对象和关键影响时期也因作物类型及生育进程而异。例如,华北平原及黄淮海冬小麦产区常面临干旱和干热风危害[6-9],黄淮海夏玉米带复合高温干旱风险呈加重趋势[6,10-11],而南方水稻产区易受到低温寡照、高温热害及暴雨洪涝等灾害影响[12-13]。这些灾害均会对作物生长发育产生不利影响,进而造成产量和品质下降。值得注意的是,不同农业气象灾害在主要发生区域、影响作物及敏感生育阶段上具有明显差异,决定了灾害指标体系必须兼顾区域适应性、作物针对性和生育期敏感性。此外,在全球气候变化背景下,极端事件的频率和强度已被观测到并预测将持续增加[14-17]。因此,精准识别与量化农业气象灾害的影响,不仅是农业防灾减灾和适应气候变化的前提,更是构建有效防灾减灾体系、保障国家粮食安全的迫切需求。

“灾害指标”在防灾减灾方面发挥着核心作用,既是描述灾害强度和频率的量化工具,也是连接气象条件与作物生理响应的关键桥梁,贯穿于灾害监测、预警、损失评估与风险区划的全业务链条[18]。我国对灾害指标系统研究可追溯至第十个“五年计划”时期,伴随着全国气象台站网络的建立与观测资料的规范化,相关研究与业务制度得以逐步建立和完善[19-21]。历经数十年,气象灾害指标研究已从早期基于单一气象要素简单阈值判别,演进到当前融合多源数据、多维特征的综合指数时代,研究范式也从单一灾害扩展至复合灾害事件,并推出了一系列国家、行业和地方标准。这一深刻的变革,在极大提升灾害认知与应对能力的同时,也催生了日益庞大复杂的指标体系,为构建统一、高效的业务应用框架带来了新的挑战。

尽管相关指标和指数已达上百种,但现有研究多聚焦于特定灾害或区域的指标构建与应用,呈现明显的“碎片化”特征。在此背景下,本文按灾害类型分类梳理主要作物气象灾害指标的发展脉络,并系统评述支撑其发展的各类方法论。探讨当前指标体系核心瓶颈,并提出面向未来的研究展望,以期为新一代农业气象业务体系的建设提供科学参考。

1 常见气象灾害指标研究进展

1.1 水分类指标

水分类农业气象灾害以干旱和渍涝为代表,核心致灾因子为土壤含水率异常、降雨量及作物蒸散发变化。早期指标多基于降雨距平(PA)或标准化降雨指数(SPI),随着研究深入,逐步引入土壤含水率、作物需水量和植被状况等指标,使得监测更贴近作物实际水分胁迫。水分类指标强调空间连续性与生理响应,能为干旱和涝渍灾害早期监测和风险评估提供依据。

1.1.1 干旱

干旱是我国最主要的农业气象灾害之一,影响范围广、持续时间长,尤其对华北、东北等主产区粮食生产构成严重威胁。因此,对干旱进行精准的监测与评估,始终是农业气象研究的核心议题。初期干旱指标主要基于气象要素构建,例如降雨距平(PA)[22]和标准化降雨指数(SPI)[23]等。这类指标优势在于能客观量化大气水分的收支状况。然而,核心局限在于气象干旱与作物实际感受到的水分胁迫在时空上并非完全同步,限制了在农业生产中应用精度。为解决这一问题,研究重点转向能更直接反映作物可用水分的土壤含水率,如土壤相对湿度(Rsm)和土壤水分亏缺指数(SMDI)[24]。这类指标在机理上更贴近作物水分胁迫本质,监测精度得到显著提升。我国现行的农业干旱国家标准也将作物水分亏缺距平指数(CWDIa)[25]作为核心判据之一。

尽管土壤含水率指标在机理上更具优势,但大尺度根区土壤含水率数据获取困难(如地面站点稀疏、遥感探测深度不足[26-27]等)限制了业务化推广。研究转而通过监测干旱对植被造成的影响反演灾害程度。植被状态指数(VCI)[28]等一系列指标,通过分析植被冠层的光谱特征评估健康状况,有效解决了干旱监测空间连续性问题。但这类方法普遍存在滞后性,因为当植被指数发生显著变化时,作物往往已经历较长时间的胁迫,对预警需求而言时效

性不足。因此，当前研究前沿聚焦于能在胁迫早期进行预警的生理指标。以太阳诱导叶绿素荧光（SIF）为代表的新型遥感指标，能直接反映植被光合作用的实际效率，可在植被外观形态发生改变前（提前 20～25 d[29]）捕捉到胁迫信号，为干旱早期预警提供了新的技术途径。

尽管干旱指标已向早期生理预警方向发展，但由于干旱灾害本身的独特性，指标体系构建与应用仍面临一些特有的科学难题。首先，干旱作为一种“缓发性”灾害，起止时间界定远比洪水、霜冻等突发性灾害模糊，现有指标在精准识别干旱事件“触发”与“解除”上仍存在较大不确定性，尤其对干旱恢复过程评估能力不足。其次，干旱具有多重属性，演进遵循从“气象干旱”到“农业干旱”，再到“水文干旱”的传递链。当前指标多聚焦于链条的某个单环节，缺乏能够有效刻画和预测不同类型干旱间演进传播过程的整合性指标。此外，近年来“骤旱”事件频发，快速演变特征对传统月、旬尺度的监测指标提出了严峻挑战，发展高时效性、高敏感度的骤旱识别与预警指标是当前亟待突破的方向。

1.1.2　渍涝

我国渍涝灾害发生频繁，渍涝灾害在长江中下游及江淮等地区对旱地作物生长和农田生产造成严重威胁。渍涝指标研究最早可追溯到 20 世纪 70—80 年代，将降雨量异常程度（降雨量在某段时间过多）作为渍涝指标[30-31]。虽然这类指标可以大范围评估灾害强度，但由于作物不同，所处发育阶段抗涝能力也不相同，而且不同地区农田土壤质地、水利工程设施存在差异，渍涝对农业造成的实际伤害也不尽相同。

因此，后续研究从农业生产角度出发，区分作物关键生育期，引入降雨日数、降雨强度、土壤相对湿度等指标要素。这类指标对灾害的评估更贴合农业生产实际。GB/T 32752—2016《农田渍涝气象等级》[32]中也将土壤含水率和地表径流深度作为主要判定渍涝强度依据。然而，依赖土壤含水率数据获取有限，对大范围渍涝评估存在局限性。因此，大量研究转而选择已有干旱指数识别渍涝或构建综合指数，例如 Z 指数[33]、标准化降水蒸散指数（SPEI）[34]和标准化前期降水蒸散指数（SAPEI）[35-36]等。这类指标（如作物水分盈余指数 CWSI）可有效解释 90% 以上[37]作物因渍涝导致产量损失。

尽管干旱指数在渍涝监测评估方面表现出更强的适用性，但多数指标构建核心依旧是降雨量，因此有效指标的构建依旧是当前研究重难点。此外，相比于干旱、高温热害等热点问题，目前有关农业洪涝灾害研究进展缓慢。一方面渍涝灾害发生在降雨过于集中或持续时间过长之后，导致灾后影响事实检验难度增大，对致灾机理、影响因素等研究薄弱。另一方面，灾害链复杂性与灾情数据零散性，使得构建量化、动态的风险评估体系缺乏有效支撑，制约了防灾减灾能力的提升。因此，准确识别不同渍涝灾害类型致灾因子与致灾机理是当前渍涝指标构建面临的核心挑战。

1.2　温度类指标

温度类农业气象灾害主要包括高温热害和低温冷害与霜冻害，核心致灾因子为温度异常。高温热害通常发生在作物生殖生长期，导致花粉受损、灌浆不足；低温冷害和霜冻害多出现在幼苗期或灌浆期，可能抑制光合器官发育并造成产量下降。温度类指标的发展经历了从单一绝对或相对温度阈值，到综合温度持续时间、热积温等动态指标的演进，同时逐步引入作物敏感期概念，更精确反映温度异常对作物生长的影响。

1.2.1　高温热害

在全球气候变暖的背景下，气温异常升高已成为影响作物生产的重要气候胁迫因素[38-39]，特别是作物生殖生长期，高温事件会显著影响作物生长发育，并对我国北方旱作农业和南方稻作系统造成不利影响[40]。早期高温热害指标可划分为绝对阈值与相对阈值 2 类。前者通常采用固定温度值（如日最高温≥35℃）作为气象高温标准[41-42]，后者则基于温度序列的分位数（如第 90 百分位）界定极端高温[43-44]。现行标准中亦存在同时考量温度与湿度的复合指标，或依据当地气候态百分位数定义高温事件。例如，在玉米开花期，日最高气温 TMax≥30℃，空气相对湿度 HI≤60% 时，开花数量较少[41]。此类指标虽然简便实用，但难以有效表征高温事件的持续性与累积效应。

21 世纪初，数次大规模热浪事件（如 1995 年芝加哥热浪和 2003 年欧洲热浪）促使研究重点转向综合强度、持续时间与发生频率的热浪指数[45]。热积温[46-47]等指标也被广泛应用于农业影响评估。此时对极端高温的判别标准由单一气象指标转向综合多要素的特征指数，从而更深刻地揭示高温致灾本质。然而，由于热浪本身缺乏统一定义，现有指标多基于相似变量构建却仅适用于特定区域，限制了普适性。此外，这些综合指数的应用多集中于对历史事件“静态”描述与归因，在“动态”评估未来气候变化时用于极端高温对农业生产的演变风险方面尤显不足。更为复杂的是，极端高温在真实环境中常与干旱等胁迫耦合形成复合事件，产生的非线性叠加

效应远非单一胁迫研究所能揭示。因此,研究前沿已聚焦于复合高温干旱事件,相关内容将在 1.3 节详细讨论。

1.2.2 低温类灾害

我国农业生产中常见的低温类灾害有低温冷害和霜冻害,两者影响特征有所不同。低温冷害是一种因生长季热量不足导致的持续性、累积性灾害,大致可分为延迟型和障碍型:延迟型主要通过抑制光合器官发育、延缓生理进程,最终在产量形成阶段才体现损失;障碍型则直接影响作物生长发育[48]。在东北地区玉米、水稻等生育关键期出现持续或突发低温,严重年份往往会导致减产 15% ~25%[49]。霜冻害则属于短时突发性低温危害,多发生在作物活跃生长期内,因夜间辐射冷却或冷平流导致植株体温骤降至 0℃以下而受害,发生迅速、致伤直接。

早期低温类灾害常用指标因灾种而异。针对低温冷害,常用指标包括日最低气温、日降温幅度和冷积温等,实际业务中多采用温度距平、活动积温等综合性指标,并在判定中纳入持续时间维度,例如双季早稻分蘖期至幼穗分化期内连续 5 d 或以上日平均气温≤20℃即判定为受到冷害[50]。针对霜冻害,叶面温度能够灵敏地指示作物所受的胁迫[51-52],然而受限于实际观测难度,该参数目前主要应用于田间试验研究,尚未成为业务化监测常规变量,实际业务中普遍采用最低气温作为主要判定依据。例如,我国现行标准中关于霜冻害指标 QX/T 88—2008《作物霜冻害等级》[52]在玉米苗期日最低气温在 -2 ~ -1℃时为轻霜冻等级。此外,冻害与霜冻害同属 0℃以下低温灾害,指标通常以最低气温、低温持续时间及冷积温等作为主要判别因子[53-55],在此一并提及,不作重点展开。

温度类灾害的致灾因子单一,因此基于多指标构建的综合指数常用于了解灾害时空分布、风险评估和保险赔付。然而,当前指标对作物生理胁迫的表征和区域实用性存在局限性,无法真实反映作物受损程度。遥感技术的引入,为霜冻害监测提供了全新视角。借助遥感技术可实现大范围霜冻害动态监测和评估,常用指标包括地表温度反演[56-57]、植被指数[58-60]和光谱指数[61-62]等,根据反演地表温度,并利用实测数据订正,晚霜冻监测情况与实际灾情吻合度可达 90% 以上[57]。植被指数在霜冻发生前后降幅极大,最低值可降至 3%[60],可以反映小麦受害损伤情况。然而此类方法在应用时可能受限于冷空气活动伴随的云层干扰,可能导致有效观测数据缺失,严重制约了灾害监测的时效性与业务化运行能力。

尽管我国在低温灾害监测预警方法上已积累了丰富的研究成果,然而,受制于其影响固有的滞后性,在构建具有前瞻性指标体系时,仍面临一系列与之相关的核心难点。低温冷害“隐性”特征构成了独特的挑战,其影响并非直接杀伤作物,而是通过抑制光合器官发育、延缓生理进程等机制,最终在产量形成关键阶段(如灌浆)才暴露出不可逆的损失,造成事实上产量“哑巴亏”[63]。现有冷害指标依赖于灾后气象统计的静态指标,对于这种动态累积的生理损伤往往反应迟钝,缺乏预见性。此外,现有指标普遍过于依赖“最低气温”单一评价因子,霜冻害形成的实质过程与空气湿度、风速、作物自身含水状况等条件密切相关[64-66],因此,构建温度与水分条件耦合影响的综合判别指标是突破当前研究局限的关键。

在实际农业生产中,气象灾害往往不是单一出现,而是多种因素共同作用的结果。温度异常与水分胁迫、光照不足等因素经常叠加,形成对作物的复合胁迫。例如,高温在干旱条件下可能加剧作物蒸腾失衡,而低温在土壤含水率充足时可能减轻冻害风险。

1.3 复合灾害指标

复合灾害指标涉及多种气象因子叠加的情形,例如高温干旱、干热风、连阴雨和低温寡照。核心特征是温度和湿度等因素的相互作用产生非线性影响,单一指标难以全面反映作物受损情况。复合指标发展经历了从简单事件叠加到多变量耦合、统计与机理结合的方法,逐步引入作物敏感期、生理响应及动态监测概念,提高对复杂灾害的识别和预测能力。

1.3.1 高温干旱

在各类复合气象灾害中,高温与干旱并存对作物产量的冲击尤为突出。随着全球气候变化加剧,此类复合事件发生频率与强度持续增加,已成为威胁粮食安全的核心因素[16,67-68]。早期复合高温干旱指标是通过识别 2 个单一灾害的极端状况并判断是否同时发生[69-70]。这种方法概念直观、计算简便,能够有效识别显著的复合极端个例。然而,局限性在于将复合事件简单视为 2 个独立事件“机械重合”,无法量化二者之间相互作用及其对作物的非线性叠加效应。为克服这一局限,当前研究在量化复合事件时,通常将其解构为 2 个子事件,分别选取适用的气象指标或综合指数,并通过耦合函数或多变量联合分布等科学方法实现系统整合,最终构建出能够表征复合事件特征的综合指数。常用干旱指数包括标准化降水指数 SPI、标准化降水蒸散发指

数 SPEI 和帕默尔干旱指数 PDSI 等[71-72]，高温指数包括日最高气温[73]、标准化温度指数 STI[74] 和温度状态指数 TCI[75] 等。这种方法能更为全面地表征复合事件的多维特征，显著提升了对复杂灾害过程整体刻画能力。

然而，尽管该整合方法在概念上显著优于早期简单叠加的识别模式，但实际应用的可靠性仍面临严峻挑战。首先，不同干旱指标选择可能导致对复合高温干旱事件量化的结果不同，对未来事件预测会产生 19% 不确定性[76]。根本原因在于干旱指数的构建基础不同，仅依赖降雨量（如 SPI）定义干旱事件会忽略其他关键的水文变量（如土壤含水率和径流），结合多变量的综合指数（如结合降雨量、径流和土壤含水率 MSDI）可以更全面地表征干旱事件，但这种复杂性也引入了额外的不确定性。此外，现有方法在表征高温与干旱之间动态耦合关系时仍显不足。多数模型基于统计上同步发生或预设函数关联二者，未能充分反映高温通过加剧蒸散从而触发或强化干旱、以及干旱通过抑制蒸腾反馈进而加剧冠层高温的双向反馈机制。这种对复杂相互作用机理的简化，限制了指标对复合事件动态演变过程准确描述。因此，从静态指标匹配，转向对高温干旱间动态反馈这一核心物理过程解析是当前研究的重要挑战。

1.3.2　干热风

干热风多发生在小麦粒重形成等关键时期。虽然影响时间较短，但干热风危害重的年份可造成小麦减产 10% ~20%，尤其是我国华北平原地区。干热风致灾因子相对明确，因此无论是在标准文件还是科学研究中，都以温度、相对湿度以及风速作为基础指标。在指标构建之初，研究者们充分考虑作物对灾害的生理响应，结合气候变量与灾损指标（灌浆速率、作物产量损失等）量化灾害影响[77]。我国在农业气象业务上当前使用的 QX/T 82—2019《小麦干热风灾害等级》[78] 新添加了土壤相对湿度，相较于先前气象指标，更能综合反映农田的实际水分供需状况，对干热风识别准确率提高 17% ~37%[79]。干热风综合指数普遍将温度、大气相对湿度和风速通过不同方法结合（如线性加权、概率函数等），在识别干热风事件中准确率可达 90% 以上[80]。

然而，现行标准中温湿风要素阈值基于历史发生干热风时对应的土壤相对湿度频率分布图确定阈值，并通过 90% ~99% 置信区间拟合气象因子的阈值，最终通过回代率验证选择最优阈值构建干热风灾害等级指标[79]，并没有考虑作物的生理响应。值得注意的是，近年来我国华北麦区小麦产量总体呈稳步上升趋势[81]，而同期干热风发生频率亦呈增加态势[82]，二者在表象上并未呈负相关关系。表明现有基于气象统计阈值的判别方法在反映作物真实受害程度方面仍可能存在局限，尤其在灾害识别与实际减产响应之间对应关系上，仍需进一步从作物生理机制层面加以检验和完善[83]。因此，未来研究需引入基于作物生理过程动态阈值判定方法，以提升干热风监测与评估指标的准确性与适用性，确保研究聚焦于真正导致减产的气象胁迫过程。

1.3.3　连阴雨

连阴雨是造成雨涝的重要原因之一，在我国长江流域，多发于作物播种与收获等关键农事季节，常导致农作物减产幅度达 10% ~20%[30]。连阴雨基础指标一般包括气温、日照时数、降雨量等。例如，QX/T 98—2008《早稻播种育秧期低温阴雨等级》[84] 中对等级划分采用日平均气温及持续天数、日照时数作为分级指标，例如，当日平均气温 ≤ 12℃、日平均气温持续 3 ~5 d 且过程平均日照≤3 h，则判定为轻度等级。然而，此类基于气象要素简单叠加的等级划分方法存在明显局限。指标仅描述了天气状况，而非作物具体的生理胁迫程度（如光合有效辐射不足、根系缺氧等）。因此，这种判据本质上是一种间接且滞后的环境代理指标，难以准确量化对作物生长及最终产量的实际影响。

因此，为更精准地评估连阴雨对农业生产的实际影响，研究重点已转向构建能反映作物受灾情况的综合指数，通常通过整合连阴雨基础指标、作物受灾面积与产量损失数据服务于风险评估[85-88]。尽管此类指数在灾后损失表征方面有所进步，但根本局限在于：作为一种基于灾后统计的“黑箱”式关联分析，未能触及连阴雨胁迫作物生理过程的核心机制，因而在灾前灾中监测预警方面效能有限。此外，我国现有的连阴雨指标多局限于区域性研究，未能形成全国统一的评估标准。主要是由于各气候区降雨规律与极端降雨机理迥异所致，这种区域化差异也直接制约了监测模型在国家尺度上推广与应用。在技术路径上，借助遥感数据的云覆盖率也可实现连阴雨监测[89]。然而，该方法目前应用较少，核心局限在于遥感观测无法有效甄别云底是否真正形成了降雨。因此，量化连阴雨胁迫在不同区域、不同生育阶段对作物生理的影响路径，构建具有普适性监测预警指标是当前研究的重点。

1.3.4　低温寡照

低温寡照是一种典型的复合型农业气象灾害，核心致灾因子为光照不足与热量亏缺。在研究中，

常用日照时数作为量化指标,同时也采用光合效率和抗氧化能力等生理指标[90]评估作物的抗逆性。由于低温寡照尚缺统一标准,不同地区和作物研究多采用相近的光温阈值组合进行判定,现阶段仍以区域性、作物针对性经验研究为主。研究者大多采用日照≤3 h 的持续日数[91]作为寡照致灾因子,同时参照 GB/T 34967—2017《北方水稻低温冷害等级》[92]中低温阈值进行综合判定。然而,对低温寡照的准确定义与量化始终面临根本性挑战,在一定程度上导致了相关研究的相对匮乏。一方面是由于复合型气象灾害本身的复杂致灾机制;另一方面,在实际天气过程,低温寡照与低温连阴雨灾害往往相伴相生、难以截然区分。连阴雨天气必然导致寡照,而持续寡照天气又常常由深厚的云层和水汽维持,极易发展为降雨[93]。这种在发生时段上高度重叠性,使得 2 类灾害在研究与评估中易产生混淆。因此,厘清低温寡照独立的致灾机理,明确与低温连阴雨等关联灾害的关键区分阈值是构建完整灾害评估指标体系的基础。主要作物气象灾害标准信息如图 1 所示。



图 1 主要作物气象灾害标准信息(国标、行标、部分地标)

Fig. 1 Standard information on meteorological disasters for major crops

2 灾害指标构建方法

2.1 人工控制试验

人工控制试验能精确解析高温、干旱等单一胁迫及其复合效应对作物关键生理过程的影响,从而实现灾害损失的准确归因。早期试验主要依赖自然气候变异,虽能反映作物在真实环境下综合响应,但难以精确解析单一气象要素的独立贡献及其交互作用。因此,为定量解析致灾因子及其交互作用,研究转向人工控制试验。通过精确设置环境变量,不仅能模拟气候变化对作物产量的影响,产生的机理数据更能显著提升模型的解释与预测能力。尽管通过试验构建的灾害指标(如低温冷害[94-95]、冻害[96]等)在试验当地具有极强的代表性与准确性,但构建的指标在空间扩展至区域尺度时,适用性往往显著降低。主要源于控制试验环境条件相对单一固定,而区域尺度上农田所处的气候背景、土壤类型及管理措施等自然与人为因素具有高度异质性,导致基于单点试验关系建立的指标难以普适应用。

基于长期实践,控制试验已发展为一套成熟规范的农业气象研究方法。但在推广应用层面仍存在明显局限。该方法虽能直接反映特定田块的实际情况且操作相对简便,但人力与时间成本较高[97],并面临显著的气候不确定性风险。若目标灾害在试验期内未发生,将导致全年试验无法获取有效数据,造成研究资源浪费与周期延长。此外,人工控制试验

通常在温室或生长室中进行，虽可精准调控环境因子，但封闭环境会阻碍作物与外界正常的水汽和气体交换，使得试验结果难以完全反映真实农田的综合环境效应。

2.2　统计模型

统计模型是构建灾害指标最基础、应用最广泛的工具，核心思想是基于历史数据，建立气象因子与作物响应或灾害损失之间数量关系。早期线性建模方法，如线性加权法与主成分分析（PCA），为构建综合指数提供了简洁高效的途径。线性加权法通过设定权重将多个气象指标（如温、湿、风）合成为 1 个具有明确物理意义的指数，在我国早期干热风指标研究中得到广泛应用[77,98-99]。主成分分析则是一种数据驱动的降维方法，能客观地从多源数据（如多元遥感数据）中提取主要变异信息并自动赋权，减少了权重设置主观性[100-101]。然而，这类方法均建立在线性假设之上，难以捕捉灾害系统中普遍存在的复杂非线性关系。随着对灾害机理认识的深化，研究者开始寻求更普适、更稳健的统计关系。Meta 分析通过整合不同区域、不同年份、不同品种下大量试验数据，能系统量化特定灾害（如低温[102]、渍涝[103]）致灾阈值与影响强度，使得构建的指标更具普适性。但结论的可靠性高度依赖于原始研究的质量，且难以动态反映气候变化背景下灾害特征的演变。

为应对日益凸显的复合灾害问题，研究范式从简单线性关联转向了对复杂依赖结构的刻画，其中基于 Copula 函数的联合分布法是当前最具代表性的前沿工具[104-106]。该方法能够灵活地将不同灾害因子的边缘分布与相关性结构分离开来，精准刻画非对称、尾部相关等复杂依赖模式，在复合事件的联合概率分析与风险评估中展现出巨大优势。近年来，为解决传统 Copula 函数在高维和非平稳气候背景下局限，动态 Copula[107-110] 和 Vine Copula[109,111-113] 等更先进的模型被相继提出，为复合灾害的动态风险评估提供了更强大的理论工具。

2.3　作物生长模型

作物模型在指标构建中独特价值，在于能动态模拟灾害胁迫下作物生理过程，从而揭示统计方法难以捕捉的脆弱性特征与机制性规律。作物生长模型（如 WOFOST、EPIC 和 CERES－Maize 等）采用过程驱动的模拟方法，能够量化不同干旱、高温胁迫强度下作物生理响应与最终产量损失，为构建具有机理基础的灾害脆弱性曲线提供了核心手段。这种方法有效弥补了传统统计方法在机制解释上不足，所构建的综合指数已广泛应用于灾害风险评估[114-116]、农业保险理赔[117]等实务领域。虽然作物模型在机理解释方面具有独特优势，但模拟精度严重依赖于难以获取的高质量参数与田间数据（表 1），且在模拟高温干旱等复合胁迫的非线性响应时存在明显偏差。

为突破这些瓶颈，将数据驱动的机器学习方法与机理模型相融合[120-122]是很好的解决办法，已成为提升农业灾害风险评估能力的重要前沿方向。这种耦合方法既可保持作物模型的生理解释性，又能利用机器学习优化参数、弥补数据缺失，显著提高了对极端胁迫响应的模拟精度与运算效率。然而，机器学习方法虽能有效捕捉复杂的非线性关系，但传统“黑箱[123]”特性却难以揭示变量间因果机制。因此，将这种强大的预测能力转化为可解释的灾害指标（如可解释机器学习[124]）是未来研究面临的关键挑战与重要方向。

3　问题与展望

3.1　气象灾害指标在监测、预警与风险评估环节配置不均衡

当前，在农业气象灾害体系化业务流程中，监测、预警和风险评估等环节职能不同，对指标的需求也各有侧重。总体来看，现有气象灾害指标多服务于灾害监测业务，在灾害发生识别、过程刻画等方面已形成一定基础；相比之下，面向灾害预警和风险评估指标体系仍相对薄弱，尚未形成与业务需求紧密衔接的分层配置。在一定程度上导致了灾前、灾中与灾后各环节之间衔接不足，难以充分满足精准农业背景下对精细化服务的需求[125]。

从防灾减灾业务链条看，监测、预警和风险评估分别对应不同阶段和任务重点：监测强调及时识别成灾事实及其空间分布特征，预警侧重于在短时间内对灾害发生概率和强度进行预判，风险评估则关注灾害对农业生产可能造成的潜在损失及其累积影响[126]。目前相关研究和标准在监测环节积累较多，而预警与风险评估指标在机理表达、时效适配和业务应用方面仍有待完善。

因此，未来研究应着眼于构建分层指标体系（监测–预警–风险评估）[127]。监测指标应基于多源遥感观测数据，精准识别灾害发生特征；预警指标需要结合监测指标与短临天气预报产品，重点对未来数小时至数日内可能发生的灾害事件预判[128]；风险评估指标则应着眼于中长期视角，通过整合致灾因子强度（监测指标）、承灾体脆弱性及暴露度等多维信息，对未来数周乃至整个作物生育期内灾害可能造成的累积影响定量预估。通过建立三者间递进

表 1 常见指标构建方法原理及优缺点

Tab. 1 Principles, advantages and disadvantages of common indicator construction methods

方法	数据来源	基本原理	示例	优点	缺点
人工控制试验	环境数据(温、光、水、气) 作物生理指标(光合、蒸腾)、形态指标(株高、叶面积)和最终产量与品质	通过控制环境条件,直接观测作物对特定致灾因子(如高温、干旱)的生理生态响应,以确定致灾临界值	棉花涝渍抑制天数指标[118]、河北省冬小麦冻害指标[96]、小麦低温伤害指数[94]等	结果可靠性高 能够精确控制环境条件 具备模拟特殊极端环境的能力	难以扩展到区域尺度 缺失自然环境的真实性事件和资金成本高昂
统计模型	气象数据 农业统计数据 田间观测记录	基于历史数据,建立气象要素与灾害损失/作物响应之间统计关系(如回归分析、阈值法)	PA(1906)、PDSI(1965)、SPI(1993)等	简化变量之间复杂关系 基于已知数据建立的模型可进行预测 充足的数据量确保了统计稳健性	相关不等于因果 对模型假设依赖性高 数据质量要求高
作物生长模型	模型驱动数据(气象、土壤、管理) 田间试验观测数据	利用基于作物生理生态过程的计算机模型,模拟不同环境条件和灾害胁迫下作物生长与产量形成	冬小麦晚霜冻灾害损失综合指数[119](WOFOST)、玉米水分关键期干旱指数[117](CERES-Maize)等	机理性与解释性强 突破田间试验时空限制 可实现作物生长过程高效模拟	对极端事件响应能力有限 忽略生物适应性与管理决策复杂性 参数不确定性

关系,既可增强各环节服务的针对性,又能形成贯穿灾前–灾中–灾后的完整业务链。

3.2 灾害指标动态表征能力不足

现有农业气象灾害指标/指数多依赖于日、月或更长时间尺度的气象数据,本质上是对已发生灾害的静态描述[126,129],因而对极端事件快速演变特征的刻画能力相对有限。面对短时强降雨引发的渍涝过程或午后突发性高温热害事件时,这种基于低时间分辨率数据的评估方式往往难以及时、准确识别灾害发生发展特征,可能造成预警信息滞后,进而影响精准防控效果。此外,部分指标基于历史灾情统计关系构建,参数形式和阈值设定往往建立在既往气候背景与灾害样本基础上。随着气候变化背景下极端天气事件频次、强度及时空分布特征的变化,这类指标在不同区域和新气候条件下适用范围仍需进一步检验。

因此,未来需发展基于分钟至小时级高分辨率观测,并结合短临预报,实现对灾害发生、发展轨迹的实时追踪与预测[128]。遥感技术的发展为提高灾害监测精确度和预测准确率提供强大的数据基础,通过将遥感与地面观测数据相结合,进而构建能够实际反映作物受到胁迫的动态指标体系。在此基础上,推动建立集实时监测、快速预测、动态评估与分级预警于一体的业务化平台,从根本上解决预警时效与灾害动态不匹配的问题。

3.3 从灾害过程表征到致灾机理解析仍需深化

当前农业气象灾害评估研究已在灾害过程表征方面取得了较多进展,现有指标主要围绕灾害本身的统计特征展开描述,如强度、频次和影响范围等。这类指标为灾害识别、等级划分和业务应用奠定了重要基础,但在进一步刻画灾害对作物生理生态过程、产量和品质形成影响方面,仍有待深化[130]。农业气象灾害的发生与致损过程是多因素交互作用的结果,既包括气象条件,也受作物生长状态、田间小气候和管理措施影响。正因灾害致损过程的复杂性,人们对灾害规律及其对作物产量和品质的影响认识,必须循序渐进,从宏观表征逐步深入到微观机理分析。

从现阶段来看,农业气象灾害评估在灾害过程表征与作物实际响应之间仍存在一定衔接不足。以干热风为例,同样 1 次干热风过程,若发生在小麦灌浆前期,可能仅导致籽粒灌浆暂时受阻,对最终产量影响有限;但若发生在灌浆中后期,植株生理功能逐步衰退,受损后恢复能力减弱,则更可能造成明显减产[131]。表明农业气象灾害影响不仅取决于灾害过程本身,也与作物所处生育阶段及其生理状态密切相关。现有干热风判别标准对作物生育阶段差异的刻画仍不够细致,仅依据灾害等级进行区分,尚难充分反映实际产量损失。此外,已有研究表明,不同复合干旱或热干风指标在冬小麦、夏玉米和水稻主产区的适用性存在差异,显示现有指标在跨作物、跨区域及多要素复合胁迫的机理刻画上仍有限[132]。表明现有指标在反映复杂致灾机制和作物敏感期动态响应方面仍有改进空间。

因此,未来研究应在继承现有灾害过程表征成果的基础上,进一步加强致灾机理与作物生理响应之间关系的解析,推动农业气象灾害指标从“灾害描述”向“致损机理刻画”深化发展。具体可融合遥

感驱动的作物动态监测[133-134]、过程模型刻画的生理胁迫响应机制[135]、以及人工智能赋力的多源信息融合与模型优化[136]，从而实现对灾害致损过程的机理解析与精准预测。据此，不仅可以提升灾害指标的农学解释力，更重要的是可以联通致灾机理与业务应用，实现农业气象服务从传统数据分析提供向精准决策转变。尤其在全球气候变化导致作物物候格局重组[137-139]、极端事件频发[140-141]的新形势下，这种基于机理与数据结合的评估框架展现出重要应用前景。

同时，未来研究还可进一步关注旱涝急转等复合气象灾害，即干旱与渍涝在短时间内快速交替的极端过程。这类事件对作物水分胁迫和产量影响复杂，目前单一灾害指标难以准确表征快速转换及与作物生育阶段的交互效应[142-143]。结合高时空分辨率观测、作物生长模型与遥感数据，开发针对旱涝急转的复合指标，将有助于完善灾害监测、提前预警及风险评估体系，为未来农业气象服务提供更全面的支持。

4　结束语

系统总结了我国常见气象灾害指标/指数的发展历史及常见构建方法，同时，指出了当前指标体系仍存在动态表征能力不足、监测-预警-风险评估环节配置不均衡以及对作物致损机理刻画仍不充分等局限。因此，未来应着眼于构建致灾机理清晰、功能定位明确的动态指标体系，农业气象灾害指标的演进是不断适应气候变化挑战和科技发展的过程。为应对当前预警时效与灾害动态不匹配的矛盾，未来研究应着力推动指标体系向过程化、智能化与功能化方向转型。通过构建融合高分辨率观测、作物生理响应与人工智能预测的动态指标，实现监测、预警与风险评估功能的精准定位，有望提升农业气象灾害风险管理的精准度和前瞻性，从而为构建韧性强、可持续的国家粮食安全保障体系奠定坚实的科学基础。

参　考　文　献

[1] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529(7584): 84-87.

[2] 罗海平, 邹楠, 胡学英, 等. 1980—2019 年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1234-1247.
Luo Haiping, Zou Nan, Hu Xueying, et al. Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China, 1980—2019[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1234-1247. (in Chinese)

[3] Shujun G. The meteorological disaster risk assessment based on the diffusion mechanism[J]. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2012, 2(2): 124-130.

[4] Vogel E, Donat M G, Alexander L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(5): 054010.

[5] van der Velde M, Tubiello F N, Vrieling A, et al. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data[J]. Climatic Change, 2012, 113(3): 751-765.

[6] Lu Y, Hu H, Li C, et al. Increasing compound events of extreme hot and dry days during growing seasons of wheat and maize in China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16700.

[7] Yu W, Ji R, Wu J, et al. Combined effects of heat and drought stress on the growth process and yield of maize (*Zea mays* L.) in Liaoning Province, China[J]. Atmosphere, 2023, 14(9): 1397.

[8] 李森, 韩丽娟, 郭安红, 等. 1961—2015 年黄淮海地区冬小麦干热风灾害时空分布特征[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6972-6980.
Li Sen, Han Lijuan, Guo Anhong, et al. Spatial-temporal characteristics of dry-hot wind for winter wheat in Huang-Huai-Hai region from 1961 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6972-6980. (in Chinese)

[9] 琚玉枫, 高演辰, 张戈, 等. 华北平原正向“暖干化”演变[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7631-7645.
Ju Yufeng, Gao Yanchen, Zhang Ge, et al. The North China Plain is turning warmer and dryer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7631-7645. (in Chinese)

[10] 吕梦薇, 胡笑涛, 范晓懂, 等. 拔节期高温干旱复合胁迫对夏玉米生长发育的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 82-89.
Lü Mengwei, Hu Xiaotao, Fan Xiaodong, et al. Effects of combined stress of high temperature and drought at jointing stage on summer maize growth and development[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 82-89. (in Chinese)

[11] Chen G, Li K, Gu H, et al. Climatic challenges in the growth cycle of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain: new perspectives on high-temperature-drought and low-temperature-drought compound events[J]. Atmosphere, 2024, 15(7): 747.

[12] 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(9): 3213-3222.
Guo Xiang, Zhao Jinpeng, Wang Rulin, et al. Continuous-rain hazard of transplanting and direct-sowing rice in Sichuan

Basin,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3213 - 3222. (in Chinese)
[13] 俄有浩, 马玉平. 农田涝渍灾害研究进展[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 12 - 30.
E Youhao, Ma Yuping. Advances in research on cropland waterlogging disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 12 - 30. (in Chinese)
[14] Zhang J, Xu W, Qiao Y, et al. A new method to identify the maximum time interval between individual events in compound rainstorm and heatwave events[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2024, 15(3): 453 - 466.
[15] Liu L, Xu H, Liu S, et al. China's response to extreme weather events must be long term[J]. Nature Food, 2023, 4(12): 1022 - 1023.
[16] Lesk C, Anderson W, Rigden A, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(12): 872 - 889.
[17] 许吟隆, 赵明月, 李阔, 等. 农业适应气候变化研究进展回顾与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(8): 1155 - 1170.
Xu Yinlong, Zhao Mingyue, Li Kuo, et al. Review on the research progress of agricultural adaptation to climate change and perspective[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(8): 1155 - 1170. (in Chinese)
[18] 郭安红, 李森, 何亮, 等. 近十年国家级农业气象灾害预报评估业务技术进展[J]. 气象, 2021, 47(6): 693 - 702.
Guo Anhong, Li Sen, He Liang, et al. Progress in operational technology for national-level agro-meteorological disaster prediction and assessment in the recent decade[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(6): 693 - 702. (in Chinese)
[19] 贾朋群, 武欣蕊, 马杰. 致敬人民气象事业走过 100 年[J]. 气象科技进展, 2021, 11(4): 191 - 198,206.
Jia Pengqun, Wu Xinrui, Ma Jie. A century of people's meteorological service in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(4): 191 - 198,206. (in Chinese)
[20] 卢鋈, 王鹏飞. 十年来我国气象业务的发展[J]. 气象学报, 1959,30(3): 197 - 201.
Lu Wu, Wang Pengfei. The development of meteorological operations in China over the past decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1959,30(3): 197 - 201. (in Chinese)
[21] 骆继宾. 回顾中央气象台天气预报业务的发展(1950—1980 年)[J]. 气象, 2010, 36(7): 16 - 20.
Luo Jibin. Review of development of operational weather forecasting and its service in the Central Meteorological Office from 1950 to 1980[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 16 - 20. (in Chinese)
[22] Henry A J, Willis L M. Climatology of the United States[J]. Nature, 1907, 76: 11 - 12.
[23] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Eigth Conference on Applied Climatology, 1993: 179 - 183.
[24] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1): 69 - 88.
[25] GB/T 32136—2015 农业干旱等级[S].
[26] Entekhabi D, Njoku E G, Neill P E O, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704 - 716.
[27] Dorigo W, Himmelbauer I, Aberer D, et al. The international soil moisture network: serving Earth system science for over a decade[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(11): 5749 - 5804.
[28] Liu W T, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(14): 2761 - 2782.
[29] Qi Z, Ye Y, Sun L, et al. Development of an indicator system for solar-induced chlorophyll fluorescence monitoring to enhance early warning of flash drought[J]. Agricultural Water Management, 2025, 312: 109397.
[30] 陈端生, 龚绍先. 农业气象灾害[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1990.
[31] 中国农业百科全书总编辑委员会农业气象卷编辑委员会. 中国农业百科全书[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
[32] GB/T 32752—2016 农田渍涝气象等级[S].
[33] 张爱民, 马晓群, 杨太明, 等. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量影响[J]. 应用气象学报, 2007(5): 619 - 626.
Zhang Aimin, Ma Xiaoqun, Yang Taiming, et al. The influence of drought and waterlogging disasters on crop yields in Anhui Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007(5): 619 - 626. (in Chinese)
[34] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696 - 1718.
[35] 高雅文, 邓可楠, 张月, 等. 基于农业旱涝指标的湖北省棉花生育期内旱涝急转特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 101 - 110.
Gao Yawen, Deng Ke'nan, Zhang Yue, et al. Using agro-meteorological indexes to analyze variation in abrupt drought-flooding alternation during cotton growth season in Hubei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 101 - 110. (in Chinese)
[36] 许莹, 王晓东, 王猛, 等. SAPEI 在皖北夏玉米苗期涝渍监测中的适用性研究[J]. 气象, 2025, 51(2): 229 - 238.
Xu Ying, Wang Xiaodong, Wang Meng, et al. Applicability of SAPEI in waterlogging monitoring during the seedling stage of summer maize in Northern Anhui Province[J]. Meteorological Monthly, 2025, 51(2): 229 - 238. (in Chinese)
[37] 吴玉洁, 霍治国, 姜会飞, 等. 江淮地区玉米涝渍指标构建及时空特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 86 - 94.

Wu Yujie, Huo Zhiguo, Jiang Huifei, et al. The construction method and spatio-temporal characteristics of a maize waterlogging rank index in the Jianghuai Region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 86 - 94. (in Chinese)

[38] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(1): 23 - 36.

[39] Ottman M J, Kimball B A, White J W, et al. Wheat growth response to increased temperature from varied planting dates and supplemental infrared heating[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(1): 7 - 16.

[40] 王红丽, 张绪成, 魏胜文. 气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 517 - 524.
Wang Hongli, Zhang Xucheng, Wei Shengwen. Impact of climate change on rain-fed farming and response solutions in semiarid area of Northwest China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(6): 517 - 524. (in Chinese)

[41] GB/T 21985—2008　主要农作物高温危害温度指标[S].

[42] QX/T 228—2014　区域性高温天气过程等级划分[S].

[43] 杨萍, 刘伟东, 侯威. 北京地区城郊极端温度事件的变化趋势及差异分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 80 - 86.
Yang Ping, Liu Weidong, Hou Wei. Trends and difference analyses of temperature extremes in rural and urban areas in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(1): 80 - 86. (in Chinese)

[44] 严晓瑜, 赵春雨, 王颖, 等. 近 50 年东北地区极端温度变化趋势[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 81 - 87.
Yan Xiaoyu, Zhao Chunyu, Wang Ying, et al. Change trend of extreme temperature in Northeast China for the past 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(1): 81 - 87. (in Chinese)

[45] Klingelhöfer D, Braun M, Brüggmann D, et al. Heatwaves: does global research reflect the growing threat in the light of climate change? [J]. Globalization and Health, 2023, 19(1): 56.

[46] Zhao H, Zhang L, Kirkham M B, et al. U. S. winter wheat yield loss attributed to compound hot-dry-windy events[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7233.

[47] Schauberger B, Gornott C, Wechsung F. Global evaluation of a semiempirical model for yield anomalies and application to within-season yield forecasting[J]. Global Change Biology, 2017, 23(11): 4750 - 4764.

[48] 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(3): 310 - 317.
Wang Yuanhao, Wang Chunyi, Zhang Xuefen. Advances in researches on indexes and risk assessments of crop cold damage [J]. Meteorological Science and Technology, 2008(3): 310 - 317. (in Chinese)

[49] 马树庆, 裘祝香, 王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2003,12(3): 137 - 141.
Ma Shuqing, Xi Zhuxiang, Wang Qi. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003,12(3): 137 - 141. (in Chinese)

[50] GB/T 27959—2011　南方水稻、油菜和柑桔低温灾害[S].

[51] 陶祖文, 琚克德. 冬小麦霜冻气象指标的探讨[J]. 气象学报, 1962,32(3): 215 - 223.
Tao Zuwen, Ju Kede. A study on the meteorological indicators of frost damage to winter wheat[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1962,32(3): 215 - 223. (in Chinese)

[52] QX/T 88—2008　作物霜冻害等级[S].

[53] 郑大玮, 刘中丽. 冬小麦冻害监测的原理与方法[J]. 华北农学报, 1989,4(2): 8 - 14.
Zheng Dawei, Liu Zhongli. Basic principles and methodology of monitoring freezing injury of winter wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1989,4(2): 8 - 14. (in Chinese)

[54] 李琦, 王腾蛟, 汪芝寿, 等. 冻害冷害对淮北市小麦产量的影响及对策[J]. 安徽农业科学, 2003(5): 723 - 726.

[55] 郑冬晓, 杨晓光, 赵锦, 等. 气候变化背景下黄淮冬麦区冬季长寒型冻害时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4338 - 4346.
Zheng Dongxiao, Yang Xiaoguang, Zhao Jin, et al. Spatial and temporal patterns of freezing injury during winter in Huang-Huai winter wheat area under climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4338 - 4346. (in Chinese)

[56] 张雪芬,陈怀亮,郑有飞,等. 冬小麦晚霜冻害遥感监测技术与方法[C]//农业生态与卫星遥感应用技术学术交流会论文摘要集,2006:58.

[57] 王福州, 魏庆伟, 常江, 等. 基于 FY - 3 的冬小麦晚霜冻遥感监测技术[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(2): 192 - 194.
Wang Fuzhou, Wei Qingwei, Chang Jiang, et al. Remote sensing monitoring technology of winter wheat late frost based on FY - 3[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(2): 192 - 194. (in Chinese)

[58] Zhao L, Li Q, Zhang Y, et al. Normalized NDVI valley area index (NNVAI)-based framework for quantitative and timely monitoring of winter wheat frost damage on the Huang - Huai - Hai Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292: 106793.

[59] 李章成, 周清波, 吕新, 等. 冬小麦拔节期冻害后高光谱特征[J]. 作物学报, 2008,34(5): 831 - 837.
Li Zhangcheng, Zhou Qingbo, Lü Xin, et al. Hyperspectral features of winter wheat after frost stress at jointing stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008,34(5): 831 - 837. (in Chinese)

[60] 杨邦杰, 王茂新, 裴志远. 冬小麦冻害遥感监测[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 136 - 140.
Yang Bangjie, Wang Maoxin, Pei Zhiyuan. Monitoring freeze injury to winter wheat using remote sensing[J]. Transactions of

the CSAE, 2002, 18(2): 136 - 140. (in Chinese)
[61] 赵爱萍. 基于遥感技术的晚霜冻胁迫后冬小麦减产率预测研究[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
Zhao Aiping. Study on predicting yield loss in winter wheat afterlate frost stress using narrow-broad waveband spectral indices [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
[62] 武永峰, 胡新, 吕国华, 等. 晚霜冻影响下冬小麦冠层红边参数比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2190 - 2195.
Wu Yongfeng, Hu Xin, Lü Guohua, et al. Comparison of red edge parameters of winter wheat canopy under late frost stress [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(8): 2190 - 2195. (in Chinese)
[63] 潘铁夫, 方展森, 赵洪凯, 等. 农作物低温冷害及其防御[M]. 北京:农业出版社,1983.
[64] 李曼. 霜与霜冻的成因及对作物的影响[J]. 现代农业科技, 2015(4): 249.
[65] 沈修美. 霜冻形成及其对农作物的影响分析[J]. 中国农业信息, 2013(3): 127 - 128.
[66] 冯玉香, 何维勋, 饶敏杰, 等. 冬小麦拔节后霜冻害与叶温的关系[J]. 作物学报, 2000,26(6): 707 - 712.
Feng Yuxiang, He Weixun, Rao Minjie, et al. Relationship between frost damage and leaf temperature with winter wheat after jointing stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000,26(6): 707 - 712. (in Chinese)
[67] Haqiqi I, Grogan D S, Hertel T W, et al. Quantifying the impacts of compound extremes on agriculture[J]. Hydrol Earth Syst. Sci., 2021, 25(2): 551 - 564.
[68] Wang L, Liao S, Huang S, et al. Increasing concurrent drought and heat during the summer maize season in Huang - Huai - Hai Plain, China[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(7): 3177 - 3190.
[69] Zscheischler J, Seneviratne S I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events[J]. Science Advances, 2017, 3(6): e1700263.
[70] 崔国韬, 邓紫茜, 田浩业, 等. 珠江流域高温干旱与高温强降水复合极端事件时空演变及未来趋势[J]. 人民珠江, 2025(12): 1 - 17.
Cui Guotao, Deng Ziqian, Tian Haoye, et al. Spatiotemporal evolution and future projections of compound heat-drought and heat-heavy precipitation extremes in the Pearl River Basin[J]. Pearl River, 2025(12): 1 - 17. (in Chinese)
[71] Chen L, Chen X, Cheng L, et al. Compound hot droughts over China: identification, risk patterns and variations[J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 210 - 219.
[72] Feng S, Hao Z, Zhang X, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 1228 - 1234.
[73] Jiang L, Zhang J, Bai L, et al. Increased frequency and severity of global compound dry and heat wave events in a daily scale [J]. Journal of Hydrology, 2025, 654: 132857.
[74] Feng S, Hao Z. Quantifying likelihoods of extreme occurrences causing maize yield reduction at the global scale[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135250.
[75] Li Q, Wang P, Li Y, et al. Hazard assessment of compound drought and heat events on summer maize from agricultural and meteorological perspectives[J]. Agricultural Water Management, 2025, 313: 109479.
[76] Hosseinzadehtalaei P, Termonia P, Tabari H. Projected changes in compound hot-dry events depend on the dry indicator considered[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 220.
[77] 北方小麦干热风科研协作组. 小麦干热风气象指标的研究[J]. 中国农业科学, 1983,16(4): 68 - 75.
North China Wheat Dry-Hot Wind Research Collaboration Group. A study on the meteorological index of wheat dry-hot wind [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1983,16(4): 68 - 75. (in Chinese)
[78] QX/T 82—2019 小麦干热风灾害等级[S].
[79] 尚莹. 小麦干热风灾害等级指标构建[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
Shang Ying. Construction of wheat dry hot wind disaster grade index [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019. (in Chinese)
[80] Li S, Zhang L, Huang B, et al. A comprehensive index for assessing regional dry-hot wind events in Huang - Huai - Hai Region, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, 116: 102860.
[81] 张兆旭, 崔津, 苟文涛, 等. 基于温度植被干旱指数的华北平原干旱监测及时空变化分析[J]. 农业大数据学报, 2023, 5(1): 95 - 107.
Zhang Zhaoxu, Cui Jin, Gou Wentao, et al. Drought monitoring and spatiotemporal changes analysis in North China Plain based on temperature vegetation dryness index[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2023, 5(1): 95 - 107. (in Chinese)
[82] Feng Y, Sun F. Spatiotemporal dynamics of hot-dry winds in Northern China: a multidimensional analysis using gridded datasets[J]. Journal of Hydrometeorology, 2024, 25(10): 1577 - 1589.
[83] Al Rasbi T S S. Social vulnerability to tropical cyclones: a case study in Muscat Governorate, Oman[D]. Leeds: University of Leeds,2019.
[84] QX/T 98—2008 早稻播种育秧期低温阴雨等级[S].
[85] 金垚, 郭艺媛, 刘琰琰, 等. 四川盆区冬小麦灌浆结实期阴雨寡照空间分布特征[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(17): 27 - 32.
Jin Yao, Guo Yiyuan, Liu Yanyan, et al. Spatial distribution of continuous rain disaster on winter wheat during grain-filling in the Sichuan Basin[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(17): 27 - 32. (in Chinese)

[86] 刘琰琰，李佳星，代逸冰，等. 基于 GIS 的四川盆周北部山区夏玉米农业气象灾害风险评估:以旺苍县为例[J]. 应用生态学报，2022，33(9)：2457－2465.
Liu Yanyan，Li Jiaxing，Dai Yibing，et al. GIS-based risk assessment of agrometeorological disasters of summer maize in northern mountainous area of Sichuan Basin：a case study of Wangcang County，Sichuan Province，China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2022，33(9)：2457－2465.（in Chinese）
[87] 徐虹，张丽娟，赵艳霞，等. 黄淮海地区夏玉米花期阴雨灾害风险区划[J]. 自然灾害学报，2014，23(5)：263－272.
Xu Hong，Zhang Lijuan，Zhao Yanxia，et al. Risk zoning of continuous overcast rain disaster of summer maize during florescence in Huang－Huai－Hai region[J]. Journal of Natural Disasters，2014，23(5)：263－272.（in Chinese）
[88] 成林，刘荣花. 河南省夏玉米花期连阴雨灾害风险区划[J]. 生态学杂志，2012，31(12)：3075－3079.
Cheng Lin，Liu Ronghua. Disaster risk zoning of continuous rain during florescence of summer maize in Henan Province，Central China[J]. Chinese Journal of Ecology，2012，31(12)：3075－3079.（in Chinese）
[89] 李军玲，郭其乐. 夏玉米花期阴雨风险区划遥感方法研究[J]. 遥感信息，2015，30(2)：77－79.
Li Junling，Guo Qile. Risk zoning method of flowering phase continuous rain of summer maize based on remote sensing and GIS[J]. Remote Sensing Information，2015，30(2)：77－79.（in Chinese）
[90] 唐新鑫，张舟娜，肖德顺，等. 早稻前期低温寡照对生长发育的影响及调控技术[J]. 中国稻米，2025，31(5)：51－57,64.
Tang Xinxin，Zhang Zhouna，Xiao Deshun，et al. Impact of low temperature and insufficient sunshine during the early growth stage on early rice and its regulatory techniques[J]. China Rice，2025，31(5)：51－57，64.（in Chinese）
[91] 吕佳佳，初征，李百超，等. 东北地区水稻开花期冷涡型光-温-水复合逆境产量损失评估指标构建[J]. 应用生态学报，2024，35(3)：731－738.
Lü Jiajia，Chu Zheng，Li Baichao，et al. Construction of yield loss indicators for cold vortex，light－temperature－water combined stress during the flowering period of rice in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2024，35(3)：731－738.（in Chinese）
[92] GB/T 34967—2017　北方水稻低温冷害等级[S].
[93] Adames Á F，Ming Y. Moisture and moist static energy budgets of south asian monsoon low pressure systems in GFDL AM4.0[J]. Journal of the Atmospheric Sciences，2018，75(6)：2107－2123.
[94] Xiao L，Asseng S，Wang X，et al. Simulating the effects of low-temperature stress on wheat biomass growth and yield[J]. Agricultural and Forest Meteorology，2022，326：109191.
[95] 段晓凤，刘伟，包佳婧，等. 内蒙古河套向日葵低温致灾试验与指标构建[J]. 应用气象学报，2025，36(1)：24－32.
Duan Xiaofeng，Liu Wei，Bao Jiajing，et al. Experiment and index development for sunflower damage caused by low temperature in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2025，36(1)：24－32.（in Chinese）
[96] 于玲. 河北省冬麦冻害指标的初步分析[J]. 农业气象，1982(4)：10－13.
Yu Ling. A preliminary analysis of the winter wheat frost damage index in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，1982(4)：10－13.（in Chinese）
[97] 于水，张晓龙，王妍，等. 气候变化对中国东北三省主要粮食作物影响研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2024，32(6)：970－985.
Yu Shui，Zhang Xiaolong，Wang Yan，et al. Review of research on the impacts of climate change on staple grain crops in the three provinces of Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2024，32(6)：970－985.（in Chinese）
[98] 王春乙，潘亚茹，季贵树. 石家庄地区干热风年型指标分析及统计预测模型[J]. 气象学报，1991，49(1)：104－107.
Wang Chunyi，Pan Yaru，Ji Guishu. Analysis of annual pattern indicators and a statistical prediction model for dry-hot wind in the Shijiazhuang area[J]. Acta Meteorologica Sinica，1991，49(1)：104－107.（in Chinese）
[99] 李森，郭安红，韩丽娟，等. 基于综合强度指数的黄淮海地区干热风灾害时空特征[J]. 自然灾害学报，2019，28(1)：76－83.
Li Sen，Guo Anhong，Han Lijuan，et al. Spatial-temporal characteristics based on comprehensive intensity index of dry-hot wind in Huang－Huai－Hai region[J]. Journal of Natural Disasters，2019，28(1)：76－83.（in Chinese）
[100] Du L，Tian Q，Yu T，et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation，2013，23：245－253.
[101] Li Q，Li P，Li H，et al. Drought assessment using a multivariate drought index in the Luanhe River Basin of Northern China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment，2015，29(6)：1509－1520.
[102] 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[J]. 应用气象学报，2024，35(1)：45－56.
Li Meixuan，Huo Zhiguo，Kong Rui，et al. Indicator construction of spring low-temperature disaster affecting winter wheat of Huang－Huai－Hai based on meta-analysis[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2024，35(1)：45－56.（in Chinese）
[103] 盛绍学. 江淮地区油菜涝渍灾害识别及其指标的研究[C]//第三届安徽科技论坛农业与气候生态学术研讨会，2004.
[104] Tavakol A，Rahmani V，Harrington J J. Probability of compound climate extremes in a changing climate：a Copula-based study of hot，dry，and windy events in the central United States[J]. Environmental Research Letters，2020，15(10)：104058.

[105] Li J, Wang Z, Wu X, et al. A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China[J]. Hydrol Earth Syst. Sci., 2021, 25(3): 1587 - 1601.
[106] Zhao Q, Zhang X, Li C, et al. Compound ecological drought assessment of China using a Copula-based drought index[J]. Ecological Indicators, 2024, 164: 112141.
[107] Kwon H H, Lall U. A Copula-based nonstationary frequency analysis for the 2012—2015 drought in California[J]. Water Resources Research, 2016, 52(7): 5662 - 5675.
[108] Sarhadi A, Burn D H, Concepción Ausín M, et al. Time-varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian Copula[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 2327 - 2349.
[109] Sarhadi A, Ausín M C, Wiper M P, et al. Multidimensional risk in a nonstationary climate: joint probability of increasingly severe warm and dry conditions[J]. Science Advances, 2018, 4(11): eaau3487.
[110] Zscheischler J, Martius O, Westra S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(7): 333 - 347.
[111] Bevacqua E, Maraun D, Hobæk Haff I, et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy)[J]. Hydrol Earth Syst. Sci., 2017, 21(6): 2701 - 2723.
[112] Hochrainer-Stigler S, Balkovič J, Silm K, et al. Large scale extreme risk assessment using copulas: an application to drought events under climate change for Austria[J]. Computational Management Science, 2019, 16(4): 651 - 669.
[113] Jiang T, Su X, Zhang G, et al. Estimating propagation probability from meteorological to ecological droughts using a hybrid machine learning Copula method[J]. Hydrol Earth Syst. Sci., 2023, 27(2): 559 - 576.
[114] 贾慧聪, 王静爱, 潘东华, 等. 基于 EPIC 模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 643 - 652.
Jia Huicong, Wang Jing'ai, Pan Donghua, et al. Maize drought disaster risk assessment based on EPIC model: a case study of maize region in Northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 643 - 652. (in Chinese)
[115] 王志强, 何飞, 栗健, 等. 基于 EPIC 模型的中国典型小麦干旱致灾险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 210 - 215.
Wang Zhiqiang, He Fei, Li Jian, et al. Assessment on drought risk of typical wheat in China based on EPIC model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5): 210 - 215. (in Chinese)
[116] Zhang F, Chen Y, Zhang J, et al. Dynamic drought risk assessment for maize based on crop simulation model and multi-source drought indices[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 100 - 114.
[117] 杨晓娟, 张仁和, 路海东, 等. 基于 CERES - Maize 模型的玉米水分关键期干旱指数天气保险:以陕西长武为例一[J]. 中国农业气象, 2020, 41(10): 655 - 667.
Yang Xiaojuan, Zhang Renhe, Lu Haidong, et al. Drought index insurance of maize in water critical period based on CERES - Maize model:a case study of Changwu, Shaanxi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(10): 655 - 667. (in Chinese)
[118] 罗云英, 钱龙, 段凯. 我国棉花涝渍抑制天数指标的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2026(4): 1 - 16.
Luo Yunying, Qian Long, Duan Kai. Applications of stress day index model for assessing cotton waterlogging impacts in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2026(4): 1 - 16. (in Chinese)
[119] 张雪芬, 余卫东, 王春乙, 等. WOFOST 模型在冬小麦晚霜冻害评估中的应用[J]. 自然灾害学报, 2006,15(增刊 1): 337 - 341.
Zhang Xuefen, Yu Weidong, Wang Chunyi, et al. Application of the WOFOST model in assessing late frost damage to winter wheat[J]. Journal of Natural Disasters, 2006,15(S1): 337 - 341. (in Chinese)
[120] Feng P, Wang B, Liu D L, et al. Incorporating machine learning with biophysical model can improve the evaluation of climate extremes impacts on wheat yield in South-Eastern Australia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 100 - 113.
[121] Pagani V, Stella T, Guarneri T, et al. Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: a case study in the main production region in Brazil[J]. Agricultural Systems, 2017, 154: 45 - 52.
[122] Bai H, Xiao D, Tang J, et al. Evaluation of wheat yield in North China Plain under extreme climate by coupling crop model with machine learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108651.
[123] Guidotti R, Monreale A, Ruggieri S, et al. A survey of methods for explaining black box models[J]. ACM Comput. Surv., 2018, 51(5):93.
[124] Xu G, Duong T D, Li Q, et al. Causality learning: a new perspective for interpretable machine learning[J]. IEEE Intelligent Informatics Bulletin, 2020, 20(1): 27 - 33.
[125] 郭淑芳, 李华峰, 于秀娟, 等. 气象观测技术对精准农业发展的促进作用[J]. 河北农机, 2025(14): 123 - 125.
[126] 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(1): 1 - 19.
Wang Chunyi, Zhang Jiquan, Huo Zhiguo, et al. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 1 - 19. (in Chinese)
[127] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2005,63(5): 659 - 671.
Wang Chunyi, Wang Shili, Huo Zhiguo, et al. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in the recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005,63(5): 659 - 671. (in Chinese)

[128] 孙治贵，王元胜，张禄，等. 北方设施农业气象灾害监测预警智能服务系统设计与实现[J]. 农业工程学报，2018，34(23)：149－156.
Sun Zhigui，Wang Yuansheng，Zhang Lu，et al . Design and realization of intelligent service system for monitoring and warning of meteorological disasters in facility agriculture in North China[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(23)：149－156.（in Chinese）

[129] Li H，Wang L，Gao X，et al. Process-based dynamic identification indicators of soybean chilling damage and analysis of the corresponding spatiotemporal characteristics in Northeast China[J]. International Journal of Biometeorology，2023，67(7)：1155－1167.

[130] 孔锋，吕丽莉，方建，等. 农业巨灾风险评估理论和方法研究综述和展望[J]. 保险研究，2016(9)：103－116.
Kong Feng，Lü Lili，Fang Jian. A review and prospect of agricultural catastrophe risk assessment theory and practices[J]. Insurance Studies，2016(9)：103－116.（in Chinese）

[131] 张志红，成林，李书岭，等. 干热风天气对冬小麦生理的影响[J]. 生态学杂志，2015，34(3)：712－717.
Zhang Zhihong，Cheng Lin，Li Shuling，et al. Effects of dry-hot wind weather on the physiology of winter wheat[J]. Chinese Journal of Ecology，2015，34(3)：712－717.（in Chinese）

[132] 王思琪，张翔，陈能成. 三种复合干旱指数在我国三大农业主产区的适用性分析[J]. 干旱地区农业研究，2020，38(1)：243－254，265.
Wang Siqi，Zhang Xiang，Chen Nengcheng. Applicability analysis of three compound drought indexes in three major agricultural production areas in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2020，38(1)：243－254，265.（in Chinese）

[133] 乔梦琦，周德成. 利用动态阈值决策树分类的华北平原冬小麦动态监测[J]. 农业工程学报，2024，40(8)：125－132.
Qiao Mengqi，Zhou Decheng. Monitoring the dynamics of winter wheat planting areas in the North China Plain using dynamic-threshold decision tree classification[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(8)：125－132.（in Chinese）

[134] 宋扬，房世波，梁瀚月，等. 基于 MODIS 数据的农业干旱遥感指数对比和应用[J]. 国土资源遥感，2017，29(2)：215－220.
Song Yang，Fang Shibo，Liang Hanyue，et al. Comparison and application of agricultural drought indexes based on MODIS data[J]. Remote Sensing for Natural Resources，2017，29(2)：215－220.（in Chinese）

[135] 陈光泽，韩曈曈，孔维府，等. 作物生长模型在农作物生产上的应用[J]. 农业工程，2024，14(12)：37－44.
Chen Guangze，Han Tongtong，Kong Weifu，et al. Application of crop growth and development model in crops growth[J]. Agricultural Engineering，2024，14(12)：37－44.（in Chinese）

[136] Li X，Dunkin F，Dezert J. Multi-source information fusion：progress and future[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2024，37(7)：24－58.

[137] Lobell D B，Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. Environmental Research Letters，2007，2(1)：014002.

[138] Sherry R A，Zhou X，Gu S，et al. Divergence of reproductive phenology under climate warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2007，104(1)：198－202.

[139] Zhang Y，Guo Y，Wang S，et al. Substantial increase of heat requirement for maturity of early rice due to extension of reproductive rather vegetative growth period in China[J]. Theoretical and Applied Climatology，2024，155(3)：1625－1635.

[140] 黄丹青. 极端天气气候事件频发：基本规律与科学应对[J]. 国家治理，2023(17)：46－52.
Huang Danqing. Frequent extreme weather and climate events：basic patterns and scientific responses[J]. Governance，2023(17)：46－52.（in Chinese）

[141] Stott P A，Christidis N，Otto F E L，et al. Attribution of extreme weather and climate-related events[J]. WIREs Climate Change，2016，7(1)：23－41.

[142] 杨家伟，陈华，侯雨坤，等. 基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J]. 地理学报，2019，74(11)：2358－2370.
Yang Jiawei，Chen Hua，Hou Yukun，et al. A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index[J]. Acta Geographica Sinica，2019，74(11)：2358－2370.（in Chinese）

[143] Zhang G，Wang H，Gan T Y，et al. A comprehensive review of recent progress on the drought-flood abrupt alternation[J]. Journal of Hydrology，2025，661：133806.