

1991—2024 年气候变化背景下全国水稻主要农业气象灾害变化特点*

张蕾 郭安红 赵运成 赵晓凤

国家气象中心, 北京 100081

摘要: 基于 1991—2024 年全国一季稻和双季稻主产区水稻发育期和气象要素观测, 结合水稻主要农业气象灾害指标构建灾害强度指数和危险性指数, 解析了全国水稻主产区高温热害、低温冷害、干旱及高温干旱复合灾害时空变化特点。结果表明: 1991—2024 年, 一季稻高温热害强度以每 10 年 0.65 的速率增加, 尤其是 2010 年后显著增加、2022 年强度最强; 2017 年起, 早稻高温热害增强趋势明显; 东北地区水稻障碍型冷害强度呈减弱趋势, 近两年少有发生; 晚稻寒露风强度 2017—2022 年较高, 近两年有所减弱。水稻干旱强度年际波动大, 一季稻和晚稻 2022 年最强, 二者受旱站点占比较早稻高。一季稻高温干旱复合灾害强度明显强于早稻。灾害高危险性分布显示, 一季稻高温热害集中在四川东北部、重庆中部、湖北东部和湖南西部; 早稻高温热害在浙江中部、江西中部、湖南东部和福建中部; 东北地区水稻障碍型冷害在黑龙江东北部和吉林东部, 晚稻寒露风在安徽南部、江苏南部和浙江; 一季稻干旱在东北地区西部和长江流域北部, 早稻干旱在广东南部和海南, 晚稻干旱在湖北东部、江西中北部和湖南中东部; 一季稻高温干旱复合灾害在四川东北部、重庆中北部、湖北东北部和湖南西部, 早稻高温干旱复合灾害在浙江北部和湖南东南部。重点区域灾害研究结果对指导此类区域开展分灾种的防灾减灾具有参考价值。

关键词: 水稻, 高温热害, 低温冷害, 干旱, 复合灾害, 强度指数

中图分类号: S16, P49 **文献标志码:** A

Characteristics of Major Agricultural Meteorological Disasters for Rice under Climate Change Background in China During 1991—2024

ZHANG Lei GUO Anhong ZHAO Yuncheng ZHAO Xiaofeng

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on rice phenological stages and meteorological observations from nationwide single-season and double-season rice regions from 1991 to 2024, combined with major agro-meteorological disaster indicators, disaster intensity and hazard indices are constructed to analyze the changing characteristics of heat stress, cold stress, drought, and compound heat and drought stresses. The results indicate that in the period of 1991-2024, heat stress in single-season rice intensifies with the tendency of 0.65 increment per 10 years, with the significant increment observed since 2010 and highest intensity in 2022. For early rice, heat stress has been gradually increasing since 2017. Obstruction-type chilling injury in rice in Northeast China tends to weaken, and merely occurs in recent two years. The intensity of cold dew wind in late rice is high during 2017-2022 but it decreases in recent two years. Drought exhibits large fluctuations, with the highest intensity in single-season and late rice occurred in 2022, which area percentages exposed to drought are higher than that in early rice. The compound heat and drought stresses in single-season rice is more severe than in early rice. At the spatial scale of high hazard for disasters, heat stress in single-season rice is concentrated in northeastern Sichuan, central Chongqing,

* 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J051、CXFZ2026J059、CXFZ2026J057) 共同资助

2025 年 2 月 25 日收稿; 2026 年 4 月 13 日收修订稿

第一作者: 张蕾, 主要从事农业与生物气象灾害监测预警与风险评估研究. Email:leizhang@cma.gov.cn

通讯作者: 郭安红, 主要从事农业气象防灾减灾研究. Email:guoah@cma.gov.cn

eastern Hubei and western Hunan, while for early rice, it is located in central Zhejiang, central Jiangxi, eastern Hunan and central Fujian. The high hazard of obstruction-type chilling injury in single-season rice is identified in northeastern Heilongjiang and eastern Jilin, while for cold dew wind in late rice, it is demonstrated in south Anhui, south Jiangsu, and Zhejiang. The high hazard of drought is highlighted in western part of Northeast China and northern part of low reaches of the Yangtze river basin for single-season rice, southern Guangdong and major Hainan for early rice, as well as eastern Hubei, north-central Jiangxi and east-central Hunan. High hazard for compound heat and drought stresses in single-season rice is concentrated in northeastern Sichuan, north-central Chongqing, northeastern Hubei and western Hunan, while for early rice, it is located in northern Zhejiang and southeastern Hunan. In these areas exposed to high hazard, above findings can help guide for taking prevention of specific disasters.

Keywords: rice, heat stress, cold stress, drought, compound disaster, intensity index

引言

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (IPCC, 2021) 指出, 近 50 年来气候变化不仅带来了全球平均温度的升高, 还导致了极端天气气候事件呈现频发、广发、强发和并发趋势。1970—2019 年天气灾害数量增加了 5 倍, 目前极端高温的发生频率是工业化之前的 4.8 倍。气候变暖提升了大气的蒸发潜力, 地区可获得净水资源量减少, 从而引发干旱; 在区域尺度上, 干旱事件频率和强度的增加较为明显 (IPCC, 2019), 农业干旱在全球所有大洲的多个地区均有增加。气候变化下我国高温热浪、骤旱等极端天气气候事件有增多趋势 (巢清尘等, 2020), 同时复合高温干旱事件呈现频率增加、持续时间延长以及影响增强的演变特征 (Hao, 2022)。高温干旱叠加更容易导致蒸散加快, 造成土壤和植被迅速失水, 对农业生产和生态环境造成严重影响 (夏军等, 2022; 张蕾等, 2024)。气候变化对农业生产的影响及对气候变化响应的研究一直广受关注。

水稻是我国主要粮食作物之一, 2001—2023 年水稻的平均产量分别占世界和亚洲粮食总产量的 28%、31% (FAO, 2025)。作为露天生产形式, 水稻的生长发育高度依赖天气气候条件 (宋忠华和解娜, 2022), 期间经常遭受多种农业气象灾害的胁迫 (吕晓敏和周广胜, 2018; 凌霄霞等, 2019; 宋忠华等, 2022), 其生长发育过程、产量和品质均会受到不同程度的负面影响 (段骅等, 2019; 杨满山等, 2024; Wang et al, 2025)。在气候变化背景下, 水稻农业气象灾害的发生频率、强度和风险分布发生了明显改变。其中, 高温热害在气候变化背景下趋于增强, 尤其是长江中下游地区一季稻和华南地区早稻高温热害的发生频率和强度呈增加趋势 (Tao et al, 2013; 杨建莹等, 2020; 许莹等, 2020)。尽管气候变暖在一定程度上缓解了水稻低温冷害的总体趋势, 但区域性冷害的突发性及其危害依然不容忽视。东北地区水稻障碍型冷害的发生频率和强度自 20 世纪 90 年代以来均呈现显著下降趋势, 但极端低温事件的发生仍可能导致区域性水稻绝收 (余会康和郭建平, 2014; 曲辉辉等, 2016); 双季晚稻寒露风发生强度尽管整体呈降低趋势, 但近年出现了强寒露风且影响更为严重 (刘丹等, 2019; 张蕾等, 2021)。干旱是水稻生产的另一个重要威胁, 长江中下游和西南地区是水稻干旱高发区域, 干旱的发生频率和强度在近些年均呈现显著上升趋势, 但其空间差异明显 (刘琰琰等, 2016; 罗孳孳等, 2024)。近年来农业气象灾害的研究重点逐步从单一灾害向复合灾害过渡 (姜丽霞等, 2021), 以高温和干旱耦合为主的复合事件对粮食系统的影响呈现出以正反馈为特征的耦合放大效应, 高温干旱是水稻生产面临的一种主要复合型灾害 (Duan et al, 2020; Yu et al, 2024), 带来的影响往往要明显重于单一灾害。

尽管对气候变化与水稻农业气象灾害的研究已经取得了不少进展, 但仍缺乏针对全国水稻灾害的系统性定量分析, 尤其是对 1991 年以来气候变化背景下灾害的变化特点缺乏全国性梳理。因此, 本文着眼于全国主要稻区水稻主要农业气象灾害 (高温热害、低温冷害、干旱以及高温干旱复合灾

害），量化对比灾害发生频率、强度及其危险性时空变化规律，为制定有效的防灾减灾策略提供科学依据，保障水稻生产的稳定性和可持续性。

1 数据与方法

本文研究区域（图1）包含我国一季稻主产区（东北、长江中下游和西南）和双季稻主产区（江南、华南）。

1.1 数据

本文基于气象数据和作物发育期观测数据开展研究。气象数据包括 1991—2024 年一季稻区（941 个国家基本气象站）、双季稻区（518 个气象站）的平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速、水汽压等逐日观测资料。作物发育期数据包括 1991—2024 年一季稻、双季早稻、双季晚稻的逐年播种、出苗、三叶、移栽、返青、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟和成熟日期。数据均来源于国家气象信息中心并经过严格的质量控制。

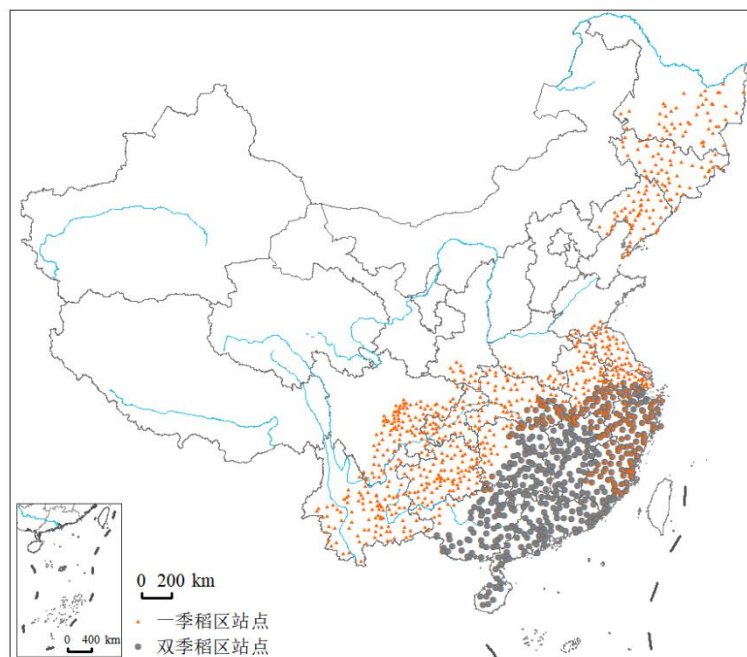


图1 研究区域及站点分布

Fig.1 The location of stations in study regions

1.2 灾害指标及指数构建

在一季稻、双季早稻、双季晚稻的生长过程中，主要考虑的农业气象灾害包括高温热害、低温冷害、干旱等（表1）。除了高温热害、干旱等单一灾害外，水稻也会面临高温热害、干旱同时发生的胁迫，即高温干旱复合灾害。

表1 水稻主要农业气象灾害

Table 1 The major agro-meteorological disasters considered for rice

作物	灾害
一季稻	高温热害（长江流域）、障碍型冷害（东北）、干旱、高温干旱
双季早稻	高温热害、干旱、高温干旱
双季晚稻	寒露风、干旱

1.2.1 高温热害和低温冷害

一季稻和早稻高温热害指标是指抽穗至灌浆乳熟期出现连续3 d及以上日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 或日

最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的高温天气；一季稻障碍型冷害是指水稻孕穗开花期出现的低温天气；晚稻寒露风是指抽穗扬花期出现的低温天气。参考中国气象局（2008）、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会（2008；2017）、毛留喜和魏丽（2015）、郭安红等（2021），依据相应的灾害等级指标，将高温热害、障碍型冷害、寒露风划分为轻度、中度、重度。

综合考虑灾害的强度、持续时间和影响程度，集成不同等级灾害，应用已有的指数构建方法（郭安红等，2018；张蕾等，2021）建立不同时间尺度的高温热害、障碍型冷害、寒露风强度指数（ H_T ）：

$$H_T = \sum_{i=1}^3 w_i \times d_i \times n_i \quad (1)$$

式中： d_i （ $i=1、2、3$ ）为轻度、中度和重度灾害的达标等级，取1、2、3； n_i 为时段内轻度、中度和重度等级灾害的累计天数；为了将 $d_i \times n_i$ 出现相同数值情况下的影响区分出来（同数值下，灾害等级越高的影响越重），引入权重系数 w_i ，综合考虑达标等级和日数的影响，采用专家打分法将轻度、中度和重度灾害的权重系数（即 $w_1、w_2、w_3$ ）分别取0.2、0.3、0.5（郭安红等，2018）。利用式（1）构建的灾害强度指数已经在早稻高温热害、晚稻寒露风灾害研究中应用，得到了较好的效果：在灾害典型年份（如2003年和2013年早稻高温热害典型年，2011年和2020晚稻寒露风典型年）计算得到的灾害强度指数较高，并且与田间灾情结果相一致（郭安红等，2018；张蕾等，2021），因而应用此方法来构建灾害强度指数。

将不同区域内的站点高温热害、障碍型冷害、寒露风强度指数采用集合平均方法集成构建省、全国尺度高温热害、障碍型冷害、寒露风强度指数。基于上述灾害等级划分标准、灾害指数构建方法，可得到1991—2024年各站点及区域逐年高温热害、障碍型冷害、寒露风发生日数和强度指数，并分析其强度指数线性变化趋势。

1.2.2 干旱

基于《农业干旱等级》（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会，2016），采用水分亏缺距平指数（ $CWDI_a$ ）表征一季稻、早稻、晚稻干旱强度：

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4} \quad (2)$$

$$CWDI_j = \left(1 - \frac{P_j + I_j}{K_c ET_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$CWDI_a = \begin{cases} \frac{CWDI - \overline{CWDI}}{100 - \overline{CWDI}} \times 100\% & \overline{CWDI} > 0 \\ CWDI & \overline{CWDI} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数（单位：%）； \overline{CWDI} 为所计算时段同期作物水分亏缺指数平均值； $CWDI_j、CWDI_{j-1}、CWDI_{j-2}、CWDI_{j-3}、CWDI_{j-4}$ 分别为第 $j、j-1、j-2、j-3、j-4$ 时间的水分亏缺指数； $a、b、c、d、e$ 为权重系数，分别取0.3、0.25、0.2、0.15、0.1； P_j 为10d的降水量（单位：mm）； I_j 为10d的灌溉量（单位：mm）； ET_0 为采用Penman-Monteith公式计算的10d作物可能蒸散量（单位：mm）； K_c 为10d作物所处发育阶段的作物系数，取值参考中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会（2016）。

在水稻生育期内（ m 天）逐日 k 的水分亏缺距平指数（ $CWDI_{a,k}$ ）的基础上，以0.4为阈值判定干旱发生（低于0.4则不考虑干旱发生），以 $CWDI_a$ 超过阈值的累积程度（谭方颖等，2020）构建时段内水稻干旱强度指数（ H_D ）：

$$H_D = \sum_{k=1}^m CWDI_{a,k} - 0.4, \quad \text{if } CWDI_{a,k} \geq 0.4 \quad (5)$$

将不同区域内的站点干旱强度指数采用集合平均方法集成构建省、全国尺度干旱强度指数。基于上述灾害等级划分标准、灾害指数构建方法，可得1991—2024年各站点及区域逐年干旱发生日数和强度指数，并分析强度指数线性变化趋势。

1.2.3 高温干旱复合灾害

基于水稻高温热害、干旱的指标，判定高温干旱复合灾害发生与否（即判定日期同时满足高温热害和干旱达标）。将不同区域内的站点高温干旱复合发生的日数采用集合平均方法集成构建省、

全国尺度高温干旱复合灾害发生日数，可得到1991—2024年各站点及区域逐年高温干旱发生日数。

1.3 灾害危险性指数

基于灾害的强度和发生概率集成构建水稻高温热害、障碍型冷害、寒露风、干旱、高温干旱复合灾害危险性指数 (R)：

$$R=H \times f \quad (6)$$

式中： H 为水稻高温热害、障碍型冷害、寒露风、干旱平均强度指数或高温干旱复合灾害日数， f 为各灾害出现年份与总年份数比值。利用自然断点法将危险性指数划分为低、中、高三个等级。

2 结果

2.1 整体变化趋势

2.1.1 高温热害

1991年以来，全国一季稻高温热害呈现增强趋势，尤其是2010年以来强度明显增加（图2a）。1991-2024年平均高温热害强度指数以每10年0.65的速率增加；2022年极端性强，7月21日至8月30日长江中下游地区35℃以上高温日数有20~40 d，浙江西南部、江西东北部等地达41 d，一季稻平均高温热害日数达5.3 d，强度指数达6.3；2006年、2013年、2016年、2019年也出现较强的高温热害，强度指数分别达到3.3、3.6、3.2、3.8。从高温热害受灾站点占比的变化来看，整体趋势不明显，2006年占比最大达39.2%，其次是2016年、2013年，分别为36.1%、34.9%，2022年为第7位，达28.9%。全国早稻高温热害呈波动性变化，在2012年、2005年、1994年、2013年、2007年出现较强的高温热害，强度指数分别达到6.3、5.9、5.1、4.4、4.3。从高温热害受灾站点占比来看，2003—2013年均较大，为60.5%~75.8%（图2b）。

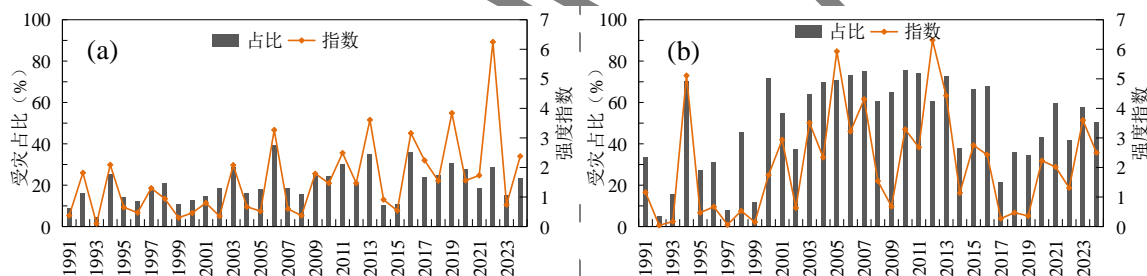


图2 1991—2024年全国 (a) 一季稻、(b) 早稻主产区高温热害强度指数及受灾站点占比

Fig.2 Annual change of intensity index and proportion of stations for heat stress in (a) single-season rice and (b) double-season early rice in major production regions of China during 1991—2024

2.1.2 低温冷害

1991年以来，一季稻障碍型冷害整体呈明显的减弱趋势，强度指数变化速率为每10年-2.2(图3a)。2017年起强度整体较弱，近2年最弱，较强年份出现在1995年、1996年、2002年、2006年、2011年，指数分别为15.5、3.9、13.7、13.6、14.6，近2年强度指数不足1。从冷害受灾站点占比来看，2017年以前普遍在11.7%以上，2017年起比例减小，近2年不足1.5%。晚稻寒露风强度呈现阶段性变化，2017年前整体较弱，强度指数不足10，2017—2022年整体强度较高，强度指数普遍在12以上，近2年有所减弱；2020年晚稻寒露风发生时间早、持续时间长，普遍出现轻度至重度寒露风，强度指数达到31.2；从受灾站点占比来看，1994年、1997年、2002年、2011年、2017—2021年均均在70%以上（图3b）。

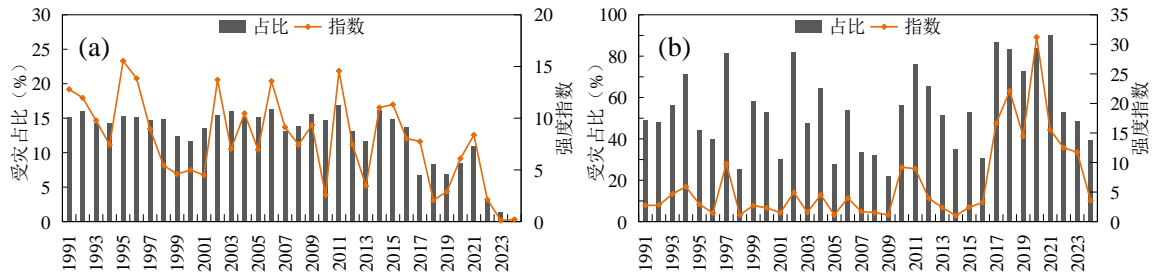


图3 1991—2024年全国 (a) 一季稻主产区障碍性冷害, (b) 晚稻寒露风强度指数及受灾站点占比

Fig.3 Annual change of intensity index and proportion of stations for obstruction-type chilling injury in (a) single-season rice and (b) cold dew wind in double-season late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.1.3 干旱

1991年以来, 全国一季稻干旱强度波动性较大, 但各年发生程度不一 (图4a)。干旱最强出现在2022年, 强度指数达到11.0, 其次是2001年、2019年, 强度指数分别为7.7、7.3, 2008年强度最弱, 仅为0.93; 受灾站点占比普遍在60%以上, 2022年达到92.3%。早稻干旱2001年以前较弱, 2001年后波动较大, 较强年份出现在2021年、2011年、1991年、2003年、2002年, 强度指数分别达2.8、2.7、2.4、2.3、1.7; 受灾站点占比在2011年、2007年、2003年、1991年较高, 分别达70.1%、70.0%、68.5%、62.9% (图4b)。晚稻干旱整体波动较小, 近5年波动较大; 最强年份为2022年、强度指数达到22.7, 其次是2019年、1992年、2009年、2003年、2004年, 强度分别为13.3、9.1、8.3、7.9、7.5; 受灾站点占比普遍在50%以上, 且有17年在80%以上, 其中2004年达97% (图4c)。

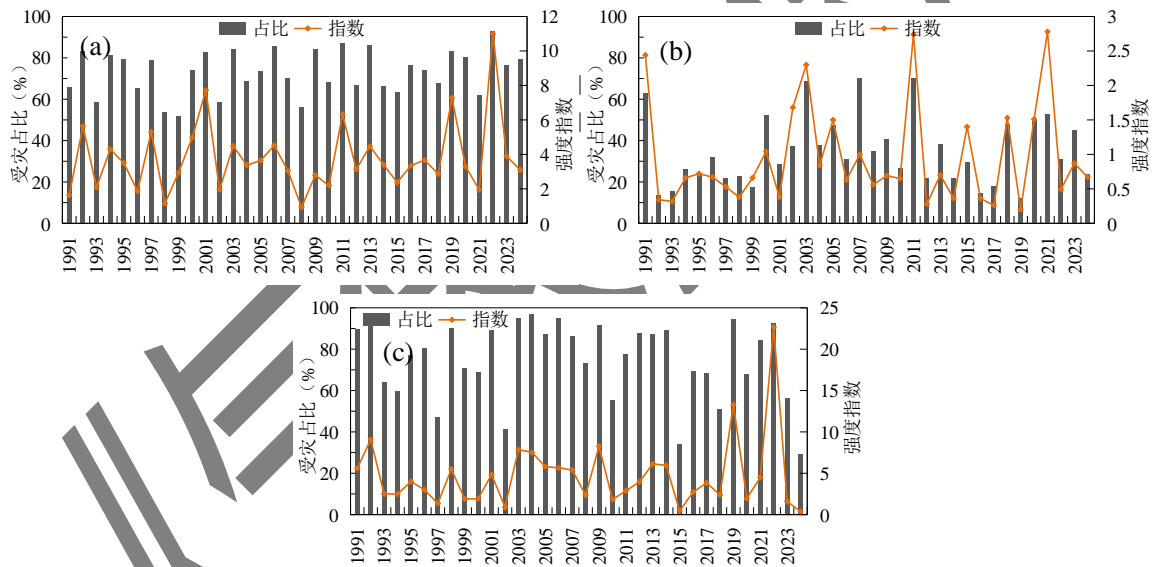


图4 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻, (c) 晚稻主产区干旱强度指数及受灾站点占比

Fig.4 Annual change of intensity index and proportion of stations for (a) drought in single-season rice, (b) double-season early rice and (c) late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.1.4 高温干旱复合灾害

1991年以来, 全国一季稻高温干旱复合灾害尽管强度较小, 但每年均有不同程度发生 (图5a)。2022年高温干旱复合灾害指数达3.7, 受灾站点占比达25.4%, 其次是2013年 (指数为1.2, 受灾站点占比达23.1%)、2006年 (指数为1.2, 受灾站点占比达22.2%)、2011年 (指数为0.4, 受灾站点占比达14.2%)、1994年 (指数为0.3, 受灾站点占比达15.0%)。与一季稻相比, 早稻高温干旱复合灾害程度明显较轻, 最强年份出现在2005年 (指数达0.5, 受灾站点占比达15.2%), 其次是1991年 (指数为0.1, 受灾站点占比达17.4%), 2000—2013年 (除2005年) 早稻高温干旱复合灾害站点占比为1.6%~13.1%, 强度低于0.05 (图5b)。

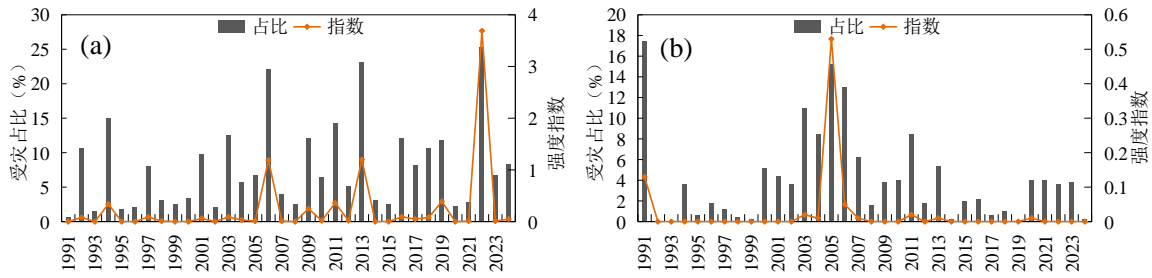


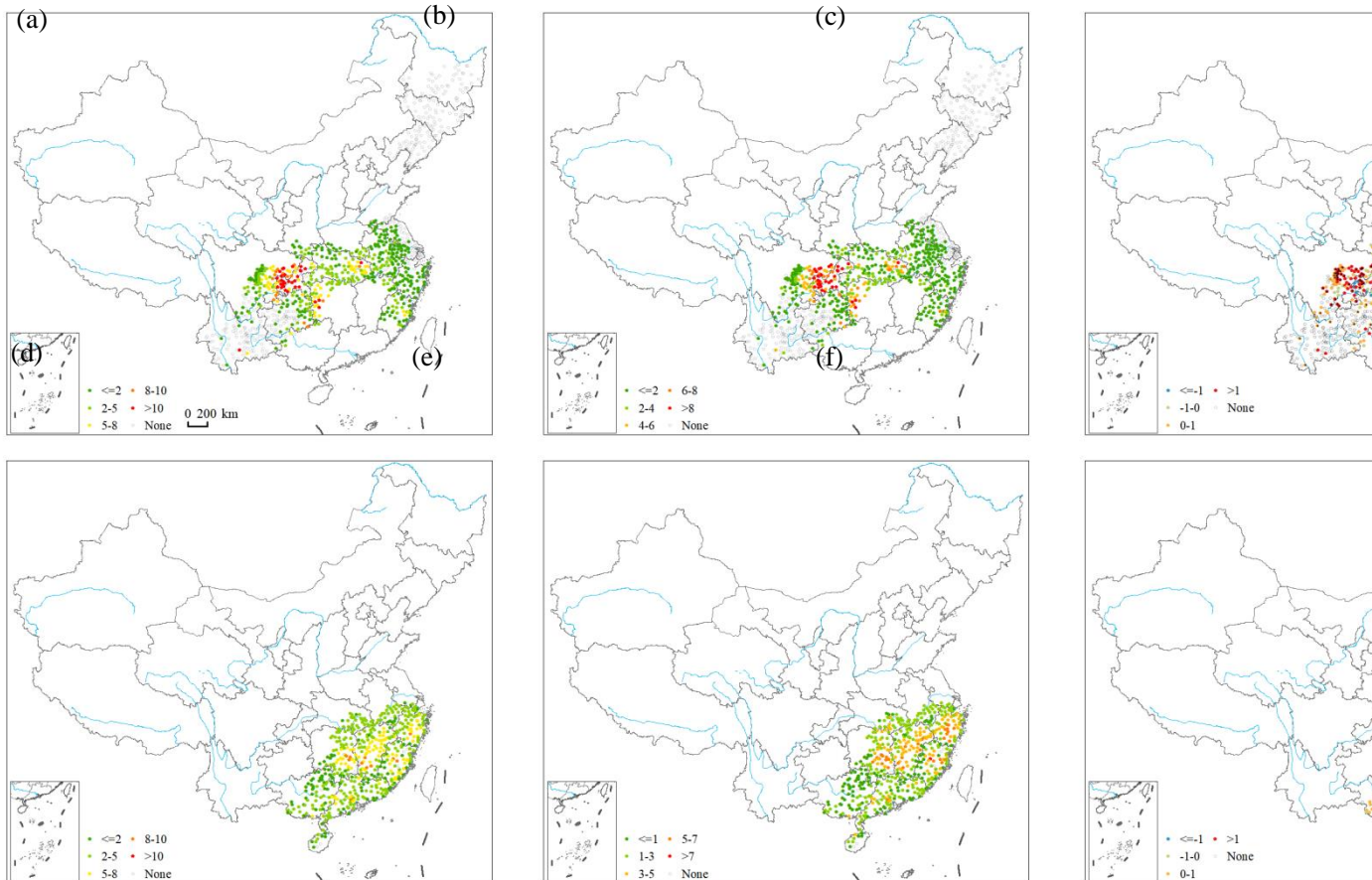
图5 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻主产区高温干旱复合强度指数及受灾站点占比

Fig.5 Annual change of intensity index and proportion of stations for compound heat and drought stresses in (a) single-season rice and (b) double-season early rice in major production regions of China during 1991—2024

2.2 空间变化特点

2.2.1 高温热害

从全国一季稻高温热害发生情况空间差异来看,以四川东北部、重庆中部、湖北东部发生较重。四川东北部、重庆中部高温热害日数达10 d以上,湖北东部、湖南西部、四川东南部为5~10 d,其余地区不足5 d,江苏东部、云南大部、贵州中西部等地鲜有发生(图6a);四川东北部、重庆中北部一季稻高温热害强度指数超过8,湖北东部、湖南西部、四川东南部为4~8,其余地区不足4(图6b);从1991—2024年强度指数线性变化趋势来看(图6c),大部分地区一季稻高温热害强度呈增强趋势,湖北东部、湖南西部、重庆中部、四川东部等地增加趋势每10年超过1。早稻高温热害较强区域主要集中在湖南东南部、江西中南部、浙江中部、福建中部(图6d, e),高温热害天数达5~10 d,强度指数达3~7,其余地区天数普遍不足5 d,强度指数不足3。除江苏南部、安徽南部、湖北东南部、浙江西部外,大部分地区早稻高温热害强度呈增强趋势(图6f),其中浙江东部、江西中部、湖南东南部等地增加趋势每10年超过1。



注：图c和f中黑点表示线性变化趋势通过0.1的显著性水平检验。

图6 1991—2024年全国（a~c）一季稻和（d~f）早稻主产区高温热害（a，d）天数，（b，e）强度指数，（c，f）每10年强度指数线性变化趋势分布

Fig.6 (a, d) The mean days, (b, e) intensity index and (c, f) it trend per 10-years of (a—c) single-season rice and (d—f) double-season early rice rice for heat stress in major production regions of China during 1991—2024

2.2.2 低温冷害

从一季稻障碍型冷害发生情况空间差异来看，从西南部向东北部呈增强的趋势。黑龙江东北部、吉林东部、辽宁东北部等地发生天数在10 d以上，黑龙江中南部、吉林西部、辽宁北部发生天数5~10 d，吉林中部、辽宁南部等地不足5 d（图7a）；黑龙江东北部和中南部大部、吉林东部、辽宁东北部等地强度指数>6，部分地区甚至>8，辽宁中部和南部不足4（图7b）；从强度指数线性变化趋势来看，吉林西部和东部、辽宁大部和黑龙江中部等地呈下降趋势，其余大部分地区趋势不明显（图7c）。全国晚稻寒露风发生日数和强度均呈从南往北增强分布趋势（图7d，7e），江苏南部、安徽南部、浙江北部寒露风发生天数>8 d、部分地区甚至>10 d，强度指数>9、部分地区甚至>12；福建南部、广东南部、广西南部、海南大部寒露风发生天数不足2 d，强度指数不足3；大部分地区寒露风强度指数呈增大趋势（图7f），浙江北部、湖北东南部、江西北部、湖南大部增大速率每10年超过4。

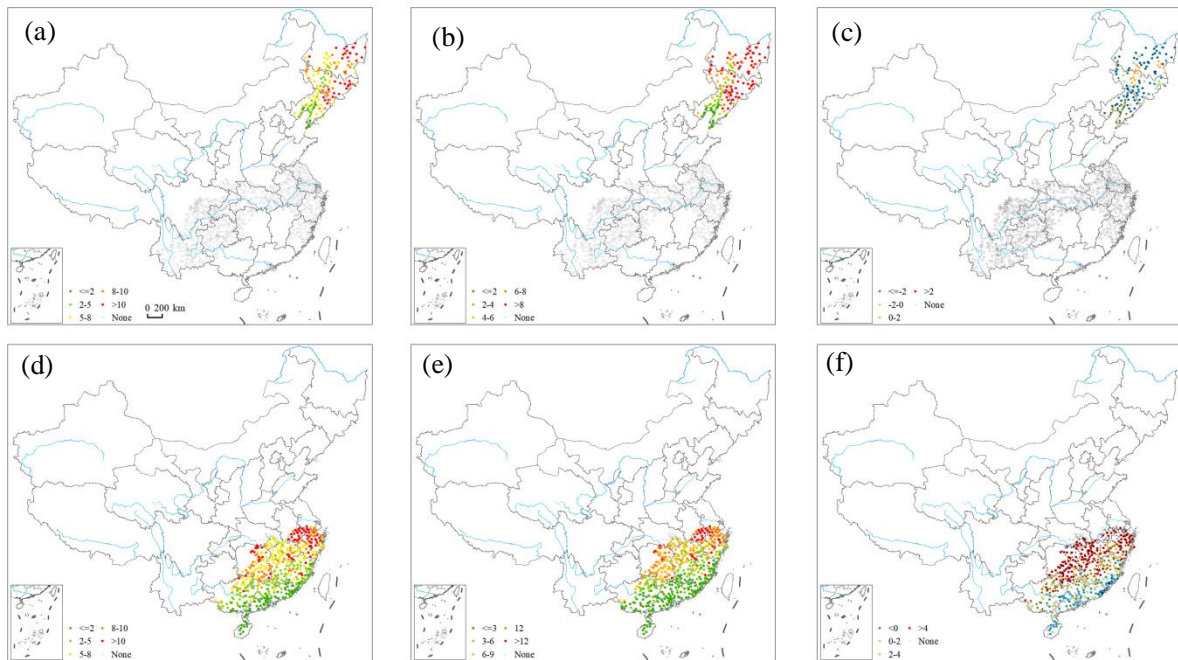


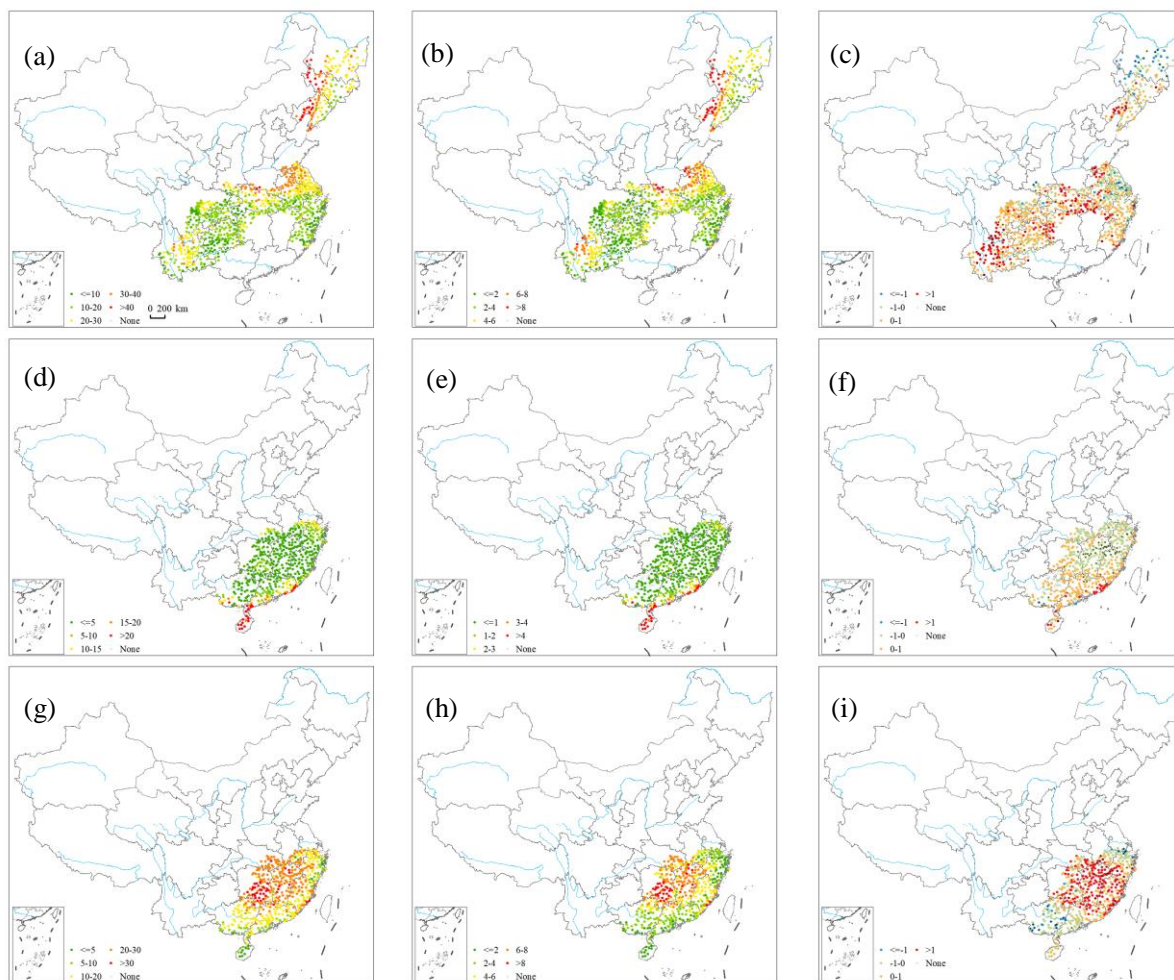
图7 1991—2024年全国（a~c）一季稻主产区障碍性冷害和（d~f）晚稻寒露风（a，d）天数，（b，e）强度指数，（c，f）每10年强度指数线性变化趋势分布

Fig.7 (a,d) The mean days, (b,e) intensity index and (c,f) it trend per 10-years for (a—c) obstruction-type chilling injury in single-season and (d—f) cold dew wind in double-season late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.2.3 干旱

从全国一季稻干旱发生情况空间差异来看，东北地区干旱整体要重于南方地区；黑龙江西部、吉林西部、辽宁中西部、安徽北部、江苏北部干旱发生日数>30 d，部分地区甚至>40 d，干旱强度指数>6，部分地甚至>8（图8a）；黑龙江中东部、吉林中部、江苏中部、安徽中部、湖北中北部、云南北部干旱发生日数为20~30 d，干旱强度指数为4~6，其余地区不足4（图8b）。一季稻干旱强度指数线性变化趋势（图8c）显示在黑龙江、吉林中西部、江苏中南部、安徽中部呈下降趋势，其

余地区呈增大趋势，其中湖北东南部、湖南西部、云南中北部速率每10年超过1。从全国早稻干旱发生情况空间差异来看（图8d, 8e, 8f），呈现从南往北减弱的趋势；广东南部、海南大部早稻干旱发生日数 >15 d，部分地区甚至 >20 d，干旱强度指数 >3 ，部分地区甚至 >4 ，广东、福建中南部、广西东部、海南强度指数呈增大趋势。全国晚稻干旱发生情况空间变化与早稻干旱相反（图8g, h, i），呈现从南往北增强的趋势；湖北南部、安徽南部、江西、湖南中东部、福建西部晚稻干旱干旱发生日数 >20 d，部分地区甚至 >30 d，干旱强度指数 >4 ，部分地区甚至 >8 ，且多数地区强度指数呈增大趋势，速率每10年超过1。



注：图c, f, i中黑点表示线性变化趋势通过0.1的显著性水平检验。

图8 1991—2024年全国（a~c）一季稻，（d~f）早稻，（g~i）晚稻主产区的干旱（a, d, g）天数，（b, e, h）强度指数，（c, f, i）每10年强度指数线性变化趋势分布

Fig.8 The (a, d, g) mean days, (b, e, h) intensity index and (c, f, i) its trend per 10-years for drought in (a—c) single-season rice, (d—f) double-season early rice and (g—i) double-season late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.2.4 高温干旱复合灾害

从全国一季稻和早稻高温干旱复合灾害发生情况空间差异来看，一季稻高温干旱复合灾害严重的区域集中在四川东北部、重庆中部、湖北东部、湖南西部，平均出现日数 >1.5 d，部分地区甚至 >2.0 d，东北大部和江苏、浙江北部、四川南部、贵州中南部和云南大部鲜有发生（图9a）。早稻高温干旱复合灾害较一季稻明显轻，灾害严重区域集中在浙江北部、湖南东南部，平均出现日数 >0.5 d，部分地区甚至 >1.0 d（图9b）。

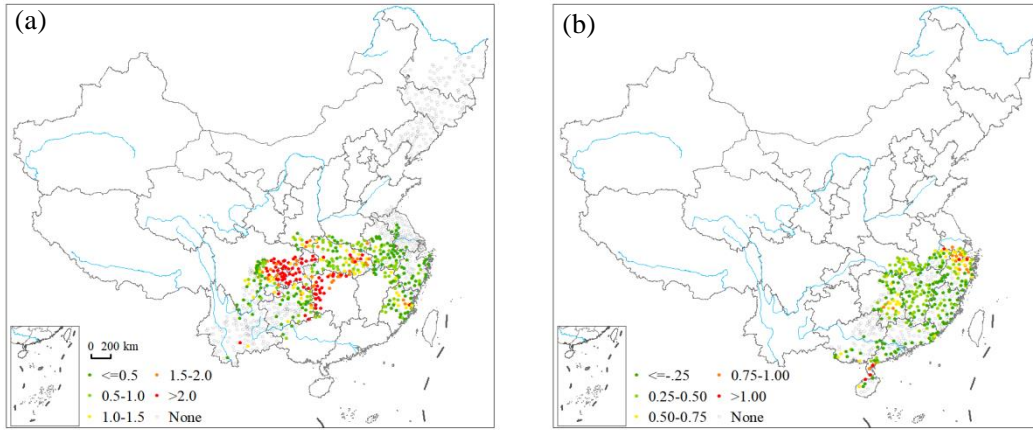


图9 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻主产区高温干旱复合灾害天数分布

Fig.9 The mean days for compound heat and drought stresses in (a) single-season rice and (b) double-season early rice in major production regions of China during 1991—2024

2.3 灾害危险性

2.3.1 高温热害

从全国一季稻高温热害危险性分布来看(图10a),高风险区主要集中在四川东北部、重庆中部、湖北东部、湖南西部,中风险区主要在湖北中南部、湖南北部。而早稻高温热害高风险区主要集中在浙江中部、江西中部、湖南东部和福建中部等地,中风险区主要在浙江北部和西部、江西北部、湖南东北部、广东西部(图10b)。

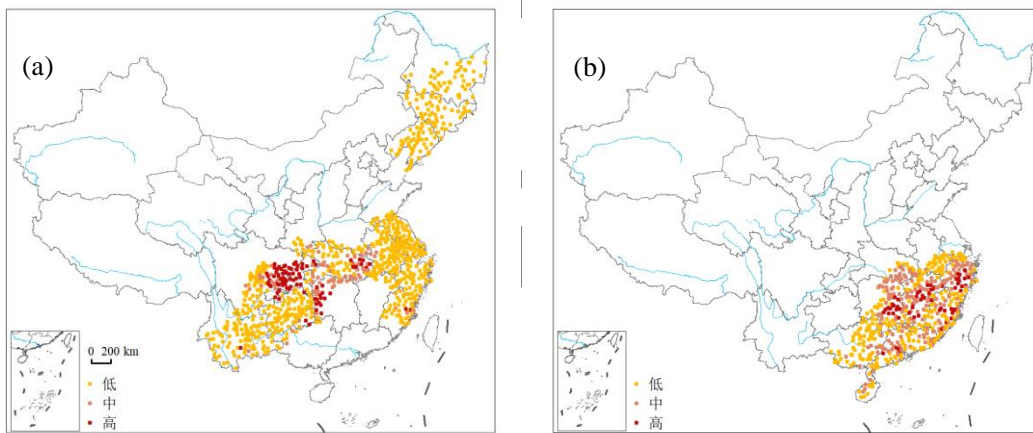


图10 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻主产区高温热害危险性分布

Fig.10 Risk for heat stress in (a) single-season rice and (b) double-season early rice in major production regions of China during 1991—2024

2.3.2 低温冷害

从东北水稻障碍型冷害危险性分布来看(图11a),高风险区主要集中在黑龙江东北部、吉林东部,中风险区主要在黑龙江中部和东南部、吉林中部、辽宁东部。晚稻寒露风危险性分布从南往北增强(图11b),高风险区主要集中在安徽南部、江苏南部、浙江大部、江西中北部、湖南中东部、广西西北部,中风险区主要在福建中西部、江西南部、广东北部、广西东北部。

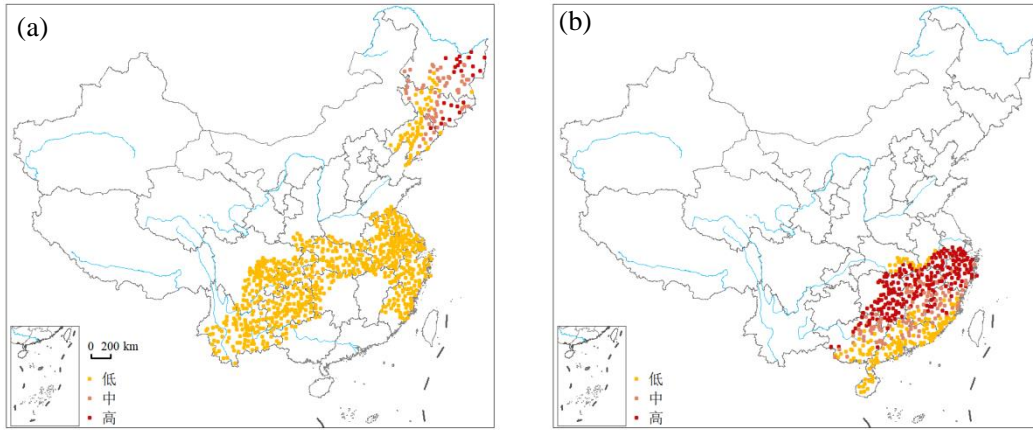


图11 1991—2024年全国 (a) 一季稻主产区障碍性冷害, (b) 晚稻主产区寒露风危险性分布

Fig.11 Risk for obstruction-type chilling injury in rice (a) in single-season rice and (b) cold dew wind in double-season late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.3.3 干旱

从全国一季稻干旱危险性分布来看 (图 12a), 高风险区主要集中在黑龙江西南部、吉林西部、辽宁西部、安徽北部、江苏北部、湖北北部和云南北部部分地区, 中风险区主要在黑龙江中东部、吉林中部和东北部、辽宁中部、江苏中南部、安徽中部、湖北中南部、四川东南部、云南中部和东北部。早稻干旱危险性高风险主要集中在广东南部、海南大部, 中风险区主要在浙江北部、湖南东南部、广东中部和广西西南部 (图 12b)。晚稻干旱危险性从南往北增强, 高风险区主要在湖北东部、江西中北部、湖南中东部, 中风险区在安徽南部、浙江西部、福建中西部、江西南部、广东北部、广西东北部 (图 12c)。

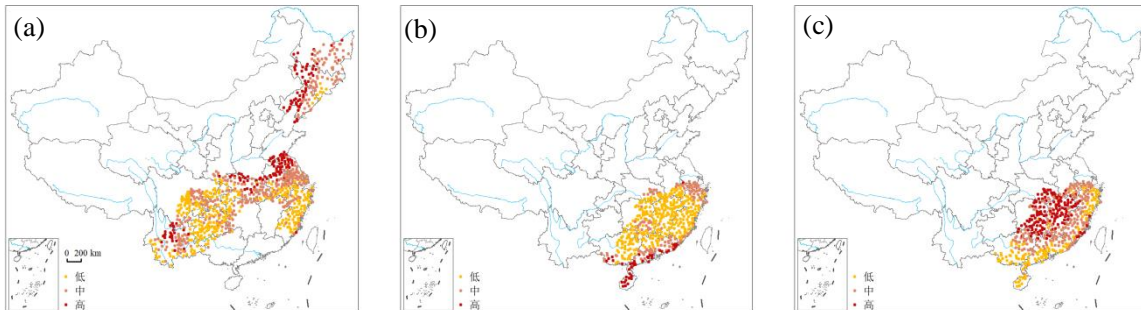


图12 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻, (c) 晚稻主产区干旱危险性分布

Fig.12 Risk for drought in (a) single-season rice, (b) double-season early rice and (c) late rice in major production regions of China during 1991—2024

2.3.4 高温干旱复合灾害

从全国一季稻高温干旱复合灾害危险性分布来看 (图 13a), 高风险区主要集中在四川东北部、重庆中北部、湖北东北部、湖南西部, 中风险区主要在湖北东南部和西北部、四川东南部、贵州东部、福建中部。早稻高温干旱复合灾害危险性高风险区主要集中在浙江北部、湖南东南部, 中风险区主要在湖北东部、江西中部、福建中部 (图 13b)。

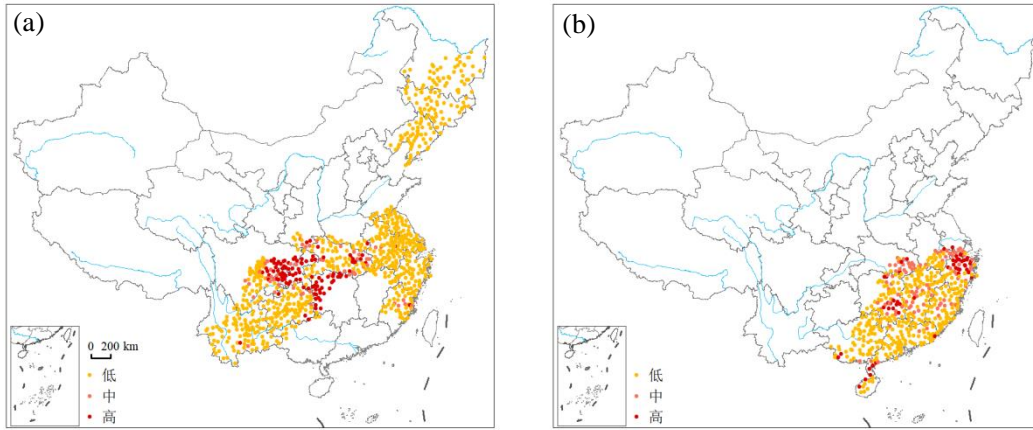


图13 1991—2024年全国 (a) 一季稻, (b) 早稻主产区高温干旱复合灾害危险性分布

Fig.13 Risk for compound heat and drought stresses in (a) single-season rice and (b) double-season early rice in major production regions of China during 1991—2024

3 结论与讨论

围绕全国一季稻和双季稻高温热害、低温冷害、干旱及高温干旱复合灾害,通过构建灾害强度指数、危险性指数分析了1991—2024年水稻主要农业气象灾害变化特点,主要结论如下:

(1) 自1991年以来,一季稻高温热害强度增强,特别是2010年后显著增强,2022年高温热害强度指数达到历史最高的6.3,但受灾站点比例仅为第7高;早稻高温热害则呈现波动性变化,2017年以来增强趋势明显;东北地区水稻障碍型冷害呈减弱趋势,2021年后强度大幅下降;晚稻寒露风强度在2017—2022年较高,强度指数普遍在12以上,受灾站点占比普遍比东北水稻障碍型冷害高。水稻干旱波动变化,一季稻和晚稻干旱强度在2022年达到峰值,早稻干旱2001年后波动较大,一季稻和晚稻受旱站点占比较早稻高。一季稻高温干旱复合灾害每年均有不同程度发生,2022年最重;早稻高温干旱复合灾害普遍较轻,2005年最重。

(2) 在灾害发生日数、灾害指数及其线性变化趋势空间分布上,四川东北部、重庆中部、湖北东部一季稻高温热害较重,湖南东南部、江西中南部、浙江中部、福建中部早稻高温热害较重且强度指数呈现增强趋势;东北地区水稻障碍型冷害从西南向东北增强,晚稻寒露风从南向北增强;一季稻干旱在东北地区较重,早稻干旱从南向北减弱,而晚稻干旱从南向北增强;一季稻高温干旱复合灾害在四川东北部、重庆中部、湖北东部、湖南西部较重,早稻高温干旱复合灾害在浙江北部、湖南东南部较重。

(3) 从灾害危险性分布来看,一季稻高温热害高风险区在四川东北部、重庆中部、湖北东部、湖南西部,早稻高温热害高风险区在浙江中部、江西中部、湖南东部和福建中部;东北地区水稻障碍型冷害高风险区在黑龙江东北部、吉林东部,晚稻寒露风高风险区在安徽南部、江苏南部、浙江大部等地;一季稻干旱高风险区在黑吉辽西部和鄂苏皖北部,早稻干旱高风险区在广东南部、海南大部,晚稻干旱高风险区在湖北东部、江西中北部、湖南中东部。一季稻高温干旱复合灾害高风险区在四川东北部、重庆中北部、湖北东北部、湖南西部,早稻高温干旱复合灾害高风险区在浙江北部、湖南东南部。

本文着重从农业气象灾害指数的角度定量化分析了水稻主要农业灾害在时间和空间上呈现出的变化趋势和分布特点,对农业生产种植布局、防灾减灾具有重要指导意义。当然也存在不确定性,本文选取的灾害指数更多基于农业气象灾害标准从业务应用的角度来构建,具有便于对比的优点。基于此构建的灾害指数虽然已经得到部分验证,但并没有经过充分的灾情检验,其原因是:(1)实

际灾害的样本获取难度较大，这也是限制农业气象灾害损失、影响评估等研究的一个困点难点；已有的部分验证也只是针对灾害的气象条件来反映灾害的变化趋势和分布，在重大灾害发生时通过一些实际调查检验（郭安红等，2021；张蕾等，2021），并不一定与实际灾情完全吻合，特别是空间上的差异没有足够的对比样本；（2）相比高温热害和低温冷害，干旱本身的复杂性增加了干旱对水稻产量等影响评估的难度，不同阶段干旱的影响是不同的，且不同强度、不同持续时间、不同干旱指数评估结果也存在较大差异，造成了当前对作物产量影响评估的不确定性；针对干旱灾害，更多的从受灾面积、成灾面积等灾害样本角度来对比，但不同灾害指数与其对应程度差异较大、匹配程度不足（徐敏等，2021；高歌等，2023）。因而，需要进一步通过部门获取、文献调研等途径收集农业气象灾害样本和建立相对丰富的灾情库，探讨灾害指标是否合理，尤其是随着品种更新、管理与栽培方式的变化，灾害的指标亦会有所变化，这种变化是否有必要修订现有指标都值得深入研究，进而期待能建立更好反映灾害影响的指标体系和标准指数。

本文从高温热害、干旱同时发生的角度来判定高温干旱复合灾害的特点，而实际生产中，高温干旱复合灾害不一定需要同时满足才会发生复合胁迫，相继发生的高温和干旱，可通过其遗留的影响且叠加，可能产生显著的、甚至更为复杂的复合胁迫效应。因而下一步需要着眼整个生长季内高温和干旱的序列、强度和发生时间，关注灾害链的时间动态、累积效应和生物物理过程的相互作用，建立更合适的高温复合灾害表征指数，才能更准确地评估高温干旱复合灾害的特点。本文的风险主要着眼水稻农业气象灾害的致灾气象条件及其危险性，是否致灾（如造成产量损失、品质下降等）还与孕灾环境敏感性以及防灾减灾能力等要素有关，目前综合考虑脆弱性、敏感性和防灾减灾能力的风险分析存在不足（刘佳等，2019；金垚等，2022）。因此，从风险单要素向多要素、单灾种向多灾种的综合风险分析有待进一步开展研究，以支撑及时预警农业气象灾害风险并制定更有效的防灾减灾策略。

参考文献

- 巢清尘, 严中伟, 孙颖, 等, 2020. 中国气候变化的科学新认知[J]. 中国人口 资源与环境, 30(3): 1-9. Chao Q C, Yan Z W, Sun Y, et al, 2020. A recent scientific understanding of climate change in China[J]. China Popul Resour Environ, 30(3): 1-9 (in Chinese).
- 段骅, 佟卉, 刘燕清, 等, 2019. 高温和干旱对水稻的影响及其机制的研究进展[J]. 中国水稻科学, 33(3): 206-218. Duan H, Tong H, Liu Y Q, et al, 2019. Research advances in the effect of heat and drought on rice and its mechanism[J]. Chin J Rice Sci, 33(3): 206-218 (in Chinese).
- 高歌, 李莹, 陈涛, 等, 2023. 2004-2019年中国干旱多承灾体灾损风险特征评估[J]. 气象, 49(5): 611-623. Gao G, Li Y, Chen T, et al, 2023. Characteristics and risk assessment of drought losses for different hazard bearing bodies in China from 2004 to 2019[J]. Meteor Mon, 49(5): 611-623 (in Chinese).
- 郭安红, 何亮, 韩丽娟, 等, 2018. 早稻高温热害强度指数构建及气候危险性评价[J]. 自然灾害学报, 27(5): 96-106. Guo A H, He L, Han L J, et al, 2018. Construction of heat damage intensity index of early rice and its climate risk assessment[J]. J Nat Dis, 27(5): 96-106 (in Chinese).
- 郭安红, 李森, 何亮, 等, 2021. 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, 47(6): 693-702. Guo A H, Li S, He L, et al, 2021. Advance in operational technology of agrometeorological disaster forecasting and assessment in China in recent 10 years[J]. Meteor Mon, 47(6): 693-702 (in Chinese).
- 姜丽霞, 赵慧颖, 曲辉辉, 等, 2021. 黑龙江省玉米干旱与低温冷害复合逆境对产量的影响[J]. 气象, 47(1): 94-105. Jiang L X, Zhao H Y, Qu H H, et al, 2021. Effect of drought and cold damage cross-stress on maize yield in Heilongjiang Province[J]. Meteor Mon, 47(1): 94-105 (in Chinese).
- 金垚, 王锐婷, 邹雨伽, 等, 2022. 基于水分亏缺指数的四川省水稻干旱灾害综合风险评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 44(11): 51-61. Jin Y, Wang R T, Zou Y J, et al, 2022. Comprehensive risk assessment of rice drought disaster

- in Sichuan Province based on crop water deficit index[J]. *J Southwest Univ (Nat Sci Ed)*, 44(11): 51-61 (in Chinese).
- 凌霄霞, 张作林, 翟景秋, 等, 2019. 气候变化对中国水稻生产的影响研究进展[J]. *作物学报*, 45(3): 323-334. Ling X X, Zhang Z L, Zhai J Q, et al, 2019. A review for impacts of climate change on rice production in China[J]. *Acta Agronom Sin*, 45(3): 323-334 (in Chinese).
- 刘丹, 郭瑞鸽, 杨军, 等, 2019. 江西省寒露风的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. *江西农业学报*, 31(10): 102-108. Liu D, Guo R G, Yang J, et al, 2019. Spatial-temporal variation characteristics of autumn low temperature and its response to climate change in Jiangxi Province[J]. *Acta Agric Jiangxi*, 31(10): 102-108 (in Chinese).
- 刘佳, 卿清涛, 陈超, 等, 2019. 基于热害累计指数的四川单季稻高温热害综合风险评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 27(9): 1440-1452. Liu J, Qing Q T, Chen C, et al, 2019. Risk assessment of hot damages for single-cropping rice based on accumulation index of heat stress in Sichuan[J]. *Chin J Eco-Agric*, 27(9): 1440-1452 (in Chinese).
- 刘琰琰, 张玉芳, 王明田, 等, 2016. 四川盆地水稻不同生育期干旱频率的空间分布特征[J]. *中国农业气象*, 37(2): 238-244. Liu Y Y, Zhang Y F, Wang M T, et al, 2016. Spatial distribution of rice drought frequency during different growth periods in Sichuan basin[J]. *Chin J Agrometeor*, 37(2): 238-244 (in Chinese).
- 罗孳孳, 方立魁, 武强, 等, 2024. 四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气象适宜度[J]. *气象*, 50(4): 461-474. Luo Z Z, Fang L K, Wu Q, et al, 2024. Meteorological suitability of axillary bud germination stage in the high temperature and summer drought areas of ratoon rice in eastern Sichuan Basin[J]. *Meteor Mon*, 50(4): 461-474 (in Chinese).
- 吕晓敏, 周广胜, 2018. 双季稻主要气象灾害研究进展[J]. *应用气象学报*, 29(4): 385-395. Lü X M, Zhou G S, 2018. A Review on main meteorological disaster of double-cropping rice in China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(4): 385-395 (in Chinese).
- 毛留喜, 魏丽, 2015. 大宗作物气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社. Mao L X, Wei L, 2015. *Meteorological Service Manual for Bulk Crops*[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 曲辉辉, 姜丽霞, 王冬冬, 2016. 气候变化对黑龙江省水稻障碍型冷害的影响[J]. *生态学报*, 36(3): 769-777. Qu H H, Jiang L X, Wang D D, 2016. Influence of climate change on sterile-type cooling injury in rice in Heilongjiang Province, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 36(3): 769-777 (in Chinese).
- 宋忠华, 高文娟, 刘富来, 等, 2022. 南方地区双季晚稻寒露风危害研究综述[J]. *中国农业气象*, 43(1): 37-49. Song Z H, Gao W J, Liu F L, et al, 2022. Review on the cold dew wind damage of double-cropping late rice in southern region[J]. *Chin J Agrometeor*, 43(1): 37-49 (in Chinese).
- 宋忠华, 解娜, 2022. 双季籼稻安全生长期研究方法择优与应用——以长沙为例[J]. *气象*, 48(10): 1333-1342. Song Z H, Xie N, 2022. Selection and application of research methods for safe growth period of double cropping indica rice: take Changsha as an example[J]. *Meteor Mon*, 48(10): 1333-1342 (in Chinese).
- 谭方颖, 何亮, 吕厚荃, 等, 2020. 基于游程理论的农业干旱指数在辽宁省春玉米旱灾损失评估中的应用[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 28(2): 191-199. Tan F Y, He L, Lü H Q, et al, 2020. Application of agricultural drought index based on run theory for the assessment of yield loss in spring maize owing to drought in Liaoning Province[J]. *Chin J Eco-Agriculture*, 28(2): 191-199 (in Chinese).
- 夏军, 陈进, 余敦先, 2022. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. *水利学报*, 53(10): 1143-1153. Xia J, Chen J, She D X, 2022. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. *J Hydraulic Eng*, 53(10): 1143-1153 (in Chinese).
- 徐敏, 孔维财, 徐经纬, 等, 2021. 基于游程理论和 CWDIa 的农业干旱时空特征分析[J]. *江苏农业学报*, 37(2): 362-372. Xu M, Kong W C, Xu J W, et al, 2021. Spatial and temporal characteristics of agricultural drought based on runs theory and crop water deficit abnormal index (CWDIa)[J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 37(2): 362-372 (in Chinese).
- 许莹, 王猛, 杨太明, 等, 2020. 安徽省一季稻高温热害致灾指标研究[J]. *气象*, 46(6): 857-862. Xu Y, Wang M, Yang T M, et al, 2020. Research on disaster-causing index of single-season-rice heat injury in Anhui Province[J]. *Meteor*

- Mon, 46(6): 857-862 (in Chinese).
- 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等, 2020. 江西早稻高温热害发生时间分布特征[J]. 应用气象学报, 31(1): 42-51. Yang J Y, Huo Z G, Wang P J, et al, 2020. Occurrence characteristics of early rice heat disaster in Jiangxi Province[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1): 42-51 (in Chinese).
- 杨满山, 关凯心, 张文梦, 等, 2024. 气候变化对川渝水稻产量的潜在影响[J]. 中国农业气象, 45(10): 1146-1159. Yang M S, Guan K X, Zhang W M, et al, 2024. Potential impacts of climate change on rice yield in Sichuan-Chongqing area[J]. Chin J Agrometeor, 45(10): 1146-1159 (in Chinese).
- 余会康, 郭建平, 2014. 气候变化下东北水稻冷害时空分布变化[J]. 中国生态农业学报, 22(5): 594-601. Yu H K, Guo J P, 2014. Variation in spatial and temporal distribution of chilling injury of rice under climate change in Northeast China[J]. Chin J Eco-Agric, 22(5): 594-601 (in Chinese).
- 张蕾, 郭安红, 何亮, 等, 2021. 2020年我国南方双季晚稻寒露风危害的变化特征[J]. 气象, 47(12): 1537-1545. Zhang L, Guo A H, He L, et al, 2021. Variation characteristics of chilling dew wind for double-season late rice across southern China in 2020[J]. Meteor Mon, 47(12): 1537-1545 (in Chinese).
- 张蕾, 钱拴, 曹云, 等, 2024. 2022年南方高温干旱特点及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 43(7): 2182-2188. Zhang L, Qian S, Cao Y, et al, 2024. Characteristics of heat and drought events across southern China in 2022 and their impacts on vegetation net primary productivity[J]. Chin J Ecol, 43(7): 2182-2188 (in Chinese).
- 中国气象局, 2008. 寒露风等级: QX/T 94—2008 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2008. Grade of autumn low temperature: QX/T 94-2008 [S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008. 主要农作物高温危害温度指标: GB/T 21985—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2008. Temperature index of high temperature harm for main crops: GB/T 21985-2008[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2016. 农业干旱等级: GB/T 32136—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2016. Grade of agricultural drought: GB/T 32136-2015[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. 北方水稻低温冷害等级: GB/T 34967—2017[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. Grade of rice cold damage in northern China: GB/T 34967-2017[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- Duan H, Tong H, Zhu A, et al, 2020. Effects of heat, drought and their combined effects on morphological structure and physicochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) starch[J]. J Cereal Sci, 95: 103059.
- FAO, 2025. Food and agricultural organization of the United Nations[OL]. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/qc>.
- Hao Z C, 2022. Compound events and associated impacts in China[J]. iScience, 25(8): 104689.
- IPCC, 2019. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, 2021. Summary for policymakers[C]//Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tao F L, Zhang Z, Zhang S, et al, 2013. Changes in rice disasters across China in recent decades and the meteorological and agronomic causes[J]. Reg Environ Change, 13(4): 743-759.

Wang S Y, Liu Y J, Asseng S, et al, 2025. Rice yield stability and its determinants across different rice-cropping systems in China[J]. Agric Forest Meteor, 364: 110452.

Yu R, Dong S Y, Han Z Y, et al, 2024. Increased exposure of rice to compound drought and hot extreme events during its growing seasons in China[J]. Ecol Indic, 167: 112735.

气象数据