



赵金媛, 胡琦, 姜婧妍, 周建朔, 张丽娜, 张山清, 王森, 郭燕云, 潘学标, 王雪皎. 1961—2020年新疆棉花花铃期高温热害时空变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(03): 1-12.

ZHAO Jinyuan, HU Qi, JIANG Jingyan, ZHOU Jianshuo, ZHANG Lina, ZHANG Shanqing, WANG Sen, GUO Yanyun, PAN Xuebiao, WANG Xuejiao. Spatiotemporal variation characteristics of high temperature heat damage to cotton during flowering and boll-forming period in Xinjiang from 1961 to 2020[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(03): 1-12.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.01

1961—2020年新疆棉花花铃期高温热害时空变化特征

赵金媛^{1,2} 胡琦^{1*} 姜婧妍¹ 周建朔¹ 张丽娜¹ 张山清³ 王森³ 郭燕云³
潘学标¹ 王雪皎^{3*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 大连市普兰店区气象台, 辽宁 大连 116200;

3. 新疆维吾尔自治区农业气象台/新疆兴农网信息中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要 为明确新疆棉花花铃期高温热害的时空分布特征和变化趋势, 基于1961—2020年新疆棉花种植区101个气象站点逐日地面气象观测资料、灾情资料、棉花生产资料, 选取新疆地区棉花花铃期高温热害指标, 采用线性趋势分析、空间插值分析和MK趋势分析等方法, 从代际、年际和候尺度分析新疆棉花花铃期高温热害发生频率和强度的时空分布和变化特征。结果表明: 1) 新疆棉花花铃期高温热害的发生以重度为主, 中度次之, 各等级高温热害发生频率呈南高北低的空间分布特征, 高值区集中在和田地区、巴音郭楞蒙古自治州、吐鲁番市和昌吉回族自治州。2) 1961—2020年新疆地区棉花高温热害发生站次比、天数、危害热积温均呈增加趋势, 其中南、北疆站次比每10年倾向率分别为2.2%和1.6%, 危害热积温每10年变化1.7和1.9 °C·d。21世纪10年代高温热害最严重。3) 新疆棉花7月1候—9月3候高温热害站次比和发生频率随候序推移呈先增加后减小的趋势, 在7月4候—8月1候高温热害发生频率较大; 时段I(1961—1990年)与时段II(1991—2020年)相比, 时段II站次比最大的候序有提前的趋势, 北疆站次比最大的候序由8月1候(29.2%)提前到7月3候(31.6%), 南疆由7月6候(28.9%)提前到7月4候(33.2%)。

关键词 新疆; 棉花; 高温热害; 时空特征

中图分类号 S166

文章编号 1007-4333(2024)03-0001-12

文献标志码 A

Spatiotemporal variation characteristics of high temperature heat damage to cotton during flowering and boll-forming period in Xinjiang from 1961 to 2020

ZHAO Jinyuan^{1,2}, HU Qi^{1*}, JIANG Jingyan¹, ZHOU Jianshuo¹, ZHANG Lina¹,
ZHANG Shanqing³, WANG Sen³, GUO Yanyun³, PAN Xuebiao¹, WANG Xuejiao^{3*}

(1. College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Dalian Pulandian District Meteorological Observatory, Dalian 116200, China;

3. Xinjiang Agro-Meteorological Observatory/Information Centre of Xinjiang Xingnong-Net, Urumqi 830002, China)

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(42105172); 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2022B02001-1); 新疆维吾尔自治区“天山英才”——“三农”骨干人才项目(2022SNGGNT067); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01A295)

第一作者: 赵金媛(ORCID: 0009-0008-8342-1658), 硕士研究生, E-mail: zjy949072427@163.com

通讯作者: 王雪皎(ORCID: 0009-0004-3249-2262), 高级工程师, 主要从事农业气象灾害、作物模型研发及应用等研究, E-mail: wxjy@126.com

胡琦(ORCID: 0000-0003-2578-7498), 副教授, 主要从事气候变化影响评价研究, E-mail: huq@cau.edu.cn

Abstract In order to clarify the spatial and temporal distribution and change trend of cotton meteorological disasters in Xinjiang, based on the daily surface meteorological observation data of 101 meteorological stations, disaster data and cotton production data in Xinjiang cotton planting area from 1961 to 2020, the high temperature heat damage index of cotton flowering and boll-forming period in Xinjiang was selected. The linear trend analysis, spatial interpolation analysis and M-K trend analysis were used to analyze the spatial and temporal distribution and variation characteristics of the frequency and intensity of high temperature heat damage at cotton flowering and boll-forming period in Xinjiang from the decadal, interannual and pentad scales. The results showed that: 1) The high temperature damage of cotton in Xinjiang was mainly severe, followed by moderate. The frequency of high temperature damage in each grade was high in the south and low in the north. The high value areas were concentrated in Hotan Area, Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Turpan Ctiy and Changji Hui Autonomous Prefecture. 2) From 1961 to 2020, the station proportion, number of days and hazardous heat accumulation temperature of high temperature heat damage of cotton in Xinjiang showed an increasing trend. The trend rate of station proportion in southern and northern Xinjiang was 2.2% and 1.6% per 10 years, and the hazardous heat accumulation temperature changed by 1.7 and 1.9 °C·d per 10 years, respectively. High temperature damage was the most serious in the 2010s. 3) From July 1st pentad to September 3rd pentad, the station proportion and occurrence frequency of high temperature heat damage in Xinjiang cotton increased first and then decreased with the passage of pentad sequence, and the occurrence frequency of high temperature heat damage was higher from July 4th pentad to August 1st pentad. Compared with period I and period II, the pentad sequence with the largest ratio of stations in period II tends to advance. The pentad sequence with the largest ratio of stations in northern Xinjiang is advanced from August 1st pentad (29.2%) to July 3rd pentad (31.6%), and that in southern Xinjiang is advanced from July 6th pentad (28.9%) to July 4th pentad (33.2%).

Keywords Xinjiang; cotton; high temperature damage; spatiotemporal characteristics

新疆棉花不仅在我国国民经济中占有重要地位,而且对国际市场亦有举足轻重的影响^[1]。新疆地形条件复杂多样且地域间气候资源分布不均匀,属于气候变化敏感带^[2-3]。自20世纪50年代以来,全球绝大部分地区极端高温事件的发生频率和强度持续增加^[4],受全球气候变化和种植制度及耕作方式的影响,新疆地区高温热害在时序、强度和影响范围等方面均存在显著变化^[5]。邬晓丹等^[6]利用Hurst指数分析新疆极端气候指数变化特征发现,新疆存在极端高温事件发生增加的风险。明确新疆棉花高温热害的时空分布和变化趋势,对该地区调整种植结构趋利避害、保障棉花生产安全具有重要意义。

花铃期是棉花产量形成的关键期(7—8月)^[7],也是一年中极端高温天气发生最为频繁的季节,花铃期高温胁迫在新疆频繁发生^[8],如2011—2020年中有5年(2011、2012、2015、2018、2019年)发生了全疆大范围的高温天气(>35 °C)、4年(2013、2014、2016、2017年)发生了南疆大范围的高温天气。已有研究表明棉花生殖生长期遭遇高温天气会降低

花粉活力、受精率^[9-11]等,并使得蒸腾、光合、干物质积累与分配等生理过程受阻,进而影响结铃率^[12-13]、棉铃体积、棉籽数量、纤维发育等^[14-15],最终导致减产^[16]和纤维品质降低^[17]。在高温胁迫下,日最高温度每升高1 °C,棉花减产110 kg/hm²^[18]。气候变暖背景下花铃期高温已成为影响新疆棉区高产、优质和稳产的重要气象灾害之一。向导等^[19]针对1964—2019年石河子垦区高温天气进行分析发现连续3天的高温出现概率为76.3%,且高温持续时间越长、温度越高,其蕾铃脱落率、叶片脱落率越高。蒙华月等^[20]基于湖北省1961—2020年26个国家气象站的气象数据分析发现2010s高温事件的发生处于历史较高水平。目前针对候尺度棉花高温热害发生演变规律的研究鲜有报道,本研究利用1961—2020年新疆棉花生育期逐日气象数据,采用线性趋势分析、空间插值分析和MK趋势分析等方法,从代际、年际和候尺度分析新疆棉花花铃期高温热害发生频率和强度的时空分布及变化特征,旨在明确新疆地区棉花花铃期高温热害时空变化规律,以期对棉花生产和科学防灾减灾提供可靠依据。

1 材料与方法

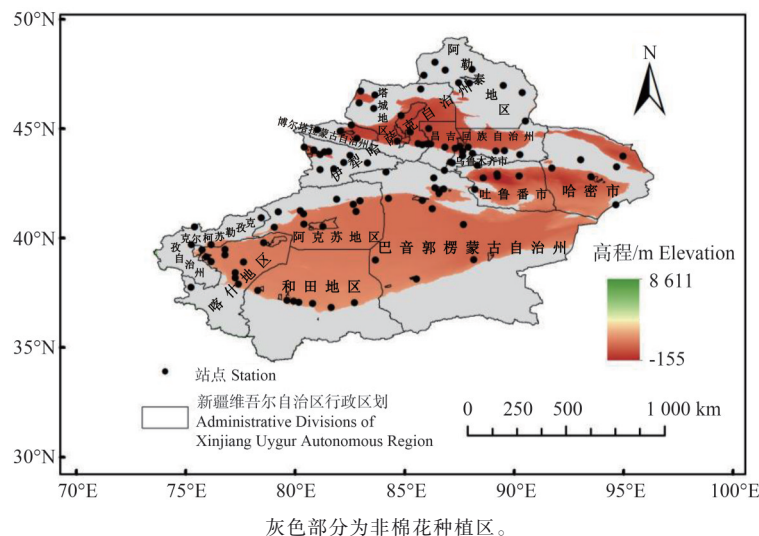
1.1 数据来源及预处理

研究区域为新疆维吾尔自治区(73.6~97.3°E、34.4~48.1°N,海拔4 383 m),该地区属于典型的温带大陆性气候区,光照充足、干旱少雨。本研究以位于新疆中部的天山山脉为界,天山以北即为北疆,包括伊犁哈萨克自治州、博尔塔拉蒙古自治州、昌吉回族自治州、乌鲁木齐市、吐鲁番市、哈密市等;以南则为南疆,包括巴音郭楞蒙古自治州、和田地区、阿克苏地区、喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州等。气象数据选取1961—2020年新疆逐日地表观测资料,共计101个气象站点(图1),数据来源于中国气象数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>)的“中国地面气候资料日值数据V3.0”数据集,

包括了逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、降水量等,气象数据经过严格的质量控制,缺测率<1‰,采用线性插值方法对缺测的气象数据进行订正。

2000—2018年新疆棉花生产数据来源于国家统计局的《中国统计年鉴》^[21]、新疆维吾尔自治区统计局(<https://www.xinjiang.gov.cn/>)和新疆兴农网信息中心(<https://www.xjxnw.com/sc/nqhy/>),主要用于分析棉花种植面积、产量和生育期的变化情况。

新疆棉花作物区划数据来源于《气候变化对新疆农业的影响及区划》^[22];灾情数据主要来源于《中国气象灾害大典(新疆卷)》^[23]。



Gray area represents non-cotton planting areas.

图1 新疆地区高程及气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of elevation and meteorological stations in Xinjiang

1.2 指标计算

1.2.1 热害发生天数(T)

新疆某一站点某年份发生高温热害的总天数记为 t ,d;某年所有站点发生高温热害的总天数记为 T ,d·站;某年某站点发生高温热害的平均天数记为 $\bar{T}$,d。

$$t = \sum_{i=1}^k l_i \quad (1)$$

$$\bar{T} = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{n} \quad (2)$$

式中: l_i 为第 i 次热害发生天数,d; t_j 为第 j 个站点发生热害的天数,d; k 为热害发生次数; n 为站点数。

1.2.2 危害热积温(H_a)

根据高温热害指标,统计某年平均每个站点气

温 $>35^\circ\text{C}$ 的值,记为 H_a , $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。

$$H_a = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (T_{\max}^{ij} - 35.0)}{N} \quad (3)$$

式中: N 为棉花种植区的站点数; m 为某年发生棉花高温热害的站点数; j 为发生棉花高温热害站点的序号, $j=1,2,3,\dots,m$; n_j 为第 j 个棉花高温热害过程中总高温日数,d; i 为第 j 个棉花高温热害过程中每天的序号, $i=1,2,3,\dots,n_j$; $T_{\max}^{ij}$ 为第 j 个站点高温热害第 i 次 $>35^\circ\text{C}$ 的温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 站次比(S)

新疆某年份发生高温热害的站点数占总站点

数的百分比记为 S 。

$$S = n/N \times 100\% \quad (4)$$

式中: n 为发生热害的站点数; N 为总站点数。

1.2.4 发生频率(E)

新疆某站点发生高温热害的年份数占总年数的百分比记为 E 。

$$E = m/M \times 100\% \quad (5)$$

式中: m 为发生热害的年份数; M 为总年数。

1.2.5 棉花花铃期高温热害指标

参考 2000—2018 年新疆棉花生产数据, 北疆棉花花铃期为 7 月 6 日—9 月 10 日, 南疆棉花花铃期为 7 月 1 日—9 月 5 日。根据《棉花花铃期热害温度指标》(DB36/T 1325—2020)^[24], 并结合周妍等^[25]关于棉花高温热害的实际研究情况, 确定棉花花铃期热害分为轻度、中度、重度 3 个等级, 采用日最高气温及其发生日数作为划分依据, 见表 1。

表 1 棉花花铃期高温热害指标

Table 1 High temperature heat damage index during the flowering and boll-forming period of cotton

热害等级 Heat hazard level	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	时间/d Time
轻度 Slight	$35.0 \leq T_{\max} < 37.5$	4~6
中度 Moderate	$35.0 \leq T_{\max} < 37.5$ 或 $37.5 \leq T_{\max} < 40.0$	7~9 1~2
重度 Severe	$T_{\max} \geq 35.0$ 或 $37.5 \leq T_{\max} < 40.0$ 或 $T_{\max} \geq 40.0$	≥ 10 ≥ 3 ≥ 1

注: $T_{\max}$ 代表日最高温度。

Note: $T_{\max}$ represents the highest daily temperature.

1.2.6 Mann-Kendall(M-K)非参数突变检验

对 1961—2020 年新疆棉花花铃期高温热害站次比、天数和危害热积温进行 Mann-Kendall 检验, 分析其趋势变化及突变特征, 本研究给定显著性水平 $\alpha=0.05$, 所对应的临界值为 ± 1.96 。

1.3 数据处理

将 1961—2020 年划分为 2 个时段: 时段 I 为 1961—1990 年, 时段 II 为 1991—2020 年。将新疆棉花花铃期分为 15 个候, 分别为 7 月 1 候(07-01—07-05)、7 月 2 候(07-06—07-10)、7 月 3 候(07-11—07-15)、7 月 4 候(07-16—07-20)、7 月 5 候(07-21—07-

25)、7 月 6 候(07-26—07-31)、8 月 1 候(08-01—08-05)、8 月 2 候(08-06—08-10)、8 月 3 候(08-11—08-15)、8 月 4 候(08-16—08-20)、8 月 5 候(08-21—08-25)、8 月 6 候(08-26—08-31)、9 月 1 候(09-01—09-05)、9 月 2 候(09-06—09-10)、9 月 3 候(09-11—09-15)。

数据处理均利用 Matlab 2014 软件; 空间分布图利用 ArcGIS10.1 软件反距离权重插值法(Inverse distance weighted, IDW)制作; 折线图采用 Origin 软件制作。

2 结果与分析

2.1 棉花花铃期高温热害指标的验证

由表 2 可知, 选取 8 个站点对棉花花铃期高温热害实际发生情况进行调查, 资料中是以县为最小尺度, 在验证时, 若该站点在此县域内, 则视作该站点发生高温热害。利用表 1 中的棉花花铃期高温热害指标结合气象数据判断是否发生高温热害, 将其与实际发生情况进行对比, 符合实际情况的占比 100%。由此可见, 该指标可以用于分析新疆棉花花铃期高温热害的发生特征。

2.2 棉花花铃期高温热害空间分布特征

由图 2 可知, 1961—2020 年新疆棉花花铃期重度高温热害发生频率最高、中度次之、轻度最小。新疆高温热害发生总频率呈南高北低的空间分布特征, 发生频率均 $\geq 40\%$, 尤其是和田地区和巴音郭楞蒙古自治州发生频率在 $60\% \sim 100\%$ (图 2(a))。发生频率 $< 40\%$ 的区域的面积为 6.7 万 km^2 , 发生频率达到 $80\% \sim 100\%$ 的区域的面积为 62.3 万 km^2 。

轻度高温热害发生频率呈西高东低的空间分布特征, 新疆西部轻度高温热害发生频率集中在 $10\% \sim 20\%$, 新疆东部轻度热害发生频率 $< 10\%$, 有 21 个站点不发生轻度高温热害(图 2(b)), 发生频率 $\geq 10\%$ 的区域面积为 93.5 万 km^2 。

中度高温热害发生频率呈西高东低的空间分布特征, 和田地区和昌吉回族自治州的西部中度高温热害发生频率较高, 可以达到 $40\% \sim 60\%$ (图 2(c))。发生频率 $\geq 40\%$ 的区域的面积为 33.2 万 km^2 。

重度高温热害发生频率呈东南高西北低的空间分布特征, 和田地区、巴音郭楞蒙古自治州、吐鲁番市、塔城地区和昌吉回族自治州高温热害发生频率 $\geq 60\%$, 阿克苏地区发生频率 $< 20\%$, 有 21 个站

表 2 实际热害调查结果与利用指标判断棉花花铃期高温热害结果的匹配情况

Table 2 Matching between the actual heat damage investigation results and the use of indicators to determine the high temperature heat damage results during the flowering and boll-forming period of cotton

站点 Station	年份 Year	日期 Date	灾害记录 Damage record	匹配结果 Matching result
米泉	1994	08-05—08-31	出现 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ 高温日数为 7 d	✓
石河子	2015	07-01—08-31	7、8 月份持续高温	✓
尉犁	2015	07-10—08-31	7 月气温 $36\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的日数为 12 d, $\geq 40^{\circ}\text{C}$ 以上的天数为 7 d	✓
阿拉尔垦区	2015	07-01—07-30	7 月 15 日—25 日连续 11 d $\geq 37.5^{\circ}\text{C}$,是历年来高温天气持续最长时段	✓
阿克陶	2014	07-13—07-20	出现异常高温,高温造成大部分棉铃脱落	✓
鄯善	1999	07-15—07-20	出现极端最高气温 43.5°C	✓
哈密	1990	08-10—08-30	长期出现高温天气	✓
克拉玛依	1999	07-20—08-05	出现 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ 高温日数为 8 d,农业受灾面积 25.3 hm^2	✓
	2000	07-11—07-13	出现极端最高气温 46.5°C	✓

注：✓为结果符合。
Note: ✓ represents correct result.

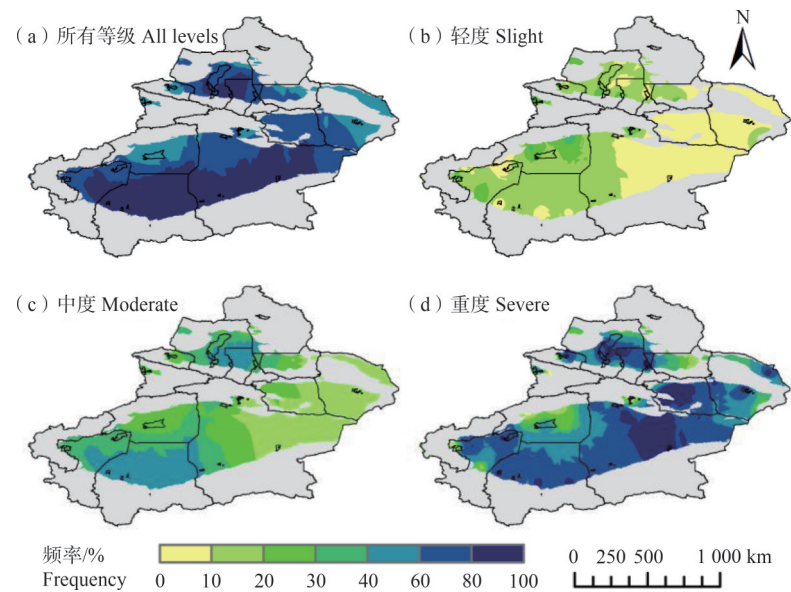


图 2 1961—2020 年新疆棉花花铃期不同等级高温热害发生频率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of frequency of high temperature heat damage at different levels during the flowering and boll-forming stage of cotton in Xinjiang from 1961 to 2020

点不发生重度高温热害(图 2(d))。发生频率 $< 40\%$ 的区域的面积为 50.2 万 km^2 ,发生频率达到 $80\%\sim 100\%$ 的区域的面积为 18.3 万 km^2 。

由图 3 可知,1961—2020 年新疆棉花花铃期高温热害发生频率代际空间变化特征为重度高温热害

发生频率最高、中度次之、轻度发生频率最小。各等级高温热害发生总频率为 $80\%\sim 100\%$ 的区域的面积由 63.4 万 km^2 (1960s)增加到 76.1 万 km^2 (2010s),升高 20.0% ;频率 $< 40\%$ 的区域面积由 29.9 万 km^2 (1960s)下降到 3.7 万 km^2 (2010s),降低 87.6% 。

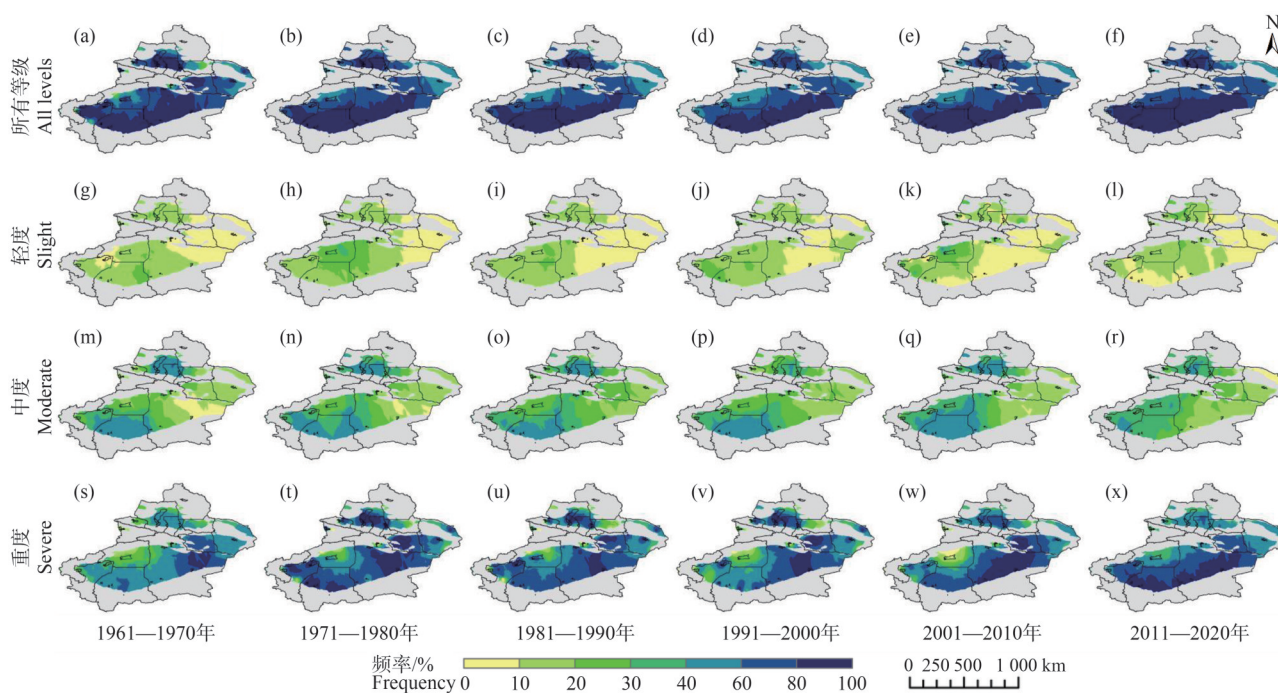


图3 1961—2020年新疆棉花花铃期高温热害发生频率年代际空间变化

Fig. 3 Decadal spatial variation of occurrence frequency of high temperature heat damage during cotton flowering and boll-forming period in Xinjiang from 1961 to 2020

轻度高温热害发生频率 $\geq 10\%$ 的区域面积由110.1万(1960s)下降到88.8万 km^2 (2010s),降低19.3%。中度高温热害发生频率 $\geq 40\%$ 的区域面积由38.4万(1960s)下降到7.4万 km^2 (2010s),降低80.7%; $<20\%$ 的区域的面积由58.0万(1960s)下降到49.0万 km^2 (2010s),降低15.5%。重度高温热害发生频率为80%~100%的区域面积由3.3万(1960s)增加到43.9万 km^2 (2010s),升高123%;发生频率 $<40\%$ 的区域由65.1万(1960s)下降到27.6万 km^2 (2010s),降低57.6%。高温热害发生总频率的高值区面积呈增加趋势;低值区面积呈下降趋势。轻度高温热害发生频率高值区面积呈下降趋势;低值区面积呈增长趋势,但增幅和降幅都比较小。中度高温热害发生频率高值区和低值区的面积均呈下降趋势,但高值区的面积降幅较大。重度高温热害发生频率高值区面积呈增长趋势,且涨幅巨大;低值区面积呈下降趋势。

2.3 棉花花铃期高温热害时间变化趋势

由图4可知,北疆和南疆的棉花花铃期高温热害站次比平均值分别为58.2%和72.3%,每个站点平均发生15.9和13.5 d,危害热积温分别为29.2和17.1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。1961—2020年北疆棉花花铃期高温热

害发生站次比、天数和危害热积温均呈上升趋势,倾向率分别为1.6%/10年、0.8 d/10年、1.9 $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ /10年,南疆棉花花铃期高温热害发生站次比、天数和危害热积温也呈上升趋势,倾向率分别为2.2%/10年、1.0 d/10年、1.7 $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ /10年,南疆高温热害站次比增加幅度高于北疆。

2008和2015年北疆高温热害站次比 $>80\%$,南疆有15年高温热害站次比 $>80\%$,即有超过32个站点发生了高温热害,南北疆站次比均呈逐渐升高的趋势(图4(a)和(b))。从代际变化来看,北疆和南疆站次比最大值均出现在21世纪10年代,分别为62.7%和81.0%,站次比最小值均出现在20世纪60年代,分别为52.5%和65.0%。

北疆棉花花铃期高温热害发生天数范围在6.0~23.0 d,2015年高温热害发生天数高达29.7 d,占棉花花铃期的44.8%,1995年高温热害发生天数最少,为5.6 d。南疆棉花花铃期高温热害发生天数范围在4.0~32.0 d,有9年高温热害发生天数 >20.0 d(图4(c)和(d))。从代际变化来看,20世纪80年代—21世纪10年代北疆高温热害天数呈增加趋势,南疆高温热害发生天数呈先减小后增大的趋势,北疆和南疆热害天数最大值均出现在21世纪10

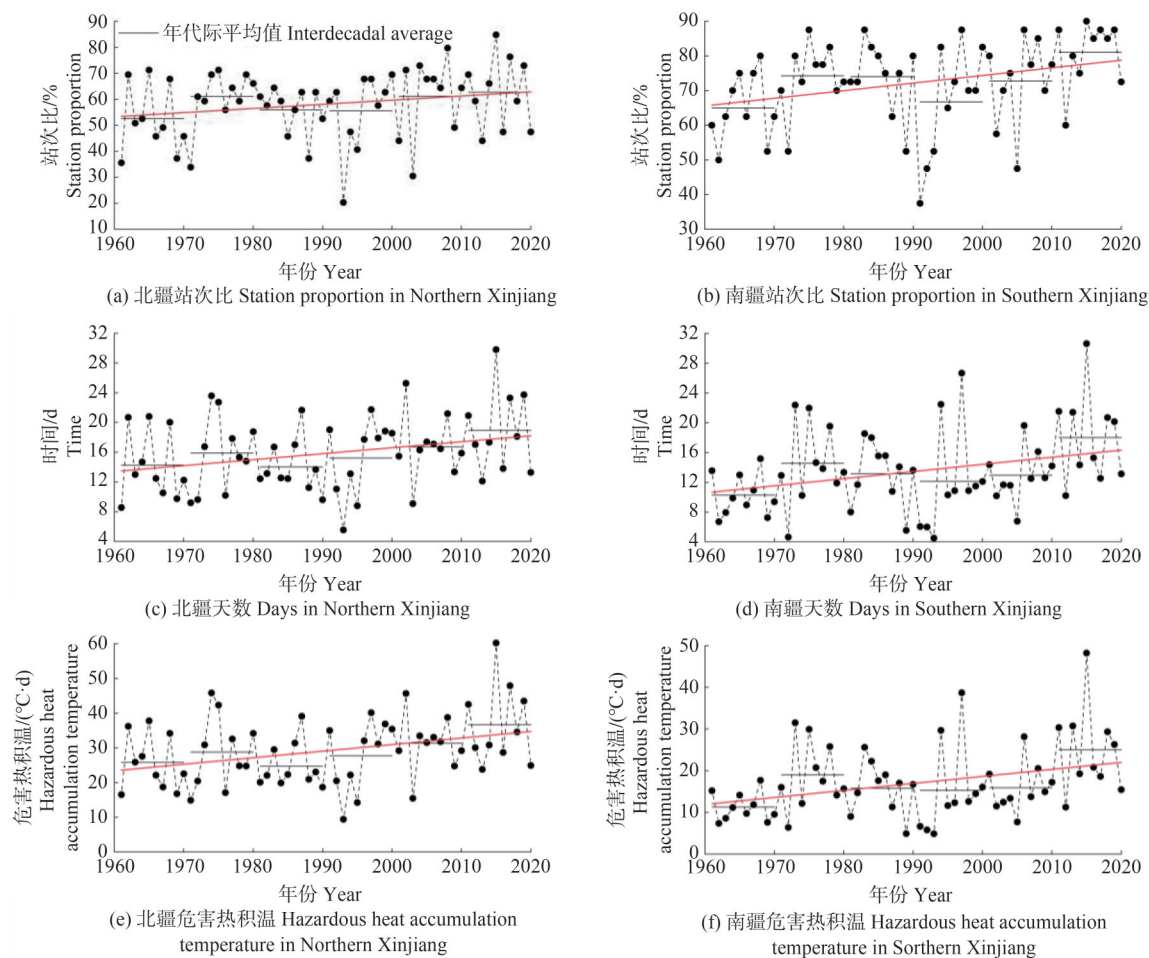


图4 1961—2020年新疆棉花花铃期高温热害时间变化特征

Fig. 4 Temporal variation characteristics of high temperature heat damage during cotton flowering and boll-forming period in Xinjiang from 1961 to 2020

年代,分别为18.9和18.0 d。

北疆每个站点危害热积温范围在 $9.0\sim 61.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,2015年危害热积温最高为 $60.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$;1993年危害热积温最低为 $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。南疆每个站点危害热积温范围在 $4.0\sim 49.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,2015年危害热积温最高为 $48.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (图4(e)和(f))。从代际变化来看,北疆和南疆危害热积温最大值均出现在21世纪10年代,分别为 36.7 和 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

由图5可知,北疆棉花高温热害站次比在1961—2020年呈不显著上升趋势($P>0.05$);高温热害发生天数在1961—2018年呈不显著上升趋势($P>0.05$),2019—2020年UF统计量超过0.05水平线,呈显著上升趋势($P<0.05$);危害热积温在1961—2017年呈不显著上升趋势($P>0.05$),2018—2020年呈显著上升趋势($P<0.05$)。南疆棉花高温热害

站次比在1961—2018年呈不显著上升趋势($P>0.05$),2019—2020年呈显著上升趋势($P<0.05$);高温热害发生天数在1961—2018年呈不显著上升趋势($P>0.05$),2019—2020年呈显著上升趋势($P<0.05$);危害热积温在1961—2015年呈不显著上升趋势($P>0.05$),2016—2020年呈显著上升趋势($P<0.05$)。

2.4 棉花高温热害候尺度分析

由图6可知,7月1候—9月3候南北疆高温热害站次比随候序推移呈增大后减小的趋势。北疆站次比平均值最大的候序是7月第3候,为29.6%,即每年7月第3候约有18个站点会发生高温热害,其次是8月第1候,为28.1%。站次比最大值出现在7月第5候,为74.6%。9月1候—9月3候的站次比平均值 $<10\%$,其中,9月第3候站次比的平均值

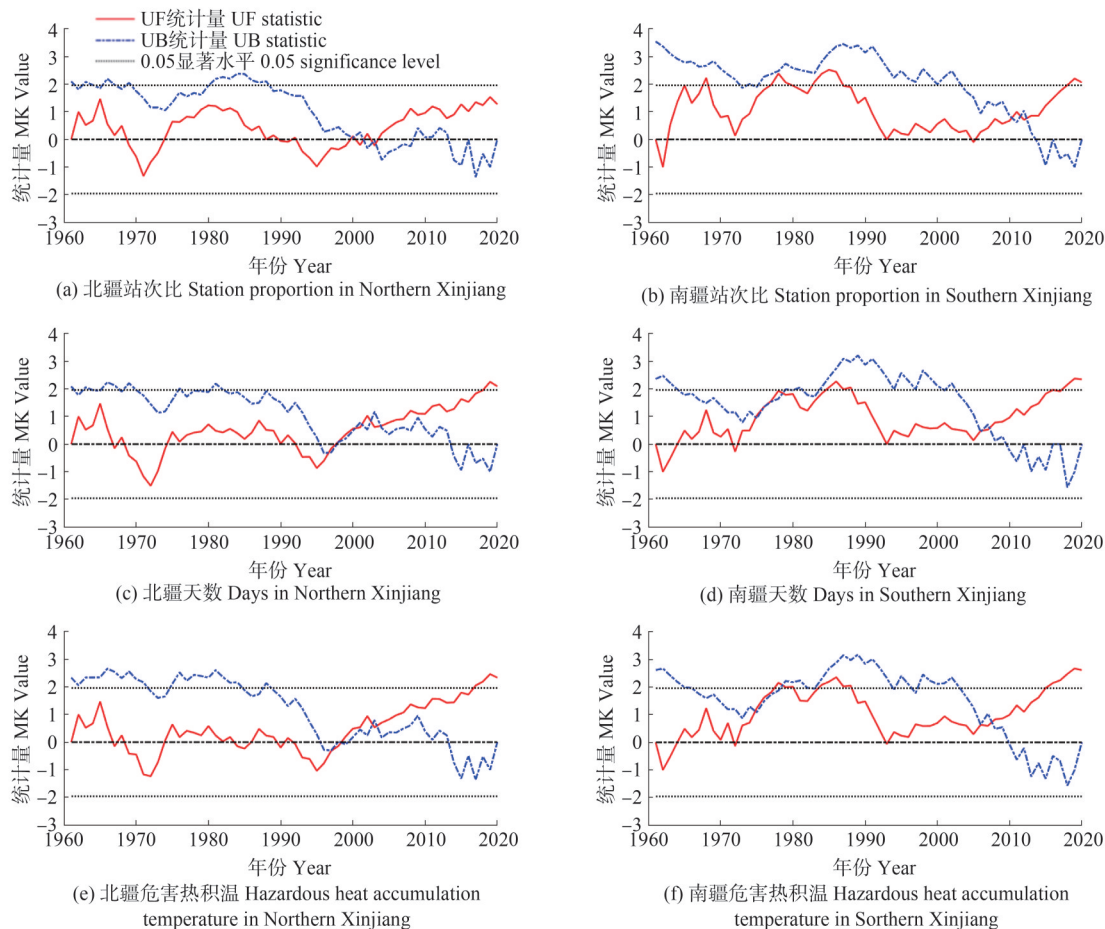


图5 新疆棉花花期铃期高温热害时间变化特征M-K检验

Fig. 5 M-K test on the characteristics of high temperature heat damage time change of cotton flowering and boll-forming period in Xinjiang

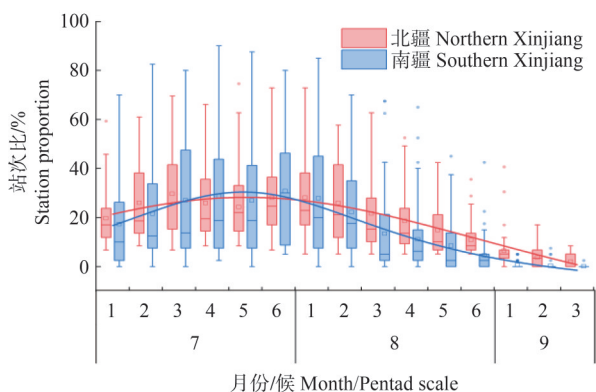


图6 新疆棉花7月1候—9月3候高温热害站次比逐候变化情况

Fig. 6 Variation of station proportion of high temperature heat damage from July 1st to September 3rd pentad in Xinjiang cotton by pentad

最小,为2.0%。南疆站次比平均值最大的候序是7月第6候,为30.8%,即每年在7月第6候约有13个

站点会发生高温热害,其次是7月第4候,为28.7%。站次比最大值出现在7月第4候,为90.0%。8月5候—9月3候的站次比平均值均<10%,其中,9月第3候站次比平均值最小,为0.04%。

由图7可知,与时段I相比(1961—1990年),时段II(1991—2020年)逐候的高温热害站次比有所升高,并且发生高温热害站次比最高的候序有提前的趋势。北疆7月第4候站次比提高的幅度最大,从21.9%提高到30.0%,其次是7月第2候,从22.6%提高到29.3%。时段I中8月第1候的高温热害站次比最大,为29.2%;时段II中7月第3候的高温热害站次比最大,为31.6%。南疆7月第1候站次比升高幅度最大,从10.2%升高到24.5%。时段I中7月第6候的高温热害站次比最大,为28.9%,时段II中7月第4候的高温热害站次比最大,为33.2%。

由图8可知,新疆高温热害发生频率随着候序推

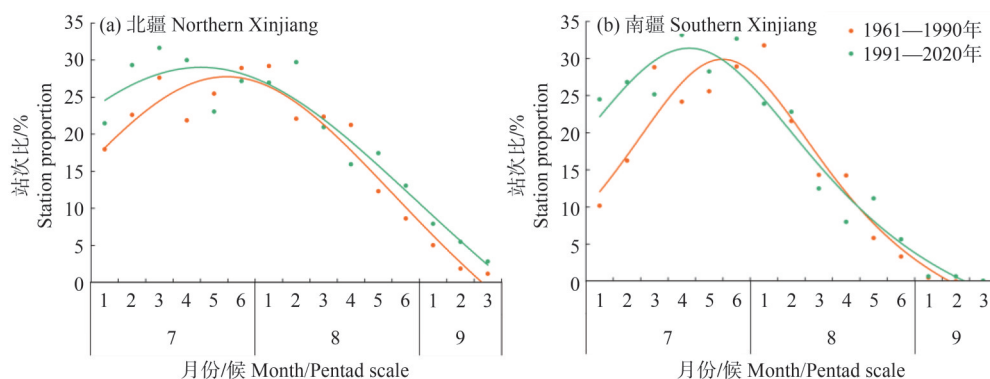


图7 新疆棉花7月1候—9月3候高温热害前后30年站次比逐候变化情况

Fig. 7 Variation of high temperature heat damage in the first 30 years and the next 30 years from July 1st to September 3rd pentad in Xinjiang cotton by pentad

移呈先增大后减小的趋势,且每一候的发生频率呈东南高西北低的空间分布特征。高温热害发生频率 $\geq 60\%$ 的区域普遍集中在巴音郭楞蒙古自治州和吐鲁番市,8月第1候发生频率为 $60\% \sim 100\%$ 的面积最大,为28.9万 km^2 ,其次是7月第6候,面积为26.8万 km^2 。高温热害发生频率为 $20\% \sim 60\%$ 的区域集中在和田地区、塔城地区、昌吉回族自治区和哈密地区,7月第6候发生频率为 $20\% \sim 60\%$ 的区域面积最大,为108.2万 km^2 。热害发生频率 $< 10\%$ 的区域集中在阿克苏地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州,9月第3候新疆全域高温热害发生频率 $< 10\%$,有53个站点不发生高温热害。

3 讨论

本研究基于棉花花铃期高温热害指标,并结合农业气候特征对新疆棉花高温热害进行分析,计算代际、年际和候尺度不同等级高温热害发生站次比、天数、危害热积温和发生频率,分析其时空特征。棉花花铃期对温度比较敏感,一方面,35.0 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温天气对棉花生长发育不利^[26],另一方面,相同的温度条件下不同的胁迫时长对棉花授粉影响不同^[27]。本研究在筛选指标时综合考虑了高温热害的温度及持续天数,相较已有的研究进一步量化了棉花花铃期高温热害发生的强度;研究结果表明,1961—2020年新疆棉花花铃期时空分布特征主要体现为喀什地区、和田地区和巴音郭楞蒙古自治州棉花花铃期高温热害发生频率高于南疆其他地区,吐鲁番市和塔城地区棉花花铃期高温热害发生频率高于北疆其他地区。本研究引入“候”

作为灾害精细化研究的时间尺度,新疆在7月4候—8月1候发生高温热害的站点较多,时段II棉花高温热害更为严重。棉花花铃期候尺度的高温热害强度增大,但棉花物候期也在发生改变,导致不同年份实际高温热害发生时间与关键生育期可能存在偏差。这些问题导致了棉花高温热害的复杂性,近年来新疆地区极端高温发生概率增加,对保障棉花安全生产提出了更严峻的挑战。未来需要在气候变化背景下把棉花物候期时空变化与高温热害时空变化情况进行结合,在此基础上制定与实际情况密切相符的灾害监测、预测系统和灾损评估方法;同时多措并举加强热害防御,如优化作物布局、调整棉花播期,使棉花花铃期错过高温时期,减轻或规避热害风险,或选择耐高温的优良品种、增加耐热品种种植面积、采取人工辅助授粉或喷洒药剂等栽培措施减轻危害。

需要指出的是,棉花高温热害的承灾体为棉花,本研究采用的棉花气候适宜性区划结果未考虑水资源影响,对土地利用情况(如沙漠地区)考虑不全面,随着资料获取途径的拓展和监测能力提升,下一步可以结合热害风险的暴露度和作物的抗灾性等多个方面,全面系统评估新疆棉花高温热害发生风险及影响。

4 结论

20世纪60年代—21世纪10年代,新疆棉花花铃期高温热害发生频率呈南高北低的空间分布特征,以重度热害为主,中度热害次之。热害发生频率高值区($80\% \sim 100\%$)的面积由63.4万增加到76.1万 km^2 ,升高20.0%,且各等级高温热害均呈现

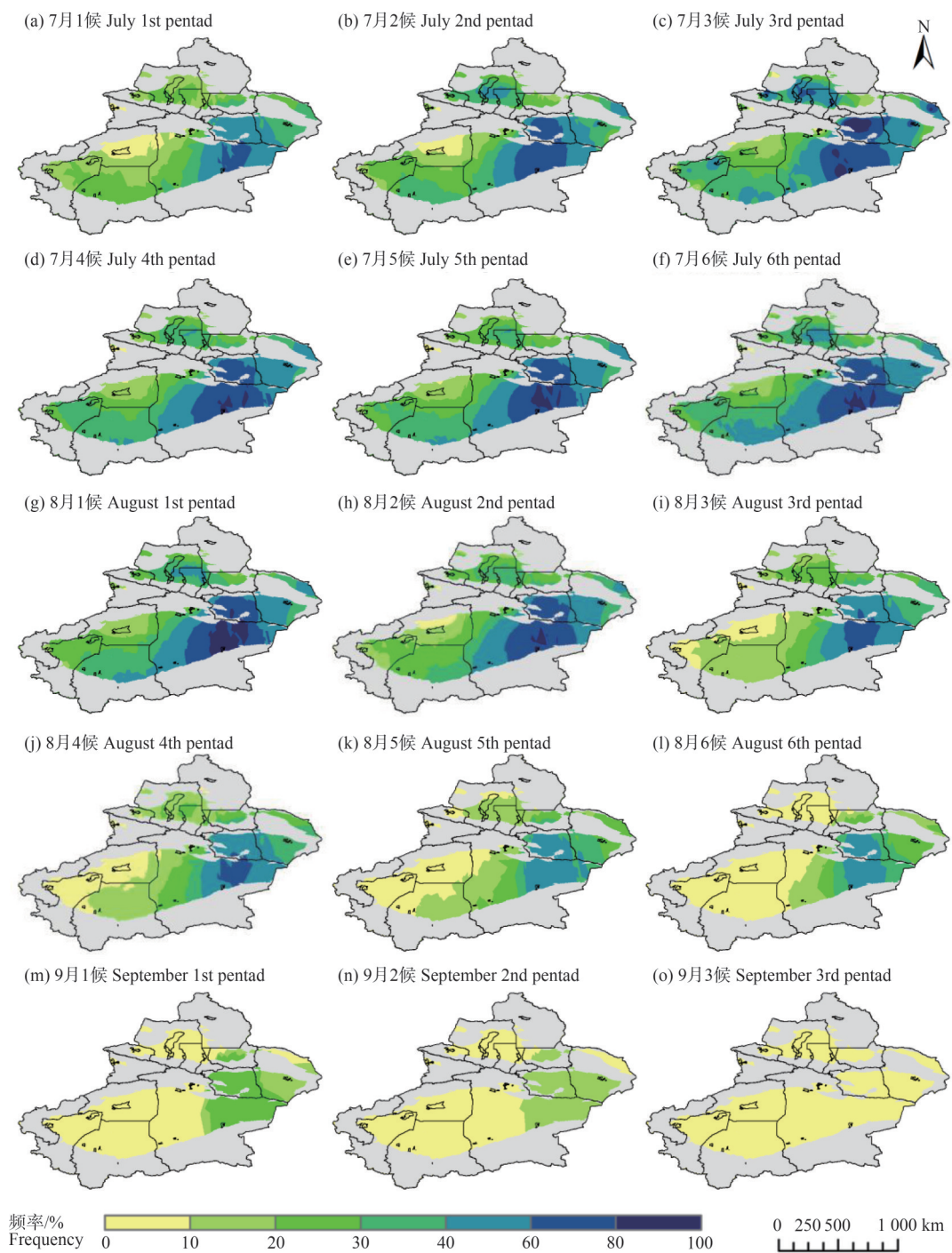


图8 新疆棉花7月1候—9月3候高温热害发生频率逐候变化情况

Fig. 8 Variation of occurrence frequency of high temperature heat damage from July 1st to September 3rd pentad in Xinjiang cotton by pentad

不同程度的升高。随着年份的推移南北疆棉花花铃期高温热害站次比、天数及危害热积温均呈增加趋势,且南疆棉花高温热害站次比和天数的增加幅度高于北疆。21世纪00年代和10年代高温热害较为严重,20世纪60年代和80年代高温热害较轻。

新疆棉花高温热害的站次比和频率随候序的推移呈先增大后减小的趋势,7月4候—8月1候棉花高温热害的站次比和频率都比较高。与时段I(1961—1990年)相比,时段II(1991—2020年)逐候的高温热害站次比有所提高,并且发生高温热害站次比最高

的候序有提前趋势,北疆由8月1候前移到7月3候,南疆由7月6候前移到7月4候。

参考文献 References

- [1] 杨忠娜,唐继军,喻晓玲. 新疆棉花产业对国民经济的影响及对策研究[J]. 农业现代化研究,2013,34(3):298-302
Yang Z N, Tang J J, Yu X L. Xinjiang cotton industry present situation and countermeasure research[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34(3):298-302 (in Chinese)
- [2] 胡汝骥,马虹,樊自立,杨青,吴素芬,黄玉英. 新疆水资源对气候变化的响应[J]. 自然资源学报,2002,17(1):22-27
Hu R J, Ma H, Fan Z L, Yang Q, Wu S F, Huang Y Y. Response of water resources to climate change in xinjiang[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1):22-27 (in Chinese)
- [3] 徐蔓慧,毛炜峰,陆帼英. 新疆气象灾害近期变化和防灾减灾工作综述[J]. 沙漠与绿洲气象,2008,2(1):50-54
Xu G H, Mao W Y, Lu G Y. Xinjiang meteorological disaster changes and general statement on the work of disaster prevention and reduction[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2(1):50-54 (in Chinese)
- [4] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [5] 吴美华,王怀军,孙桂丽,徐长春. 新疆农业气象灾害成因及其风险分析[J]. 干旱区地理,2016,39(6):1212-1220
Wu M H, Wang H J, Sun G L, Xu C C. Formation and risk analysis of meteorological disasters in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(6):1212-1220 (in Chinese)
- [6] 郭晓丹,罗敏,孟凡浩,萨楚拉,尹超华,包玉海. 气候暖湿化背景下新疆极端气候事件时空演变特征分析[J]. 干旱区研究,2022,39(6):1695-1705
Wu X D, Luo M, Meng F H, Sa C L, Yin C H, Bao Y H. New characteristics of spatio-temporal evolution of extreme climate events in Xinjiang under the background of warm and humid climate[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6):1695-1705 (in Chinese)
- [7] 朱建强,欧光华,张文英,刘德福. 棉花花铃期涝渍随对棉花产量的试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(4):80-83
Zhu J Q, Ou G H, Zhang W Y, Liu D F. Experimental research on effect of surface and subsurface waterlogging in stage of cotton flowering and boll set on yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4):80-83 (in Chinese)
- [8] 郭林涛. 棉纤维发育响应短期高温胁迫的关键时间窗口及其生理变化研究[D]. 南京农业大学,2015
Guo L T. Key time region for fiber quality formation response to short-term heat stress and its mechanism[D]. *Nanjing Agricultural University*, 2015 (in Chinese)
- [9] 倪密,王学德,张昭伟,朱云国,张海平,邵明彦,袁淑娜,刘英新,文国吉. 三系杂交棉花粉育性对高温和低温胁迫的反应[J]. 作物学报,2009,35(11):2085-2090
Ni M, Wang X D, Zhang Z W, Zhu Y G, Zhang H P, Shao M Y, Yuan S N, Liu Y X, Wen G J. Reaction of pollen fertility to high or low temperature stresses in CMS-Based hybrid cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11):2085-2090 (in Chinese)
- [10] 张学贤,郭立平,吴建勇,戚廷香,唐会妮,王海林,乔秀琴,邢朝柱. 高温胁迫对棉花不同胞质类型恢复系花药散粉和产量的影响[J]. 中国棉花,2018,45(10):28-30
Zhang X X, Guo L P, Wu J Y, Qi T X, Tang H N, Wang H L, Qiao X Q, Xing C Z. Effects of high temperature stress on anther dispersal and yield of cotton restorer lines with different cytoplasmic types [J]. *China Cotton*, 2018, 45(10):28-30 (in Chinese)
- [11] 郑冬官,方其英,蔡永立,黄德祥. 高温对棉花花粉生活力的影响[J]. 棉花学报,1995,7(1):31-32
Zheng D G, Fang Q Y, Cai Y L, Huang D X. Effect of high temperature on cotton pollen viability[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 1995, 7(1):31-32 (in Chinese)
- [12] 马晓昕,李成林,张超,李慧霞,周克海,周晓箭,杨代刚,高俊山. 高温胁迫影响棉花生长及产量品质的生理与分子机理[J]. 中国棉花,2021,48(12):1-6,12
Ma X X, Li C L, Zhang C, Li H X, Zhou K H, Zhou X J, Yang D G, Gao J S. Physiological and molecular mechanism of high temperature stress on cotton growth, yield and quality[J]. *China Cotton*, 2021, 48(12):1-6, 12 (in Chinese)
- [13] 蔡义东,袁小玲,邓荏明,贾菲,刘志. 基于花粉萌发与结铃表现选育耐高温高产杂交棉[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2010,36(2):119-122
Cai Y D, Yuan X L, Deng J M, Jia F, Liu Z. Development of cotton hybrid with high-temperature tolerance and high yield by performance of pollen germination and boll setting[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2010, 36(2):119-122 (in Chinese)
- [14] 邓晓雷,潘晶晶,祝水金,陈进红. 铃期极端高温对转iaaM基因棉花棉铃产量性状、纤维品质和棉仁营养品质的影响[J]. 浙江农业学报,2018,30(11):1805-1810
Deng X L, Pan J J, Zhu S J, Chen J H. Effect of extreme high temperature on boll yield traits, fiber quality and cottonseed kernel nutrient quality of iaaM transgenic germplasm of cotton in bolling stage [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(11):1805-1810 (in Chinese)
- [15] 杨威,朱建强,吴启侠,王曾桢,叶浩. 花铃期短期渍水和高温对棉花叶片光合特性、膜脂过氧化代谢及产量的影响[J]. 棉花学报,2016,28(5):504-512
Yang W, Zhu J Q, Wu Q X, Wang Z Z, Ye H. The effect of short-term waterlogging and high temperature on photosynthesis, membrane lipid peroxidation metabolism, and yield during cotton flowering and boll-forming[J]. *Cotton Science*, 2016, 28(5):504-512 (in Chinese)
- [16] 万刚,刘振海,苏景惠,朱莉,王亚滨,孙昕璐,丁红,刘玉国,张莉,李国英. 持续高温与棉花黄萎病发生的关系及对棉花产量和品质的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2017,35(1):75-82
Wan G, Liu Z H, Su J H, Zhu L, Wang Y B, Sun X L, Ding H, Liu Y G, Zhang L, Li G Y. The relationship between continuous high temperature and the occurrence of cotton Verticillium wilt and its effect on yield and quality of cotton [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2017, 35(1):75-82 (in Chinese)
- [17] 马金虎,王宏富,王玉国,李炳林,程昕昕. 高温老化对棉花种子发芽及生理特性影响的研究[J]. 棉花学报,2005,17(1):42-46
Ma J H, Wang H F, Wang Y G, Li B L, Cheng X X. Effects of high temperature aging on germination and physiological characteristics of different cotton varieties [J]. *Cotton Science*, 2005, 17(1):42-46 (in Chinese)
- [18] 刘云涛,肖文俊. 高温胁迫下棉花蕾铃脱落及耐高温育种研究进展[J]. 分子植物育种,2019,17(15):5089-5096
Liu Y T, Xiao W J. Research progress on square and boll shedding and high temperature tolerance breeding of cotton under heat stress [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(15):5089-5096 (in Chinese)
- [19] 向导,杨明凤,张玲,张明,王雪娇. 高温热害对棉花蕾铃脱落的影响分析

- [J]. 湖北农业科学, 2022, 61(21): 15-19
- Xiang D, Yang M F, Zhang L, Zhang M, Wang X J. Analysis on the effect of high temperature damage on cotton boll abscission [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(21): 15-19 (in Chinese)
- [20] 蒙华月, 吴雨箫, 钱龙, 罗云英, 陈诚, 许敏, 邓靖瑶. 湖北省棉花生育期内涝渍高温灾害特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 119-128
- Meng H Y, Wu Y X, Qian L, Luo Y Y, Chen C, Xu M, Deng J Y. Spatiotemporal variation in waterlogging and thermal stress to cotton in Hubei Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(7): 119-128 (in Chinese)
- [21] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000—2018
- National Bureau of Statistics of China. *China Statistic Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2000—2018
- [22] 李景林, 普宗朝, 张山清. 气候变化对新疆农业的影响及区划[M]. 北京: 气象出版社, 2018
- Li J L, Pu Z C, Zhang S Q. *Influence of Climate Change on Agriculture in Xinjiang and Its Regionalization* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018 (in Chinese)
- [23] 温克刚, 史玉光. 中国气象灾害大典·新疆卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006
- Wen K G, Shi Y G. *China Meteorological Disaster Ceremony (Xinjiang volume)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [24] 江西省市场监督管理局. 棉花花铃期热害温度指标: DB36/T 1325—2020 [S]. 南昌: 江西省气象局, 2020
- Market Supervision Administration of Jiangxi Province. Temperature index of heat damage to flowering and boll-setting stage of cotton: DB36/T 1325-2020 [S]. Nanchang: Jiangxi Meteorological Bureau, 2020 (in Chinese)
- [25] 周妍, 邵明阳, 郭欢, 吴昊, 曾小林. 江西棉花花铃期热害时空分布规律研究[J]. 中国棉花, 2023, 50(6): 12-17
- Zhou Y, Shao M Y, Guo H, Wu H, Zeng X L. Temporal and spatial distribution characteristics of heat damage during flowering and boll period of cotton in Jiangxi Province[J]. *China Cotton*, 2023, 50(6): 12-17 (in Chinese)
- [26] 李迎春, 郭燕云, 王雪姣, 李新建, 胡启瑞, 姚艳丽. 2021年新疆棉花生长气象条件分析[J]. 中国棉花, 2022, 49(2): 1-3
- Li Y C, Guo Y Y, Wang X J, Li X J, Hu Q R, Yao Y L. Analysis of weather conditions for cotton growth in Xinjiang in 2021 [J]. *China Cotton*, 2022, 49(2): 1-3 (in Chinese)
- [27] 吴启侠, 朱建强, 杨威, 程伦国, 晏军. 花铃期高温受涝对棉花的交互效应及排水指标确定[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 98-104
- Wu Q X, Zhu J Q, Yang W, Cheng L G, Yan J. Response of cotton to interaction of waterlogging and high temperature during flowering and boll-forming stage and determination of drainage index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 98-104 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 赵金媛, 硕士研究生, 2021—2023年就读于中国农业大学, 硕士期间获得校级二等学业奖学金, 本科期间多次获得奖学金和学术竞赛奖项。硕士期间在《中国农业气象》发表论文1篇, 并获得气象水文相关计算机软件著作权2项。



通讯作者简介: 王雪姣, 新疆兴农网信息中心(新疆农业气象台)正高级高工, 博士。承担新疆自治区级农业气象业务技术把关、决策服务、科研及专业气象服务工作。任新疆棉花学会理事会理事、新疆为农气象服务专家组棉花产业组副组长、国家气象中心作物模型业务应用创新团队核心成员。主持科研项目10项(国家自然科学基金1项、省部级项目3项)。第一(通讯)作者发表论文19篇, SCI收录2篇、EI收录2篇、其他核心期刊15篇; 制订地方标准3项、授权使用新型专利5项、获得软件著作权1项。



通讯作者简介: 胡琦, 博士, 中国农业大学资源与环境学院副教授, 硕士生导师, 实验教学中心常务副主任。主要从事气候变化及其影响、农业减灾、二十四节气传统文化与科学等领域研究, 先后主持或参与国家级课题5项, 发表论文30余篇, 多篇文章入选“精品期刊顶尖论文平台—领跑者5000(F5000)”, 主编教材1部, 获得软件著作权10余项。