

黄淮海夏播玉米花期高温热害空间分布规律研究*

刘哲 乔红兴 赵祖亮 李绍明 陈彦清 张晓东

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 黄淮海夏播玉米区是我国优势玉米种植区之一,近两年均遭受花期高温热害,严重影响了玉米产量和品质。通过调整玉米播种时间,可使玉米花期错过高温热害严重时期,从而减轻或规避热害风险,但需获知各地高温热害发生强度和频率的空间分布规律。因此,以该地区为研究区域,以日高温时长为玉米花期热害指标,计算得到黄淮海地区玉米花期高温热害强度,分析2013年热害的空间分布规律;利用63 a气象数据和日高温时长概率分布函数计算黄淮海各县区玉米花期出现高温热害风险的概率和空间分布规律。结果表明,2013年黄淮海地区夏播玉米散粉期高温热害胁迫较重的地区主要位于河南省平顶山市、信阳市等地,高温热害程度严重。如果这些热害重灾区提前7 d左右播种,将显著减少玉米花期与高温时期的耦合,降低因花期高温热害造成的产量损失。基于物候时期、县域环境这一更加精细的时空尺度研究玉米气象灾害风险分布规律,既可为气象灾害研究提供新视角,又可用于指导重灾区通过调整播期规避风险,具有重要的理论和现实意义。

关键词: 玉米 花期 高温热害 空间分布

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0272-08

Spatial Distribution of High Temperature Stress at Corn Flowering Stage in Huang-Huai-Hai Plain of China

Liu Zhe Qiao Hongxing Zhao Zuliang Li Shaoming Chen Yanqing Zhang Xiaodong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: High temperature stress has serious influences on the yield and quality of corn. The yield loss would be devastating if heat injury happened at corn flowering stage. The Huang-Huai-Hai Plain is one of corn predominance regions in China, where high temperature damage often occurs in recent years. This study aims to explore the temporal and spatial distribution of the high temperature stress of corn at flowering stage in Huang-Huai-Hai Plain. Firstly, we determined hours per day of temperature higher than 34℃ at flowering stage as the index for heat injury, then we calculated the index value of each county in the Huang-Huai-Hai Plain during 2013, and analyzed its temporal and spatial distribution of the region. Secondly, based on the meteorological data in 63 a, we calculated the 2013 probability of high temperature stress at corn flowering stage in the region. The result shows that, Pingdingshan City, Xinyang City of Henan Province and area near by encountered unusual high temperature at flowering stage in 2013, where the probability of 2013 was below once-in-a-century. In order to reduce yield loss and overlapping time between the corn flowering stage and high temperature period, we suggested to sow about one week in advance for these areas. In background of the climate change, research on the temporal and spatial distribution of corn high temperature damage is significant to react the disaster mitigation of maize production.

Key words: Corn Flowering stage High temperature stress Spatial distribution

收稿日期: 2015-02-12 修回日期: 2015-05-05

* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41301075)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD01B01)

作者简介: 刘哲,讲师,博士,主要从事作物品种表型获取与评价技术研究,E-mail: liuz@cau.edu.cn

通讯作者: 张晓东,教授,博士生导师,主要从事农业空间信息技术与应用研究,E-mail: zhangxd@cau.edu.cn

引言

玉米性喜暖湿气候,温度过高或过低都会影响玉米正常生长。近年来,受全球气候变化影响,极端异常温度的出现渐趋频繁^[1-2]。防御或减轻高温热害对玉米产量和品质的影响,已成为黄淮海夏播玉米区亟待解决的重要课题。根据高温热害的时空分布规律调整玉米播种时间能有效避免在温度敏感期遭遇高温热害,如应用气象模型,研究和预测高温干旱在不同年代、省级尺度下的变化趋势对作物产量的影响以及调整播种期方案等^[3-7]。但由于时间最小单元为 10 a,研究区内基本采用相同的从播种到收获的物候时期;而且空间最小单元一般为省或地市级。这种较大时空尺度下的研究结果难以满足每年各地区制定减灾防灾措施的需求。在更小的时空尺度下研究玉米气象灾害风险分布规律,才能指导各地特别是重灾区通过调整播期来规避风险。因此,本文探索中小时空尺度下玉米高温热害时空分布规律,最小时间单元为 1 d,最小空间单元为县;并以黄淮海夏播玉米区为例,研究县域尺度下玉米对温度最敏感的花期高温热害分布规律。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄淮海夏玉米区主要分布在北纬 31°~41°、东经 105°~122°之间,位于我国玉米带的中段,主要包括山东省、河南省全部,北京市、天津市及河北省大部分,山西省中南部、陕西省关中地区,江苏省、安徽省淮河以北以及江苏省北部的徐淮地区^[8]。该区属暖温带半湿润气候类型,光、热、水资源丰富,无霜期 170~220 d^[9],年降水量 500~800 mm,年大于等于 10℃活动积温 4 000~5 000℃。该区属于一年两熟生态区^[10],玉米种植方式多种多样,间套复种并存。该区一直是我国重要的粮食作物和经济作物产区,玉米在本区粮食组成中占有较大比重^[11-12],黄淮海夏玉米生产的发展对我国全年粮食生产起着重要作用^[13-14]。

1.2 数据构成

历史气象数据。时间范围:1951~2013 年;空间范围:研究区域内的 149 个国家基本气象站点;数据包括:日最高温度、日最低温度、日平均相对湿度等 12 个气象指标的日值数据。数据来源:中国气象局。

种植环境调查数据。空间范围:研究区域内的 190 个调查县;数据包括:生育期、产量、倒伏率、病

虫害发生情况等实地调查数据。数据来源:北京金色农华种业科技股份有限公司。

基础地理数据。比例尺:1:400 万;空间范围:全国,本文只使用研究区域内的数据;数据包括:面状县图斑、面状省图斑。数据来源:国家基础地理信息系统网。

1.3 研究方法

本文首先对黄淮海夏播玉米区的高温热害发生机理进行整理分析,确定玉米花期高温热害指标,推算出指标的计算方法,并对指标和计算方法进行验证。利用种植环境调查获得各县生育时期数据和气象站点多年逐日数据。计算黄淮海地区夏播玉米花期高温热害风险程度与发生概率,并对 2013 年的风险情况进行分析。通过空间插值和区域统计分析,研究该区域的高温热害空间分布规律。具体技术路线如图 1 所示。

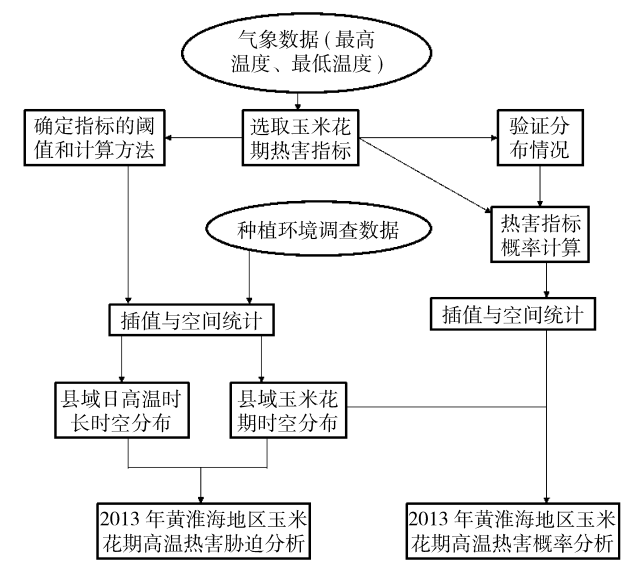


图 1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

1.3.1 日高温时长

传统方法一般使用高温出现的天数作为胁迫指标^[15],该指标的区辨力较差,受温度阈值影响很大,难以准确反映持续性、较严重的高温胁迫程度。对于玉米花期而言,一般认为当温度高于 32~35℃时,将遭受高温热害胁迫,出现授粉困难,甚至出现高温杀雄等现象^[16-18]。日高温时长是指每天温度高于高温阈值的时间跨度。高温时长能够描述玉米花粉处在高温中的时间长度;其次,对高温热害阈值不敏感,不会出现阈值差 1℃而少算或多算若干天的情况。综合考虑不同地区、田间管理以及玉米不同品种等因素后,本文使用 34℃作为玉米花期高温阈值。

文献[19]指出,2013 年宿州试验站玉米结实率

受播期影响较大。其中,隆平 206 在宿州 6 月 10 日播种的地块结实率与常年相比基本持平,为 99.7%,6 月 16 日播种的结实率则下降为 91.3%,但是 6 月 18 日播种的结实率猛降至 69.5%。本文选取 2013 年高温热害较为严重的安徽省宿州市宿

县气象站点观测的气象温度数据进行分析。根据日高温计算模型,使用 Visual Studio 2010、SQL Server 2005 等工具,采用 C# 4.0 编写程序计算日高温时长。宿县站 2013 年 7—8 月份 34℃ 以上日高温时长结果如图 2 所示。

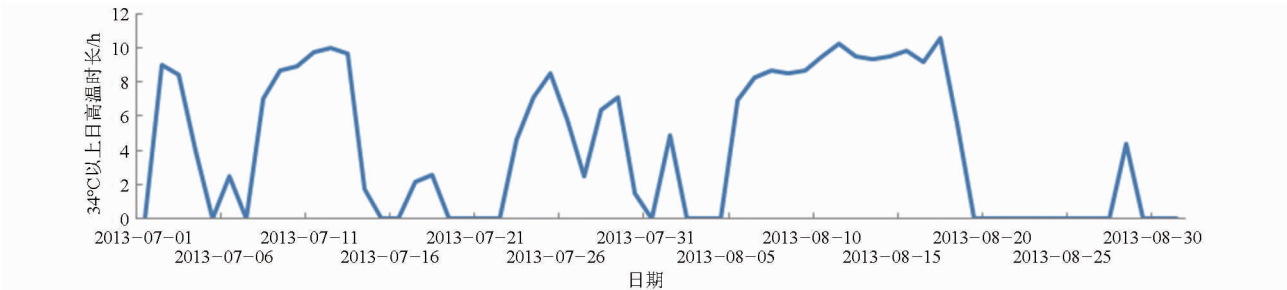


图 2 2013 年 7—8 月份宿县站 34℃ 以上日高温时长变化曲线

Fig. 2 Hours per day of temperature higher than 34℃ at Suxian County from July to August in 2013

由图 2 可知,2013 年 8 月 5 日—8 月 19 日连续近半个月的时间里 34℃ 以上日高温时长在 8 h 以上。6 月 19 日播种的玉米花期正好处于这一阶段,因此 6 月 19 日播种的玉米不可避免出现结实率降低的情况。而 6 月 10 号播种的玉米,其散粉期大概在 8 月 2—7 日之间。这段时间日高温时长基本在 4 h 以下,有的日最高温度低于 34℃,日高温时长为 0。因此,6 月 10 日播种的玉米结实率较为正常。该分析初步证明日高温时长这一指标可有效表达玉米花期高温热害。

1.3.1.1 日高温时长的计算

地面基本气象站提供的温度相关数据有日最高、最低气温以及平均气温,若要获得逐时或逐分钟的气温日变化参数,需要采用模拟气象要素日变化过程的理论和方法^[20]。

目前,气温日变化模拟方法主要有正弦-指数法、 T_k 订正法^[21]和分段线性订正法,此 3 种方法模拟精度相差不大,而且白天模拟效果优于夜晚^[20]。本文采用正弦-指数法^[22]来模拟气温日变化。在典型的晴天,气温日变化曲线^[23-24]可表示为

$$T = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \sin \frac{\pi \left(t_h - L_{SH} + \frac{D_L}{2} \right)}{D_L + 2p} \quad (1)$$

其中
$$D_L = 12 \left(1 + \frac{2a}{\pi} \sin \frac{a}{b} \right) \quad (2)$$

$$a = \sin L_{AT} \sin \sigma \quad (3)$$

$$b = \cos L_{AT} \cos \sigma \quad (4)$$

$$\sin \sigma = -\sin \frac{23.45 \pi}{180} \cos \frac{2 \pi (D_{AY} + 10)}{365} \quad (5)$$

$$t_h = t_b + 4(L - 120) + E_Q \quad (6)$$

$$E_Q = 0.0172 + 0.428 \cos Q_0 - 7.3515 \sin Q_0 - 3.3495 \cos(2Q_0) - 9.3619 \sin(2Q_0) \quad (7)$$

$$Q_0 = \frac{2 \pi (D_{AY} - 1)}{365} \quad (8)$$

- 式中 T ——实时温度 $T_{\max}$ ——日最大温度
 $T_{\min}$ ——日最小温度 t_h ——真太阳时
 p ——最高气温出现时间与正午时刻相差的小时数,取 2 h
 $a、b$ ——关于 σ 的函数
 D_L ——白天时长 L_{AT} ——站台纬度
 D_{AY} ——日序数 σ ——太阳赤纬
 Q_0 ——关于日序数 D_{AY} 的函数
 t_b ——北京标准时间 L ——当地经度
 E_Q ——时差, min
 L_{SH} ——最大太阳高度角出现的时间

由于所设阈值一般出现在白天,因此,只考虑白天的气温日变化曲线。当气温上升时, $T_{\min}$ 取值为当天最低气温,当气温下降时 $T_{\min}$ 取值为第 2 天最低气温。白天时长 D_L 、最大太阳高度角出现的时间 L_{SH} 也可以由站点坐标推算。 t_h 是实时时间, T 是因变量。要求得高温时长,必须求得高温阈值 T_a 出现的时间点 t_a 。将 $T = T_a$ 代入方程即可解算高温阈值 T_a 出现的时间点 t_a 。由于计算公式复杂,本文通过换算,消去参数 L_{SH} ,简化计算过程,具体计算过程如下:

计算第 J 天高温时长时,如果当天最高气温 $T_{\max}^J < T_a$,那么高温时长 $\Delta h = 0$ 。如果当天最高气温 $T_{\max}^J > T_a$,按照如下步骤计算:

当气温上升时,将当天的最高气温、最低气温、高温阈值代入式(1)得

$$\sin \frac{\pi \left(t_a^1 - L_{SH} + \frac{D_L}{2} \right)}{D_L + 2p} = \frac{T_a - T_{\min}^J}{T_{\max}^J - T_{\min}^J} \quad (9)$$

式中 t_a^1 ——气温升高至 34℃ 的时刻

同理,当气温下降时,将当天的最高气温 $T_{\max}^J$ 、第 2 天最低气温 $T_{\min}^{J+1}$ 、高温阈值 T_a 代入式(9)得

$$\sin \frac{\pi \left(t_a^2 - L_{SH} + \frac{D_L}{2} \right)}{D_L + 2p} = \frac{T_a - T_{\min}^{J+1}}{T_{\max}^J - T_{\min}^{J+1}} \quad (10)$$

式中 t_a^2 ——气温降低至 34℃ 的时刻

当气温上升时,有 $0 < \frac{t_a^1 - L_{SH} + \frac{D_L}{2}}{D_L + 2p} < \frac{1}{2}$, 由此可得

$$\frac{\pi \left(t_a^1 - L_{SH} + \frac{D_L}{2} \right)}{D_L + 2p} = \arcsin \frac{T_a - T_{\min}^J}{T_{\max}^J - T_{\min}^J} \quad (11)$$

当气温下降时,有 $\frac{t_a^2 - L_{SH} + \frac{D_L}{2}}{D_L + 2p} > \frac{1}{2}$, 由此可得

$$\frac{\pi \left(t_a^2 - L_{SH} + \frac{D_L}{2} \right)}{D_L + 2p} = \pi - \arcsin \frac{T_a - T_{\min}^{J+1}}{T_{\max}^J - T_{\min}^{J+1}} \quad (12)$$

用式(11)减去式(12),化简后可得第 J 天的日高温时长为

$$t_a^2 - t_a^1 = (D_L + 2p) \left(1 - \frac{A_1 + A_2}{\pi} \right) \quad (13)$$

其中 $A_1 = \arcsin \frac{T_a - T_{\min}^J}{T_{\max}^J - T_{\min}^J}$ (14)

$$A_2 = \arcsin \frac{T_a - T_{\min}^{J+1}}{T_{\max}^J - T_{\min}^{J+1}} \quad (15)$$

1.3.1.2 日高温时长的概率分析

首先,按照上述推导的日高温时长计算方法,计算每个气象站点从 1951—2013 年共 63 a 的 7 月 22 日—8 月 25 日的日高温时长,由此构建日高温时长历史数据。其次,将 7 月 22 日—8 月 25 日按每 5 d 分成一个时间段,总共 7 个时间段,计算每年 7 个不同时间段日高温时长平均值,作为该时间段内判断日高温时长概率分布以及概率计算的依据。以宿县站为例,部分时段日高温时长频率如图 3 所示。

通过图 3 可以看出,日高温时长的分布规律并不明显,总体来看,绝大多数年份没有出现 34℃ 以上高温。因此对于日高温时长的分布函数,采用经验分布函数的方法计算其概率分布函数。对于总体 X (平均 5 d 日高温时长的逐年数据)的分布函数 F ,假设其样本为 $X_1, X_2, \dots, X_n$,将样本值 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 按从小到大顺序排列并重新编号,设定平均 5 d 高温热害的温度阈值为 34℃,时长阈值为 7 h。由经验分布函数原理可知

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq X_{(k-1)} < 7 \leq X_{(k)} \leq \dots \leq X_{(n)}$$

高温时长指标达到热害的概率 P 计算式为

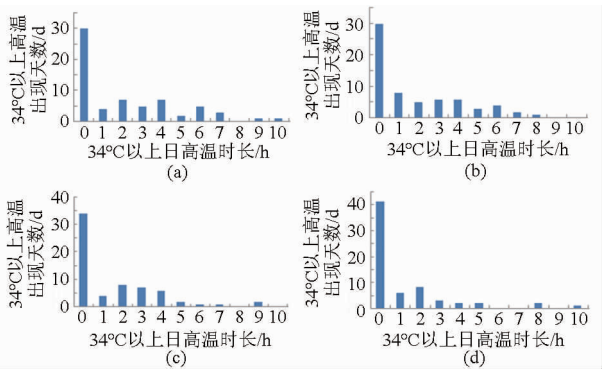


图 3 1951—2013 年宿县站 7 月 27 日—8 月 15 日每 5 d 日高温时长平均值直方图
Fig. 3 Frequency of hours per day of temperature higher than 34℃ (every five days) at Suxian County from July 27th to August 15th during 1951 to 2013
(a) 7 月 27—31 日 (b) 8 月 1—5 日
(c) 8 月 6—10 日 (d) 8 月 11—15 日

$$P = f(x > 7) = \frac{n - k + 1}{n} \times 100\% \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

1.3.2 黄淮海夏播玉米花期时空分布

在研究区域中,仅在种植环境调查县有玉米生育时期的数据(表 1),需要通过空间插值将调查县的生育时期数据推算到所有研究区县。

表 1 黄淮海夏播玉米生育时期调查数据示例
Tab.1 Date of crop growth stage in Huang-Huai-Hai Plain

站点名称	播种日期	抽雄期
驻马店市	2007-06-08	2007-08-01
安阳市	2007-06-03	2007-08-05
菏泽市	2007-06-06	2007-08-01
运城市	2007-06-05	2007-07-31
北京市	2007-06-18	2007-08-12
⋮	⋮	⋮

文献[25]通过比较反距离加权法、径向基函数法、克里格法等插值方法的异同,以调查县夏播玉米 5 个阶段的生育时期为数据源,对黄淮海夏播玉米区生育期的数据进行空间插值处理,结果发现拔节期和抽雄期的最佳插值方法为反距离加权法。因此,本文主要使用反距离加权法(IDW)对黄淮海地区夏播玉米的抽雄期进行插值,再使用 ArcMap 中 Zonal Statistics as Table 工具,将插值结果按照县域进行统计(图 4)。

由于种植环境调查数据不包括玉米散粉期,本文根据该地区玉米抽雄吐丝最大间隔^[26],将县区抽雄期往后推算 5 d,作为玉米的散粉期。由图 4 可知,黄淮海地区夏播玉米大部分地区在 8 月份以后进入抽雄散粉期;少部分地区如河南省北部郑州附

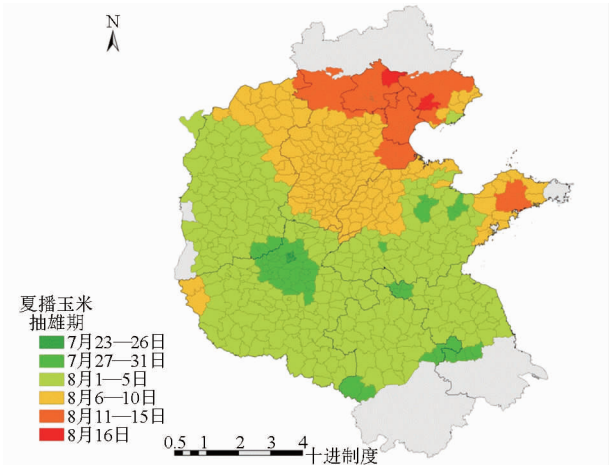


图 4 黄淮海地区夏播玉米抽雄期分布图

Fig.4 Distribution of tasseling date in Huang-Huai-Hai Plain

近、山西省东西部部分地区在 7 月份下旬进入抽雄散粉期；河北省南部以及山东省西北部大部分地区在 8 月 6 日以后才进入抽雄散粉期。河北省北部以及北京市、天津市等地直到 8 月份中旬才开始抽雄散粉。黄淮海夏播玉米抽雄散粉期的计算为花期热害指标计算提供了基础数据。

2 结果和分析

2.1 县域高温时长空间分布

首先通过 ArcMap 中 Zonal Statistics as Table 工具,选用普通克里格插值法,将 2013 年研究区域气

象站点的日高温时长数据计算到每个县域(图 5)。由图 5 可知,7 月 22 日—8 月 5 日之间,高温基本仅存在于黄淮海南部地区;而 8 月 6—10 日,整个黄淮海中部地区包括整个河南省、安徽省北部、江苏省北部,出现异常严重的高温天气,大部分地区的日高温时长超过 7 h;到了 8 月 11—15 日,高温覆盖的地区进一步扩大,河南全省(西部少部分地区除外)、安徽省、江苏省、甚至山东省西部,都出现了严重的异常高温;8 月 16—20 日,高温有所减轻,山东省及江苏省基本褪去,但是依然存在于河南省和安徽省等地区。8 月 21—25 日高温基本褪去。

通过将县域生育期属性表与县域玉米散粉期高温热害指标属性表进行连接操作,连接字段为县域国标代码。通过 C#编写应用程序,访问连接以后的属性表。判断玉米散粉期所处任的时间段,然后提取该段时间的日高温时长平均值(图 6)。由图 6 可知,从 1983—2013 年黄淮海地区夏播玉米散粉期的平均高温胁迫风险来看,该时期大部分区域不易发生高温胁迫;但从发生趋势来看,受全球气候变化影响,最近几年部分区域易发高温胁迫,如 2013 年部分区域遭遇了非常严重的高温胁迫。重点受灾地区在安徽省北部、江苏省北部,以及河南省南部,这些地区散粉期日平均高温时长普遍在 7 h 以上。另外,山东省中西部一些地区高温时长也在 5 h 以上。

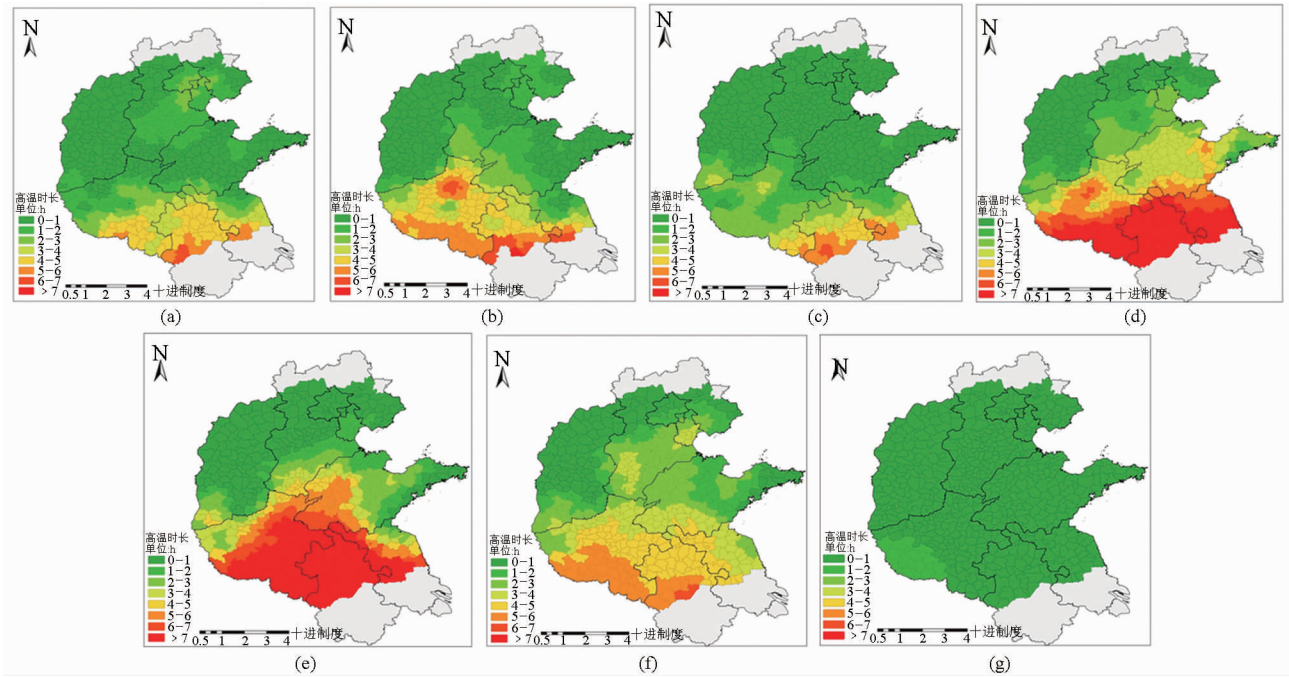


图 5 黄淮海地区 2013 年日高温时长平均值分布图

Fig.5 Distribution of hours per day of temperature higher than 34℃ (every five days) of Huang-Huai-Hai Plain from July 22nd to August 25th in 2013

(a) 7 月 22—26 日 (b) 7 月 27—31 日 (c) 8 月 1—5 日 (d) 8 月 6—10 日
(e) 8 月 11—15 日 (f) 8 月 16—20 日 (g) 8 月 21—25 日

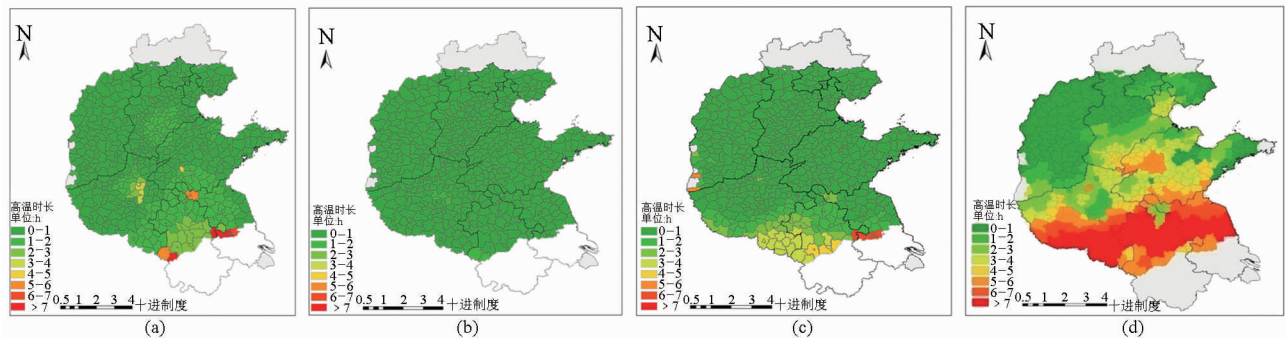


图 6 黄淮海夏播玉米区花期 34℃ 以上日高温时长平均值分布图

Fig. 6 Distribution of hours per day of temperature higher than 34℃ of Huang-Huai-Hai Plain during corn flowering stage in the past 30 years
(a) 1983 年 (b) 1993 年 (c) 2003 年 (d) 2013 年

2.2 日高温时长热害概率空间分布

利用日高温时长概率分布函数计算各站点 2013 年平均 5 d 34℃ 以上日高温时长 $X_{(2013)}$ 的发生概率,如表 2 所示。

表 2 2013 年各气象站点每 5 d 34℃ 以上平均日高温时长的出现概率
Tab. 2 2013 probability of hours per day of temperature higher than 34℃ (every five days) for each meteorological station in Huang-Huai-Hai Plain %

站点名称	7 月 22—26 日	...	8 月 21—25 日
信阳市	28.1		100
宿县	10.9		100
保定市	23.4		100
朝阳市	43.7		100
⋮	⋮		⋮

将各气象站点每 5 d 34℃ 以上平均日高温时长的出现概率,利用空间插值、区域统计计算到各个县域。通过编写程序,获取该县域散粉期的 2013 年高温时长概率,作为县域 2013 年玉米花期热害强度的概率(图 7)。

由图 7 可知,2013 年黄淮海地区在夏播玉米花期内许多区域出现了百年一遇的高温天气,如江苏省北部地区、山东省东营市、天津市、河北省邯郸市、河南省平顶山市、信阳市等地。安徽省北部、河南省南部地区、以及山东省西部地区等,2013 年玉米高温热害程度为 20~50 年一遇。黄淮海其他地区玉米高温热害程度为 10 年一遇。

对于热害严重地区,如果适当调整玉米播种时间,提早或推后 7 d 左右,则可以减少夏播玉米花期与高温时间的耦合,缓解玉米授粉的不利条件,减轻高温热害对玉米产量、品质的影响。在实际指导热害严重地区调整播种时间时,还需要考虑几方面问题:一是该地区的夏播玉米与前后茬(如冬小麦)轮作的茬口是否紧张,有多少天可供提前播种;二是要

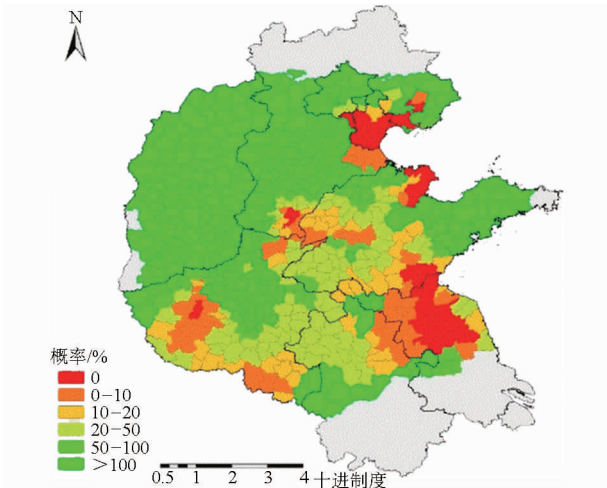


图 7 2013 年黄淮海地区夏播玉米花期日高温时长概率分布图

Fig. 7 Probability of hours per day of temperature higher than 34℃ in Huang-Huai-Hai Plain during corn flowering stage in 2013

判断该地区当年是否为夏季高温年,对于夏季高温年则一定要调整播种期,对于热害频发区的非高温年也建议调整播种期,或者选用熟期适中的品种。夏季高温年的预测属于短期气候预测(即月、季、年时间尺度的预测)范畴,受预测方法和异常环流、海温、降水和季风等影响^[27-28],当前准确率很难突破 75%^[27],各地在决策是否要调整播种期时,可参考当地气象部门对当年是否为夏季高温年的相关预报。

3 结论

- (1) 研究并确定了以日高温时长作为表达玉米花期热害的指标,该指标对温度阈值不敏感,不会出现阈值上下调整 1~2℃ 而少算或多算若干天的情况,准确度高于高温天数指标。
- (2) 基于日最高、最低温度数据,采用正弦-指数法,推导并编程实现了日高温时长的计算公式。

选择 34℃ 为温度阈值,分析了不同地区日高温时长数据的年际规律,日高温时长的概率适合采用经验分布函数计算。

(3) 利用 63 a 气象数据计算了黄淮海地区玉米花期高温热害强度和概率,分析了 2013 年热害的空间分布规律;河南省平顶山市、信阳市等重灾区的玉米高温热害强度达到百年一遇。建议该热害重灾区提前 7 d 左右播种,减少玉米花期与高温时期的耦合,降低花期高温热害的产量损失。

(4) 玉米花期热害发生在玉米花粒期与高温时

间耦合的情况下。因此,本文通过插值计算了各县区的花期,而未采用统一的日历时期,可以提高计算精度。

(5) 初步分析了黄淮海玉米花期高温热害的空间分布规律,对该地区玉米防控高温有较高参考意义。本文主要针对花期的日间高温,而拔节和灌浆期夜间高温也会干扰玉米生长和结实,后续可以采用本文的技术方法进行深入研究,以全面揭示玉米高温热害的时空规律。

参 考 文 献

- 1 Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates with climate change[J]. *Climatic Change*, 1998, 39(4): 667–694.
- 2 何奇瑾,周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性[J]. *科学通报*, 2012, 57(4): 267–275.
He Qijin, Zhou Guangsheng. The climatic suitability for maize cultivation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4): 267–275. (in Chinese)
- 3 马建勇. 东北地区高温干旱对玉米产量影响的情景分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
Ma Jianyong. Projected future changes of heat stress & drought and their impacts on maize yield in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- 4 冶明珠. 气候变化背景下东北地区玉米气候资源适宜度评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
Ye Mingzhu. Evaluation of the climate resources and climate suitability in Northeast China under climate change[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 5 陈升宇. 湖北省水稻热害与夏季冷害变化规律及防御对策研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
Chen Shengbei. Study on changes and precaution policy of rice heat and chilling injury in summer in Hubei Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 6 张倩. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010.
Zhang Qian. Study on the impact assessment of high temperature damage for rice in the lower and middle reaches of Yangtze River [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2010. (in Chinese)
- 7 Abbraha M G, Savage M J. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of *KwaZulu-Natal*, South Africa[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 115(1–4): 150–160.
- 8 修屏亚, 罗振锋, 矫树凯. 现代玉米生产[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 1–15.
- 9 高增玉, 谷峰, 于翠红, 等. 黄淮海夏播玉米区青贮玉米品种的发展策略[J]. *河北农业科学*, 2011, 15(5): 11–13.
Gao Zengyu, Gu Feng, Yu Cuihong, et al. Development strategy of silage maize varieties in Huanghuaihai summer maize region [J]. *Journal of Hebei Agriculture Sciences*, 2011, 15(5): 11–13. (in Chinese)
- 10 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 215–218.
Sun Hongyong, Zhang Xiying, Chen Suying, et al. Effect of meteorological factors on grain yield of summer maize in the north China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 215–218. (in Chinese)
- 11 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- 12 黄川容, 刘洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(增刊1): 118–123.
Huang Chuanrong, Liu Hong. The effect of the climate change on potential productivity of winter wheat and summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(Supp. 1): 118–123. (in Chinese)
- 13 许海涛, 王友华, 许波, 等. 黄淮海玉米生产发展现状、存在问题及对策[J]. *玉米科学*, 2007, 15(增刊1): 160–162.
Xu Haitao, Wang Youhua, Xu Bo, et al. Present situation and problem in the development of corn production in Huang-Huai-Hai valley and its counter measure[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(Supp. 1): 160–162. (in Chinese)
- 14 陈钢, 秦建国, 王瑞庄, 等. 1999—2005 年国家黄淮海和河北省夏玉米区审定玉米新品种总结及发展趋势[J]. *种子世界*, 2006(8): 38–40.
Chen Gang, Qin Jianguo, Wang Ruizhuang, et al. The summer corn of Huang-Huai-Hai and Hebei district audited maize new development trends of summing up in 1999—2005[J]. *Seed World*, 2006(8): 38–40. (in Chinese)
- 15 陆魁东, 黄晚华, 方丽, 等. 气象灾害指标在湖南春玉米种植区划中的应用[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 548–554.
Lu Kuidong, Huang Wanhua, Fang Li, et al. The climatic zoning of spring maize in hunan based on meteorological disaster indexes [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(4): 548–554. (in Chinese)
- 16 杨国虎. 玉米花粉花丝耐热性研究进展[J]. *种子*, 2005, 24(2): 47–51.

17 陈朝辉,王安乐,王娇娟,等. 高温对玉米生产的危害及防御措施[J]. 作物杂志,2008(4):90-92.
Chen Chaohui, Wang Anle, Wang Jiaojuan, et al. Influence of high temperature on growth and development of maize[J]. Crops, 2008(4):90-92. (in Chinese)

18 Thmopson L M. Climate change, weather variability and corn production[J]. Agronomy Journal, 1986,78(4):649-653.

19 李潮海. 2013 年黄淮海地区玉米灾情调研报告[EB/OL]. <http://chinamaize.blog.sohu.com/279855167.html>.

20 余卫东,汤新海. 气温日变化过程的模拟与订正[J]. 中国农业气象,2009,30(1):35-40.
Yu Weidong, Tang Xinhai. Simulation and modification of dally variation of air temperature [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2009,30(1):35-40. (in Chinese)

21 Ephrath J E, Goudriaan J, Marani A. Modeling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics[J]. Agricultural Systems,1996, 51(4):377-393.

22 曹卫星,罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京:华文出版社,2003:112-114.

23 孙吉山,洪薇. 北京标准时间与各地真太阳时的换算法[J]. 上海针灸杂志,1994,13(1):25-26.
Sun Jishan, Hong Wei. Conversion method of Beijing standard time and around the true solar time[J]. Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion,1994,13(1):25-26. (in Chinese)

24 林慧捷. 时差产生的物理机制及其在气象中的应用[J]. 辽宁气象,1996(1):46-48.
Lin Huijie. The physical mechanism of jet lag and its application in weather[J]. Liaoning Meteorological,1996(1):46-48. (in Chinese)

25 杨扬. 玉米种植环境倒伏胁迫提取方法研究与应用[D]. 北京:中国农业大学,2012.
Yang Yang. Study and application of methods for predicting corn lodging stress using environment factors[D]. Beijing:China Agricultural University,2012. (in Chinese)

26 卢宗志,江晓东,张明,等. 玉米开花规律及其花粉生物学特性研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(17):9231-9232,9243.
Lu Zongzhi, Jiang Xiaodong, Zhang Ming, et al. Study of blossoming law of maize and its pollens biological characteristics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(17):9231-9232, 9243. (in Chinese)

27 贾小龙,陈丽娟,高辉,等. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655.
Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Gao Hui, et al. Advances of the short-range climate prediction in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(6): 641-655. (in Chinese)

28 赵金彪,张健挺,陈丽娜. 夏季多高温年的环流特征及其预测方法探讨[J]. 广西气象, 2004, 25(12): 21-24.
Zhao Jinbiao, Zhang Jianting, Chen Li'na. A discussion of circulation characteristics and prediction method in more high temperature summer [J]. Journal of Guangxi Meteorology, 2004, 25(12): 21-24. (in Chinese)