

引用格式: 黄亿, 王靖, 赫迪, 等. 气候变暖下西南春玉米生长季不利气象条件的时空演变[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1753-1764. [Huang Y, Wang J, He D, et al. Temporal-spatial change in adverse meteorological conditions during spring maize growth in Southwest China under climate warming[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1753-1764.] DOI: 10.18402/resci.2017.09.13

气候变暖下西南春玉米生长季不利气象条件的时空演变

黄 亿^{1,2}, 王 靖¹, 赫 迪¹, 唐建昭¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 常山县气象局, 衢州 324200)

摘 要:为明确西南地区气候变暖前后春玉米生长季内不利气象条件的时空演变特征, 本文采用西南地区27个农业气象站点1981-2010年的发育期资料和66个气象站点的1961-2010年的逐日气象资料, 分析气候变暖前后西南春玉米生长季内连阴天、高温、低温及水分盈亏发生的时空分布特征。研究结果表明: ①西南地区春玉米生长季内, 连阴天主要发生在出苗-七叶和七叶-抽穗阶段, 变暖后发生频率分别平均增加12%和15%, 但仅11%和14%的研究站点显著增加($P < 0.05$); ②高温天气主要发生在乳熟-成熟阶段, 且主要集中在东北部地区, 变暖后发生天数每生长季平均减少2.5d, 23%的站点高温发生的天数显著减少($P < 0.05$); 低温天气在整个生长季均有发生, 变暖后低温出现天数每生长季平均减少2.2d, 其中七叶-抽穗阶段低温发生天数减少最为显著, 56%的站点发生天数显著减少($P < 0.05$); ③水分亏缺主要发生在播种-拔节阶段, 变暖后轻、中度水分亏缺发生频率分别增加6%和7%; 春玉米各个生长阶段均受不同程度的水分盈余影响, 但主要表现为轻度盈余, 除西北部外, 变暖后轻度水分盈余发生频率增加15%, 播种-拔节和灌浆-成熟阶段21%和11%的研究站点轻度水分盈余显著增加($P < 0.05$)。总体来看, 变暖后西南地区春玉米生长季高温、低温发生天数减少, 对玉米生长有利, 但连阴天以及水分盈亏发生频率增加, 可导致玉米品质下降和产量减少。

关键词: 连阴天; 高温; 低温; 春玉米; 水分亏缺; 水分盈余; 气候突变检验; 西南地区

DOI: 10.18402/resci.2017.09.13

1 引言

中国西南地区包括四川、云南、贵州和重庆三省一市, 是重要的粮食生产基地之一。西南山地玉米生产区是中国三大玉米主产区之一, 玉米种植面积约500万 hm^2 , 占全国玉米种植面积的20%左右^[1]。

在气候变暖背景下, 西南地区的农业气象灾害发生频率增加^[1], 极端气象灾害频发, 如2006年发生的川渝干旱、2009-2010年发生的特大干旱、2010年3月的低温阴雨以及同年7月的暴雨洪涝等。对西南地区春玉米生长季气候条件的变化研究发现, 1961-2010年玉米生长季平均温度增加 0.55°C ^[2]; 干旱发生频率增加, 其中云南北部玉米生长季发生频

率较高^[3], 云南西南和东南部、贵州西南部、四川盆地西部和东北部洪涝多发^[4], 全年雾日天数增加^[5], 总辐射显著降低, 温度日较差减小^[6]。

不利气象条件对作物的生长发育和产量具有显著影响, 贾士芳等对玉米授粉前后进行遮光处理, 研究了弱光胁迫对玉米光合特性及产量的影响, 结果表明弱光胁迫通过影响玉米穗粒数和千粒重等影响产量^[7]; 一些学者的研究表明, 高温通过缩短玉米生育期、降低灌浆速率、减少灌浆时间、抑制光合速率、降低根系及叶片生长速率等方面影响产量^[8-14]; 张建平等利用WOFOST模型模拟了玉米在苗期、抽穗期和灌浆期发生不同程度低温对玉米灌

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-07-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB430205); 全国涉农引智平台项目(2015Z007)。

作者简介: 黄亿, 女, 浙江衢州人, 硕士, 主要从事气候变化对作物产量影响研究。E-mail: dear_smile1@163.com

通讯作者: 王靖, E-mail: wangj@cau.edu.cn

浆及产量的影响,得到低温发生时段及程度不同对玉米产量影响存在显著差异,苗期和灌浆期都发生1d低于下限温度2℃低温将导致减产6.29%,而三个发育期均发生7d低于下限温度4℃低温可导致玉米减产41.47%^[15];高杰等通过对玉米苗期干旱胁迫实验表明干旱胁迫引起玉米叶片光系统受损,导致干物质积累降低^[16];庞艳梅等的研究表明1961-2010年四川盆地玉米生育期有效降水量呈下降趋势,玉米各生育阶段均呈现水分亏缺,其中播种-拔节阶段水分亏缺最为严重^[17];何永坤等利用旬水分盈亏指数建立了玉米干旱累积指数并结合玉米单产资料构建了玉米干旱产量损失评估模型,并表明对于相同干旱累积指数变化,西南地区玉米产量损失程度不同^[18]。以上研究结果表明,寡照、高温、低温和水分盈亏均会对玉米生长发育和产量造成不利影响。

当前已有的研究侧重于玉米全生育期农业气候资源或者农业气象灾害的变化特征,较少关注对玉米生长有不利影响的气象条件在不同生长阶段的时空变化。此外,大量研究表明气候变暖背景下极端气象条件发生的频率增加^[19-21],但当前的研究缺乏对气候变暖前后西南地区玉米各生长阶段不利气象条件的时空差异进行解析。

本研究以西南春玉米生产区为研究对象,分析其气候变暖前后玉米不同生长阶段不利气象条件的时空变化,以期对相关部门应对气候变化和防灾减灾提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究站点和数据来源

西南地区包括四川、云南、贵州和重庆三省一市。根据当地农业气候特征,参考农业气象观测站

玉米播种期和生育期长度等,以县级为单位将西南地区划分为6个玉米种植区和1个非种植区^[6](图1)。各种植区玉米生长季最高温度、最低温度及平均温度分别在35.5℃~42.6℃、-2.7℃~3.7℃及19.3℃~23.4℃间变化;生长季总日照时数变化在481.8~769.7h;降水量在592.6~874.7mm间变化(表1)。

本文所用的四川、云南、贵州和重庆的66个气象站点(图1)1961-2010年逐日气象资料(包括逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水和日照时数)来源于中国气象局国家气象信息中心地面气象观测资料(<http://data.cma.cn/data/index.html>),1961-2010时段能够反映过去50年西南地区的气候波动和变化特征。27个农业气象站点玉米生长发育、田间管理资料来自于当地农业气象试验站,其中发育期数据包括播种、出苗、三叶、七叶、拔节、抽穗、开花、吐丝、乳熟和成熟。文中计算涉及的不同种植区域玉米各生育期长度根据1981-2010年各种植区

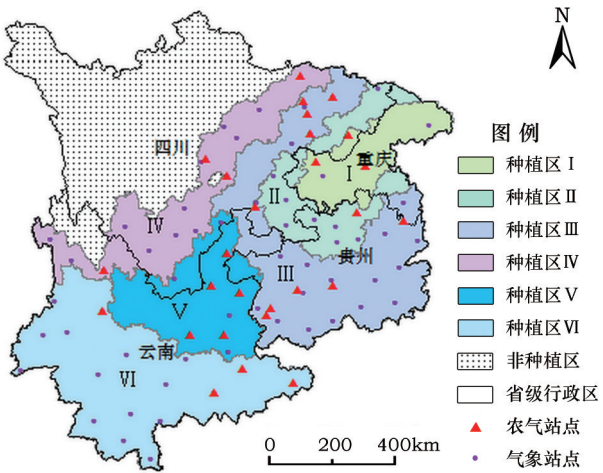


图1 西南地区春玉米种植分区和研究站点分布
Figure 1 The planting districts of spring maize and distribution of the study sites in Southwest China

表1 研究区各种植区玉米生长季时间及气候资源概况

Table 1 Climatic characteristics, sowing and harvesting dates of maize growing season in different growing districts in study area

分区	最高温度 /℃	最低温度 /℃	平均温度 /℃	总日照时数 /h	总降水量 /mm	玉米播种 /收获时间
I	41.2	-0.3	21.2	540.4	611.4	3月14日/7月20日
II	42.6	1.4	23.4	481.8	592.6	4月25日/8月18日
III	41.4	-2.7	22.9	617.8	806.1	4月18日/8月25日
IV	39.7	-0.1	20.9	520.9	649.8	5月2日/8月30日
V	35.5	0.8	19.3	769.7	755.1	4月23日/9月17日
VI	42.5	3.7	22.4	602.9	874.7	4月28日/8月31日

2017年9月

域内农业气象观测站实际观测值的平均值确定。为统一比较气候变暖前后不利气象条件的差异,不同年份的生育期长度日期取值保持一致。各种植区玉米平均播种期为3月14日-5月2日,最早为种植区I,最迟为种植区IV;收获期最早为7月20日,最迟为9月17日,分别为种植区I和种植区V。

2.2 研究方法

2.2.1 不利气象条件指标确定

玉米生长发育对光、温、水的敏感阶段不同,因而前人研究根据不利气象条件的影响敏感阶段分别对玉米生长阶段做出不同划分。本文分析的玉米生育期不利气象条件包括连阴天、高温与低温、水分盈余与亏缺。其中针对连阴天指标,将玉米生长阶段划分为出苗-七叶、七叶-抽穗、抽穗-乳熟和乳熟-成熟四个阶段^[22]。出苗-三叶和三叶-七叶两个阶段玉米生长最适温度差异较大^[23],因此针对高温和低温指标将玉米生长阶段划分为播种-出苗、出苗-三叶、三叶-七叶、七叶-抽穗、抽穗-乳熟和乳熟-成熟六个阶段^[23,24]。水分亏缺及盈余对作物生产的影响是长期累积作用的结果,所以针对该指标,将玉米生长阶段划分为播种-拔节、拔节-灌浆、灌浆-成熟三个阶段^[18]。

主要的不利气象条件指标如下^[23,25]:

(1)连阴天。当每日日照时数 $\leq 3\text{h}$ 持续出现5d及以上时,则认为连阴天发生^[25]。连阴天使玉米光合速率降低,影响干物质积累,开花前光照不足则会造成花期不遇^[22]。若玉米在灌浆期间遭遇连阴天会使灌浆速率降低,果实内淀粉含量减少、产量及品质下降。

(2)高温和低温。生长季低温和高温胁迫均不利于玉米生长发育。低温使玉米生长缓慢,生育期延迟,并影响玉米成熟度,使籽粒含水量增加,从而使产量及品质下降,灌浆初期低温则通过减缓灌浆强度及灌浆速率影响产量,且强度越大、持续时间越长,玉米减产越严重^[15];高温除不利于光合作用外,在不同生长阶段影响不同:如在抽穗-开花阶段发生高温不利于授粉,灌浆期发生高温则会使淀粉酶活性降低,导致籽粒灌浆不足从而影响产量。玉米各生长阶段对温度响应不同,高温、低温指标差异较大,因此玉米生长季内不利温度指标阶段划分

表2 玉米生长季不利温度指标^[24]

Table 2 Adverse temperature index during maize growing season

生长阶段	低温指标	高温指标
	(日最低温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$)	(日最高温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$)
出苗-三叶	3	27
三叶-拔节	11.5	30
拔节-抽穗	14	33
抽穗-乳熟	14	35
乳熟-成熟	10	30

如表2所示,在计算时为统一阶段则按出苗-七叶、七叶-抽穗、抽穗-乳熟、乳熟-成熟计算。播种-出苗阶段日均温低于 8°C 则不利于玉米发芽出苗,经分析,西南地区春玉米生长季中并未遇到此不利条件,因此在本文中未作考虑。

(3)水分亏缺和盈余。生长季内降水过多或过少均不利于作物生长,不同发育阶段的降水量与该阶段作物需水量最大程度的匹配才有利于作物生长发育。本文利用水分盈亏指数来表征水分亏缺和盈余对玉米不同发育阶段的影响。黄晚华等根据农田水分平衡原理并考虑前期水分盈亏影响,提出了作物水分亏缺指数(CWDI)^[26],张玉芳等在原水分亏缺指数计算基础上增加前10日累积降水量和作物需水量之差作为前期水分盈亏的指标^[27],经修订的作物水分盈亏指数表达公式为:

$$I = \frac{(R_{10} - W_{10}) + (R - W)}{W} \quad (1)$$

式中 R 为某发育阶段降水量(mm); W 为该阶段作物需水量(mm); R_{10} 为前10日累计降水量(mm); W_{10} 为前10日累计作物需水量(mm)。

其中:

$$W = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸散量,采用Penman-Monteith公式^[28,29]计算; K_c 为作物系数,综合FAO推荐值和《中国主要农作物需水量等值线图研究》^[30],并参考相关研究成果^[18]确定了西南地区玉米各生长阶段的作物系数(表3)。

根据作物水分盈亏指数(I)及该区域所有站点各阶段历年水分盈亏指数平均值(I_{mean})、标准差(σ)进行玉米各阶段水分盈亏等级划分(表4)^[27,31]。

2.2.2 气候变暖突变检验

研究表明,近50年西南地区玉米生长季平均温

表3 玉米各发育阶段作物系数

Table 3 Crop coefficient of maize at different growth and development stages

分区	播种-拔节	拔节-灌浆	灌浆-成熟
I	0.80	1.15	1.02
II	0.72	1.07	0.69
III	0.81	1.13	0.90
IV	0.71	1.02	0.80
V	0.59	1.02	0.68
VI	0.69	1.15	0.84

度增加0.55℃^[2],本文利用Mann-Kendall(MK)突变检验确定西南地区气候变暖的突变年份^[32,33]。给定显著性水平 $\alpha=0.05$,计算出西南地区每个气象站点年均温变化突变点,以其均值作为西南地区气候变暖突变点。经计算西南地区气候变暖突变年份为1991年。

2.3 数据处理

按照以上方法计算西南地区66个气象站点1961-2010年连阴天、高温和低温、水分亏缺及盈余的发生频率、发生天数及其在气候变暖前后的差异(变暖前:1961-1990年;变暖后:1991-2010年)。不利气象条件发生频率(天数)为各站点1961-2010年不利气象条件的发生频率(总天数),频率差(天数差)为各站点不利气象条件变暖后发生频率(总天数)减去变暖前发生频率(总天数)的差值。利用反距离权重插值方法(Inverse Distance Weighted interpolation, IDW)对各研究要素进行空间插值,反距离权重插值法基于相近相似原理,根据插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均。插值结果采用ArcGIS软件表达,从而进一步分析气候变暖前后各不利气象条件的时空分布及差异。

3 结果及分析

3.1 变暖前后春玉米生长季连阴天发生的空间差异

图2为西南春玉米生长季连阴天发生频率及其在变暖前后的空间差异。由图2a可见,在出苗-七叶阶段连阴天集中在西南地区东部,且变暖后发生频率增加12%。仅在东北部和中部部分地区发生频率有所减少;图2b显示,在七叶-抽穗阶段连阴天发生频率高达74%,其中北部地区变暖后发生频率显著增加22%;在抽穗-乳熟阶段,连阴天发生的站点有33%集中在西南部,且变暖后发生频率减少;种植区III东南部连阴天发生频率在变暖后增加25%(图2c);在乳熟-成熟阶段,连阴天在北部地区及种植区IV西南部发生频率较高,且变暖后呈增加趋势,其中种植区III北部增加趋势尤为明显(图2d)。

3.2 变暖前后春玉米生长季高温及低温发生的空间差异

西南春玉米生长季中,高温主要发生在乳熟-成熟阶段,其中67%的站点集中在东北部地区,且变暖后高温发生天数减少(图3d,见1758页)。由图3a(见1758页)可知,在出苗-七叶阶段高温主要发生在南部地区,且变暖后种植区V和VI每生长季高温发生天数减少0.8d。由图3b(见1758页)可知,在七叶-抽穗阶段,高温主要发生在种植区III北部及东部地区、种植区VI南部地区,且除种植区III部分地区、种植区V及种植区VI东部地区变暖后高温发生天数有所减少外,其它地区高温发生天数增加;在抽穗-乳熟阶段,变暖后东南部地区每生长季高温发生天数减少0.9d,种植区III北部高温发生天数较多且变暖后呈增加趋势,每年发生天数增加1.2d(图

表4 基于作物水分盈亏指数的玉米水分盈亏等级划分

Table 4 Maize water surplus /deficit degree based on crop water budget index

		播种-拔节	拔节-灌浆	灌浆-成熟
重度盈余	$I_{mean} + \sigma \leq I$	> 2.5	> 3.0	> 3.5
中度盈余	$I_{mean} \leq I < I_{mean} + \sigma$	1.3~2.5	1.7~3.0	1.9~3.5
轻度盈余	$I_{mean} - \sigma \leq I < I_{mean}$	0.1~1.3	0.3~1.7	0.4~1.9
正常	$I > 0, I < I_{mean} - \sigma; I < 0, I \geq I_{mean} + \sigma$	-0.1~0.1	-0.1~0.3	-0.1~0.4
轻度亏缺	$I_{mean} \leq I < I_{mean} + \sigma$	-0.1~-0.3	-0.1~-0.4	-0.1~-0.3
中度亏缺	$I_{mean} - \sigma \leq I < I_{mean}$	-0.3~-0.6	-0.4~-0.6	-0.3~-0.6
重度亏缺	$I_{mean} - \sigma > I$	< -0.6	< -0.6	< -0.6

2017年9月

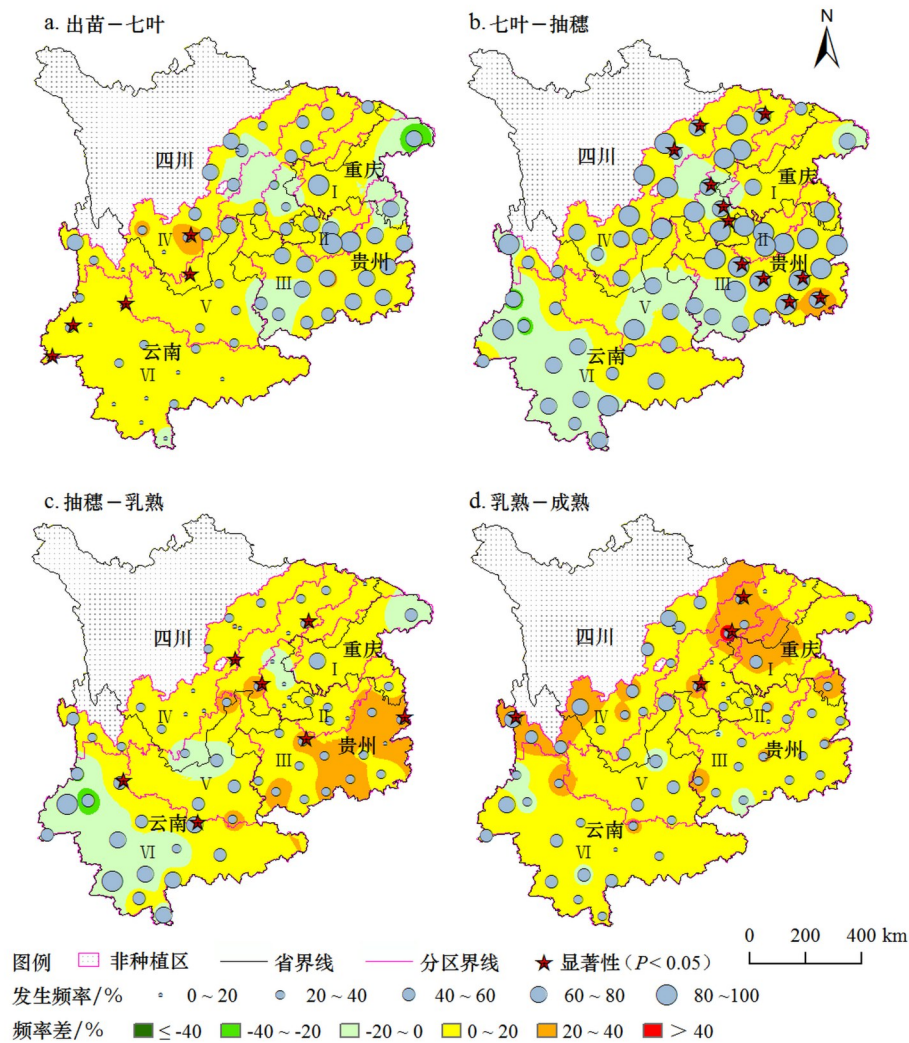


图2 1961-2010年西南春玉米各发育阶段连阴天发生的时空分布

Figure 2 The temporal and spatial distributions of number of successive overcast weather occurred in the different growing stages of spring maize in Southwest China from 1961 to 2010

3c, 见 1758 页)。在玉米乳熟-成熟阶段,北部地区高温发生天数减少,但纳溪站变暖后每年高温发生天数较变暖前增加尤为明显,达 10.4d。

低温事件在整个玉米生长季均有发生,其中七叶-抽穗及乳熟-成熟阶段低温发生频率较其它阶段分别高 67% 和 23%,呈南多北少分布。但变暖前后,除出苗-七叶阶段种植区 I—种植区 III 东部地区有所增加外,变暖后低温出现天数均减少,其中七叶-抽穗及乳熟-成熟阶段低温发生天数显著减少 3.4d 和 2.6d ($P < 0.05$) (图 4, 见 1759 页)。

3.3 变暖前后春玉米生长季水分亏缺和盈余发生的空间差异

玉米生长季水分亏缺主要发生在播种-拔节阶

段,发生水分亏缺的站点中,77% 的站点集中在西北部和南部地区,种植区 II、III 大部分地区、种植区 V 及种植区 VI 变暖后轻度水分亏缺增加 7% (图 5a, 见 1760 页),种植区 I、II 北部、种植区 IV 及种植区 VI 东部及中部中度水分亏缺发生频率在变暖后增加 6% (图 5b, 见 1760 页),种植区 II、III 北部重度水分亏缺发生频率变暖后增加 9% (图 5c, 见 1760 页)。在拔节-灌浆阶段,主要表现为轻度水分亏缺,63% 集中在东北部和南部部分地区。变暖后,种植区 III 和 VI 轻度水分亏缺发生频率平均增加 7% (图 5d, 见 1760 页),西部地区重度水分亏缺发生频率增加 5% (图 5f, 见 1760 页)。在灌浆-成熟阶段,主要表现为中度水分亏缺,多发于东部地区。变暖后,种植区

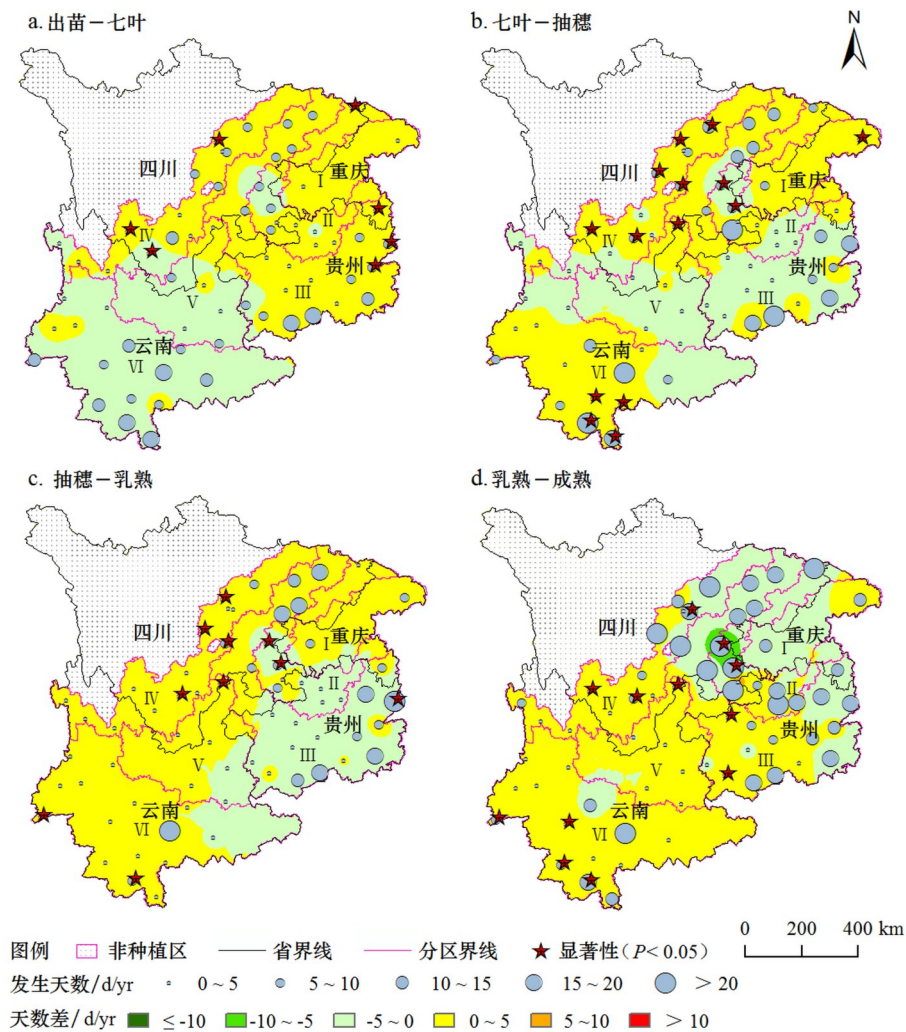


图3 1961-2010年西南春玉米各生长阶段高温天数时空分布

Figure 3 The temporal and spatial distributions of number of high-temperature days occurred at different growth stages of spring maize in Southwest China from 1961 to 2010

II-IV轻度水分亏缺发生频率增加4%(图5g,见1760页),种植区IV南部和种植区V中度水分亏缺发生频率增加7%(图5h,见1760页),重度水分亏缺影响增加的区域主要在种植区II-IV北部以及种植区VI南部(图5i,见1760页)。其中四川绵阳在播种-拔节及拔节-灌浆阶段变暖后水分亏缺发生频率增加尤为明显,其中在播种-拔节阶段变暖后重度水分亏缺发生频率较变暖前增加35%,在拔节-灌浆阶段轻度水分亏缺发生频率增加18%。

由图6(见1761页)可见,西南地区春玉米在各个生长阶段均受不同程度的水分盈余影响,主要表现为轻度水分盈余。变暖后大部分地区中、重度水分盈余发生频率分别减少11%和13%,轻度水分盈

余发生频率有不同程度增加。在播种-拔节阶段,中部及东部地区变暖后轻度水分盈余发生频率增加18%(图6a,见1761页);在拔节-灌浆阶段,种植区III和V中度水分盈余发生频率增加11%(图6e,见1761页);在灌浆-成熟阶段,中南部地区及种植区I变暖后轻度水分盈余发生频率增加17%,北部地区中度水分盈余发生频率增加10%(图6g、图6h,见1761页)。

4 结论与讨论

西南地区春玉米生长季内主要不利气象条件有连阴天、高温、低温以及水分亏缺和盈余,其中连阴天主要发生在出苗-七叶和七叶-抽穗阶段,变暖后发生频率分别平均增加12%和15%,高温主要发

2017年9月

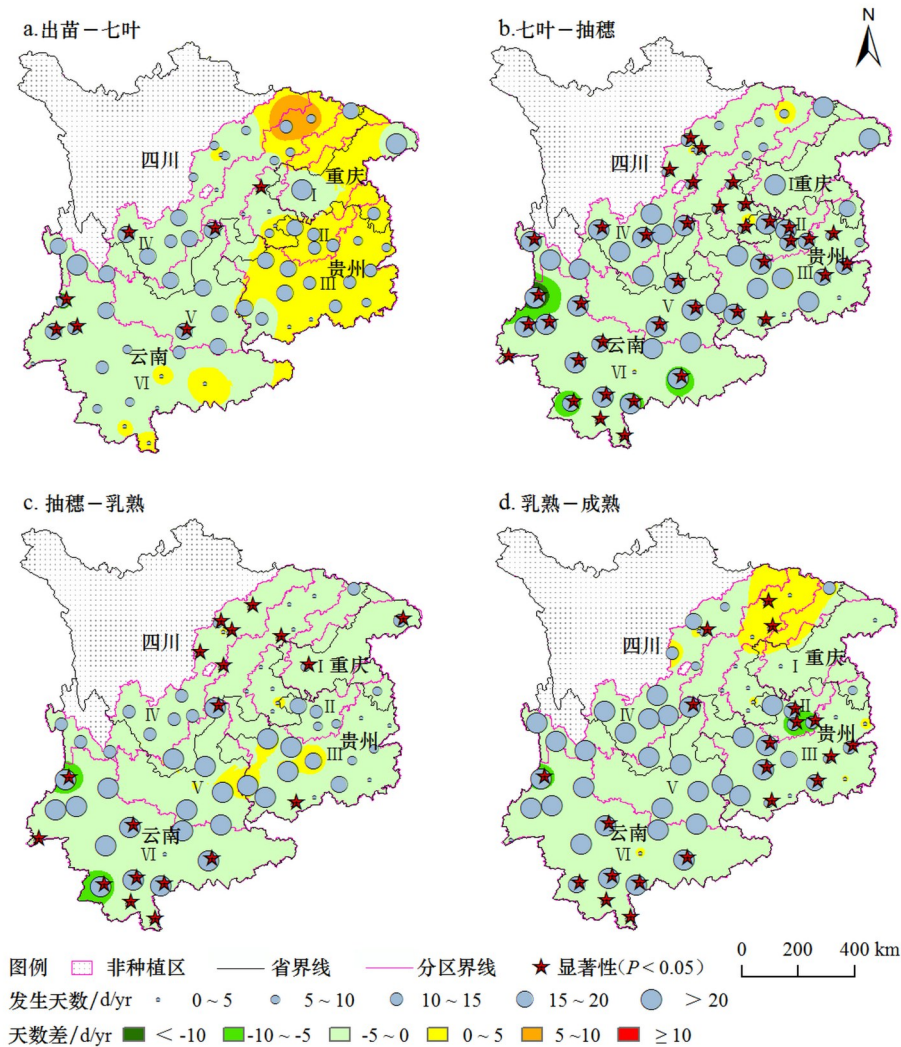


图4 1961–2010年西南春玉米各生长阶段低温天数时空分布

Figure 4 The temporal and spatial distributions of number of low-temperature days occurred at different growth stages of spring maize in Southwest China from 1961 to 2010

生在乳熟-成熟阶段,变暖后发生天数每生长季平均减少2.5d,低温及水分盈余则在整个生长季均有发生,变暖后低温出现天数每生长季平均减少2.2d,水分盈余主要表现为轻度水分盈余,变暖后除西北部外轻度水分盈余发生频率增加15%。从生长阶段看,西南地区春玉米在七叶-抽穗阶段更易遭受不利气象条件的影响,其次是出苗-七叶阶段。对耐阴性较弱的品种,出苗-七叶光照不足影响地上部干物质积累^[34],易造成玉米幼苗生长缓慢,从而导致减产;七叶-抽穗阶段光照不足造成穗粒数减少,影响产量^[9];乳熟-成熟阶段光照不足则影响产品品质,同样不利于玉米生产。种植区Ⅲ北部、种植区Ⅵ中

部及南部在玉米灌浆-成熟阶段可能受高温和水分亏缺的叠加影响;西南地区春玉米在出苗-七叶和乳熟-成熟阶段易受连阴雨影响,易发生虫害,应做好相关防护措施。

前人研究表明,西南地区玉米生长季干旱发生的可能性增加^[2],且大部分地区洪涝多发^[4],同时全年雾天日数呈增加趋势^[5],玉米生长季总辐射显著降低,温度日较差减小^[6],与本文的研究结果一致。本研究的结果进一步表明变暖后连阴天发生频率增加,轻、中度水分亏缺发生频率增加,轻、中度水分盈余发生频率增加;张厚暄研究认为,气候变暖下,北方玉米因温度升高而增产,南方玉米因热害

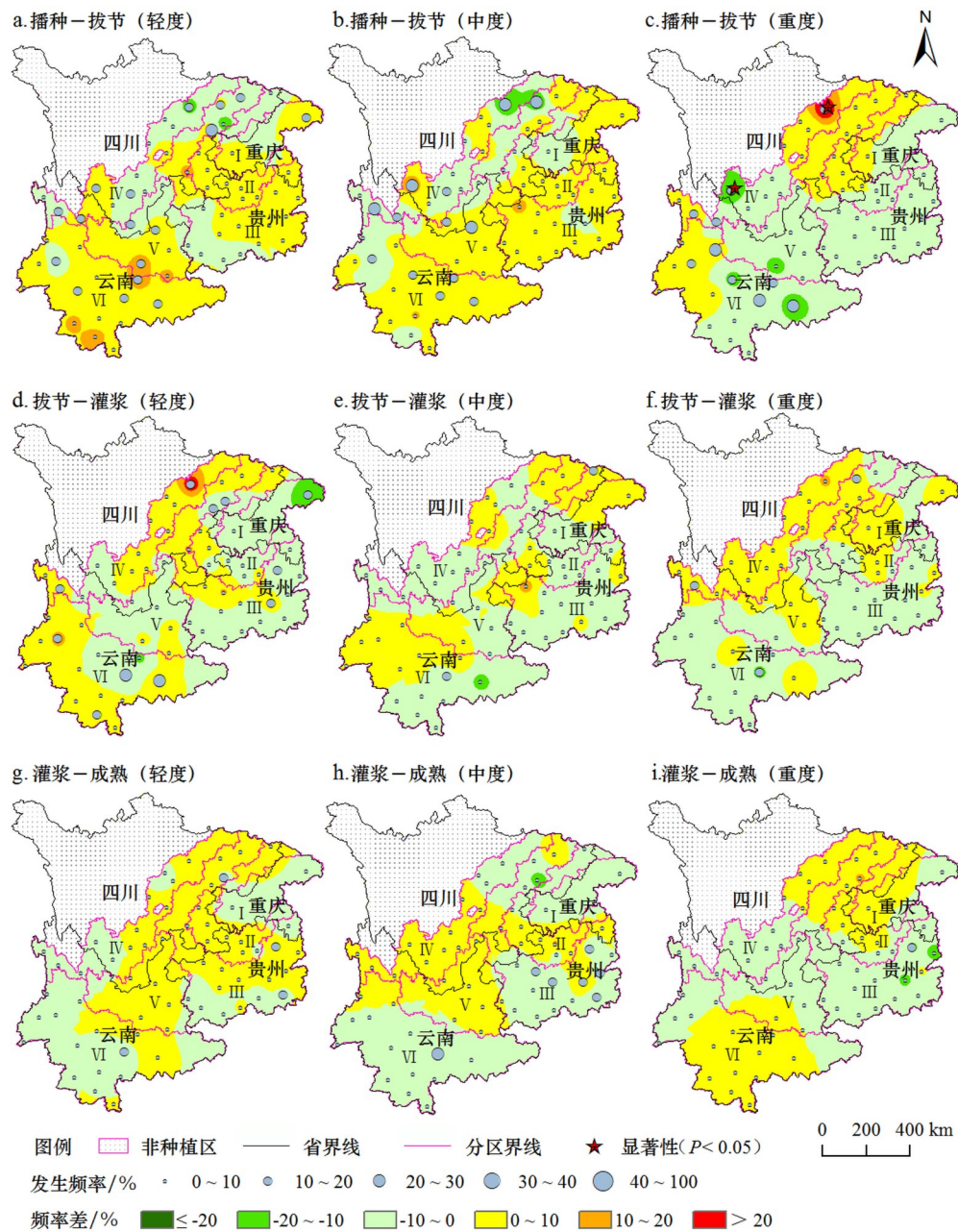


图5 1961-2010年西南春玉米各生长阶段水分亏缺程度时空分布

Figure 5 The temporal and spatial distributions of water deficit degrees at different growth stages of spring maize in Southwest China from 1961 to 2010

加重而减产^[35]。但本研究结果表明,变暖后西南地区春玉米生长季高温及低温发生天数减少,即西南地区春玉米热害并未加重。

在未来气候变暖趋势进一步加剧的情况下,可结合西南地区春玉米实际生产情况,采用耐阴性及耐旱性较好的品种,并根据不同地区适度调整播期;同时在玉米种植地区的选择上,尽量避免低洼

地区,以减轻水分盈余及涝害的发生,同时,在高温和水分亏缺时段以及连阴雨易发时期应做好相关减灾措施。

需要注意的是,西南地区主要是山地玉米带,具有典型的喀斯特地貌,地形复杂,径流和渗漏量较大。本文的水分亏缺和盈余指标未考虑径流、渗漏等因素,可能高估了实际生产中的水分盈余发生

2017年9月

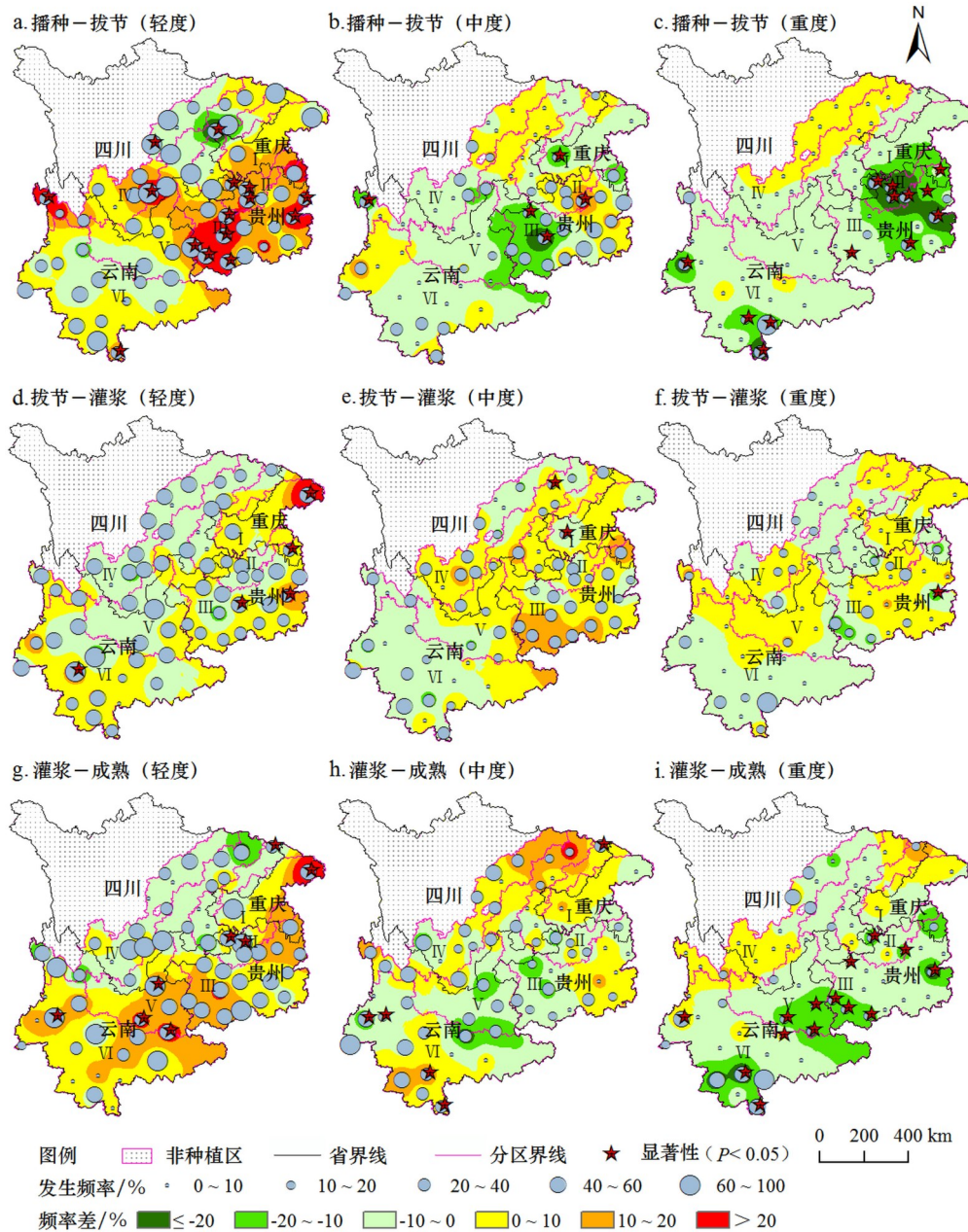


图6 1961–2010年西南春玉米各生长阶段水分盈余程度时空分布

Figure 6 The temporal and spatial distributions of water surplus degrees at different growth stages of spring maize in Southwest China from 1961 to 2010

情况。其次,本文根据西南地区地形特点、农业气候特征以及当地玉米播种期和生育期长度等,将西南玉米种植区划分为六个亚区,但西南地区地形较为复杂,地势起伏较大,在同一亚区内作物生育期、气象要素空间分布存在一定差异,在气象要素及不利气象条件指标的空间插值中未考虑高程影响,对地形变化差异大的局部站点,评估结果可能会受到一定影响,进一步的工作需考虑地形的影响,对不

利气象条件的发生及其影响进行精细化评估。

参考文献(References):

- [1] 潘光堂,杨克诚. 我国西南地区玉米育种面临的挑战及相应对策探讨[J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1141-1147. [Pan G T, Yang K C. Facing toward challenges and corresponding strategies for maize breeding in Southwestern region of China[J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2012, 38(7): 1141-1147.]

- [2] He D, Wang J, Dai T, *et al.* Impact of climate change on maize potential productivity and the potential productivity gap in Southwest China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(6):1155-1167.
- [3] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应IV. 基于作物水分亏缺指数的玉米干旱时空特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2590-2598. [Sui Y, Huang W H, Yang X G, *et al.* Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of global climate change. IV. Spatiotemporal characteristics of drought for maize based on crop water deficit index[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2590-2598.]
- [4] 吴立, 霍治国, 张蕾, 等. 西南地区农业洪涝等级指标构建及时空分布特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2473-2481. [Wu L, Huo Z G, Zhang L, *et al.* Level indicators construction and temporal-spatial distribution features of agricultural flood in the Southwest of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2473-2481.]
- [5] Ma Z F, Liu J, Zhang S, *et al.* Observed climate changes in Southwest China during 1961-2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 17(1): 30-40.
- [6] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于APSIM模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 155-165. [Dai T, Wang J, He D, *et al.* Modelling the impacts of climate change on spring maize yield in Southwest China using the APSIM model [J]. *Resources Science*, 2016, 38(1): 155-165.]
- [7] 贾士芳, 董树亭, 王空军, 等. 弱光胁迫对玉米产量及光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2456-2461. [Jia S F, Dong S T, Wang K J, *et al.* Effects of weak light stress on grain yield and photosynthetic traits of maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2456-2461.]
- [8] 陶志强, 陈源泉, 隋鹏, 等. 华北春玉米高温胁迫影响机理及其技术应对探讨[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(4): 20-27. [Tao Z Q, Chen Y Q, Sui P, *et al.* Effects of high temperature stress on spring maize and its technologic solutions in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(4): 20-27.]
- [9] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 遮荫对夏玉米产量及生长发育的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 4657-4662. [Zhang J W, Dong S T, Wang K J, *et al.* Effects of shading on the growth, development and grain yield of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 4657-4662.]
- [10] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育、产量及水分利用的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(2): 108-111. [Liu M, Tao H B, Wang P, *et al.* Effects of sowing date on growth, yield formation and water utilization of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(2): 108-111.]
- [11] 戴明宏, 单成钢, 王璞. 温光生态效应对春玉米物质生产的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(3): 35-41. [Dai M H, Shan C G, Wang P. Effect of temperature and solar ecological factors on spring maize production[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(3): 35-41.]
- [12] Daynard T B, Tanner J W, Duration W G. Duration of the grain filling period and its relation to grain yield in corn, *Zea mays* L. [J]. *Crop Science*, 1971, 11(1): 45-48.
- [13] 张吉旺. 光温胁迫对玉米产量和品质及其生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005. [Zhang J W. Effects of Light and Temperature Stress on Physiological Characteristics of Yield and Quality in Maize (*Zea Mays* L.) [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005.]
- [14] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 大田增温对夏玉米光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 81-86. [Zhang J W, Dong S T, Wang K J, *et al.* Effects of increasing field temperature on photosynthetic characteristics of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 81-86.]
- [15] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同时段低温冷害对玉米灌浆和产量的影响模拟[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(9): 115-121. [Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, *et al.* Modeling the impact of low temperature disaster during different development stages on grain filling processes and yields of maize [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2012, 40(9): 115-121.]
- [16] 高杰, 张仁和, 王文斌, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光系统II性能的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1391-1396. [Gao J, Zhang R H, Wang W B, *et al.* Effects of drought stress on performance of photosystem II in maize seedling stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1391-1396.]
- [17] 庞艳梅, 陈超, 潘学标. 1961-2010年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 133-141. [Pang Y M, Chen C, Pan X B. Variation characteristics of maize effective precipitation and water requirement in Sichuan basin during 1961- 2010[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 133-141.]
- [18] 何永坤, 唐余学, 张建平. 中国西南地区干旱对玉米产量影响评估方法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 185-191. [He Y K, Tang Y X, Zhang J P. Evaluation method for effects of drought disaster on yields of maize in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 185-191.]
- [19] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis[C]. Vienna: Egu General Assembly Conference, 2014.
- [20] Gourdji S M, Sibley A M, Lobell D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: Historical trends and future projections[J]. *Environmental Research Letter*, 2013, DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024041.

2017年9月

- [21] Trnka M, Rotter R P, Ruiz-Ramos M, *et al.* Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4 (7):637-643.
- [22] 鲁晓明, 张新, 张前进, 等. 不同遮荫时间下玉米雄雌开花间隔与产量的关系研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(36): 50-54. [Lu X M, Zhang X, Zhang Q J, *et al.* The relationship between anthesis silking interval and maize yield under different shading time[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(36): 50-54.]
- [23] 郭建平, 庄立伟, 陈玥煜. 东北玉米热量指数预测方法研究 (I) - 热量指数与玉米产量[J]. 灾害学, 2009, 24(4): 6-10. [Guo J P, Zhuang L W, Chen Y Y. Study on forecasting methods of corn heat index in Northeastern China (I) - heat index and corn yield[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(4): 6-10.]
- [24] 郭建平, 马树庆. 农作物低温冷害监测预测理论和实践[M]. 北京: 气象出版社, 2009. [Guo J P, Ma S Q. The Theory and Practice of Low- Temperature Damage Monitoring and Prediction in Crops[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009.]
- [25] 刘荣花, 赵国强. 现代农业气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014. [Liu R H, Zhao G Q. Modern Agricultural Meteorological Service Manual[M]. Beijing: Meteorological Press, 2014.]
- [26] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 28-34. [Huang W H, Yang X G, Qu H H, *et al.* Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 28-34.]
- [27] 张玉芳, 王锐婷, 陈东东, 等. 利用水分盈亏指数评估四川盆地玉米生育期干旱状况[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 615-620. [Zhang Y F, Wang Y T, Chen D D, *et al.* Evaluation on drought at maize growth stage in Sichuan basin based on water budget index[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4): 615-620.]
- [28] 张丹, 张广涛, 王丽学, 等. 彭曼-蒙特斯公式在参考作物需水量中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4513-4514. [Zhang D, Zhang G T, Wang L X, *et al.* Research on the equation of Penman-Monteith in reference crop evaporation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2006, 34(18): 4513-4514.]
- [29] Karl T R. Some spatial characteristics of drought duration in the United States[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(8): 1356-1366.
- [30] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993. [Team of Isograms of Water Requirement for Chinese Main Crop. Studies on the Isograms of Water Requirement for Chinese Main Crops[M]. Beijing: China Agriculture and Technology Press, 1993.]
- [31] 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101-109. [Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, *et al.* Crop water requirement and temporal- spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 101-109.]
- [32] 陈颖, 张灵, 千怀遂. 华南地区近53a极端高温日数的变化特征及其区域差异[J]. 热带地理, 2016, 36(4): 692-699. [Chen Y, Zhang L, Qian H S. Variation characteristics and spatial differences of extremely high temperature days over South China during the recent 53 years[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(4): 692-699.]
- [33] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493. [Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493.]
- [34] 杜成凤, 刘天学, 蒋寒涛, 等. 弱光胁迫及光恢复对玉米幼苗活性氧代谢的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(3): 570-575. [Du C F, Liu T X, Jiang H T, *et al.* Effects of low light stress and light recovery on reactive oxygen metabolism of maize seedlings[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(3): 570-575.]
- [35] 张厚喧. 关于气候变暖对我国农业生态环境影响及其对策的几点看法[J]. 中国农业气象, 1992, 13(3): 20-23. [Zhang H X. Some opinions on the influence of climate warming on agro-ecological environment and its countermeasures in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1992, 13(3): 20-23.]

Temporal-spatial change in adverse meteorological conditions during spring maize growth in Southwest China under climate warming

HUANG Yi^{1,2}, WANG Jing¹, HE Di¹, TANG Jianzhao¹

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

2. Changshan Meteorological Bureau, Quzhou 324200, China)

Abstract: We investigated spatial and temporal variations in adverse meteorological conditions during the maize growing season in Southwest China. Datasets covered observed phenological data from 27 agro-meteorological stations (1981-2010) and daily meteorological data from 66 meteorological stations (1961-2010). These data were used to calculate agro-meteorological indices such as successive overcast weather, high-temperature day, low-temperature day, water surplus and deficit index, indicating adverse meteorological conditions in the most recent 50 years. We found that successive overcast weather occurred frequently from emergence to seventh-leaf and from seventh-leaf to heading, and the frequency increased by 12% and 15%, respectively after climate warming. A total of 11% and 14% of stations decreased during these two periods. Heat stress mainly occurred during the period from milking ripeness to maturity, which mostly centered in northeast of Southwest China. The number of days with heat stress decreased by 2.5 days after climate warming, with 23% of stations decreasing. Low-temperature days occurred during the whole growing season, and the number of days with cold stress decreased by 2.2 days after climate warming, especially during from seventh-leaf to jointing when 56% of stations decreased. High-temperature days mainly occurred from sowing to jointing, and the frequency of light water deficit and medium water deficit increased by 6% and 7%, respectively. The water surplus happened through the maize growing season, but it was always mild. The frequency of light water surplus increased by 15% after climate warming, with 21% and 11% of stations increasing significantly during sowing-jointing and grain filling-maturity, respectively. The decrease in heat stress and cold stress has a good impact on the growth of spring maize, however, the increase in cloudy days and water surplus/deficit may decrease quality and yield.

Key words: cloudy days; heat stress; cold stress; spring maize; water deficit; water surplus; Mann-Kendall analysis; Southwest China