

# 河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度演变特征 及其对玉米生产的影响

殷雪莲<sup>1</sup>, 何金梅<sup>2</sup>, 郭萍萍<sup>1</sup>

(1. 甘肃省张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省气象服务中心, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 采用数理统计方法对河西走廊中部六县(区)1961—2009 年逐日实测气温资料进行分析, 分析  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度分布特征、年际和年代际演变规律及其异常变化特点, 并分析  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的演变对当地主导作物玉米的种植结构、生长性状及产量等的影响, 结果表明: 近 50 a 河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度表现为初日提早、终日推迟、持续日数延长、积温增加的趋势; 20 世纪 70 年代至 80 年代前期各地  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温偏少, 持续日数较短, 90 年代以来, 积温增加趋势明显, 尤其 2001—2009 年增加幅度为近 50 a 最大, 热量资源充足; 70 年代、80~90 年代初均出现积温异常偏少、持续日数异常偏短的年份, 2000—2009 年, 河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温异常偏多的年份占近 50 a 来异常偏多年份的 83%; 生长季  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  热量资源显著增加, 利于扩大河西走廊中部主导作物玉米的种植面积和区域, 提高了玉米单产及总产量。

**关键词:**  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温; 空间分布; 年代际变化; 玉米生产; 河西走廊中部

**中图分类号:** S161.2+2; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0236-08

## Evolution of critical temperature on $\geq 10^{\circ}\text{C}$ limit and its effect on maize production in central Hexi Corridor

YIN Xue-lian<sup>1</sup>, HE Jin-mei<sup>2</sup>, GUO Ping-ping<sup>1</sup>

(1. Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Gansu Provincial Meteorological Service Center, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Based on the daily air temperature data of six counties of Zhangye in the central Hexi Corridor from 1961—2009, analysis was made of the spatial distributions, annual and decadal variations and climatic anomalous change year of the critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ , as well as the effect of its evolution on crop planting pattern, growth situation and maize output. The results are as follows: During the last 50 years, the variation trend of the critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  presents the characteristics of the initial day becoming earlier, terminal day postponing, duration prolonging and the accumulated temperature increasing. In the 1970s—1980s, the phenomena of the accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  decreasing and duration shortening occurred in most of the weather stations in the central Hexi Corridor; in the 1990s, the accumulated temperature increased obviously, and the increase extent in the years of 2001—2009 is the highest the last 50 years; and the phase of thermal abundance appeared. In the beginning of 1970s—1990s, the anomaly phenomena of the accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  decreasing and duration shortening occurred in most of the weather stations. During the period of 2000—2009, the anomalous increase years of critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  accounted for 83% of the total in the last 50 years. The anomalous increase years, accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  and thermal resources increased remarkably in maize growing period, which was helpful for enlarging planting area of the dominant crop maize, raised the yield of maize per unit area and the general output.

**Keywords:** cumulative temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ; spatial distribution; decadal variation; maize production; central Hexi Corridor

收稿日期: 2014-03-28

基金项目: 甘肃省气象局科研项目(2013-19); 张掖市气象局科研项目

作者简介: 殷雪莲, 女, 甘肃高台人, 高级工程师, 主要从事气候与应用气象方面的研究工作。E-mail: yxl-bn@163.com。

热量是重要的气候资源,热量条件与植物生长关系密切,植物生长起止温度,生长旺盛期的天数和日平均气温的累积值是衡量作物生长期和总热量的重要指标。当日平均气温稳定通过 $0^{\circ}\text{C}$ 时,树木树体内部活动已开始;稳定通过 $5^{\circ}\text{C}$ 时,树木芽开始萌动;稳定通过 $10^{\circ}\text{C}$ 时,农作物种子开始发芽,因此,日平均气温稳定通过 $10^{\circ}\text{C}$ 的初终日期及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温和持续日数是十分重要的农业热量指标,其不仅表征了喜温作物生长期的长短和热量资源的多少,同时也反映了喜温作物播种、生长、停止灌浆或生长以及喜凉作物积极生长的起止时间,是进行农业气候区划、合理配置农作物以及预报物候期、病虫害发生期的重要依据<sup>[1]</sup>。以气候变暖为主要特征的全球变化已成为事实<sup>[2]</sup>,气候变化将改变农业气候资源,尤其是热量资源的时空分布,进而对各地农业生态系统、农业结构布局、农作物生长发育和产量形成都将产生广泛而深刻的影响。诸多研究表明<sup>[3-5]</sup>,气候变暖使中国大部分地区的热量资源得到不同程度的丰富,农业气候带北移,北方地区一年两季耕作面积增加,作物生长季延长,作物品种向晚熟方向改变,同时,各地气候变化及其对热量资源的影响具有明显的区域性差异,因此,在气候变暖背景下,研究当地 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的时空变化规律、揭示热量资源分配的新格局,为合理调整种植结构及农业气候区划提供依据。许多学者对西北农业气候资源变化进行了研究<sup>[6-10]</sup>,涉及热量资源对气候变化的响应、黄土高原地区积温演变、气候变暖对西北主要农作物的影响、农作物生育期热量资源变化及河西气候资源特征研究等,而本文将分析近50 a河西中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 热量资源的时空变化特征及对主导作物(玉米)生产带来的影响,为充分利用气候资源指导农业生产,研究和探讨此区域农业对策均具有重要且长远的现实意义。

## 1 资料来源与研究方法

### 1.1 资料来源

河西走廊中部张掖市高台、临泽、甘州区、山丹、民乐、肃南6县(区)1961—2009年逐日气温资料,为各地气象站实时监测值;1981—2009年春小麦、玉米的播种面积及产量等农业资料来自张掖市统计年鉴;1984—2009年玉米物候资料来自于张掖市甘州区农业气象观测站监测数据。

### 1.2 研究方法

(1) 对河西走廊中部稳定通过 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初、终日期采用5日滑动平均方法确定,分别计算起始和

终止日期期间的活动积温作为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温。

(2) 进行每10 a的阶段分析。

(3) 将气象要素的趋势变化用一次线性方程表示,即:

$$x_t = a_0 + a_1 t, t = 1, 2, \dots, n$$

式中, $x_t$ 为气象要素的拟合值; $a_1 \times 10$ 称为气候倾向率,表示气象要素每10 a的变化率。对6个站分别计算 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的积温及初日、终日和持续日数的气候倾向率。

(4) 采用统计学方法分析各要素的年代际变化,年代际阶段性分析用1960年代、1970年代、1980年代和1990年代、2001—2009年分别代表1961—1970、1971—1980、1981—1990和1991—2000、2001—2009年;气候均值采用1970—2000年平均值。

(5) 文中的川区指河西走廊中部绿洲区的甘州区(代表站)、高台、临泽三县(区),山区指祁连山沿线的山丹、民乐(代表站)、肃南三个县。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的空间分布特征

#### 2.1.1 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温及初日、终日和持续日数

活动积温:一个地区的产业结构、作物布局、品种搭配、耕作制度,在一定程度上取决于作物生育期间的温度变化及时空分布。日平均气温稳定大于 $10^{\circ}\text{C}$ 的时期作为越冬作物生长活跃期和喜温作物播种期与生长活动期,此期间的积温是衡量喜温作物可以利用资源的主要标志<sup>[11]</sup>。分析表明(表1),河西走廊中部六县(区)累年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温达 $1\ 600 \sim 3\ 100^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,北部川区明显高于南部山区,南北差异较大,平川区域达 $2\ 900^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 以上;浅山地区为 $2\ 600 \sim 2\ 900^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ;南部祁连山沿线的高海拔地区为 $1\ 200 \sim 2\ 000^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。总的分布趋势:随着海拔高度的上升而减少,与海拔高度关系密切,每升高 $100\text{ m}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温减少 $166.4^{\circ}\text{C}$ ( $T_{10} = 5385.5 - 1.664H$ )。

初日:初日随海拔高度的升高而推迟,中北部川区大部出现在4月下旬前期,最早为4月5日(临泽1981年、2009年);东南部山区均出现在5月上旬之后,最晚为6月17日(民乐、肃南1969年)。据计算,海拔高度每升高 $100\text{ m}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日推迟 $1.0\text{ d}$ 。

终日:结束时间分布趋势与初日相反,由西北向东南逐渐提前,且随海拔高度的升高结束得较早。南部山区结束在9月中旬之前,最早结束在1993年8月27日(民乐、肃南);川区结束时间均偏晚,在9月下旬之后,最迟为2006年10月21日(川区)。经计

算海拔高度每升高 100 m,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的终日提早 2.2 d。 减少, 川区较山区延长近 50 d。

持续日数:  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  持续日数自西北向东南逐渐

表 1 河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的平均值

Table 1 Mean value of critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in the central Hexi Corridor from 1961—2009

| 地名<br>Location | 经度<br>Longitude<br>E/ $^{\circ}$ | 纬度<br>Latitude<br>N/ $^{\circ}$ | 海拔高度<br>Elevation<br>/m | 积温<br>Accumulative temperature<br>/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ | 初日<br>Initial day<br>(m-d) | 终日<br>Terminal day<br>(m-d) | 持续日数<br>Lasting days<br>/d |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 高台 Gaotai      | 99.50                            | 39.22                           | 1332.9                  | 3019.3  | 04-22                      | 10-03                       | 165                        |
| 临泽 Linze       | 100.10                           | 39.09                           | 1455.1                  | 3095.1  | 04-22                      | 10-05                       | 167                        |
| 甘州 Ganzhou     | 100.26                           | 38.56                           | 1484.1                  | 2915.0  | 04-25                      | 10-01                       | 161                        |
| 山丹 Shandan     | 101.05                           | 38.48                           | 1765.9                  | 2625.6  | 05-04                      | 10-02                       | 151                        |
| 民乐 Minle       | 100.49                           | 38.27                           | 2282.0                  | 1638.2  | 05-24                      | 09-11                       | 112                        |
| 肃南 Sunan       | 99.37                            | 38.50                           | 2311.5                  | 1684.0  | 05-24                      | 09-13                       | 113                        |

## 2.2 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的年际变化

积温: 河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温均值川区为  $3009.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , 山区为  $1991.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , 通过 49 a  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温时间序列(图 1a)分析表明: 河西走廊中部川区、山区  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的积温在波动中增加, 随时间的线性趋势变化率: 川区的高台、临泽、甘州区分别为  $48.7^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $44.6^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $71.0^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 山区的山丹、民乐、肃南分别为  $65.3\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $61.7\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、

$49.4\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 通过了 0.01 显著性检验。说明近 50 a 此区域  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的活动积温升高趋势明显, 且分布于西北部的高台及临泽和西南部的肃南增速较中部的甘州区和东南部的民乐、山丹慢。

初日: 分析  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的初日时间演变曲线(图 1b), 川区(以代表站为例)总体呈弱的推后趋势, 山区的三县均表现出一致提前的趋势, 平均提前  $0.4\sim 1.4\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 以肃南最为明显。

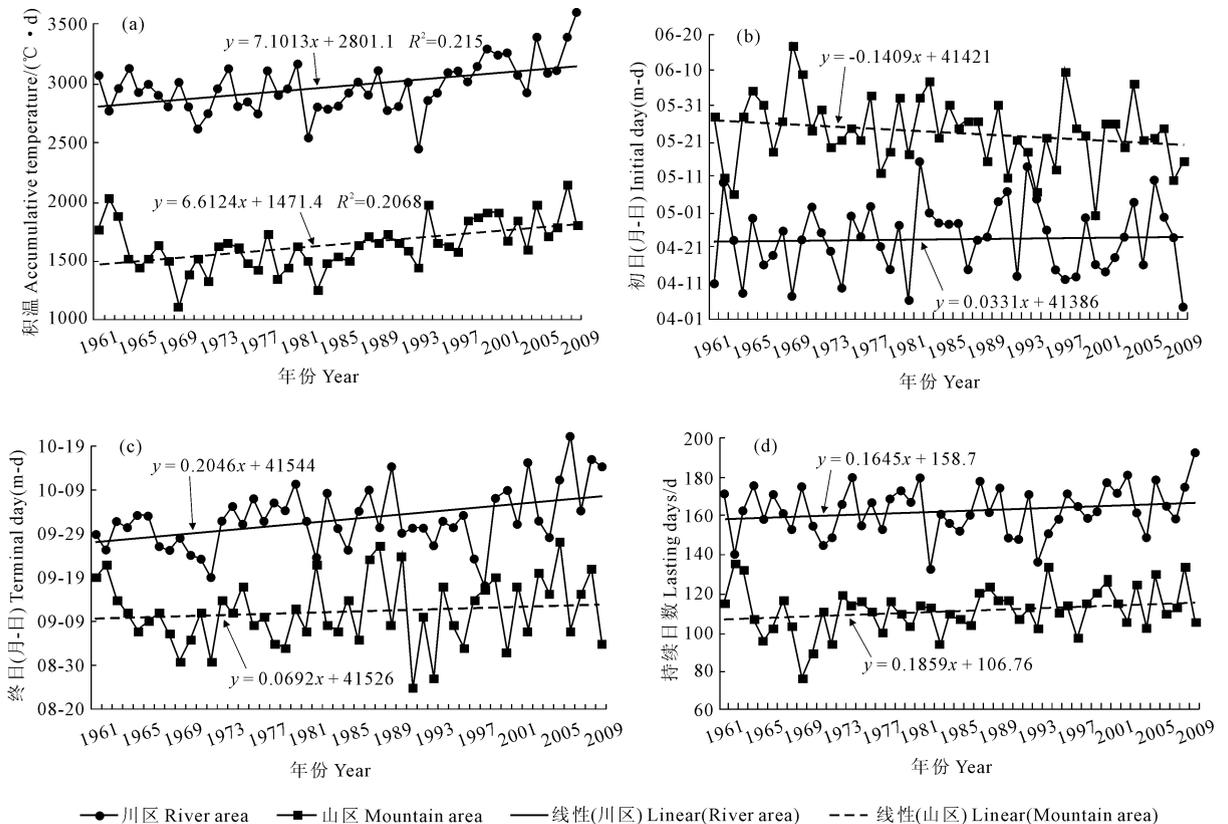


图 1 河西中部代表站 1961—2009 年  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温 (a)、初日 (b)、终日 (c) 及初终间日数 (d) 变化曲线 (折线为历年值, 斜线为趋势线)

Fig. 1 The change of accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (a), initial day (b), terminal day (c) and lasting days (d) at stations of the central Hexi Corridor from 1961—2009 (solid line: measured value, thick slope line: trend value)

终日:近50 a六县(区) $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的终日表现出一致的推后趋势(图3b),速率为 $0.7\sim 2.2\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,其中南部浅山区的山丹推迟最为明显。

初日~终日间持续日数:通过49 a $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数的时间序列分析(图3b,代表站),川区、山区六县(区)均为延长趋势,速率为 $1.6\sim 2.5\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,山丹最为明显。

### 2.3 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度年代际变化趋势

分析河西中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的年代际(图2a、2b、2c、2d)及距平变化(表略),具有如下特点:

(1) 各地 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈波动式增加趋势,60~70年代,川区大部分积温略有增加,山区减少 $24\sim 103^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,以70年代减少较明显。

(2) 相关研究<sup>[12]</sup>表明:1987年西北地区西中部气候出现向暖湿转型的突变,80年代气候突变前河西走廊中部除山丹外,其它各地积温均有减少趋势,减少幅度小于70年代;90年代后期,气温异常偏高,各县(区)积温一致增加,增幅为 $44.9\sim 107^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ;2001—2009年,各地积温增幅达 $136.1\sim 263.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,增加幅度为近50 a最多。

(3) 80年代,气温波动明显,河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日出现均较平均日期偏晚,以山区较为明显,偏晚 $3\sim 6\text{ d}$ ;90年代西北部的高台、临泽略有推

迟,南部沿山区较历年同期提早 $5\sim 6\text{ d}$ ;2001—2009年,各地初日均早于历年同期。

(4) 60~70年代,川区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的终日由提前转为推迟,山区总体为推迟趋势;80年代,除西北部的高台外,其它各地均较历年同期推迟,以山区最为明显;90年代,除高台没有变化外,其它各地均提前;2001—2009年,六县(区)推迟达 $2\sim 8\text{ d}$ 。

(5) 分析初日~终日间持续日数,70年代总体表现为川区较均值偏长,山区偏短的特征。80~90年代川区为负距平,山区为正距平;2001—2009年六县(区)均较历年值偏长,除西北部的临泽偏长 $2\text{ d}$ 外,其它各县(区)偏长 $4\sim 9\text{ d}$ ,偏长幅度较大。

(6) 2001—2009年,是近50 a来热量条件优越的年代,与80年代相比,初日提早了 $4\sim 8\text{ d}$ ,终日推迟了 $2\sim 8\text{ d}$ ,持续日数延长了 $3\sim 10\text{ d}$ ,积温增加了 $145.6\sim 298.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。徐铭志等<sup>[13]</sup>定义了日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日数为气候生长期,并研究得出:全国近50年气候生长期平均增加了 $6.6\text{ d}$ ,北方地区平均增加 $10.2\text{ d}$ 。根据此研究,2001—2009年,河西走廊中部大部地方气候生长期增加幅度大于全国均值,与北方地区增幅相当,是49 a间气候生长期增加最明显的时期。

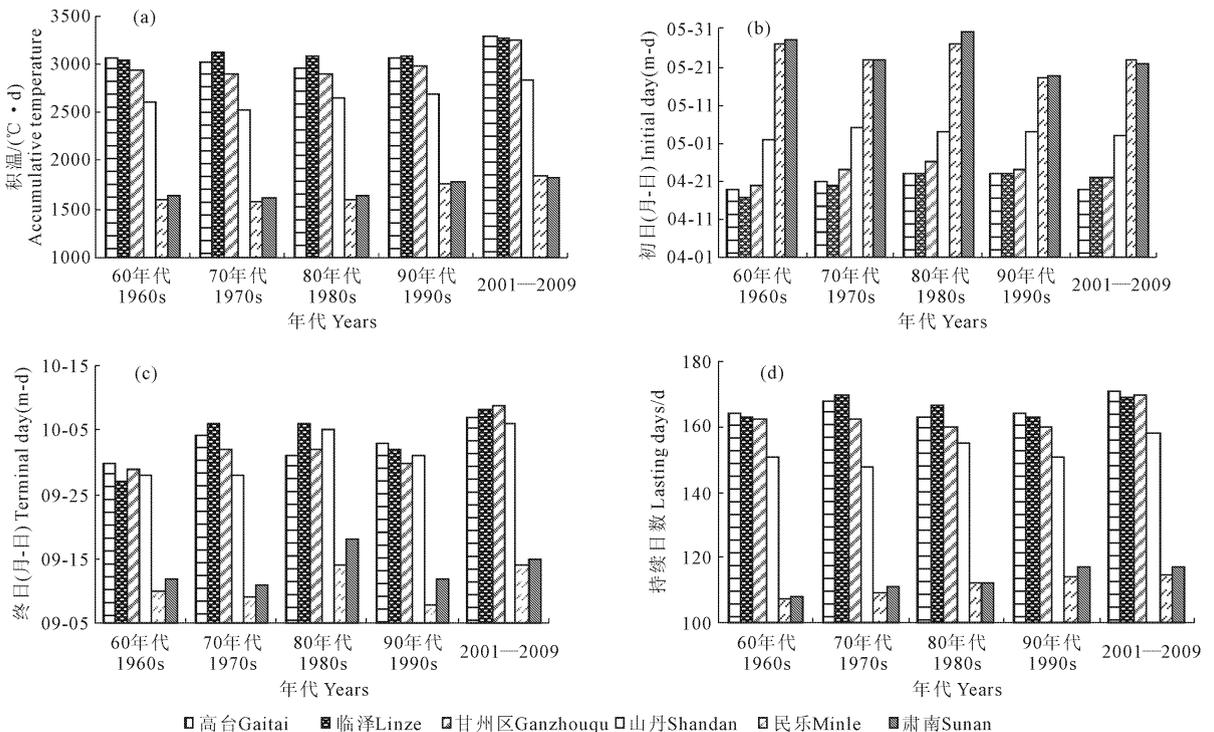


图2 河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温(a)、初日(b)、终日(c)和持续日数(d)的年代际变化

Fig.2 The inter-decadal variation of critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ (a), initial day(b), terminal day(c) and lasting days(d) in the central Hexi Corridor

## 2.4 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的异常特征

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度的变化主要受气候变化影响,气候异常对农业生产有重大的影响。世界气象组织对气候异常提出两种判别标准,一是距平超过标准差的 2 倍以上,二是出现的几率为 25 a 以上一遇。由于标准差是描述气象要素相对其平均值离散程度的统计量,因此取距平超过标准差达到一定程度为异常是适当的。本文采用距平大于标准差的 2 倍作为异常标准,来分析河西中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的异常特征。

从河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的异常分析来看(表 2)具有以下明显特征:各地积温、初日、终日及持续日数,49 a 间均有异常年份出现,且各要素间存在一定的联系。

积温:河西走廊中部六县(区)70 年代、80~90 年代初均出现积温异常偏少年份,川区的高台、临泽 1982、1993 年较历年偏少了  $404.0 \sim 530.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其中 1993 年两地积温为  $2\,489.3 \sim 2\,565.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,为 49 a 来最低值;山区的肃南、民乐 1972、1983 年均偏少  $271.4 \sim 352.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,偏少幅度小于川区。2000—2009 年的 10 a 中,六县(区)积温异常偏多年呈增加态势,其中 2005 年六县(区)积温均异常偏多;2009 年川区及浅山区的山丹、2008 年甘州区及山区的积温也异常偏多,此外,高台、民乐及肃南分别在 2006、1994 年和 2000 年出现了积温异常偏多状况。

初日:80 年代,六县区均出现了初日异常偏晚年,70 年代中期川区均出现了异常偏早的年份,2000 年及 2009 年的高台、甘州区、民乐、肃南初日出现时间异常偏早。

终日:川区及浅山区大部 60 年代末、70 年代初期及 1997—1998 年异常偏早的年份较多,2005—2006 年六县区大部终日异常偏迟。

初日~终日间持续日数:49 a 间河西走廊中部异常偏短的年份多于偏长的年份,偏短的年份共有 12 a,有 75% 出现在 60~80 年代前期,其中 1982 年和 1993 年为典型的异常偏短年份;49 a 间异常偏长年份仅有 5 a,其中 4 a 出现在 1994—2009 年气候异常变暖的年代。

分析  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的异常特征表明:初日异常偏迟的年份,积温异常偏少的年份也相应较多,积温异常偏少年份占初日异常偏迟年份的 78%,而积温异常偏多年份只占初日异常偏早年份的 38%;终日与积温异常年份间的关系不明显,终日异常偏早与偏晚年份分别占积温异常偏少与偏多年的 9% 和 14%,且在川区二者近乎无相关性;持续日数的异常与积温异常关系较显著,近 50 a 中持续日数异常偏长的 5 a 中有 4 a 积温异常偏多,异常偏短的 12 a 中有 9 a 积温异常偏少。故当地初日异常偏迟的年份,积温异常偏少的几率也较大,持续日数异常偏长与偏短的年份会导致积温的异常偏多与偏少。

表 2 河西走廊中部  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  界限温度的异常年份

Table 2 The anomalous years of critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in the central Hexi Corridor

| 地名<br>Location | 初日<br>Initial day              | 终日<br>Terminal day                          | 持续日数<br>Lasting days           | 积温<br>Accumulative temperature             |
|----------------|--------------------------------|---|--------------------------------|--|
| 高台 Gaotai      | 1974, 2009(-)<br>1982, 1993(+) | 1971(+)<br>1997(-)                          | 1963, 1982, 1993(-)            | 1982, 1993(-)<br>2005, 2006, 2009(+)       |
| 临泽 Linze       | 1969, 1974(-)<br>1982, 1993(+) | 1968, 1997(-)<br>1979, 2006(+)              | 1979(+)<br>1982, 1993(-)       | 1982, 1993(-)<br>2005, 2009(+)             |
| 甘州 Ganzhou     | 1974, 2009(-)<br>1982(+)       | 1970, 1998(-)<br>1989, 2006(+)              | 1982, 1993(-)<br>2009(+)       | 1982(-)<br>2005, 2008, 2009(+)             |
| 山丹 Shandan     | 1982(+)                        | 1962, 1968, 1970, 1980,<br>1998(-), 2006(+) | 2005(+)                        | 1961, 1979(-)<br>2005, 2008, 2009(+)       |
| 民乐 Minle       | 1983(+)<br>2000(-)             | 2005(+)                                     | 1972, 1983(-)<br>1994(+)       | 1969, 1972, 1983(-)<br>1994, 2005, 2008(+) |
| 肃南 Sunan       | 1969, 1987(+)<br>2000(-)       | 1972(-)                                     | 1969, 1970, 1972(-)<br>2000(+) | 1969, 1972, 1983(-)<br>2000, 2005, 2008(+) |

注:“+”表示  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的初日-终日、持续日数及积温异常偏晚、异常偏长、异常偏高,“-”则表示相反意义。

Note: “+” means that the initial day and terminal day of critical temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  abnormally postpone, the duration abnormally prolongs, and the accumulative temperature is abnormally high. “-” stands for the contrary meaning.

## 2.5 积温变化对玉米生产的影响

### 2.5.1 种植结构调整明显,播种面积逐年增加 气候变暖,热量资源增加,适宜种植喜温作物的范围扩

大,是影响喜凉作物春小麦种植面积迅速减少,喜温的玉米等作物种植面积迅速扩大,导致夏秋作物种植结构发生明显改变的主要原因<sup>[14]</sup>。地膜玉米面

积的扩大及制种玉米的快速发展,致使河西中部春小麦、玉米的种植结构明显调整,玉米种植面积逐年呈现出增加趋势(图3),相关分析呈现出显著正相关,相关系数为0.9304,显著性水平超过了0.001,线性趋势变化率为 $1.55\text{万}\text{hm}^2\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。主要夏作物春小麦的种植面积明显减少,面积随时间变化呈现出显著负相关,相关系数为 $-0.91722$ ,显著性水平超过了0.001,线性趋势变化率为 $1.93\text{万}\text{hm}^2\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

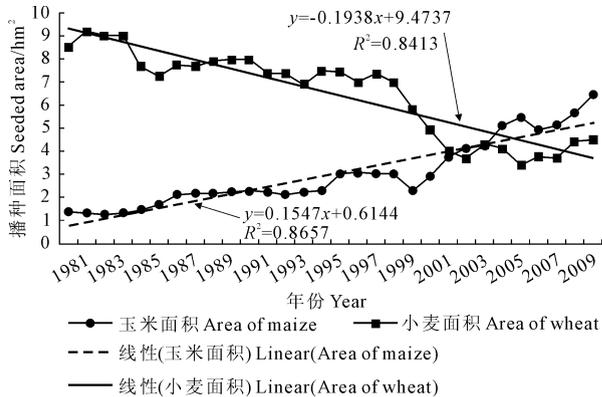


图3 河西走廊中部历年春小麦、玉米播种面积变化分析

Fig.3 The analysis of the change of several years' spring wheat, maize seeded area in the central Hexi Corridor

2.5.2 玉米种植区域不断扩展 气候变暖致使甘肃省各玉米种植区气候生态随之发生了较明显的变化,如温热、温暖区因气温升高,干旱机率增大,导致玉米产量下降,而温和区因生育期间热量增加,积温保证率提高,玉米产量增加,且玉米种植上限抬升,种植范围扩大<sup>[15]</sup>。1986年河西走廊中部张掖市玉米气候区划<sup>[16]</sup>中划分:海拔 $< 1\,450\text{m}$ 的区域为中晚熟品种适宜区;海拔 $1\,450\sim 1\,700\text{m}$ 的区域为早、中熟品种种植区;海拔 $> 1\,700\text{m}$ 以上的区域为不适宜种植区。由于气候变暖及玉米制种技术的提高,2005年刘明春等<sup>[15]</sup>又对河西走廊玉米气候生态种植区划做了进一步研究:最适宜种植区海拔 $1\,200\sim 1\,400\text{m}$ ,适宜晚熟和中晚熟品种;适宜种植区海拔 $1\,400\sim 1\,600\text{m}$ ,适合种植中晚熟品种;次适宜种植区海拔 $\leq 1\,200\text{m}$ 及沿山 $1\,600\sim 1\,700\text{m}$ 的区域,适合种植晚熟和中早熟品种;可种植区包括 $1\,700\sim 1\,900\text{m}$ 的沿山区域,可种植早熟品种;南部沿山 $> 1\,900\text{m}$ 的区域不适宜种植玉米。由此看出:80年代后期至2009年间,河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温比1961—1986年平均增加 $127^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,持续日数增加 $3\sim 7\text{d}$ ,玉米生长活动期热量资源显著增加<sup>[17]</sup>,加之21世纪地膜覆盖栽培技术的推广,致使玉米出苗时间

提前5d左右,争取到 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $270\sim 300^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,品种熟性提高了一级<sup>[18]</sup>,原来只能种植中早熟品种的地区可以种植中晚熟品种,种植中晚熟品种的部分区域可种植晚熟品种,适宜种植高度提高了 $200\text{m}$ 左右。适宜种植区域由80年代中期的高台、临泽、甘州区及312国道以北的大部分灌溉区,扩展到了民乐、山丹县所辖的六坝、三堡、南古、新天镇及东乐乡等海拔近 $2\,000\text{m}$ 的浅山地带,种植区域向东南延伸了近 $50\text{km}$ 。

2.5.3 对生育期的影响分析 分析1984—2009年河西走廊中部川区玉米物候观测资料(表3)看出:20世纪80年代至2001—2009年,玉米物候期总体呈现出播种期提早、成熟期延迟、全生育期延长的特征。80年代、90年代及2001—2009年,播种平均日期分别出现在4月13、15及18日,历年极差为15d,最早出现在2004年4月9日,最晚在1984年4月24日;平均成熟期出现在9月19—28日,历年极差为14d,最早出现在1989年9月16日,最晚在2001年9月30日;各年代际播种~成熟期平均天数达 $154\sim 169\text{d}$ ,历年全生育期极差为23d,其中最短为149d,出现在1984年,最长为2004年的172d。上述分析看出:播种期最早、成熟期最晚、生长期最长的年份均出现在21世纪,反之则出现在80年代积温波动剧烈的时期,这与上文论述的80年代河西走廊大部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温减少,2001—2009年各地积温增幅为近50a最多的结论相符。

利用玉米物候观测资料,计算1984—2009年各生育期出现的平均日期及各生育期随时间的线性趋势变化率(表4),分析表明:抽雄前的各发育期有所提前,其中播种期、七叶期变化速率为 $1.4\sim 1.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ;出苗、拔节普遍期变化速率为 $2.7\sim 3.0\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ;抽雄后的各发育期有后推趋势,其中乳熟、成熟期变化速率为 $4.2\sim 4.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,同时玉米全生育期天数延长明显,变化速率为 $5.5\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。玉米生育期与生长期长度的变化主要与其由中熟逐步向中晚熟品种过度等熟制变化有关外, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的增加也是影响其变化的原因之一。生长期延长,玉米干物质积累多,品质好,种子籽粒饱满,色泽纯正,发芽势强,耐储藏。

2.5.4 对产量的影响 河西走廊中部川区1980—2009年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温随时间的线性趋势变化率为 $192.0^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,相关系数达0.41,以高出1961—2009年 $121.0^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率递增<sup>[17]</sup>。相关研究<sup>[18-19]</sup>表明:光、热、水三个因子中,热量与产量的相关性最为显著,说明温度是影响玉米产量形成的

关键气象因子,河西灌区玉米产量与生育期积温关系非常密切,积温不足是影响产量的主要矛盾,尤以灌浆期最为明显。从表 5 看出:河西中部玉米播种~拔节营养生长期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的贡献小于于生殖生长期,拔节~成熟期贡献较大,约占全生育期热量的 62%,尤其灌浆期所需积温达  $800^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  以上,故从播种到成熟,越到后期,与热量条件的相关关系越密

切,尤其从 8 月上旬吐丝到 9 月中旬成熟期,呈显著的正效应,这段时间正是灌浆乳熟期,是决定籽重的关键时期,积温充足有利于光合产物的积累。河西走廊中部张掖市玉米气候产量与全生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温相关系数达 0.6619,信度在 0.05 时相关显著,积温增减  $100^{\circ}\text{C}$ ,玉米增减  $487.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [18]。

表 3 玉米播种-成熟期日期年际变化

Table 3 Change of maize sowing~maturation period between year

| 生育期<br>Growing stage          | 年代 Decade |       |             | 极差/d<br>Extremal<br>D-value | 特早(特长)<br>Anomalous early<br>(Anomalous long) | 特晚(特短)<br>Anomalous late<br>(Anomalous short) |
|-------------------------------|-----------|-------|-------------|-----------------------------|---|---|
|                               | 1980s     | 1990s | 2001—2009 年 |                             |   |   |
| 播种时间(月-日)<br>Sowing date(m-d) | 04-18     | 04-15 | 04-13       | 15                          | 04-09(2004 年)                                 | 04-24(1984 年)                                 |
| 成熟时间(月-日)<br>Mature date(m-d) | 09-19     | 09-25 | 09-28       | 14                          | 09-16(1989 年)                                 | 09-30(2001 年)                                 |
| 全生育期<br>Growing period/d      | 154       | 164   | 169         | 23                          | 172(2002,2004 年)                              | 149(1984 年)                                   |

表 4 玉米发育期及时间变化速率

Table 4 Speed change of every growth date of maize with years

| 发育期<br>Growing stage                          | 播种<br>Sowing stage | 出苗<br>Seedling stage | 七叶<br>7-leaves stage | 拔节<br>Jointing stage | 抽雄<br>Tasselling stage | 乳熟<br>Milking stage | 成熟<br>Maturity stage |
|---|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| 平均日期(月-日)<br>Mean date(m-d)                   | 04-14              | 04-30                | 05-30                | 06-24                | 07-22                  | 09-02               | 09-25                |
| 线性趋势变化率<br>Growth rate/(d·10a <sup>-1</sup> ) | -1.38              | -2.92                | -1.59                | -2.67                | 0.45                   | 4.64                | 4.15                 |

表 5 春玉米主要发育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温及贡献率

Table 5 The critical temperature and contribution during main growing stages of maize

| 生育期<br>Growing stage   | 播种~出苗<br>Sowing~Seedling | 出苗~七叶<br>Seedling~7-leaves | 七叶~拔节<br>7-leaves~Jointing | 拔节~抽雄<br>Jointing~Tasselling | 抽雄~乳熟<br>Tasselling~Milking | 乳熟~成熟<br>Milking~Maturity |
|--|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 平均积温/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ )<br>Critical temperature | 171.5                    | 471.0                      | 479.9                      | 588.8                        | 861.2                       | 341.1                     |
| 积温贡献率/%<br>Critical temperature<br>contribution                  | 5.9                      | 16.2                       | 16.5                       | 20.2                         | 29.6                        | 11.7                      |

分析 1980—2010 年玉米单产、总产演变曲线,得出:30 a 中,玉米单产( $\text{hm}^2$ )2001 年之前较高,2001 年后,高产大田玉米生产逐步过渡为制种为主,品种更新,单产减小,总体随时间的线性趋势变化率为  $21.8\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,2001—2010 年制种玉米产量随时间的线性趋势变化率为  $26.3\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,尤其 2005—2010 年间,随着 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的增加,单产线性趋势变化率为  $99.9\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,增产幅度加大。玉米总产随时间的线性趋势呈现出显著正相关,相关系数为 0.9515,显著性水平超过了 0.001,变化率为  $1.25\times 10^8\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,2001 年后,线性趋势变化率增为  $2.3\times$

$10^8\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,平均每年增产  $1.1\times 10^7\text{ kg}$ 。气候变暖,河西走廊中部制种玉米播种面积大幅增加,年产优质杂交玉米种子  $4.5\times 10^8\text{ kg}$ ,占全国大田玉米年用种量的 40% 以上,能满足我国近 133 万  $\text{hm}^2$  玉米生产用种(见图 4)。

### 3 结论与讨论

1) 河西走廊中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温在空间分布上表现为“川区高于山区、中北部高于南部”的格局,南北差异较大; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日自西北向东南推迟,且随海拔高度的升高逐渐推迟,中北部绿洲灌溉区较南部

山区提早近1个月; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 终日结束时间由西北向东南逐渐提前,并随海拔高度的升高逐渐提前,川区较南部祁连山区延迟近20 d; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日~终日间日数由西北向东南逐渐减少,中北部川区长于南部山区。

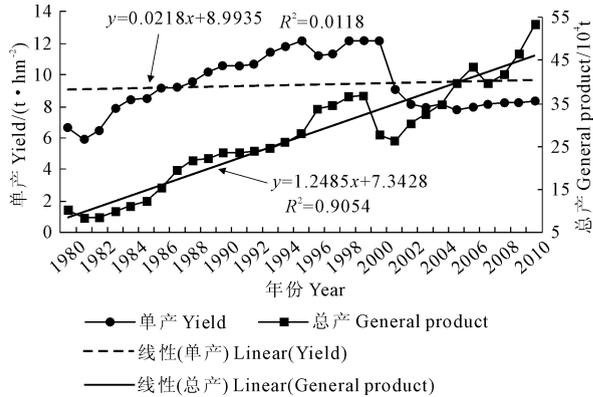


图4 河西走廊中部玉米产量的时间变化

Fig.4 The curves of maize yield in the central Hexi Corridor

2)  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温在波动中增加,随时间的线性趋势变化率川区在 $44.6 \sim 71.0^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 间,山区在 $49.4 \sim 65.3^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 之间;川区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日呈弱的推后趋势,南部山区提前速率较快,提前速率为 $0.4 \sim 1.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ;  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的终日均表现出一致的推后趋势,速率为 $0.7 \sim 2.2 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ;各地 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 持续日数均为延长趋势,延长速率为 $1.6 \sim 2.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

3) 气候变暖使河西中部 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 热量条件得到了不同程度的改善,在近50 a稳定通过 $10^{\circ}\text{C}$ 积温变化中,前期递增趋势缓慢,中期平缓变化,后期显著递增,特别是近30 a标准气候期积温递增趋势尤为突出。近50 a  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 界限温度总体表现为初日提早、终日推迟、持续日数延长、积温增加的趋势,90年代以来,积温增加趋势明显,尤其2001—2009年,积温增幅达 $136.1^{\circ}\text{C} \sim 263.1^{\circ}\text{C}$ ,增幅为近50 a最大,积温异常偏多的年份占近50 a异常偏多年份的83%,大部地方气候生长期增加幅度大于全国均值。

4) 近50 a河西走廊中部热量资源增多更为明显,致使该区域喜凉的主导作物春小麦种植面积迅速减少,喜温的玉米种植面积迅速扩大。2003年始,随制种玉米的快速推广,面积达 $4.13 \text{ 万 hm}^2$ ,2010年增至 $6.45 \text{ 万 hm}^2$ ,春小麦种植面积则由1982年的 $9.17 \text{ 万 hm}^2$ 减少至2010年的 $4.5 \text{ 万 hm}^2$ ,夏秋作物种植结构发生明显改变,同时, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 热量资源的剧增,使玉米品种熟性提高一级,种植高度提高

200 m左右,种植区域向东南扩展了近50 km,这对品种的改良及增产都具有重要意义。目前河西走廊中部从事玉米杂交种子生产的企业达到63家,54家“中国种业骨干企业”中有14家落户,此区域已成为全国最大的玉米制种基地。

#### 参考文献:

- [1] 邓振镛.干旱地区农业气象研究[M].北京:气象出版社,1999:121-122.
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[C]//Houghton J T, Ding Y, Griggs J, et al. Observed Climate Variability and Change, Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001: 881.
- [3] 徐兴奎,王小桃,金晓青.中国区域1960—2000年活动积温年代变化和地表植被的适应性调整[J].生态学报,2009,29(11):6042-6050.
- [4] 刘德祥,董安祥,邓振镛.中国西北地区气候变暖对农业的影响[J].自然资源学报,2005,20(1):119-125.
- [5] 张强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,28(3):1210-1218.
- [6] 孙兰东,刘德祥.西北地区热量资源变化及其对农业种植结构的影响[J].地球科学进展,2007,22(特刊):61-67.
- [7] 王毅荣.黄土高原地区积温演变[J].冰川冻土,2007,29(1):119-124.
- [8] 韩永翔,董安祥,王卫东.气候变暖对中国西北主要农作物的影响[J].干旱地区农业研究,2004,(4):39-43.
- [9] 屈振江.陕西农作物生育期热量资源对气候变化的响应研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):75-79.
- [10] 殷雪莲,贺建锋.河西走廊中部气候资源特点及其开发应用[J].干旱区研究,2010,27(2):188-193.
- [11] 刘德祥,董安祥,陆登荣.中国西北地区近43年气候变化及其对农业生产的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):195-200.
- [12] 施雅风,沈永平,汝胡骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
- [13] 徐铭志,任国玉.近40年中国气候生长期的变化[J].应用气象学报,2004,15(3):306-312.
- [14] 刘德祥,赵红岩,董安祥.气候变暖对甘肃夏秋季作物种植结构的影响[J].冰川冻土,2005,27(6):806-811.
- [15] 刘明春,邓振镛,李巧珍,等.甘肃省玉米气候生态适应性研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):112-117.
- [16] 甘肃省张掖地区农业区划汇编[M].甘肃省张掖地区农业区划办公室,312-325.
- [17] 殷雪莲,代德彬,褚超.张掖市农业生产对气候变暖的相应[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):115-120.
- [18] 邓振镛,林日暖.河西气候与农业开发[M].北京:气象出版社,1993:133-146.
- [19] 薛生梁,刘明春,张惠玲.河西走廊玉米生态气候分析与适生种植气候区划[J].中国农业气象,2003,24(2):12-15.