

厄尔尼诺对宁夏干旱山区农作物的影响初探

马力文^{1,2}, 刘 静^{1,2}

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002;

2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要: 引起赤道太平洋海温异常的厄尔尼诺现象, 通过大气环流的异常影响东亚季风系统, 对宁夏气温、降水等农作物赖以生存的环境造成影响。为了解厄尔尼诺对宁夏中南部山区气候要素的变化及对产量的影响程度, 本文采用动态距平分析法, 分析了宁夏干旱山区 1961 年以来厄尔尼诺发生当年和次年气候要素、农业气候资源及小麦、玉米和马铃薯的产量变化。结果表明, 厄尔尼诺造成宁夏暖冬, 有利于设施农业生产。厄尔尼诺使冬、春季气温偏高, 但夏季气温明显偏低, 作物生长季积温减少, 高海拔地区热量强度更加不足, 影响玉米成熟。厄尔尼诺发生次年, 中部干旱带春季降水偏多, 有利于保障春播和作物苗期生长, 但夏、秋季降水偏少, 容易出现干旱, 不利于作物生长发育。南部山区春季、秋季降水偏多, 有利于作物播种和苗期生长, 但夏季降水偏少, 特别是作物开花、灌浆初期降水偏少, 不利于玉米、马铃薯生长。玉米灌浆中后期、马铃薯成熟期降水偏多, 容易引起马铃薯晚疫病。厄尔尼诺发生当年小麦、玉米和马铃薯减产; 厄尔尼诺发生次年, 山区冬小麦、玉米和马铃薯平均增产幅度分别为 8.9%、7.8% 和 8.4%, 均为显著增产。

关键词: 厄尔尼诺; 农业气候资源; 作物产量; 对策; 动态距平法

中图分类号: S165 **文献标志码:** A

A preliminary study on impact of El Nino on crops in arid mountainous areas of Ningxia

MA Li-wen^{1,2}, LIU Jing^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

2. Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

Abstract: El Nino, cause the anomaly equatorial Pacific sea surface temperature, impacts Ningxia temperature, precipitation and other elements which crops survival environment in the East Asian monsoon system through abnormal atmospheric circulation. In order to understand the effect of El Niño on change of climatic elements and yield in central and southern mountainous regions of Ningxia, the current study analyzed, by dynamic difference method, the climatic factors, agro-climatic resources, El Niño yearly occurrence, as well as the yield changes of wheat, maize and potato. The results showed that, El Nino causes a warm winter in Ningxia which facilities greenhouse agricultural production. El Nino makes warm winter and spring, but lowers temperature than normal in the summer significantly. It decreased thermal accumulation in crops during growing season, especially heat intensity highly insufficient in high altitude regions where maize cannot mature. In the following year of El Nino occurrence, the rainfall in spring increased in the central dry zone, which helps sowing and crop seedling growth, but decreased in summer and autumn which prone to drought. In southern mountainous region, El Nino caused more rainfall in the spring and autumn, but less in the summer, likely to cause drought in corn crucial growing stage. In the late filling and maturity, more precipitation may cause potato late blight and interrupt harvest. When El Nino occurs, the yields of winter wheat, corn and potato are decreased, but the yields of three crops are increased significantly in the following year in central and southern mountainous regions.

Keywords: El Nino; agricultural climate resources; crop yields; countermeasure; dynamic differences method

收稿日期: 2016-10-20

修回日期: 2017-05-03

基金项目: 中国气象局气候变化专项; 气候变化对宁夏旱作农业的影响与适应对策 (CCSF201315); 宁夏回族自治区科技惠民专项: 宁夏贫困区引种高优节水张杂谷新品种与全程气象保障技术试验示范 (2016KJHM15)

作者简介: 马力文 (1964—), 女, 北京市人, 高级工程师, 从事农业气象研究与业务。E-mail: Ma_liwen@163.com。

通信作者: 刘 静 (1964—), 男, 北京市人, 正研级高级工程师, 从事气候变化影响、农业气候资源研究。E-mail: Ahmd_liujing@163.com。

厄尔尼诺现象造成赤道太平洋海温异常,直接影响热带太平洋地区的气候变化,也对其它地区的区域气候乃至全球大气环流的异常都有重要作用^[1]。中国位于东亚季风区,东亚夏季风和冬季风的异常直接导致中国气候的异常^[2-3],厄尔尼诺通过大气环流以“遥相关”的形式影响东亚季风系统,对气温、降水造成显著影响^[4]。气温、降水是农作物赖以生存的重要因素,气温和降水异常可导致农业生态环境的改变,对农业有重要影响^[5-6]。

国内外对 ENSO 导致气候异常、作物产量丰歉关注已久。JN Ferris 分析了 Enso 对全球作物产量的影响^[7]。S Yokoyama 研究了历年 El Nino 对亚洲和太平洋地区粮食作物产量的影响^[8]。SA Mauget、DR Upchurch 研究了 ENSO 与美国中西部大平原的气候和农业的关系^[9]。JW Hansen、A Irmak、JW Jones 研究了 ENSO 对佛罗里达州作物产量的影响^[10]。陶福祿、Masayuki、Yokozawa 等分析了中国农业生产与东亚季风和 EL NINO 的关系^[11]。Adams RM, Houston LL, McCarl BA 等通过墨西哥农业与 ENSO 的关系建立了干旱早期预警模型^[12]。

厄尔尼诺不仅影响中低纬度的气候,引起华南干旱^[13],也对全国乃至青藏高原的气候产生影响^[14]。曹蓉研究了东北夏季降水与大气环流和太平洋海温的关系^[15]。王敬方、吴国雄、胡娜娜发现厄尔尼诺现象发生后,我国东北容易出现持续性冷夏^[16]和干旱^[17]。李恩菊、赵景波发现山东省在厄尔尼诺年气温升高,降水减少,容易出现干旱^[18]。山西雁北地区厄尔尼诺年气温偏低,与黄土高原区增温趋势相反,旱灾加重^[19],但在厄尔尼诺发生次年降水偏多^[20-21]。内蒙古在厄尔尼诺发生年降水减少,出现大旱、特旱的概率高^[22]。西北地区东部厄尔尼诺发生年夏季降水减少,秋季降水增多^[23]。陈朝基发现甘肃 1950—2000 年农作物受旱面积与厄尔尼诺和拉尼娜密切相关^[24]。雷洽平认为 ENSO 是影响陕西农业干旱灾害的影响因子^[25],厄尔尼诺发生当年秋季至次年春季易出现连旱,次年秋季降水较多,次年夏粮产量偏歉的概率增大,秋粮容易丰产^[26]。程相坤、徐东进、曾国良等发现 EL NINO、LA NINA 可导致叶尔羌河流域出现枯水年和丰水年^[27]。白庆梅等认为厄尔尼诺年由于西风减弱和印度季风增强,输送到干旱/半干旱区的水汽更多,冬季降水比常年偏多有共性^[28]。与宁夏毗邻的毛乌素沙地在厄尔尼诺年降水减少,但次年降水增加^[29]。周双燕将 NINO 因子引入重庆北碚柑橘旱情预警模型,实现了干旱早期预警^[30]。

宁夏处在我国东部季风区和西北干旱区的过渡地带,受冬季风影响大且时间长,夏季风的强弱影响汛期降水的多寡,影响农业生产,对雨水依赖性极强的中南部山区农业生产更是受气候异常的影响。上述大多数文献集中在 ENSO 对当地气候的影响和预测上,对农作物产量的影响研究相对薄弱,特别是缺乏针对宁夏旱作农业区的影响研究。自 2014 年开始的厄尔尼诺事件持续了 20 个月以上,造成 2016 年宁夏南部山区玉米、马铃薯大幅减产。了解厄尔尼诺对宁夏农业气候资源及农作物产量影响是当地政府制定相应对策的迫切需求。本文根据 1961 年以来发生的典型厄尔尼诺年份气象要素、农业气候资源和产量的动态距平,探讨了厄尔尼诺对宁夏中南部山区气候要素、农业气候资源以及粮食作物产量的影响,可为农业生产趋利避害、科学决策提供依据。

1 资料和方法

1.1 厄尔尼诺影响年份、指数及程度

国家气候中心在业务上以赤道太平洋综合区连续 6 个月海温距平是否超过 0.5°C 或连续 5 个月累积距平超过 4.0°C 作为厄尔尼诺发生的标准(均允许有 1 个月的间断)。按此标准,1961—2012 年共发生 12 次厄尔尼诺事件,我们将发生年份、生长季、SSTA 峰值、累计值、二者乘积及程度列于表 1,便于资料年代选取和程度评价。气象资料选自宁夏中南部山区各气象观测站 1961—2014 年地面逐日气象观测资料,产量资料选自宁夏调查总队 1961—2014 年统计年鉴中各市县小麦、玉米和马铃薯播种面积和产量数据。

根据表 1,将赤道 3.4 区 SSTA 指数的峰值和正距平 0.5°C 的累计值相乘表示海温异常的强度,划分厄尔尼诺的强度(图 1)。可看出,1997—1998 年、1982—1983 年为极强,1987—1988 年为强,1965—1966 年、1972—1973 年、1991—1992 年、2002—2003 年和 2009—2010 年为中度,其余年份强度较弱。

1.2 气候资料趋势分离

以往在分析厄尔尼诺对气候的影响时,一般以发生厄尔尼诺当年和次年气候要素与多年平均值进行比较,以距平值作为评价指标。分析发现,由于受气候变暖的影响,宁夏南部山区冬季气温逐年上升,气候倾向率 $0.4^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ (图 2a),在 1992 年以前的厄尔尼诺发生年份冬季平均气温均为负距平,之后均为正距平,与观测到的暖冬等事实有出入,用当年气温与 30 年平均值的距平很难客观评价厄尔尼诺的影响(图 2b)。

表 1 1961—2012 年历次厄尔尼诺事件发生时间、程度及生长季(摘自国家气候中心)

Table 1 The initial and end date of El Nino occurrence, SSTA3.4, the degree and the next growing season in 1961—2012.
(From the CMA national climate center)

发生时间 Occurrence time		发生当年冬季 The winter of that year	发生次年 生长季 The growing season following year	SSTA3.4			程度 Degree
开始 Start	结束 End			峰值 Peak value	累计 Cumulative	乘积 Product	
1963 年 7 月 July 1963	1963 年 12 月 December 1963	1963—1964	1964	0.6	2.9	1.74	1
1965 年 6 月 June 1965	1966 年 2 月 February 1966	1965—1966	1966	1.1	7.5	8.25	3
1968 年 12 月 December 1968	1969 年 6 月 June 1969	1968—1969	1969	0.9	4.5	4.05	2
1972 年 4 月 April 1972	1973 年 2 月 February 1973	1972—1973	1973	1.6	12.1	19.36	3
1982 年 5 月 May 1982	1983 年 8 月 August 1983	1982—1983	1984	2.2	20.4	44.88	5
1986 年 10 月 October 1986	1988 年 1 月 January 1988	1987—1988	1988	1.3	15.4	20.02	4
1991 年 5 月 May 1991	1992 年 5 月 May 1992	1991—1992	1992	1.2	11	13.2	3
1994 年 10 月 October 1994	1995 年 2 月 February 1995	1994—1995	1995	1	4.1	4.1	2
1997 年 4 月 April 1997	1998 年 5 月 May 1998	1997—1998	1998	2.5	23.5	58.75	5
2002 年 6 月 June 2002	2003 年 2 月 February 2003	2002—2003	2003	1.3	6.7	8.71	3
2006 年 8 月 August 2006	2007 年 1 月 January 2007	2006—2007	2007	1.1	5.2	5.72	2
2009 年 6 月 June 2009	2010 年 4 月 April 2010	2009—2010	2010	1.3	9.2	11.96	3

注:程度按照 SSTA 峰值与累计值的乘积分级标准,1 为极弱,2 为弱,3 为中,4 为强,5 为极强。

Note: according to the level of the SSTA peak value and the cumulative value of the product classification standards, 1 is extremely weak, the other is weak, the 3 is the middle, the 4 is the strong and the 5 is very strong.

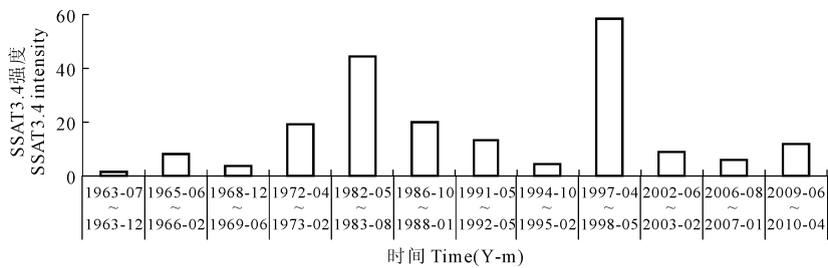


图 1 厄尔尼诺年 3.4 区 SSTA 强度

Fig. 1 The initial and end date of El Nino occurrence, multiply SSTA in 1961—2012

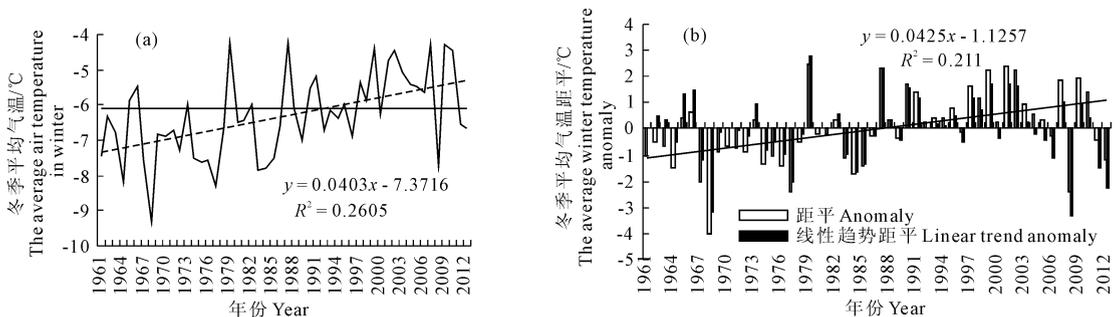


图 2 南部山区冬季平均气温年际变化与线性趋势拟合

Fig. 2 The annual variations and linear trend of winter average temperature in the southern mountainous region

为消除气候变暖的干扰,得到厄尔尼诺对气温、降水影响的真实情况,对 1961—2012 年间气温进行线性趋势分离,代表气候变化的系统增温作用,以平均气温与当年气温趋势值的离差作为当年气温的动态距平值,滤除了气候变化本身对温度的影响,使厄尔尼诺对气温的真实影响凸显出来(图 2b)。

设气温多年序列为 T ,可以把 T 分解为时间趋势项 T_t 和当年气候波动项 T_w ,即:

$$T = T_t + T_w \quad (1)$$

T_t 是时间 t 的函数,反映了气候变化对温度的影响,称为趋势气温,可用线性、非线性、滑动平均或者周期函数等描述,即:

$$T_t = f(t) \quad (2)$$

因此,逐年气候波动 T_w 可被分离出来:

$$T_w = T - f(t) \quad (3)$$

厄尔尼诺发生当年、次年气温动态距平可用(3) 求算,如果大部分样本倾向正距平,证明厄尔尼诺造成升温。如果 $f(t)$ 为不随时间而变的常数,则 $f(t)$ 转换为温度序列的均值,即:

$$f(t) = (\sum T_i) / n \quad (4)$$

此时 T_w 为传统距平法得到的距平值,是本文动态距平法的一种特例。因此,在一个数据序列中,如果该数据序列随着时间呈现增减趋势,可采用动态距平法客观反映序列的波动;当该数据序列不随时间出现趋势变化时,才能采用距平法反映序列的波

动。

1.3 产量趋势分离

农作物产量序列受当年气候条件影响,也受生产力水平、农业技术进步影响,产量呈逐步上升趋势。一般把产量序列 Y 分解为随品种改良、农业技术进步逐年上升的趋势产量 Y_t 和当年气象条件影响的气象产量 Y_w ,即:

$$Y = Y_t + Y_w + \epsilon \quad (5)$$

ϵ 为随机影响,如发生病虫害、洪涝等偶发性灾害,难以用气象因素表示的产量干扰项。本文认为, Y_t 不仅包含品种、管理、肥力等农业技术进步造成的产量随时间增长的趋势,也包含了气候变化造成的产量单向增减趋势。因此,在分析厄尔尼诺对作物产量的影响时,对 1961—2014 年各市县小麦、水稻、玉米和马铃薯进行趋势产量分离,获得气象产量(图 3)。其气象产量 Y_w 除了滤除农业技术进步对产量的影响外,也滤除了气候变化对产量的系统影响,可反映厄尔尼诺发生次年气象条件本身的变化对产量的影响程度,也相当于产量动态距平法。由于时间跨度大,产量基数前后相差好几倍,采用相对气象产量可以消除产量水平对增减产幅度的影响,即:

$$Y_{RW} = \frac{Y - Y_t}{Y_t} \times 100 \quad (6)$$

式中, Y_{RW} 为相对气象产量; Y 为产量; Y_t 为趋势产量。

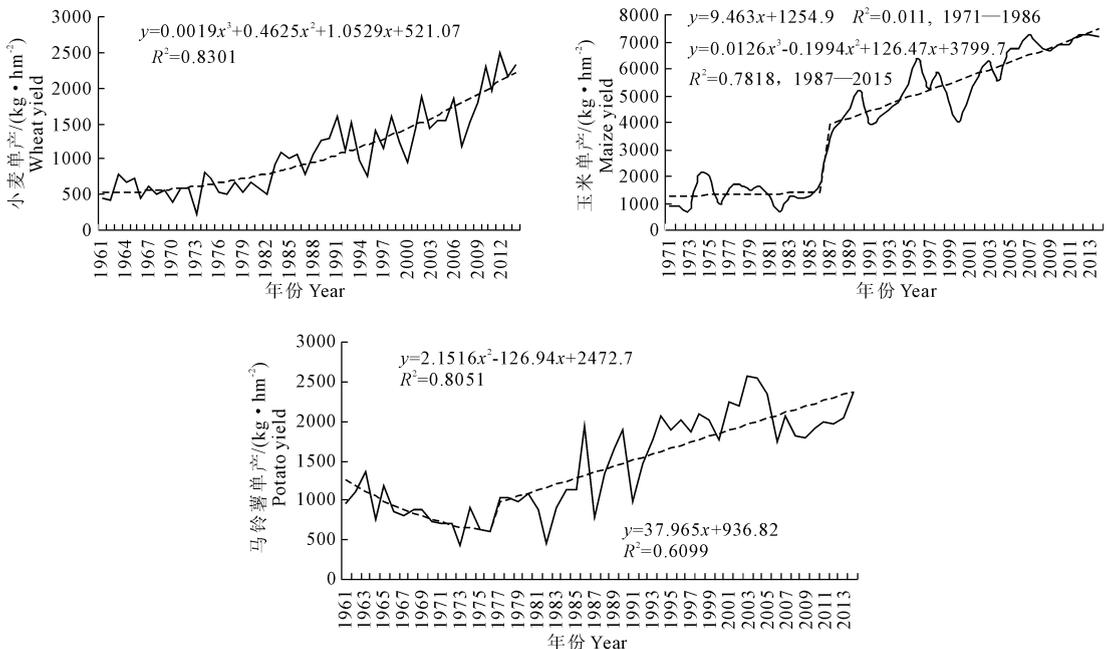


图 3 宁夏山区小麦、玉米和马铃薯单产趋势拟合

Fig.3 The yield trends of wheat, rice, corn and potato in Ningxia

2 结 果

2.1 厄尔尼诺事件对气温的影响

2.1.1 暖冬的概率加大 冬季风强弱是导致我国冬季冷暖变化的直接原因,厄尔尼诺造成赤道东太平洋海温持续偏高,冬季风强度偏弱,常常导致我国暖冬^[2]。采用趋势温度分离的动态气温距平发现,宁夏在厄尔尼诺发生的 12 年中,中南部山区当年冬季平均气温偏高的有 6 年,其中,异常偏高的年份中部干旱带有 4 年,南部山区有 5 年;冬季平均最低气温偏高的年份,中部干旱带有 8 年,南部山区有 7 年,暖冬几率占 58.3% 以上;12 年中,中部干旱带出

现冷冬的只有 1964、1983 年,南部山区只有 1964、1983 和 1992 年出现异常低温,冷冬概率在 25% 以下(图 4)。

2.1.2 作物生长季气温偏低 对宁夏中南部山区 1961—2012 年逐月气象资料进行线性趋势拟合,以厄尔尼诺发生次年 4—9 月逐月趋势离差评价宁夏中南部山区气温的变化(图 5),发现厄尔尼诺次年各月气温负距平居多,特别是 1984、1988、1992 和 1995 年,中部干旱带和南部山区大多为负距平。按照 12 次厄尔尼诺发生次年逐月平均动态距平来看,气温偏低出现在 6、7、8 月份,整个夏季偏低明显,5 月、9 月偏低不明显,4 月份气温偏高(图 6)。

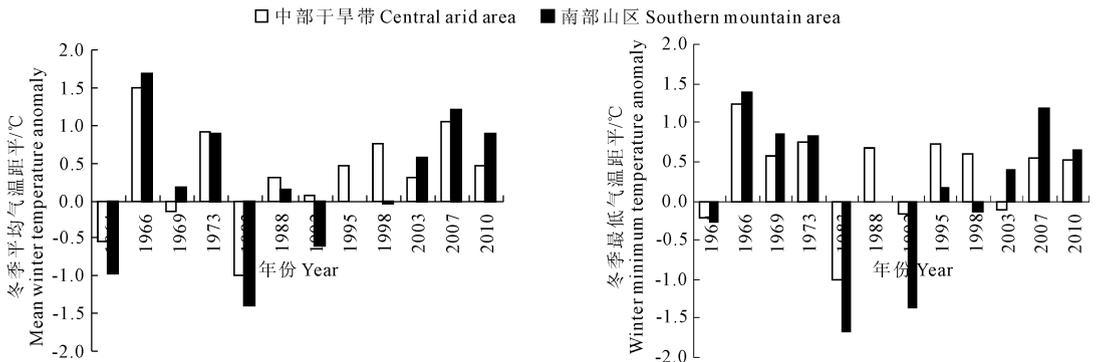


图 4 厄尔尼诺发生年冬季平均气温(左)和最低气温(右)的动态距平

Fig. 4 Dynamic difference of winter average (left) and minimum temperature (right) El Niño occurred

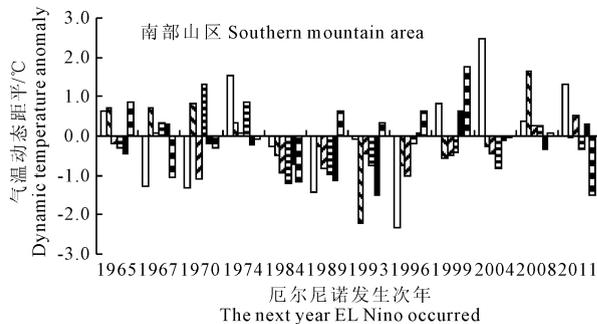
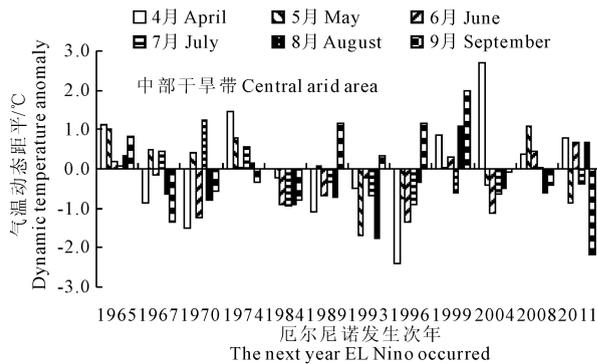


图 5 厄尔尼诺发生次年 4—9 月平均气温动态距平

Fig. 5 The average temperature dynamic difference from April to September the following year El Niño occurred

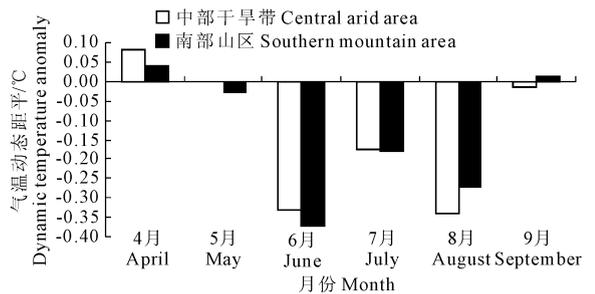


图 6 厄尔尼诺发生次年逐月平均气温动态距平多年平均

Fig. 6 The multi-year average dynamic difference of monthly average temperature the following year El Niño occurred

2.1.3 作物生长季热量资源减少 厄尔尼诺发生次年,我区中南部作物生长季(5—9 月)不同界限温度的积温均呈减少趋势,中部干旱带 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 活动积温比常年减少 35°C d 以内,南部山区 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温减少 $50 \sim 80^{\circ}\text{C d}$,即厄尔尼诺使高海拔地区 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温明显减少,造成热量强度不足,影响玉米成熟(图 7)。

2.2 厄尔尼诺对降水的影响

厄尔尼诺发生次年,中部干旱带 4—5 月份降水比常年同期偏多,6 月、8 月和 9 月偏少,7 月持平;

南部山区 4—5 月份降水与其他年份无差异,与常年相比持平,6—8 月份降水均比常年同期偏少,尤以 8 月份偏少为巨,9 月份降水偏多(图 8c)。

从各站分布来看,作物播种至出苗期(4—5 月份),中部干旱带各站降水均偏多,南部山区除泾源偏多外,其余均在均值附近;作物营养生长期(6 月份),中南部山区各站降水均偏少,降水一致性偏

少趋势明显;作物抽穗扬花期间(7 份),韦州、兴仁、六盘山降水偏多,其他地区均偏少;作物灌浆期间(8 月份),中部干旱带盐池、麻黄山降水偏多,其他地区偏少,南部山区各站一致明显偏少;作物灌浆成熟期间(9 月份),除盐池降水略偏多外,中部干旱带其他地区降水偏少;南部山区除西吉略偏少外,其余各站降水偏多(图 8a、图 8b)。

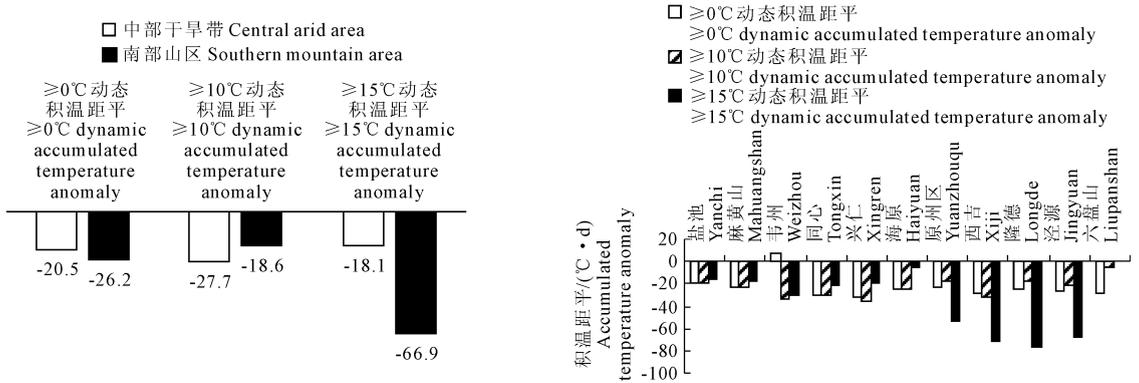


图 7 厄尔尼诺发生次年中南部(左)及各县(右)5—9 月不同界限温度积温动态距平

Fig. 7 The accumulated thermal dynamic difference of each limited temperature from 5 to 9 the following year El Nino occurred on central and south region (left) and counties (right)

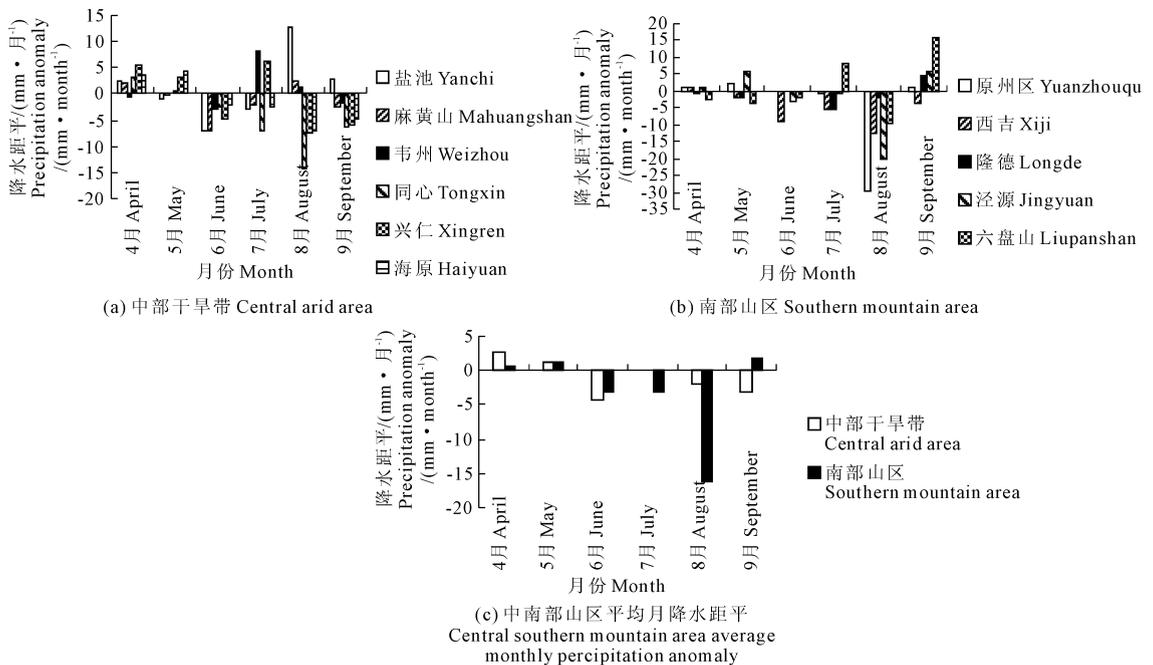


图 8 宁夏厄尔尼诺发生次年作物生育期间降水距平逐月变化特征

Fig. 8 The monthly precipitation difference variation during the following year El Nino occurred in Ningxia

2.3 厄尔尼诺对日照的影响

分析历次厄尔尼诺发生次年逐月日照时数距平发现,厄尔尼诺发生次年 6 月、8 月日照显著减少,5 月、9 月日照略偏多,7 月与历年持平,中部干旱带和南部山区日照变化基本相似(图 9)。

2.4 厄尔尼诺对作物产量的影响

比较厄尔尼诺发生当年、次年相对气象产量的增减幅度,发现厄尔尼诺发生当年小麦、玉米和马铃薯均表现减产,小麦减产幅度最大。厄尔尼诺发生次年山区三大作物均表现增产,山区冬小麦、玉米和

马铃薯单产 12 次过程平均增产幅度分别为 8.9%、7.8%和 8.4%(图 10a)。自 2014 年开始的严重厄尔尼诺持续到 2016 年,山区玉米、马铃薯因 2016 年 6—8 月份的严重干旱而显著减产。

以单产增减 5% 作为丰、平、歉年分型标准,分析 12 次厄尔尼诺发生次年 3 大作物增产、平产和减产所占比例,发现小麦、马铃薯增产年份多,玉米增减产年数相同,呈两极化分布,可能与降水出现时段有关,如大降水出现在玉米抽雄吐丝期,容易出现受精障碍,影响结实率,反而对增产不利,但如出现在大喇叭口期,旱作玉米更容易显著增产(图 10b)。

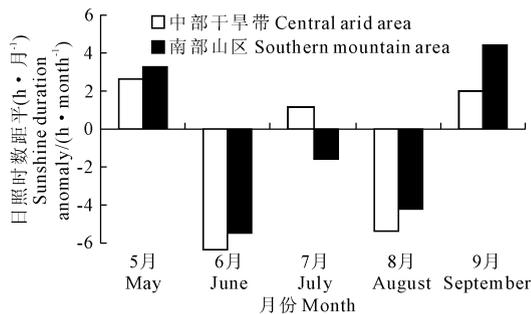
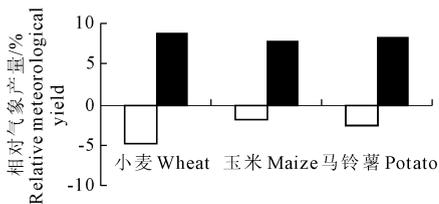
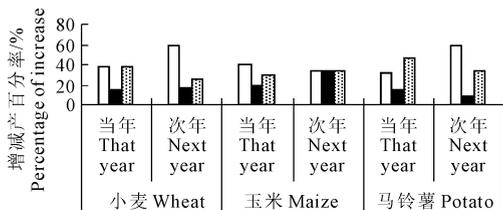


图 9 宁夏发生厄尔尼诺的次年作物生育期间逐月日照距平
Fig.9 Monthly sunshine hours during growing season the next year El Nino occurred in Ningxia



(a) 厄尔尼诺结束年和次年产量平均增幅
El Nino year end and the average annual output growth



(b) 厄尔尼诺当年、次年作物增减产年份占比
El Nino year, the following year crop yield reduction

图 10 厄尔尼诺发生的当年、次年作物单产增减幅(左)及增减产年份所占比例(右)

Fig.10 The average crop relative climatic yields the following year of El Nino occurred (left) and the percentage of increase or decrease years (right)

3 结 论

厄尔尼诺现象与宁夏气候关系比较密切,厄尔尼诺发生当年冬季和次年作物生长季,气温、降水时空分布发生一定的改变,从而对农业产生了一定的影响,归纳如下:

1) 厄尔尼诺造成宁夏冬季气温偏高,形成暖冬的概率大,降低极端寒冷天气的持续时间和程度,有利于减少冬季设施农业生产能源消耗,对设施农业生产十分有利。

2) 厄尔尼诺发生年份,气温偏高由冬季可以延伸到春季,但夏季平均气温明显偏低。中南部山区作物生长季(5—9月) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 活动积温均呈减少趋势,中部干旱带减少相对较少,南部山区减少较多,特别是 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温减少明显,这些高海拔地区热量强度本身不足,厄尔尼诺造成热量强度更不足,影响玉米成熟。

3) 厄尔尼诺发生次年,宁夏中部干旱带春季降水偏多,有利于保障春播和苗期作物生长,但夏季、秋季降水偏少。南部山区春季、秋季降水偏多,夏季降水偏少,特别是作物开花、灌浆初期降水偏少,有利于玉米、马铃薯生长,但灌浆中后期、成熟期降水偏多,容易引起马铃薯晚疫病等病害。

4) 厄尔尼诺对宁夏粮食作物产量有一定影响,厄尔尼诺发生次年山区冬小麦、玉米和马铃薯均显著增产。

本文针对 2016 年发生厄尔尼诺后对 2017 年产量预估的需求,初步分析了厄尔尼诺对宁夏南部山区农业气象条件和作物产量的影响,但未分析拉尼娜年份对山区农业的影响。今后可将两者结合起来,以 NINO3、NINO4、NINO3.4 区 SSTA 逐月、3 月滑动平均值与小麦、玉米和马铃薯的相对气象产量进行相关分析,也可结合热带印度洋海温、南方涛动(SOI)等研究造成产量变化的海温指数和代表区域,更进一步研究海温异常对宁夏农业的影响,为产量年景丰歉预测提供依据。

参 考 文 献:

[1] 孙永罡,陈久康,范玉华.北半球冬季环流异常对我国东北夏季长期天气过程的影响[J].南京气象学院学报,1994,17(2):153-158.

[2] 王盘兴,徐建军,许应龙.季风区环流季节变化及其在 El Nino 年的异常[J].应用气象学报,1995,6(4):407-413.

[3] 陶诗言,张庆云.亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J].大气科学,1998,22(4):399-407.

[4] 龚道溢,王绍武. ENSO 对中国四季降水的影响[J].自然灾害学报,1998,7(4):44-52.

[5] 于沪宁,江爱良.厄尔尼诺与全球趋暖灾害骤增对农业持续发

- 展的影响[J].地理科学进展,2000,19(3):227-236.
- [6] 郑冬晓,杨晓光. ENSO 对全球及中国农业气象灾害和粮食产量影响研究进展[J]. 气象与环境科学,2014,37(4):90-101.
- [7] Ferris J N. An analysis of the impact of enso (el nino/southern oscillation) on global crop yields[J]. Staff Papers, 1999,81(5):1309.
- [8] Yokoyama S. Historical occurrence of El Nino and its impact on food crop production at a regional level in Asia and the Pacific[J]. Radiology, 2006,240(2):369-379.
- [9] Mauget S A, Upchurch D R. El Nino and La Nina related climate and agricultural impacts over the Great Plains and Midwest[J]. Journal of Production Agriculture, 1999,12(2):203-215.
- [10] Hansen J W, Irmak A, Jones J W. El Nino-southern oscillation influences on florida crop yields[J]. Annual Proceedings Soil & Crop Science Society of Florida, 1998,57(85):12-16.
- [11] Fulu Tao, Masayuki Yokozawa, Zhao Zhang, et al. Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asian summer monsoon and El Niño Southern Oscillation[J]. Climate Research, 2004,28:23-30.
- [12] Adams R M, Houston L L, McCarl B A, et al. The benefits to Mexican agriculture of an El Niño-southern oscillation (ENSO) early warning[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003,115(3):183-194.
- [13] 袁中友.厄尔尼诺/拉尼娜事件与广东省干旱关系探讨[D]. 广州:华南师范大学,2004.
- [14] 丛晓明.近 40 a 青藏高原主要气象灾害对 ENSO 的响应[D]. 西宁:青海师范大学,2012.
- [15] 曹蓉.东北夏季降水的基本特征及其与大气环流和太平洋海温的关系[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [16] 王敬方,吴国雄.持续性东北冷夏的变化规律及相关特征[J]. 大气科学,1997,21(5):523-532.
- [17] 胡娜娜.东北三省旱涝时空演变及趋势判断[D].西安:陕西师范大学,2013:51-53.
- [18] 李恩菊,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对山东省气候的影响[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2010,38(3):80-84.
- [19] 祁子云,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对山西省北部地区气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(4):97-101.
- [20] 张鹏飞,赵景波.50 余年来厄尔尼诺-拉尼娜(El Nino/La Nina)事件对山西省气候影响分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):74-78.
- [21] 高惠珍,安学军,刘亚萍.厄尔尼诺现象对山西省旱涝的影响分析[J].山西水利科技,1998,(4):13-15.
- [22] 白小娟,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对内蒙古自治区气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(6):245-249.
- [23] 张存杰,高学杰,赵红岩.全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J].冰川冻土,2003,25(2):157-164.
- [24] 陈朝基.1950—2000 年甘肃农作物受旱面积与厄尔尼诺和拉尼娜的关系[J].安徽农业科学,2011,39(1):214-216.
- [25] 雷治平.陕西农业干旱灾害评估及影响因子分析研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [26] 景毅刚. ENSO 现象和陕西省夏粮丰歉年景的关系[J].中国农业气象,2000,21(2):14-16.
- [27] 程相坤,徐东进,曾国良.叶尔羌河流域农业干旱分析[J].气象科技,1997,(2):40-43.
- [28] 白庆梅,田文寿,冯兆东,等.亚洲干旱/半干旱区降水与大洋暖池气候的相关特征研究[J].冰川冻土,2010,32(2):295-308.
- [29] 徐小玲,延军平.近 30 年毛乌素沙区的气候与厄尔尼诺/拉尼娜事件的相关分析[J].干旱区研究,2003,20(2):117-122.
- [30] 周双燕.重庆北碚柑橘旱情预警模型构建及应用[D].雅安:四川农业大学,2011.

(上接第 264 页)

- [25] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.
- [26] 王胜,田红,张存杰,等.安徽冬麦区 4 种干旱指数应用对比[J].气象科技,2015,43(2):295-301.
- [27] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.
- [28] 奚振邦,杨金楼,计仲孚,等.土壤有效水与化肥相互作用作用机理及其应用研究Ⅲ:不同土壤水势对甘蓝吸收土壤水分和养分的影响[J].植物营养与肥料学报,1996,2(1):32-38.
- [29] 宋艳玲,蔡雯悦,柳艳菊,等.我国西南地区干旱变化及其对贵州水稻产量的影响[J].应用气象学报,2014,25(5):550-558.
- [30] 杨若子,周广胜.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,2015,73(6):1141-1153.
- [31] 蔡菁菁,王春乙,张继权.东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价[J].气象学报,2013,71(5):976-986.
- [32] 杨秋珍,许明,李军.对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨[J].气象学报,2010,68(2):277-284.
- [33] 樊晓一,乔建平,陈永波.层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J].自然灾害学报,2004,13(1):72-76.
- [34] 武健伟,李锦荣,孙涛,等.锡林郭勒地区沙尘暴气候致灾因子危险性评价[J].2011,28(6):936-943.
- [35] 温华洋,田红,唐为安,等.安徽省冰雹气候特征及其致灾因子危险性区划[J].中国农业气象,2013,34(1):88-93.
- [36] 朱红蕊,于敏敏,姚俊英,等.黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J].灾害学,2012,27(2):96-99.
- [37] Yin Yuanyuan, Zhang Xingming, Lin Degen, et al. GEPIC - V - R model: A GIS - based tool for regional crop drought risk assessment [J]. Agriculture Water Management, 2014,144:107-119.