

山东省气候变化及其对冬小麦—夏玉米产量的影响

刘 昌, 张红日, 赵相伟, 李明杰

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘 要:利用 1983—2015 年山东省 34 个气象站点的气象数据,通过线性回归分析山东省 1983—2015 年气候变化特征;基于 Matlab, Surfer 绘制年平均气温、降水量及日照时数的小波系数实部等值线图进行气候周期变化的分析;利用 HP 滤波法提取农作物产量中的气候产量,并采用 Lobell 非线性回归模型和敏感性分析法探究了气候变化对山东省冬小麦、夏玉米单产的影响。结果表明:1983—2015 年山东省年平均气温和降水整体呈现波动上升的趋势,日照时数呈现波动下降的趋势;气候变化的多时间尺度趋势分析显示,山东省气温在一定时间内将持续升高,降水量在经历短暂的增加之后将转入减少的阶段,日照时数会延续目前的下降趋势;1983—2015 年山东省冬小麦、夏玉米单产及冬小麦—夏玉米周年单产呈明显的上升趋势,但气候产量波动较大;平均气温、降水量、日照时数增加对冬小麦单产有促进作用,降水量增加对冬小麦增产影响最显著,降水量每增加 100 mm,冬小麦增产 5.76%。夏玉米对平均气温、最低气温、日照时数的增加表现为负效应,最高气温和降水量的增加有利于夏玉米增产。冬小麦—夏玉米周年单产对最高气温、最低气温的响应表现为负效应,降水量的增加能够小幅提升周年单产。

关键词:气候产量;小波分析;敏感性分析;冬小麦;夏玉米;山东省

中图分类号:P467; S512.1⁺1; S513

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0379-06

Climate Change and Its Effect on the Yields of Winter Wheat and Summer Corn in Shandong Province

LIU Chang, ZHANG Hongri, ZHAO Xiangwei, LI Mingjie

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: We analyzed the characteristics of climate change by linear regression analysis using the meteorological data of 34 weather stations in Shandong Province from 1983 to 2015. Based on Matlab and Surfer, the real-time contour maps of annual mean temperature, precipitation and sunshine hours were used to analyze the climatic cycle variation. The HP filter method was used to extract climate yields of crops, the Lobell non-linear regression model and sensitivity analysis were used to investigate the impact of climate change on the yields of winter wheat and summer maize in Shandong Province. The results show that the annual average temperature and precipitation in Shandong Province showed the fluctuating trend from 1983 to 2015, and the sunshine duration presented the fluctuating decline trend. Multi-time-scale trend analysis of climate change shows that the temperature in Shandong Province will continue to increase within a certain period of time, and the precipitation will turn to the decreasing stage after the brief increase. The sunshine hours will continue the current downward trend. From 1983 to 2015, the yields per unit area of winter wheat and summer corn, and annual yields per unit area of winter wheat-summer corn in Shandong Province showed the obvious rising trend, but the climatic yields fluctuated greatly. The increases of average temperature, precipitation and sunshine hours can promote the yield per unit area of winter wheat, and the increase of precipitation has the most significant influence on the yield increase of winter wheat. The increase of precipitation per 100 mm can increase the yield of winter wheat by 5.76%. The increases of average temperature, minimum temperature and sunshine hours have the negative effect on yield of summer corn, and the increases of maximum temperature and precipitation were beneficial to the increase of summer corn yield. The responses of annual yields of winter wheat and summer corn to maximum temperature and minimum temperature were negative,

收稿日期:2019-07-16

修回日期:2019-08-13

资助项目:国家自然科学基金“冬小麦生长过程对干旱胁迫的响应机制与灌溉模式优化研究”(41807170)

第一作者:刘昌(1994—),男,山东烟台人,硕士,主要从事气候变化研究。E-mail:liuchanglw@126.com

通信作者:张红日(1966—),女,山东烟台人,教授,主要从事地理环境演化与分析。E-mail:zhr941213@163.com

and the increase of precipitation could slightly improve the annual yield.

Keywords: climate yield; wavelet analysis; sensitivity analysis; winter wheat; summer maize; Shandong Province

在全球气候变暖的背景下,山东省气候产生了显著的变化,同时气温、降水和日照时数的时空格局分布也随之变化。农业作为我国国民经济发展的基础,对气候的变化具有很强的敏感性,气候变化对作物的生长和产量都将产生较大的影响^[1]。IPCC 第五次研究报告指出,未来平均气温还会持续升高,强降雨的强度和密度都将会上涨^[2],这也引起了国内外众多专家学者的关注。这不仅影响到农产品产量,还关系到国家粮食生产和粮食安全。

近些年,关于气候变化对农作物产量影响的研究有很多,Paul 等^[3]运用开顶式气室(OTC)方法验证了观测试验法在研究气候变化对农作物影响中的可行性。Easterling 等^[4]在 EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator)模型中加入 CO₂对作物光合作用和蒸散作用的影响,探讨美国 MINK (Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas)气候变化对地区作物影响。王馥棠^[5]利用 3 种大气环流模式预测未来气候情境下,农作物减产的主要原因是大气中二氧化碳浓度倍增时,气温升高、农作物发育速度加快以及生育期缩短。Murat Isik 等^[6]采用随机生产函数的计量经济模型,利用生产函数参数及其弹性的估计来分析预测的气候变化对农业的影响,结果表明,气候变化对平均作物产量的影响不大,但会大大减少大部分作物的方差和协方差,这些结果影响到作物之间的农业用地分配和作物生产组合。黄维等^[7]利用已有的气象和产量数据,揭示气候因子对农作物产量的影响,得出在一定幅度内气温升高和降水量增加对中国农作物产量具有正效应。张洁等^[8]在研究河西走廊中部 30 a 来的气候变化特征及其对主要农作物生育期和产量的影响时发现,气温、降水等气候因子均不用程度影响春小麦、玉米的生育期及产量,且地域性差异明显。以往的研究多集中在较大区域上的定性研究上,作物模型法本身具有一定的局限性,而采用历史观测资料统计分析法研究较大区域的气候变化情况又无法真实反映省份的气候变化情况,很难明确省级行政单元气候变化对农作物产量的影响,为确保粮食安全提出具有针对性的建议。

山东省地处我国东部沿海,属温带季风性气候,降水集中,雨热同期,光照资源充足,热量条件能够满足农作物一年两作的需要,且全年无霜期较长,是我国的粮食主产区之一,冬小麦—夏玉米是其主要复种方式^[9]。作为我国的一个产粮大省,研究山东省气候

变化对冬小麦夏玉米产量的影响具有重要意义。故本文基于现有历史数据,采用线性回归、非线性回归及敏感性分析等方法定量研究山东省气候变化及其对冬小麦、夏玉米产量的影响,以期对山东省冬小麦—夏玉米种植模式的管理调整、种植结构的合理布局以及应对气候变化提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究所需气象数据包括研究区内 34 个国家基准气象站(图 1)1983—2015 年平均气温、降水量和日照时数的月值数据,气象数据由中国气象数据网国家气象科学数据共享服务平台提供。1983—2015 年山东省冬小麦、夏玉米的产量数据来源于《山东统计年鉴》的统计数据。

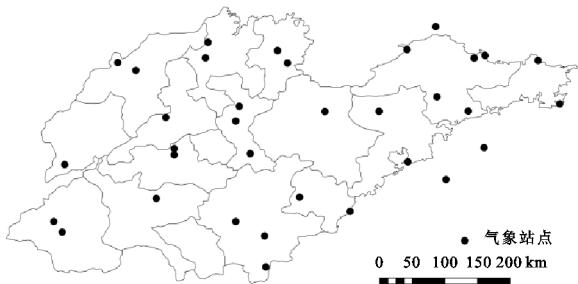


图 1 气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 小波分析 气候变化过程通常表现为一种周期性波动,其变化造成的损坏也随之波动^[10]。具有时—频多分辨功能的小波分析(Wavelet Analysis)能够更好的揭示时间序列问题。Morlet 小波函数的一般形式见公式(1)。

$$\varphi(t)=e^{ict}e^{-t^2/2} \tag{1}$$

式中: c 为常数。选择好合适的基小波函数后,通过小波变换获得小波系数,利用 Surfer 软件绘制小波系数等值线图。

1.2.2 HP 滤波法分离气候产量 HP 滤波法是一种状态空间中分解时间序列的方法,其假设产出是由长期趋势分量和短期波动分量两部分组成^[11]。从时间变化角度来看,农作物产量可以分为长时间尺度的平稳变化分量和短时间尺度偏离时间变化的显著波动分量。因此农作物的产量 y 可分解为趋势产量 y_t 、气候产量 y_w 和随机产量 Δy ,即:

$$y=y_t+y_w+\Delta y \tag{2}$$

由于 Δy 为随机噪音,对农作物产量的影响无规律可循,不能用某种固定的函数来定量估计并列入模型,故忽略不计。因此认为农作物产量由趋势产量(y_t)和气候产量(y_w)两部分组成,即:

$$y = y_t + y_w \quad (3)$$

因此,可以采用 HP 滤波法将其分离。

1.2.3 Lobell 多元非线性回归模型 Lobell 多元非线性回归模型考虑了气温、降水量、日照时数、技术进步以及政策等因子,其中技术进步所带来的产量增加的趋势以年份的线性趋势和二次趋势来代替。Lobell 多元非线性回归模型如下:

$$\ln Y = c + d_1 t + d_2 t^2 + \beta_1 T + \beta_2 P + \beta_3 S + \epsilon \quad (4)$$

式中: Y 是农作物的单产; c 为固定效应; d 是时间趋势效应; β 是自变量参数; T 表示生长期平均气温; P 表示生长期降水量; S 表示生长期日照时数; ϵ 为误差项。

2 结果与分析

2.1 1983—2015 年山东省气候变化

通过对山东省年平均气温趋势分析(图 2A)发现。1983—2015 年山东省年平均气温最低出现在 1985 年为 11.76℃,最高出现在 2007 年为 13.79℃,相差达 2.03℃。山东省年平均气温以较快速度增长,气候倾向率为 0.33℃/10 a。

从山东省降水量变化曲线(图 2B)可以看出,全省降水量在 448.52~981.77 mm 波动,但总体趋势是增加的,气候倾向率达到 19.4 mm/10 a。其中,降水最少的一年是出现在 2002 年,为 448.52 mm,降水最丰沛的一年是出现在 1990 年,为 981.77 mm。

图 2C 是山东省近 33 a 日照时数变化曲线图,日照时数最多和最少分别出现在 1997 年和 2007 年,分别为 2 745.07 h 和 2 187.46 h。通过线性倾向估计分析得出,山东省日照时数呈较快速度减少,气候倾向率为 -99.5 h/10 a。

2.2 气候变化的多时间尺度分析

2.2.1 年平均气温的多时间尺度分析 图 3A 为 1983—2015 年山东省年平均气温的小波系数实部等值线图,其中横坐标为年份,纵坐标为时间尺度。图中实线表示正相位,即实部大于 0,气温处于升高阶段;虚线表示负相位,即实部小于 0,气温正在降低阶段,等值线间隔为 0.1。近 33 a 来,山东省的气温变化的周期振荡较为明显,主要存在 4~8 a,10~16 a 的变化周期。其中 10~16 a 的周期振荡最明显,振荡强度最强,为第一主周期;4~8 a 为第二主周期。若以小波系数实部的零值点来划分冷暖阶段,山东省

近 33 a 平均气温在 10~16 a 尺度上大致经历了四次由冷转暖再由暖转冷的过程。

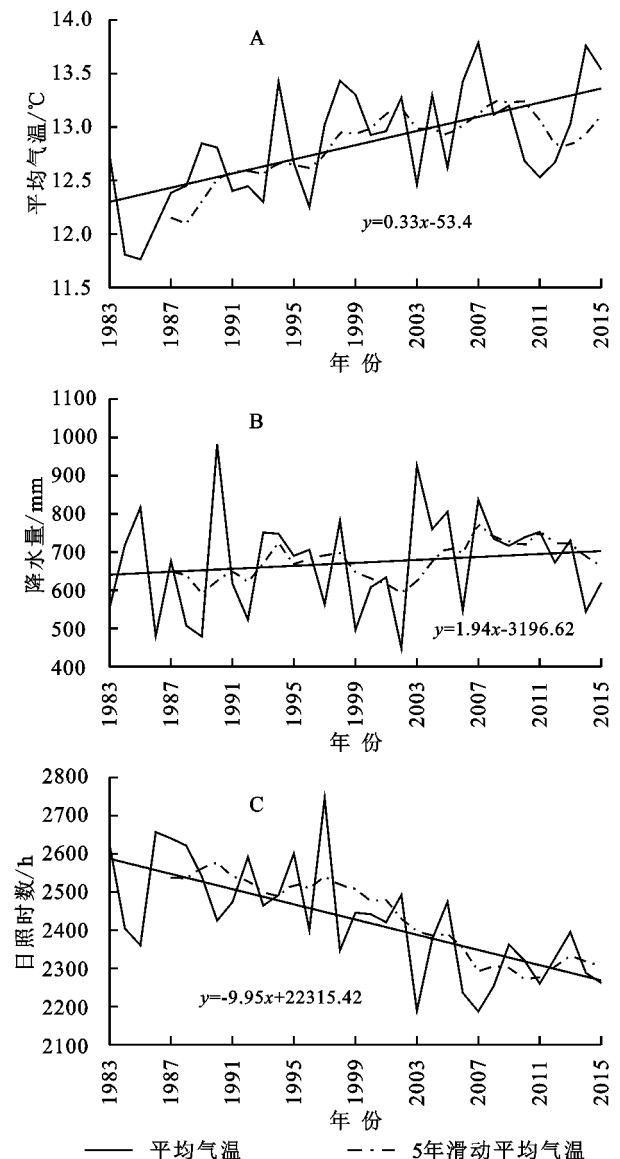


图 2 1983—2015 年山东省年平均气温、降水量、日照时数逐年变化过程

从图 3A 中还可以推断出未来山东省气温的演变趋势,可以看出,除去边界外,小波系数实部的正负中心几乎是成对出现,并且周期大致相同(10~16 a 尺度上约为 7.5 a)。因此,目前的暖期在一定时间内还将持续发展下去。

2.2.2 年平均降水量的多时间尺度分析 通过对 1983—2015 年山东省降水量的小波系数实部等值线图(图 3B)分析,可以看出,山东省近 33 a 降水量主要存在 4~5 a,6~8 a,10~13 a,13~16 a 的振荡周期。由小波方差图可以辨别出 13~16 a 振荡在各个阶段是最明显的,是第一主周期,其次是 6~8 a,为第二主周期,4~5 a 是第三主周期,10~13 a 是第四主周期。山东省降水量近 33 a 在 13~16 a 尺度上大致经历了

升降交替的准三次振荡,且在整个研究时段内表现非常稳定,具有全域性。因此从图 3B 中推断未来山东省降水量在经历短暂的增加之后将转入减少的阶段。

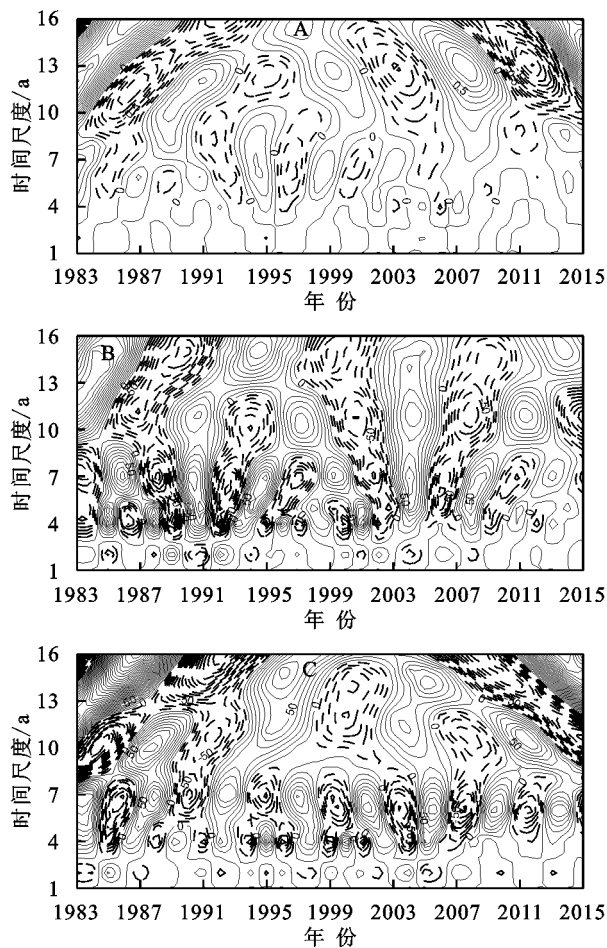


图 3 1983—2015 年山东省年平均气温、降水量和日照时数小波系数实部等值线

2.2.3 年平均日照时数的多时间尺度分析 由 1983—2015 年山东省日照时数的小波系数实部等值线图(图 3C)可以得出:这 33 a 山东省年平均日照时数主要存在 3~4 a, 6~8 a, 9~12 a 的变化周期。其中 9~12 a 尺度的周期振荡最明显,振荡强度最强; 3~4 a 尺度上的振荡周期主要存在于 2000 年以前; 6~8 a 尺度上的振荡周期在整个研究时段内表现稳定,且具有全域性。根据振荡强度最强的 9~12 a 尺度上小波系数实部振荡情况可以推测,山东省在未来一段时间内日照时数还将继续减少。

2.3 冬小麦、夏玉米产量变化分析

通过 HP 滤波法得到冬小麦和夏玉米的气候产量,通过其变化分析(图 4)发现,冬小麦、夏玉米的单产在 2005 年之前波动较大,而 2005 年之后产量比较稳定。冬小麦单产自 1983—1997 年一直保持较快速度增长;1997—2002 年遭遇较大减产,2002 年相比 1997 年减产 997 kg/hm²;2002—2015 年又恢复增产态势,2015 年冬小麦单产达到最高值 6 176 kg/hm²。

相对于冬小麦,夏玉米在 2005 年之前单产波动更大,单产呈现波动增长的趋势,其中 1997 年减产严重,相比 1996 年,减产达 1 499 kg/hm²;2005—2015 年玉米单产呈现平稳增产的态势。冬小麦—夏玉米周年单产同样在 2005 年之前波动较大,2002 年周年单产相比前一年减少 1 029 kg/hm²,2005 年之后平稳增长。

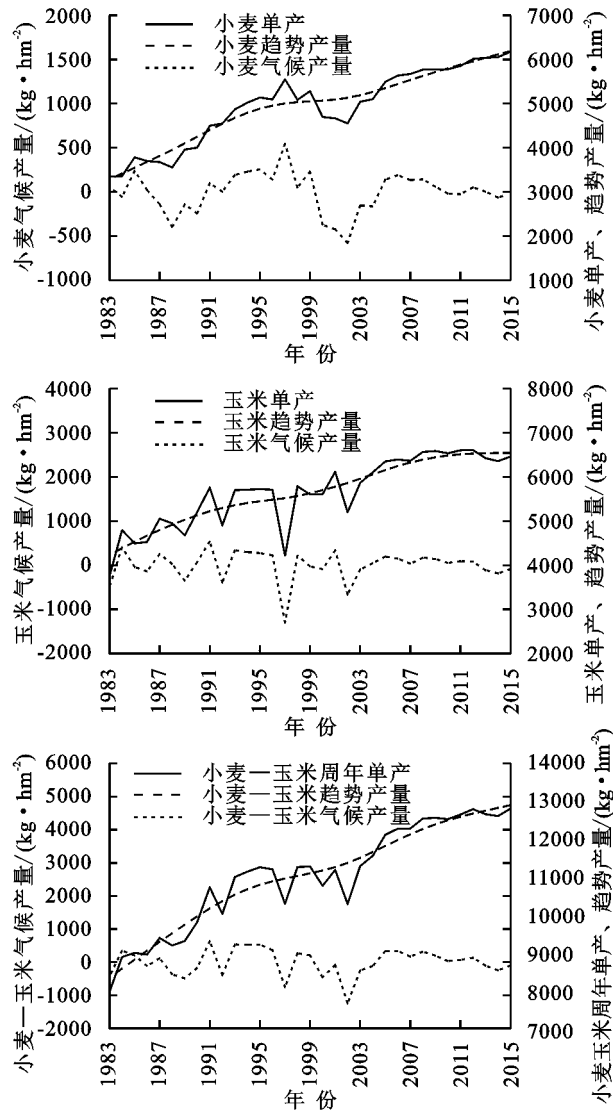


图 4 冬小麦—夏玉米单产、趋势产量以及气候产量年际变化

通过分析还可以看出,冬小麦、夏玉米以及周年单产的趋势产量都呈现上升趋势,与实际产量总体变化趋势相似,这是各种自然和社会因素综合作用的结果,其中社会因素占主导地位。冬小麦、夏玉米的气候产量波动较大,振荡幅度也非常明显,这主要是受其生长期各气候因素影响。山东省近 33 a 小麦气候产量在 -578.62~547.31 kg/hm² 之间波动变化,特别是 2005 年之前波动较大。夏玉米气候产量变化同样在 2005 年之前波动较大,在 -1 309.27~536.98 kg/hm² 之间波动变化。冬小麦—夏玉米周年气候产量在 -1 241.12~635.55 kg/hm² 之间波动变化,最小值出现在 2002 年。冬小麦、夏玉米以及冬小麦—夏玉米气

候产量在 2005 年之后都呈现振幅较小的波动下降。

图 5 是冬小麦、夏玉米的气候产量及其生长期气候因子的年际变化图。从图 5A 得知,冬小麦气候产量波动与其生长期平均气温、降水量、日照时数波动趋势都基本相同。平均气温、降水量的增加有利于小麦增产,日照时数的减少导致光照不足,不利于小麦进行光合作用,影响抽穗结实,不利于小麦的增产。

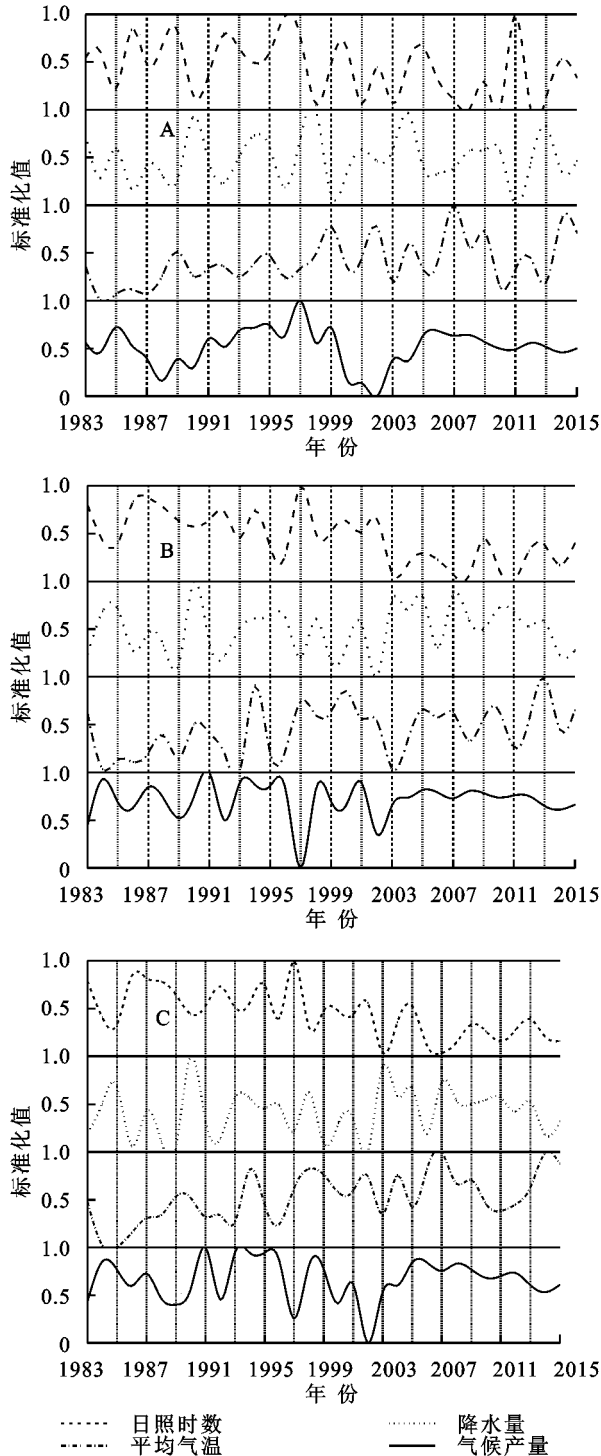


图 5 冬小麦—夏玉米气候产量及其生长期气候因子年际变化

从图 5B 得知,夏玉米气候产量变化与其生长期平均气温变化趋势大致相同,但步调不一致,与生长期降水量变化趋势相同,与日照时数变化趋势相反。夏玉米的生长需水较多,只有满足它对水分的要求才能获得高产。夏玉米是短日照植物,在短日照条件下可以正常开花结实,太阳光中的光谱成分对夏玉米影响较大,据研究白天以蓝色等短波光为主,玉米发育较慢,而早晨和傍晚以红色等长波光为主玉米发育较快。

图 5C 是冬小麦—夏玉米周年气候产量与气候因子年际变化的响应。气候产量波动仅与降水量波动趋势一致。不论是冬小麦还是夏玉米生长期降水量增加都有利于作物增产,而生长期平均气温增加有利于冬小麦增产,却导致夏玉米减产,日照时数对冬小麦和夏玉米产量影响同样如此。因此,平均气温和日照时数对冬小麦—夏玉米周年气候产量的影响并不明显。

2.4 冬小麦、夏玉米对气候变化的敏感性分析

农作物产量受多种因素影响,本研究利用 Lobell 多元非线性回归模型对山东省冬小麦、夏玉米单产及周年单产对气温、降水量和日照时数的敏感性进行分析,气温每升高 1℃、降水每增加 100 mm、日照时数每增加 100 h,冬小麦—夏玉米产量变化结果如图 6 所示。

平均气温升高对冬小麦、夏玉米单产的影响明显不同。冬小麦单产对平均气温升高表现为正响应,平均气温每升高 1℃,小麦增产 2.2%;最高气温和最低气温的升高对冬小麦的单产表示为负影响,但影响程度不大。夏玉米单产对平均气温和最低气温的升高表现为负响应,平均气温每升高 1℃,减产 1.83%,最低气温每升高 1℃,减产 2.69%,最高气温的升高对夏玉米单产的影响是正向的,每升高 1℃增产 2.8%。平均气温升高对山东省冬小麦—夏玉米周年单产仅有小幅促进作用,这主要是由于小麦增产和玉米减产相抵消。相比气温,降水量的增加对于冬小麦、夏玉米的增产效果较为明显。降水量每增加 100 mm,冬小麦增产达 5.76%,夏玉米增产达 3.36%,但是对山东省冬小麦—夏玉米周年单产的增产效果仅为 1.16%。日照时数每增加 100 h,冬小麦单产增加 3.33%,而夏玉米单产对日照时数增加表现为负响应,日照时数每增加 100 h,夏玉米减产 3.36%。日照时数增加会山东省冬小麦—夏玉米周年单产有小幅减产,但影响并不明显,这同样是由小麦增产和玉米减产相抵消造成。

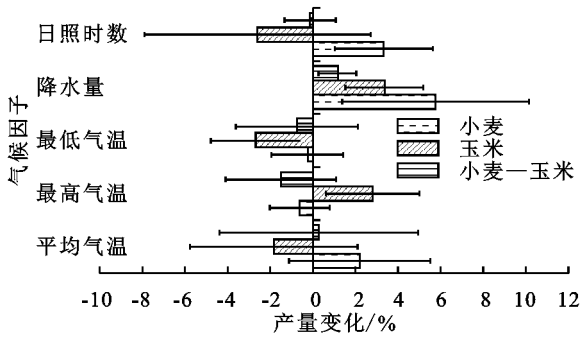


图6 山东省冬小麦—夏玉米对气温(+1℃)、降水量(+100 mm)和日照时数(+100 h)的敏感性分析

3 结论

(1) 1983—2015年山东省年平均气温、降水量呈上升趋势,但日照时数呈现下降的趋势。其中年平均气温以0.33℃/10a的速度上升,降水量的10a变化率为19.4 mm,日照时数以99.5 h/10a的速度减少。

(2) 气候变化的多时间尺度分析显示,年平均气温、降水量和日照时数都存在多时间尺度变化特征。1983—2015年山东省年平均气温主要存在4~8a, 10~16a的变化周期,其中在10~16a尺度上大致经历了4次由冷转暖再由暖转冷的过程,目前正处于暖期,这一趋势仍将持续发展。降水量主要存在4~5a, 6~8a, 10~13a, 13~16a的振荡周期,13~16a振荡在各个阶段是最明显的,是第一主周期。日照时数主要存在3~4a, 6~8a, 9~12a的变化周期,在9~12a尺度上显示日照时数减少的趋势将持续发展。

(3) 通过对产量变化分析发现,1983—2015年山东省冬小麦、夏玉米单产及冬小麦—夏玉米周年单产呈明显的上升趋势,但气候产量波动较大,呈波动下降的趋势,这主要是受生长期气候因子的影响。

(4) 敏感性分析显示,平均气温、降水量、日照时数的增加对冬小麦单产都有促进作用,其中降水量的增加对冬小麦的增产影响最显著,降水量每增加100 mm,冬小麦增产5.76%。夏玉米对平均气温、最低气温、日照时数的增加表现为负响应,而最高气温和降水量的增加均有利于夏玉米增产。冬小麦—夏玉米周年单产对最高气温、最低气温的响应表现为负效应,降水量的增加能够小幅提升周年单产。

全球气候变化以变暖为主要特征已得到各界学者的公认。山东省是中国气候变化的敏感区之一,农业气候资源也发生显著变化。

通过分析,3个气象因子对于冬小麦都存在正向相关性。因此在冬小麦成长期内,要保证水资源的及时供给,避免因干旱而造成的减产。并且在全球变暖的背景

下,气温的升高以及日照时数的增加对冬小麦都有正向的影响,起到增产的作用。而夏玉米对于降水和最高气温的敏感性较强。可见水对于农作物的重要性,这也就启发我们要加强水资源的保护及其利用,要加强基础灌溉设施的建设,进一步对接国家高标准农田建设的政策,实现早能灌、涝能排,有效改善农业生产条件,争取得到国家资金的支持,保证基本农田水利建设。

但是文章仍有不足之处,本文只研究了冬小麦、夏玉米整个生长期内的气候变化,对于其具体生育阶段的气候变化没有过多研究。另外气候变化导致的极端天气增加,灾害性事件频率和强度增加对农作物的影响也极为突出,这都是今后研究的重点方向。只有深刻认识气候变化特征,才能不断提高农业生产适应气候变化,抵御气候灾害的能力,保障国家粮食安全。

参考文献:

- [1] 蔡运龙.全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策[J].地理学报,1996,38(3):202-212.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [3] Leadley P W, Drake B G. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange[M] // Springer, Dordrecht: CO₂ and Biosphere, 1993.
- [4] Easterling W E, Rosenberg N J, Mc Kenney M S, et al. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂ [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 59(1/2): 17-34.
- [5] 王馥棠. CO₂ 浓度增加对植物生长和农业生产的影响[J].气象,1993,19(7):8-13.
- [6] Murat I, Stephen D. An analysis of the impact of climate change on crop yields and yield variability[J]. Applied Economics, 2006, 38(7): 835-844.
- [7] 黄维, 邓祥征, 何书金, 等. 中国气候变化对县域粮食产量影响的计量经济分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(6): 677-683.
- [8] 张洁, 白青华, 马鸿勇. 气候变化对河西走廊中部地区主要农作物的影响[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 303-308.
- [9] 靳建辉, 刘秀铭, 赵国永, 等. 全球气候变化大趋势与次级波动[J]. 亚热带资源与环境学报, 2012, 7(1): 40-46.
- [10] 廉丽姝. 山东省气候变化及农业自然灾害对粮食产量的影响[J]. 气象科技, 2005, 33(1): 73-76.
- [11] 薛晓萍, 张承旺, 张丽娟, 等. 区域农业生产脆弱性及干旱诊断分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 107-114.