

徐 敏,高 苹,徐经纬,等. 江苏省玉米气候资源的变化特征与未来气候情景预估[J]. 江苏农业科学,2014,42(10):95-100.

# 江苏省玉米气候资源的变化特征与未来气候情景预估

徐 敏<sup>1</sup>,高 苹<sup>1</sup>,徐经纬<sup>2</sup>,于庚康<sup>1</sup>,张力文<sup>1</sup>,王雪燕<sup>1</sup>

(1. 江苏省气象局,江苏南京 210008; 2. 南京信息工程大学大气科学学院,江苏南京 210044)

**摘要:**利用江苏省淮北地区 20 个气象台站 1961—2012 年的气象观测资料,统计分析了夏玉米生育期内光、温、水等气候资源的变化特征;利用区域气候模式 RegCM4 在代表性浓度路径(representative concentration pathways,RCP)为 4.5、8.5 排放情景下的预估数据,对淮北地区未来近 20 年的农业气候资源进行了预估。结果表明:近 52 年内, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  活动积温在各年间均在  $2\ 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上, $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  活动积温在各年间均在  $2\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,且热量资源充足,在 20 世纪 90 年代存在显著上升趋势;日照时数、太阳总辐射都存在显著下降趋势,线性倾向率分别达到了  $-4.8\text{ h/年}$ 、 $-7.5\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,2000 年之后明显低于气候平均值;降水量呈现“明显下降—平稳波动—快速上升”的特征;2014—2030 年,2 种气候情景下,光、温、水资源的年际波动都比较大;活动积温(个别年份除外)为正距平,总体呈现增加趋势;太阳净辐射基本上也都为正距平;水分盈亏基本上以正距平为主。研究结果可为政府部门和农户充分利用当地农业气候资源、调整种植结构、应对气候变化提供参考。

**关键词:**江苏省;气候变化;农业气候资源;夏玉米;情景预估

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)10-0095-06

全球气候变化对陆地生态系统、粮食安全等产生了重大影响,尤其是随着人口的不断增加,气候变化对全球粮食安全的威胁已成为 21 世纪人类必须面对的重大挑战<sup>[1]</sup>。根据政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate

change,IPCC)第 4 次评估报告,全球平均温度在过去 100 年上升了  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,20 世纪 50 年代以来的变暖趋势尤为明显<sup>[2]</sup>。近 50 年,江苏年平均气温升高了  $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并且极端天气气候事件趋多增强,降水区域性变化特征显著<sup>[3]</sup>。

农业气候资源是农业自然资源的重要组成部分,是农业生产的基本环境条件和物质能源,在农业生产中起着主导作用,直接影响农业生产过程,并在一定程度上决定了一个地区农业生产结构和布局、作物种类和品种、种植方式、栽培管理措施和耕作制度等,最终影响农业产量的高低和农产品质量的优劣<sup>[4]</sup>。气候变化对农业生产的影响程度和范围以及应

收稿日期:2013-12-24

基金项目:中国气象局气候变化专项(编号:CCSF201318);国家自然科学基金(编号:41005057)。

作者简介:徐 敏(1984—),女,江苏南京人,硕士,工程师,主要从事农业气候资源变化的研究。Tel:(025)83287133;E-mail:amin0506@163.com。

萌发期结果,在实际生产中,要因地制宜,根据土壤的盐渍化类型和程度对不同啤酒大麦进行整个生育期综合鉴定,才能全面评价啤酒大麦的耐盐碱性和在盐碱地上的适应程度。

## 参考文献:

- [1] 王星玉. 中国黍稷[M]. 北京:中国农业出版社,1996:52-60.
- [2] 阮成江,谢庆良. 盐胁迫下沙棘的渗透调节效应[J]. 植物资源与环境学报,2002,11(2):45-47.
- [3] Boyer J S. Plant productivity and environment[J]. Science,1982,218:443-448.
- [4] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science,2001,6(2):66-71.
- [5] Szabolcs I. Salt-affected soils[M]. Boca Raton,Florida:CRC Press Inc,1989.
- [6] 颜 宏,石德成,尹尚军,等. 盐、碱胁迫对羊草体内 N 及几种有机代谢产物积累的影响[J]. 东北师大学报:自然科学版,2000,32(3):47-52.
- [7] Shi D C, Yin S J, Yang G H, et al. Citric acid accumulation in an alkali-tolerant plant *Puccinellia tenuiflora* under alkaline stress[J]. Acta Botanica Sinica,2002,44(5):537-540.
- [8] 盛彦敏,石德成,肖洪兴,等. 不同程度中碱性复合盐对向日葵生

- 长的影响[J]. 东北师大学报:自然科学版,1999,31(4):65-69.
- [9] Yan H, Zhao W, Jiao X Q, et al. Analysis of organic acids accumulated in *Kochia scoparia* shoots and roots by reverse-phase high performance liquid chromatography under salt and alkali stress[J]. Chemical Research in Chinese Universities,2006,22(3):315-318.
- [10] 颜 宏,赵 伟,盛彦敏,等. 碱胁迫对羊草和向日葵的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(8):1497-1501.
- [11] 尹尚军,石德成,颜 宏. 碱胁迫下星星草的主要胁迫反应[J]. 草业学报,2003,12(4):51-57.
- [12] 颜 宏,石德成,尹尚军,等. 外施  $\text{Ca}^{2+}$ 、ABA 及  $\text{H}_3\text{PO}_4$  对盐碱胁迫的缓解效应[J]. 应用生态学报,2000,11(6):889-892.
- [13] 尹尚军,石德成,颜 宏.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下星星草胁迫反应与时间及胁强的关系[J]. 草业学报,1999,8(4):46-50.
- [14] 卢良恕. 中国大麦科学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:2-10.
- [15] 柳小宁,包奇军,张华瑜,等. 三种基因型啤酒大麦种子萌发期耐盐性的研究[J]. 作物杂志,2013(6):137-140.
- [16] 王佳佳,谷思玉.  $\text{NaCl}$  与  $\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  对玉米萌发期胁迫效应的比较[J]. 作物杂志,2012(2):138-141.
- [17] 王 宁,曹敏建,王 君,等.  $\text{NaCl}$  和  $\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  对玉米种子萌发及幼苗生长的影响差异研究[J]. 作物杂志,2009(4):52-56.

对措施等已成为目前国内外学者研究的热点,研究范围涉及到农业气候资源的分布、利用、评价,以及不同作物在其生长期气候资源的变化特征分析等<sup>[5-8]</sup>。

江苏省的玉米生产在全省粮食生产中占有重要地位,全省常年种植面积接近 40 万  $\text{hm}^2$ ,淮北地区的玉米种植面积约 20 万  $\text{hm}^2$ ,各县均有种植。淮北地区土壤资源较充裕,主要为黄泛冲积平原经旱耕熟化而形成的潮土类、棕壤、褐土以及洼地黑姜土等,土壤沙、碱、薄、渍,增产潜力大,是历史上玉米集中产地。近年来,随着生产条件的改善、新品种的推广以及栽培技术的改进,产量逐步上升,总产仅次于稻、麦,单产低于水稻,高于小麦,为全省 3 大粮食作物之一。随着气候大背景的改变,江苏省淮北地区玉米单产相对气象产量自 21 世纪以来波动较大。而针对玉米生育期内,江苏省淮北地区农业气候资源时空变化特征以及未来气候情景预估方面的研究则鲜见报道。为此,本研究将对近 52 年江苏省淮北地区的农业气候资源(光、温、水)的时空变化特征进行分析,并对未来不同气候情景下农业气候资源进行预估,为当地充分利用气候资源指导农业生产、合理调整种植结构提供依据,同时对研究和探讨气候变化背景下农业应对策略也具有重要而长远的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

历史气象数据:江苏省气候中心提供的 20 个气象台站 1961—2012 年的逐日平均气温、降水量、日照时数等常规气象要素。

区域气候模式模拟与预估数据<sup>[9]</sup>:国家气候中心提供的 RegCM4 区域气候模式(空间分辨率是 50  $\text{km} \times 50 \text{ km}$ ,地表一层)模拟的 1961—2005 年的气温、降水量、太阳辐射、水汽蒸发等要素,以及在 IPCC AR5 中提出的代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCP)为 8.5、4.5 的排放情景下,预估计算的逐日气温、降水、太阳辐射、水汽蒸发等要素。

玉米产量数据来自于江苏省统计局。

### 1.2 研究方法

1.2.1 趋势产量的模拟 自 1961 年以来,江苏玉米产量上下波动大,难以用一种简单的函数模拟趋势产量  $y_i$ 。故本研究先将产量序列逐步滑动分段,对每段使用灰色系统相应的各年之多个模拟值进行平均,以模拟趋势产量和进行趋势产量的预测,即简称为灰色系统 GM(1,1)模型逐段滑动平均。

设有一产量原始序列:

$$y^{(0)} = \{y^{(0)}(j)\}, (j=1, 2, \dots, n)。 \quad (1)$$

按步长  $q$  ( $< n$ ) 进行逐步滑动分段,则每段( $i$ )原始序列为:

$$y_i^{(0)}(t) = \{y_i^{(0)}(i), y_i^{(0)}(i+1), \dots, y_i^{(0)}(i+q-1)\} \begin{cases} i=1, 2, 3, \dots, n-q+1 \\ t=i, i+1, \dots, i+q-1 \end{cases} \quad (2)$$

对每段( $i$ )的数据序列根据 GM(1,1)模型的数学方法,作累加生成序列:

$$y_i^{(1)}(t) = \sum_{m=i}^t y_i^{(0)}(m)。 \quad (3)$$

建立白化形式的微分方程:

$$\frac{dy_i^{(1)}}{dt} + a_i y_i^{(1)} = u_i。 \quad (4)$$

用最小二乘法求解参数  $a_i$ 、 $u_i$ ,再求取时间响应函数:

$$y_i^{(1)}(t+1) = [y_i^{(0)}(i) - u_i/a_i]e^{-at} + u_i/a_i。 \quad (5)$$

就可得到  $\hat{y}_i^{(1)}(t+1)$ ,经累减生成:

$$\hat{y}_i^{(0)}(t+1) = \hat{y}_i^{(1)}(t+1) - \hat{y}_i^{(1)}(t)。 \quad (6)$$

获取原始序列的拟合值  $\hat{y}_i^{(0)}(t+1)$ ,即为经过 GM(1,1)模型处理后第  $i$  段的数据序列。

显然对于  $t+1$  时刻有  $P_{t+1}$  个  $\hat{y}_i^{(0)}(t+1)$  值。则  $t+1$  时刻的  $\hat{y}_i^{(0)}(t+1)$  平均数为

$$\hat{y}_i = 1/P_{t+1} \cdot \sum_{i=1}^{P_{t+1}} \hat{y}_i^{(0)}(t+1) \begin{cases} t=0, 1, 2, 3, \dots, n-1 \\ i=1, 2, \dots, n-q+1 \end{cases}。 \quad (7)$$

其中

$$P_{t+1} = \begin{cases} t+1 & t+1 < q \\ q & q \leq t+1 \leq n-q+1 \\ n-(t+1)-1 & t+1 > n-q+1 \end{cases}$$

根据(7)式便可算得历年趋势产量拟合值,得到趋势产量曲线。

1.2.2 相对气象产量的计算方法 产量不仅受社会因素的影响,而且还取决于历年气象条件的优劣。对大范围农业区而言,农业生产水平逐年变化不大,相对稳定;但农作物的生长发育则各有特点,对气象条件的要求也各不相同,且气象条件逐年变化较大,故最终的产量历年波动也不相同。因此,一般将实际产量  $y$  分离为依社会生产水平的变化而变化的趋势产量  $y_i$ 、随历史气象环境条件而变化的气象产量  $y_w$  和随机误差  $\varepsilon$ 。其模型为:

$$y = y_i + y_w。 \quad (8)$$

在通常情况下,随机误差  $\varepsilon$  可以忽略不计。

由(8)式可得气象产量  $y_w$ ,为了消除历年生产水平给当时气候产量  $y_w$  造成的不适当影响,一般使用相对气象产量  $y_w/y_i \times 100\%$  进行分析。

1.2.3 参考作物蒸散量 参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ) 是指假设平坦地面被特定低矮绿色植物(高 0.12 m,地面反射率为 0.23)全部覆盖、土壤水分充分情况下的蒸散量。本研究采用联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的 Penman - Monteith 公式计算  $ET_0$ <sup>[10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米种植概况

2.1.1 种植面积 淮北地区近 50 年来玉米种植面积总体上变化不大,在 26 万  $\text{hm}^2$  上下波动,但有 2 段明显的低谷期,即 20 世纪 70 年代、20 世纪 90 年代末至 2006 年;20 世纪 60 年代基本维持在 26 万  $\text{hm}^2$  左右,80 年代至 90 年代各年均大于 26 万  $\text{hm}^2$ 。

2.1.2 单产变化 淮北地区近 50 年来玉米单产呈上升趋势,不仅与该地区的种植制度改良、农业政策支持、品种更新、农业管理措施的提高密切相关,而且与气候条件亦有较大的关系。利用灰色系统模型逐段滑动平均技术,将玉米单产进行分离,获得时间趋势产量(图 1)和相对气象产量(图 2)。

由图 2 可知,20 世纪 60 年代至 90 年代的 40 年间,淮北地区玉米的气象产量波动相对平稳,但进入 21 世纪以来波动增大。

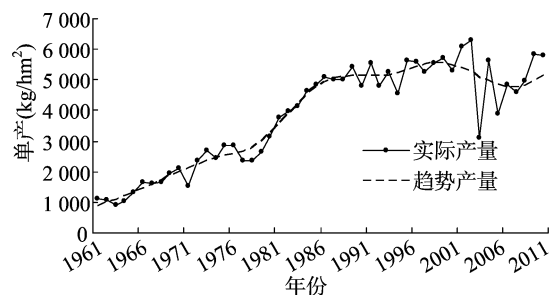


图1 淮北地区玉米单产50年内的变化趋势

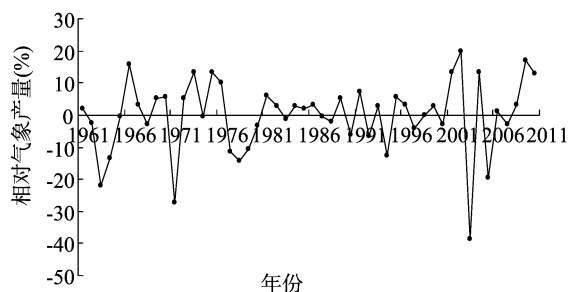


图2 淮北地区玉米相对气象产量50年内的变化趋势

2.1.3 总产量变化 由图 3 可以看出,淮北地区近 50 年来的玉米总产量呈 4 段变化趋势:第 1 段为 1961—1980 年,总产呈缓慢上升趋势,其斜率为 0.729;第 2 段为 1981—1989 年,总产呈快速上升趋势,其斜率为 11.04;第 3 段为 1990—2003 年,总产呈下降趋势,其斜率为 -3.383;第 4 段为 2004—2010 年,总产呈恢复性上升趋势,其斜率为 12.11。

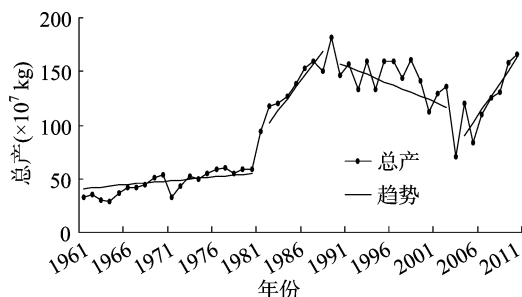


图3 淮北地区玉米总产量50年内的变化趋势

2.2 气候变化背景下玉米的热量、光能、水分等资源的变化特征

2.2.1 热量资源变化特征 一定界限温度以上的累积温度是评价一地区热量资源的重要指标之一。一般以  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 20^{\circ}\text{C}$  积温反映喜温作物生长期内的热量资源。

淮北地区夏玉米在小麦收获后于 5 月中、下旬播种,9 月中旬收获,全生育期为 95 ~ 105 d,需  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温 2 400 ~ 2 700  $^{\circ}\text{C}$ 。从图 4 可见,1961—2012 年,淮北地区夏玉米生育期内  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的活动积温各年均均在 2 900  $^{\circ}\text{C}$  以上,因此淮北的热量资源完全满足夏玉米生育的需要。在全球气候变化的背景下,江苏淮北地区的热量资源也存在着较为显著的气候变化特征。近 52 年来,淮北地区夏玉米生育期内  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活

动积温总体存在着“先降—后升—再降”的趋势演变特征,其中 20 世纪 80 年代变化较为平稳,活动积温基本都低于气候平均值(1981—2010 年气候平均值为 3 067  $^{\circ}\text{C}$ ),20 世纪 90 年代上升趋势显著,20 世纪 90 年代后期至 2010 年基本处于气候平均值以上。活动积温的年际波动较明显,尤其是 20 世纪 60、70 年代,其中 1967 年(3 210  $^{\circ}\text{C}$ )、1978 年(3 209  $^{\circ}\text{C}$ )、1994 年(3 217  $^{\circ}\text{C}$ )为极大值年;1972 年(2 933  $^{\circ}\text{C}$ )、1976 年(2 944  $^{\circ}\text{C}$ )、1980 年(2 936  $^{\circ}\text{C}$ )、1989 年(2 947  $^{\circ}\text{C}$ )为极小值年。

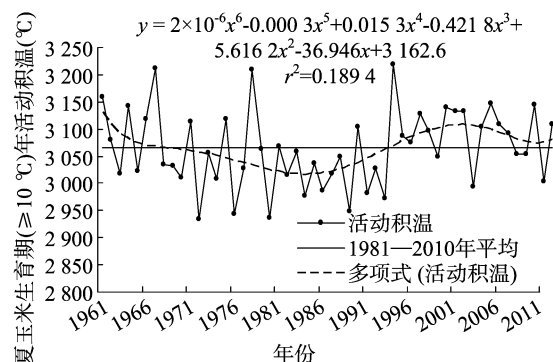


图4 1961—2012年淮北地区夏玉米生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温的年变化

为进一步了解淮北地区区域间的农业气候资源差异,将淮北地区大致分成 3 个区域:西北部(徐州)、东北部(连云港)、淮河一带(宿迁、淮安和盐城北部)。从这 3 个区域的年代际变化来看(表 1), $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温各区域变化趋势基本上都是先下降后上升,其中 1981—1990 年最低;1961—1970 年基本最大,3 个区域  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的活动积温分别达到了 3 106 (西北部)、3 057 (东北部)、3 098  $^{\circ}\text{C}$  (淮河一带);区域间存在数值差异,西北部最大,淮河一带次之,东北部最小。

表 1 淮北地区各区域夏玉米全生育期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温的年代际变化

区域	活动积温( $^{\circ}\text{C}$ )				
	1961— 1970 年	1971— 1980 年	1981— 1990 年	1991— 2000 年	2001— 2012 年
西北部	3 106	3 062	3 028	3 100	3 085
东北部	3 057	3 062	2 982	3 045	3 056
淮河一带	3 098	3 058	3 010	3 068	3 089

近 52 年,淮北地区夏玉米生育期内  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温均在 2 700  $^{\circ}\text{C}$  以上(图略)。根据多项式模拟方法,将活动积温进行模拟,近 52 年来,淮北地区夏玉米生育期内  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温呈 6 次多项式趋势变化,其相关系数为 0.47,达到 0.001 信度极显著水平。夏玉米生育期内  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温的气候变化特征与  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的活动积温类似,即 20 世纪 60、70 年代年际波动幅度大,80 年代基本处于低谷期,90 年代有所上升,但上升趋势没有  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温明显,20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初期  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  积温处于高位期,2006 年之后又出现下降趋势。

表 2 为淮北地区各区域夏玉米全生育期  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温的年代际变化情况。从表 2 可知,各区域的年代际变化趋势一致,也都是先降后升,1981—1990 年处于谷底,西北部、东北部、淮河一带的  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  的平均活动积温分别只有 2 912、

2 825、2 882 ℃;1991—2000 年,西北部与淮河一带的≥20 ℃ 的平均活动积温都在 2 970 ℃ 以上;区域间存在数值差异,西北部最大,淮河一带次之,东北部最小。

表 2 淮北地区各区域夏玉米全生育期≥20 ℃ 活动积温的年代际变化

区域	活动积温(℃)				
	1961— 1970 年	1971— 1980 年	1981— 1990 年	1991— 2000 年	2001— 2012 年
西北部	2 976	2 925	2 912	2 988	2 972
东北部	2 885	2 833	2 825	2 894	2 924
淮河一带	2 953	2 915	2 882	2 942	2 980

2.2.2 光能资源变化特征 计算发现,近 52 年来,淮北地区夏玉米生育期内(日平均气温≥10 ℃)日照时数呈显著下降趋势(图 5),线性趋势达到了-4.8 h/年,通过了 0.001 的显著性检验,这与我国大部分地区日照时数减少的趋势一致。其中,1981—2010 年的年日照时数平均值为 774 h;20 世纪 90 年代之前,各年日照时数基本上都高于气候平均值,而 2000 年之后基本上都低于气候平均值,其中 2011 年出现了近 52 年来的最低值,只有 554 h,比气候平均值少了 220 h。

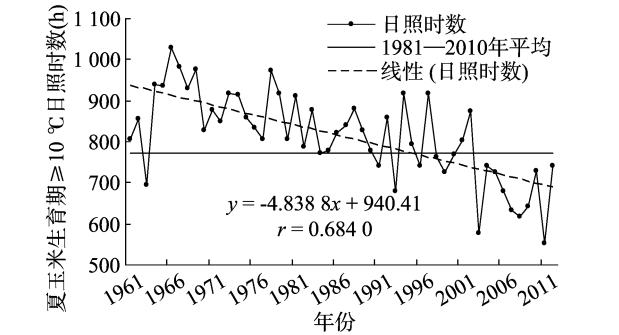


图 5 1961—2012 年淮北地区夏玉米日照时数的年度变化

表 3 为淮北地区各区域夏玉米全生育期日照时数的年代际变化情况。从表 3 可知,1961—2012 年,在玉米生育期内,各个区域日照时数年代际下降趋势非常明显。2001—2012 年,西北部、东北部和淮河一带的平均日照时数已经分别降到了 708、687、631 h;区域间存在一定的差异,西北部与东北部的日照时数较为接近,淮河一带的日照时数明显少于这 2 个区域,地区分布差异与活动积温有所不同。

表 3 淮北地区各区域夏玉米全生育期日照时数的年代际变化

区域	日照时数(h)				
	1961— 1970 年	1971— 1980 年	1981— 1990 年	1991— 2000 年	2001— 2012 年
西北部	929	900	827	808	708
东北部	933	890	853	803	687
淮河一带	882	852	819	770	631

图 6 为 1961—2012 年淮北地区夏玉米生育期(日平均气温≥10 ℃)太阳总辐射的年变化情况。从图 6 可知,淮北地区夏玉米生育期太阳总辐射同样存在显著下降的趋势,线性趋势达到了-7.5 MJ/(m<sup>2</sup>·年),通过了 0.001 的显著性检验。太阳总辐射的下降现象与我国大部分地区太阳总辐射减少的现象一致,其气候变化特征与日照时数一致。有研究指

出,我国太阳总辐射降低可能是由气候变化造成大气气溶胶含量的增加所致<sup>[11]</sup>。大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系,大气中的气溶胶粒子吸收、散射太阳辐射,使得地面接收的太阳辐射减少,导致光合有效辐射随之减少,农作物生长受阻。

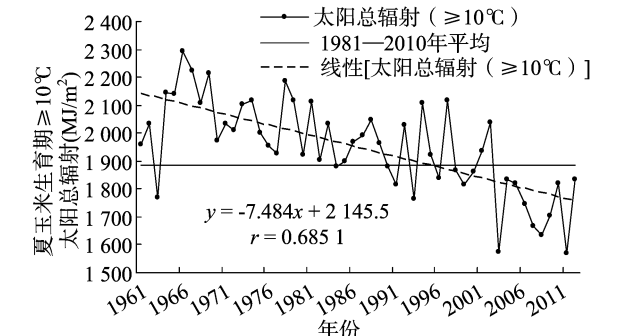


图 6 1961—2012 年淮北夏玉米太阳总辐射的年变化

2.2.3 水分资源变化特征 研究地区农业水分资源,不仅需要水分的收入(主要是降水),还要考虑水分的蒸发(作物蒸散量),并根据需水情况讨论水分盈亏。本研究从夏玉米生育期内的年降水量、蒸散量、水分盈亏 3 个方面进行分析。

在 1961—2012 年,淮北地区夏玉米生育期内降水量呈现出了“明显下降—平稳波动—快速上升”的气候变化特征(图 7),下降期主要是在 20 世纪 60 年代,20 世纪 70、80 年代波动较平稳,从 20 世纪 90 年代后期开始显著上升。1981—2010 年,夏玉米生育期内的气候平均降水量为 604 mm。在近 52 年中,共有 4 年出现了降水量极低值(1966、1981、1988、1994 年),生育期内降水量不足 400 mm;共有 2 年出现了降水量极大值(1963、2007 年),生育期内降水量超过了 900 mm。

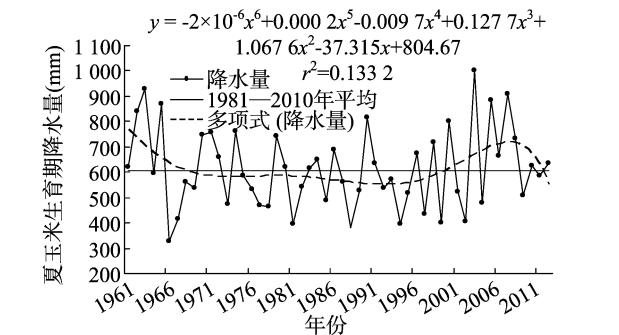


图 7 1961—2012 年淮北地区夏玉米生育期内降水量的年变化

表 4 为淮北地区各区域夏玉米全生育期降水量的年代际变化情况。从表 4 可知,1961—2012 年,在玉米生育期内,淮北西北部与东北部降水量的年代际变化趋势较为一致,均是“上升—下降—再次上升”趋势,1981—1990 年为低谷期,2001—2012 年降水量增加明显;淮河一带的生育期降水量年代际变化趋势与其他 2 个区域有所不同,谷底期是在 1991—2000 年,降水量为 587 mm;比较 3 个区域的年代际生育期降水量,东北部与淮河一带基本上要大于西北部。

蒸散量是表征大气蒸散能力,评价气候干旱程度、植被耗水量的重要指标。从图 8 可知,淮北地区夏玉米蒸散量在 20

表 4 淮北地区各区域夏玉米全生育期降水量的年代际变化

区域	降水量 (mm)				
	1961— 1970 年	1971— 1980 年	1981— 1990 年	1991— 2000 年	2001— 2012 年
西北部	611	616	485	547	679
东北部	651	672	555	579	651
淮河一带	644	590	598	587	698

世纪 60 年代变化非常大,20 世纪 60 年代中期达到顶峰,1967 年出现了近 52 年来的最大值 592 mm;1967 年到 20 世纪 70 年代中期处于显著下降期;20 世纪 70 年代后期一直到 2000 年均无明显变化趋势,仅存在一定的年际变化;21 世纪以来又出现了下降趋势,2003 年出现了极低值 421 mm。1981—2010 年,气候平均蒸散量为 484 mm。蒸散量的减少可能是由于日照时数的明显减少所造成的。

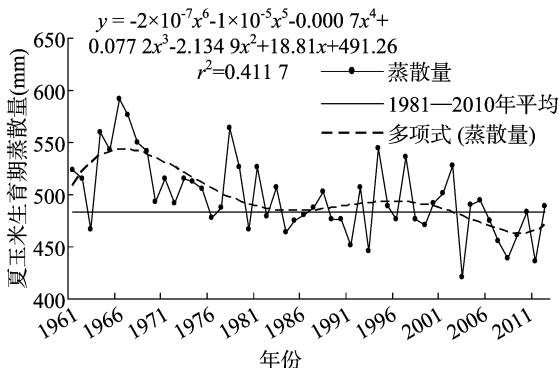


图8 1961—2012年淮北夏玉米生育期蒸散量的年变化

从淮北地区各区域夏玉米全生育期蒸散量的年代际变化来看(此处数据略),1961—2012 年,3 个区域玉米生育期内年代际蒸散量均呈现下降趋势。20 世纪 60 年代,蒸散量均在 520 mm 以上,而到了 2001—2012 年年均下降到了 490 mm 以下;对比 3 个区域的蒸散强度,西北部最强,其次是东北部,淮河一带最弱。已有研究表明,过去 50 年,全国绝大多数流域的年、季潜在蒸散量均呈现减少趋势,南方各流域(西南诸河流域除外)和夏季潜在蒸散量减少趋势尤为明显<sup>[12]</sup>。

水分盈亏可以具体反映水分的供求矛盾,计算方法是将降水量减去蒸散量。当水分盈亏为正值时,表明水分供过于求;当等于零时,表明水分供应适宜;当为负值时,表明水分供应不足。1961—2012 年,淮北地区夏玉米生育期有 10 年水分供应不足,其中 1966 年盈亏最为严重(−265 mm);有 3 年基本供需平衡,其余均是供过于求,其中 2003 年最为充裕,达到了 583 mm。

将 1961—2012 年江苏淮北玉米单产的相对气象产量分别与夏玉米生育期≥10℃活动积温、太阳辐射、降水量进行相关性研究。分析发现,由于淮北地区的活动积温通常都满足玉米生育期所需,所以相对气象产量与活动积温 2 者的相关性偏弱;太阳辐射同样如此,相关系数只有 0.12;与降水量呈反相关,相关系数高达 −0.51(通过了 0.001 的显著性检验),即从生育期总耗水量来说,如果降水量过多,已经超出了玉米的需水量,则玉米单产下降。

### 2.3 未来情景下淮北玉米农业气候资源的可能变化

2.3.1 热量资源的可能变化 在 RCP 8.5 高排放情景下,2014—2030 年淮北地区夏玉米生育期内≥10℃的活动积温距平都为正值(距平是相对于气候模式模拟的 1961—2005 年气候平均值,以下同)(图 9),说明未来 17 年淮北地区夏玉米生育期内≥10℃的活动积温呈现出一致增多的气候特征,且距平呈现出明显的上升趋势,线性趋势达到了 5.1℃/年;在 RCP 4.5 排放情景下,除 2014 年和 2015 年夏玉米生育期内≥10℃的活动积温距平为负值以外,其余年份均为正值,年际变化非常显著,2020 年处于波峰,活动距平值高达 207℃。比较 2 种情景,可知 RCP 8.5 高排放情景下的≥10℃活动积温距平基本上要大于 RCP 4.5,但 RCP 4.5 排放情景下的年际波动明显要大于 RCP 8.5,两者的波动特征总体上呈现反位相。

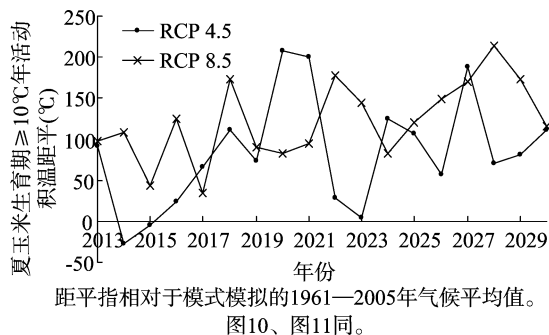


图9 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下,2013—2030 年淮北地区夏玉米生育期≥10℃活动积温的距平变化

在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,2014—2030 年夏玉米生育期内≥20℃的活动积温距平与≥10℃的活动积温距平时间变化特征是一致的(此处数据省略),但是波动幅度明显要大于≥10℃,说明极端情况增多。

2.3.2 光能资源的可能变化 从图 10 可知,在 RCP 8.5 高排放情景下,2014—2030 年夏玉米生育期内的太阳净辐射距平值基本上为正值(除 2023 年),说明未来获得的太阳净辐射增加,太阳净辐射距平没有明显的变化趋势,年际波动显著;在 RCP 4.5 排放情景下,除 2015、2016、2022 年夏玉米生育期内的太阳净辐射距平值为负值以外,其余均为正值,年际变化非常显著,2020 年处于波峰,距平值高达 196 MJ/(m<sup>2</sup>·d);比较 2 种情景,RCP 8.5 高排放情景下的太阳净辐射距平基本上要大于 RCP 4.5,两者的波动特征总体上呈现反位相。

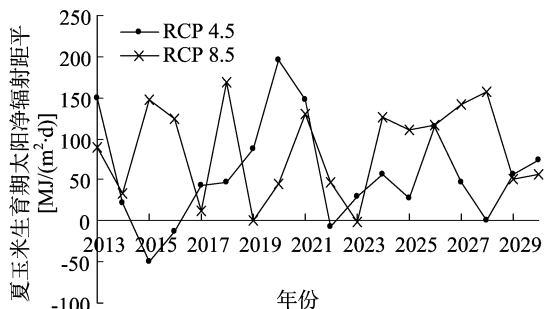


图10 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下,2013—2030年淮北地区夏玉米生育期太阳净辐射距平的年变化

2.3.3 水分资源的可能变化 从图 11 可知,在 RCP 8.5 高排放情景下,2014—2030 年间共有 10 年的夏玉米生育期内

降水距平为正值,其余为负值,存在年际波动。2023 年降水距平为极端高值年,降水量将增加 259 mm,2021 年为极端低值年,降水量将减少 143 mm;在 RCP 4.5 排放情景下,降水距平基本上为正值(2019、2020、2026 年除外),存在 5 年的周期振荡。2015 年降水距平为极端高值年,降水量将增加 451 mm,2020 年为极端低值年,降水量将减少 146 mm;比较 2 种情景,RCP 4.5 情景下的降水距平极端幅度明显要大于 RCP 8.5 情景下的幅度。

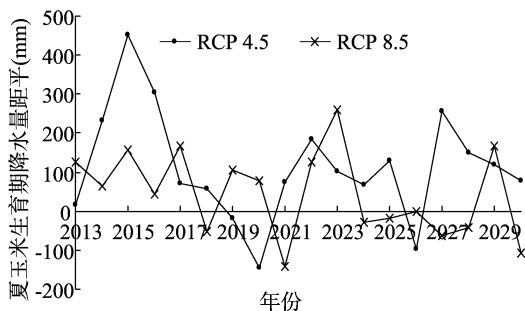


图11 RCP 4.5和RCP 8.5情景下, 2013—2030年淮北地区夏玉米生育期降水量距平的年变化

从蒸散量来看(图略),在 RCP 8.5 高排放情景下,2014—2030 年淮北地区夏玉米生育期内蒸散量距平基本为正值(2019、2023 年除外),存在显著年际波动。2028 年为极端高值年,蒸散量将增加 58 mm,2023 年为极端低值年,蒸散量将减少 14 mm;在 RCP 4.5 排放情景下,蒸散量距平也基本为正值;比较 2 种情景,RCP 8.5 情景下的夏玉米生育期内蒸散量距平总体上要大于 RCP 4.5 情景。

从未来的水分盈亏情况来看(此处数据略),相对于 1961—2005 年的水分盈亏气候平均值 17 mm(模式模拟值),在 RCP 8.5 高排放情景下,2014—2030 年夏玉米生育期内水分盈亏正、负距平年数分别为 9、8 年。2023 年之前,水分盈亏距平是以正值为主,说明大部分年份夏玉米生育期内水分供应充足,而在 2023 年之后,除了 2029 年,其余均为负距平,说明 2024—2030 年中有 6 年水分供应不足,2023 年水分最为充裕,水分盈亏距平高达 272 mm;在 RCP 4.5 情景下,水分盈亏正、负距平年数分别为 14、3 年,2015 年为极端高值年,水分盈亏距平高达 446 mm;比较 2 种情况,RCP 4.5 情景下的水分盈亏距平要略大于 RCP 8.5 情景,极端情况也要略明显一些。

### 3 讨论与结论

利用 1961—2012 年江苏省淮北地区夏玉米生育期内的气象要素,计算了  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温、 $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温、太阳总辐射、降水总量、参考作物蒸散量、水分盈亏等物理量,对光资源、热量资源、水分资源进行了统计分析,并利用气候模式的预估数据,对未来高、中排放情景下,农业资源变化所造成的可能影响进行了探讨。主要研究结果为:(1)1961—2012 年,淮北地区夏玉米生育期内  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温各年均均在  $2900^{\circ}\text{C}$  以上, $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温各年均均在  $2700^{\circ}\text{C}$  以上,热量资源充足, $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温总体存在着“先降—后升—再降”的趋势演变特征, $\geq 20^{\circ}\text{C}$  活动积温呈 6 次多项式趋势变化。(2)1961—2012 年,淮北地区的日照时数和太阳总辐射都存在着

显著的下降趋势,线性倾向率分别达到了  $-4.8\text{ h/年}$ 、 $-7.5\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,2000 年之后已严重低于气候平均值,且年际波动幅度非常大。太阳总辐射的显著下降会对玉米的光合作用产生影响,从而影响到玉米的品质与产量。(3)1961—2012 年,淮北地区的年降水量呈现出了“明显下降—平稳波动—快速上升”的气候变化特征,2000 年以来上升非常明显,但随着日照时数的减少,蒸散量从 2000 年来却出现了下降,因此,玉米的水分供应在 2000 年以来是非常充裕的。由此可见,夏玉米生育期内,光、温、水资源都发生了显著变化,特别是进入 21 世纪以来,年际波动显著,使得玉米的相对气象产量也相应出现了较为显著的年际变化。从区域间差异来看,西北部的热量资源较淮河一带和东北部丰富;西北部和东北部的光能资源好于淮河一带;东北部和淮河一带的降水资源多于西北部。(4)在 RCP 8.5 和 RCP 4.5 未来气候情景下,2014—2030 年在夏玉米生育期内, $\geq 20^{\circ}\text{C}$  与  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温呈现出一致增多的气候特征;由于 2 种情景都是增加辐射强迫,所以 2014—2030 年的太阳净辐射大于 20 世纪的气候平均值;RCP 8.5(RCP 4.5)情景下水分盈亏正、负距平年数分别为 9、8 年(14、3 年)。在未来气候情景下,光、温、水资源的年际波动都比较显著,说明极端气候事件将增多。

### 参考文献:

- [1] Kang Y H, Khan S, Ma X Y. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – a review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1665–1674.
- [2] IPCC. Climate change 2007: synthesis report[M]. Oslo: Intergovernment Panel on Climate Change, 2007: 543–544.
- [3] 江苏省气象局. 江苏省气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 6–7.
- [4] 郭建平. 气候变化情景下中国农业气候资源演变趋势[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 1–2.
- [5] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199–2206.
- [6] 李 勇, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 I. 华南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2605–2614.
- [7] 代姝玮, 杨晓光, 赵 孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442–452.
- [8] Rosegrant M W, Cline S A. Global food security: challenges and policies[J]. Science, 2003, 302(5652): 1917–1919.
- [9] Gao X J, Wang M L, Giorgi F. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC\_CSM1.1 – RegCM4.0[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013, 6(5): 381–386.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1998: 196–205.
- [11] 李晓天, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 25–32.
- [12] 高 歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378–387.