

潘敖大,曹颖,陈海山,等. 2013. 近 25 a 气候变化对江苏省粮食产量的影响[J]. 大气科学学报,36(2):217-228.

Pan Ao-da, Cao Ying, Chen Hai-shan, et al. 2013. Impacts of climate change on food-crops production in Jiangsu Province from 1986 to 2010 [J]. Trans Atmos Sci, 36(2):217-228. (in Chinese)

近 25 a 气候变化对江苏省粮食产量的影响

潘敖大^{1,2}, 曹颖^{1,3}, 陈海山¹, 孙善磊¹

(1. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学), 江苏 南京 210044;

2. 厦门市气象局, 福建 厦门 361012; 3. 江苏省气象局, 江苏 南京 210008)

摘要:利用 1986—2010 年江苏省 63 个气象站的常规气象数据和粮食单产统计资料,分析了苏北、苏中、苏南地区和江苏全省三种时间尺度的气候变化特征;基于自助抽样(bootstrap)和一元线性回归的方法,研究了各区 and 全省粮食产量对作物年(11 月—次年 10 月)、夏粮—秋粮生长季(11 月—次年 5 月和 6—10 月)和月尺度气候要素的响应;并定量评价了过去 25 a 气候变化对各区 and 全省粮食产量的影响以及各气候要素的贡献。结果表明:1)在作物年、夏粮—秋粮生长季以及月尺度上,三区 and 全省各气候要素均发生了不同程度的变化,且存在一定的时空差异。在不断发展的农业管理措施和技术以及气候的共同作用下,三区 and 全省粮食单产显著($p > 0.01$)增加,其中,全省增加趋势为 $66.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2)除苏南地区对作物年尺度上的气候变化响应不显著外,粮食产量对降水的不同时变化的负响应关系(即随降水的增加而减小,减小而增加)均在不同时间尺度和地区得到了体现,说明降水对这些地区粮食生产的影响十分重要;其中,苏北、苏中和全省粮食产量随作物年降水的增加(减少)而减小(增加),平均速率分别为 $0.19\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 、 $0.09\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 和 $0.11\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 。3)三类模型结果均显示气候变化使得苏北、苏南和江苏粮食产量减小,但结果略有差异,其中,利用月气候要素建立的模型 C 的结果显示气候变化对粮食单产(总产)的影响最大,其均值分别为 $-6.51\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-11.28 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)、 $-3.27\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-2.36 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$) 和 $-1.34\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-4.45 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)。另外,为了系统而全面地评估气候变化对粮食产量的影响,考虑月尺度的气候变化的影响是十分必要的。

关键词:气候变化;粮食产量;自助抽样方法;江苏省

中图分类号:F326.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-7097(2013)02-0217-12

Impacts of climate change on food-crops production in Jiangsu Province from 1986 to 2010

PAN Ao-da^{1,2}, CAO Ying^{1,3}, CHEN Hai-shan¹, SUN Shan-lei¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China;

2. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012, China; 3. Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the observations of 63 conventional meteorological stations and the investigated data of food-crops production in Jiangsu Province from 1986 to 2010, this paper studied the characteristics of climate change on three time scales in north, central and south Jiangsu, and the whole province. Based on the one-dimensional linear regression equation with the bootstrap resampling method, this paper studied the responses of the food-crops production to climate changes on the three time scales of crop-year

收稿日期:2011-10-25; 改回日期:2012-11-08

基金项目:江苏省科技支撑计划(社会发展)项目(BE2009694);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:潘敖大(1963—),男,江苏金坛人,博士,正研级高级工程师,研究方向为气候变化,panad@cma.gov.cn.

(from November to October the next year), the growth seasons of summer (from November to May the next year) and autumn (from June to October) crops, and month. The influences of climate changes on the food-crops yield and the contributions of each climate factor in the past 25 years were quantitatively estimated. Results show that: 1) In north, central and south Jiangsu, and the whole province, the climate factors are different on the time scales of crop-year, the growth season of summer and autumn crops and month, with some spatial-temporal differences. Under the combined impacts of the developing agricultural managements and technologies, and climate change, the food-crops yield per hectare in the four study areas increases significantly ($p > 0.01$), with increasing trend of $66.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in the whole province. 2) Except that the response of the food-crops yield in south Jiangsu to climate change on the time scale of crop-year is not significant, the negative response of the food-crops yield to precipitation (the food-crops yield decreases when precipitation increases, and v. v.) can be found in the four study areas on the three time scales, indicating that precipitation variation plays an important role in the food-crops production. When precipitation increases (decreases), the food-crops yield in north and south Jiangsu, and Jiangsu decreases (increases), with the mean rates of $0.19\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$, $0.09\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ and $0.11\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$, respectively. 3) Results of the three models show that the food-crops production in north and south Jiangsu, and Jiangsu all decreases due to climate change. Results of Model-C established by monthly climate factors reveal that climate change leads to the food-crops yield per hectare (total production) decrease of $-6.51\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-11.28 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$), $-3.27\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-2.36 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$) and $-1.34\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-4.45 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$) in north and south Jiangsu, and Jiangsu, respectively. Additionally, it is very necessary and critical to pay enough attention on the effects of monthly climate change in order to completely and systematically evaluate effects of climate change on food-crops production.

Key words: climate change; food-crops yield; bootstrap resampling method; Jiangsu Province

0 引言

温室气体增加导致的全球气候变暖业已成为人们关注的焦点(孙善磊等,2010a;高庆九等,2012;周国华等,2012);政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次评估报告(IPCC,2007)指出,过去100 a全球气温平均上升了(0.74 ± 0.18) °C。随着气候变化的加剧,其对社会经济和生态系统的影响不断加深,已严重威胁到社会和自然生态系统的可持续发展(孙善磊等,2010b,2011)。农业是人类赖以生存的基础产业,稳定和可持续的粮食生产是其发展的关键;作为影响粮食生产的主要自然因素,气候可以通过影响作物生育进程、适宜种植区和灾害性因子等进而影响粮食生产(郭建平,1992)。

近年来,国内外学者围绕着气候变化对粮食生产的可能影响开展了大量的相关研究(肖卉等,2011;张佩等,2011),并认为温度和降水的变化是影响农业生产的两个主要因子;但对不同国家或地区,二者对作物产量的影响(增加或减少)及幅度有所差别。基于自助采样法(bootstrap resampling),Tao et al. (2008)对中国及各省的主要粮食作物与气候变化的关系进行了定量分析,指出气候变化使我国

水稻(1951—2002年)和大豆(1979—2002年)总产量趋势分别增加了 3.2×10^5 和 $0.7 \times 10^5 \text{ t} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,而使小麦和玉米(1979—2002年)趋势分别减少了 $1.2 \times 10^5 \text{ t} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $21.2 \text{ t} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。Joshi et al. (2011)分析了气候变化对1987—2007年尼泊尔粮食产量的影响,发现季节性降水、最低和最高温度对不同作物的影响存在较大的差异。采用面板数据(白仲林,2008)和计量经济学模型,Isik and Devadoss(2006)定量分析了降水和气温变化对美国爱荷华州主要粮食作物单产及其波动的影响,结果显示降水增加和温度升高会减小小麦、大麦、土豆和甜菜单产及其波动。高永刚等(2007)利用世界粮食研究模型(World Food Studies, WOFOST)研究了近43 a来黑龙江气候变化对农作物产量的影响,指出气候变化的空间差异对各主要作物产量变化的空间分布具有重要影响,但不同作物的影响不同。曹广平和陈永福(2012)通过建立引入气候因素的种植业生产函数模型,实证分析了1990—2009年气候因素和非气候因素对山东省种植业产出的影响并对产出增长的各要素贡献进行了分解;结果表明气候变暖将会对山东省种植业造成明显的负面影响。以上工作分别从不同角度和不同方法上评估了气候变化

对不同作物产量的影响。但大多数研究往往只针对气候变化对单一作物产量的影响,缺乏对粮食总产量的相关分析;且一般考虑整年或整个作物生长季的气候变化对粮食产量的影响,而忽略了不同时间尺度(如月尺度)的气候变化影响,因此很难对粮食产量的影响做出系统而全面的评价。因此,综合考虑不同时间尺度的气候变化对粮食产量的影响,可以更加系统地地区分不同时间尺度的气候变化对粮食产量的影响,有利于较准确地评价气候变化对粮食产量的影响。本研究依据江苏省1986—2010年气候(降水、最低和最高温度、日较差和日照时数)变化特征,拟利用自助采样方法定量分析江苏主要粮食产量对各气候要素的响应关系,并评价1986—2010年不同时间尺度的气候变化对江苏省主要粮食总产量变化的贡献,以期对江苏省农业生产应对气候变化的政策制定和江苏农业发展的科学规划提供初步的决策依据。

1 数据及方法

1.1 研究区概况

江苏地处“江淮沂沭泗”五大江河下游的江淮平原,长江横穿其南部,面积为 $1.03 \times 10^5 \text{ km}^2$;地形以平原为主,主要有苏南平原、苏中江淮平原和苏北黄淮平原,占全省面积70%以上。该研究区既属东亚季风区,又属亚热带和暖温带过渡区,具有明显的季风气候特征。一般说来,苏北灌溉总渠(淮河)以

南广大地区属北亚热带湿润季风气候,以北地区为南温带半湿润季风气候。春夏秋冬四季分明,年日照时数2 000~2 600 h,年均气温 $13 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$,无霜期200~240 d,年均降雨量800~1 200 mm。由于光热条件兼有南北之长,且降水比较丰富,适于喜温和中温作物的生长。

1.2 数据来源及处理

本文采用1985—2010年江苏省70个气象站逐日降水(mm)、最低温度($^\circ\text{C}$)、最高温度($^\circ\text{C}$)、温度日较差($^\circ\text{C}$)以及日照时数(h)资料。逐日资料缺测的处理方法遵从年内缺测时间均不大于15 d;年内缺测时间超过15 d的站点予以剔除;连续缺测时间小于等于15 d的资料,用线性插值法替换缺测值;最后使用到的站点总计63个(图1)。另外,考虑研究对象为粮食产量,其反映的为某一地区粮食生产的平均状况;考虑到单个气象站点无法准确代表某一区域的气候特征,本文基于ArcGIS 9.2平台采用样条函数(spline function)方法对逐月气候要素进行了空间插值处理,并获得了江苏省各市逐月气候要素的时间序列。江苏省粮食生产可以分为夏粮和秋粮;夏粮主要有小麦、大麦和蚕豌豆等作物,生长期主要在11月—次年5月;秋粮主要有水稻、玉米、大豆、绿豆和薯类作物,生长期主要在6—10月。为了找出与粮食产量有密切联系的气候要素,并准确评价气候变化对粮食产量的影响,本文对气候要素做如下处理:分别计算11月—次年10月(一个作物

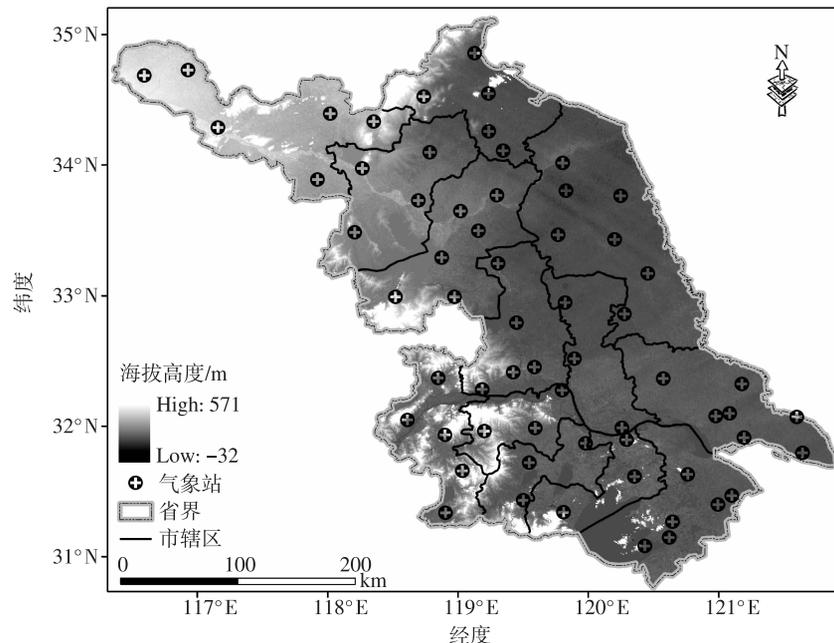


图1 江苏省63个气象站分布

Fig. 1 Distribution of 63 weather stations in Jiangsu Province

年)、夏粮—秋粮生长季各气候要素的平均或总和;进而获得三种时间尺度(作物年、夏粮—秋粮生长季和月尺度)的气候要素。

根据江苏省气候、地理特点和行政区域划分,一般把江苏分为 3 个区,分别是苏北、苏中和苏南地区。苏北地区包括徐州、连云港、盐城、宿迁和淮安;苏中地区主要有扬州、泰州和南通;苏南地区则包括南京、镇江、常州、无锡和苏州。研究期间(1986—2010 年)13 个地级市粮食产量主要取自《江苏省统计年鉴》《江苏省农村统计年鉴》《数据见证辉煌——江苏 60 年》《江苏农村经济 50 年》《江苏农村改革发展 30 年》和江苏省各市历年统计年鉴;过去 25 a 间(1986—2010 年)全省作物播种面积平均为 $5.64 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 粮食总产量平均为 $3.33 \times 10^{10} \text{ kg}$ 。

1.3 研究方法

在农业生产中,农业产出是在各种自然和非自然因素综合作用下形成的;而农业产出的影响因素主要分为社会经济因素和气候因素两部分。为了研究粮食产量与气候要素之间的关系,必须将社会经济因素等人为因素的影响从实际产量中剔除,余下的粮食产量变化可以由气候变化来解释。鉴于作物育种、品质、播种手段等田间管理水平不断提高而引起产量大幅增长,为了消除这些非气候要素引起的产量增长趋势,众多学者(Nicholls, 1997; Vesselin and Gerrit, 2001; Lobell and Asner, 2003; Chen et al., 2004; Christopher and Navin, 2005; Lobell et al., 2005; Lobell and Field, 2007; Joshi et al., 2010; 包云轩等, 2012)采用去倾处理的方法(年际差),就气候变化对作物产量的影响开展了广泛研究。本文以 $\Delta Y_i (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 表示第 i 年粮食单产的年际差,即第 i 年与第 $i-1$ 年粮食单产的差值;分别对不同时间尺度的气候要素做相应处理;新序列的时段为 1987—2010 年。

本研究拟采用 Pearson 相关分析确定 1987—2010 年粮食单产年际差与不同时间尺度气候要素年际差的相关关系,并找出与粮食单产呈显著($p > 0.05$)相关的气候要素。利用一元线性回归方程,可以获得粮食单产对某一气候要素的响应;另外,为了解决因样本容量($n = 24$)有限带来的不确定性,引入自助抽样方法(Tao et al., 2008),通过 1 000 次的反复抽样获得 1 000 组样本(每组 $n = 24$),并建立新的一元线性回归方程,最后获得粮食单产对该气候要素响应的范围。

评估 1986—2010 年气候变化对粮食单产的影响,可采用下式:

$$\left. \frac{dY_{\text{clim}}}{dt} \right|_m = \sum_{i=1}^N \left(\alpha_i^m \cdot \frac{dx_i^m}{dt} \right). \quad (1)$$

其中: m 表示由作物年、夏粮—秋粮生长季和月尺度的气候要素年际差与粮食产量年际差所建立的模型,分别记为模型 A、模型 B 和模型 C; $\left. \frac{dY_{\text{clim}}}{dt} \right|_m$ 表示 m 模型计算的气候变化引起的粮食产量变化; N 为 m 模型中与粮食产量有显著($p > 0.05$)相关的气候要素个数; α_i^m 为 m 模型中粮食单产对第 i 个气候要素的响应,即一元回归方程系数; $\frac{dx_i^m}{dt}$ 表示 1986—2010 年第 i 个气候要素的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 粮食产量及气候变化特征

表 1 为过去 25 a 苏北、苏中、苏南(以下简称三区)和江苏省粮食单产、总产量和播种面积的多年平均及其标准差。可以发现:三区粮食单产均在 $5\ 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,且由于水热条件的差异,粮食单产表现为从南(苏南)到北(苏北)逐渐递减的变化特征;而播种面积和总产量从南到北逐渐递增,与江苏省经济发展空间格局基本一致,苏南地区对农业的倚重较小,而苏北和苏中地区则相反。就全省平均而言,粮食单产、播种面积和总产量的 25 a 平均分别为 $5\ 921.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $5.64 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $3.33 \times 10^{10} \text{ kg}$ 。1986—2010 年,在农业管理措施和技术等的不断发展以及气候变化的共同作用下,三区和江苏省粮食单产显著($p > 0.01$)增加(图 2),其中,以苏北地区增加最多($69.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);而江苏省增加趋势为 $66.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

近年来,在全球变暖背景下,江苏省气候也发生了相应的变化,图 3 为 1986—2010 年三区和江苏的不同时间尺度的主要气候要素变化趋势。在作物年尺度上,过去 25 a 江苏省降水略微增加,日较差和日照时数分别以 $-0.02 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-6.25 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率显著($p > 0.05$)减小,而最低和最高温度均显著($p > 0.01$)上升,分别为 $0.07 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$;苏北降水略有增加,而苏中和苏南略减少;三区最低和最高温度均显著($p > 0.01$)上升,其中以苏中最低温度和苏南最高温度最大,分别为 $0.08 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$;苏北和苏中日较差、苏北日照时数显著($p > 0.05$)减小。

表1 1986—2010年粮食单产、总产量和播种面积以及气候要素的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of yield per hectare, total production and sown area of food-crops, and climatic factors from 1986 to 2010

	粮食单产/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	播种面积/ (10^6 hm^2)	粮食总产量/ (10^{10} kg)	年降水/ mm	最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	日较差/ $^{\circ}\text{C}$	年日照时数/ (10^3 h)
苏北	5 657.98 ± 611.74	3.06 ± 0.24	1.73 ± 0.23	935.05 ± 186.02	10.68 ± 0.65	19.48 ± 0.55	8.80 ± 0.36	2.15 ± 0.13
苏中	5 811.98 ± 516.37	1.41 ± 0.11	0.82 ± 0.06	1 063.65 ± 182.32	12.04 ± 0.72	20.06 ± 0.64	8.01 ± 0.29	2.03 ± 0.12
苏南	6 293.14 ± 574.79	1.17 ± 0.35	0.74 ± 0.17	1 141.78 ± 182.17	12.64 ± 0.68	20.53 ± 0.66	7.90 ± 0.27	1.91 ± 0.11
江苏	5 921.03 ± 549.27	5.64 ± 0.61	3.33 ± 0.28	1 046.83 ± 151.38	11.79 ± 0.68	20.02 ± 0.60	8.24 ± 0.28	2.03 ± 0.11

注:上标表示该变量的标准差。

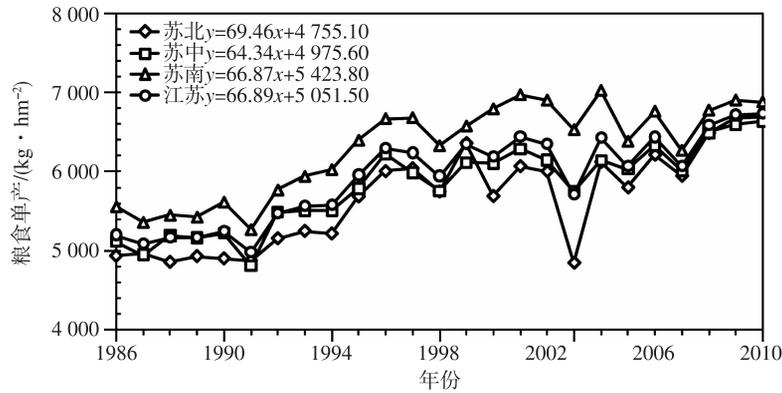


图2 1986—2010年苏北、苏中、苏南和江苏省的粮食单产变化

Fig. 2 Variations of food-crops yield per hectare in north, central and south Jiangsu, and Jiangsu from 1986 to 2010

在夏粮—秋粮生长季尺度上,夏粮生长季和秋粮生长季的江苏降水分别呈微弱下降和上升趋势,最低和最高温度均显著($p > 0.01$)上升,秋粮生长季时日较差和日照时数均显著($p > 0.01$)减小,而夏粮生长季变化不大;就三区而言,夏粮(秋粮)生长季的降水在苏北、苏中和苏南分别呈减小(增加)、减小(减小)和增加(减小)的趋势;除苏北的秋粮生长季最高温度外,三区最低和最高温度均显著($p > 0.01$)升高,尤以苏中最低温度最明显($0.09 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上);苏北和苏中秋粮生长季日较差分别以 $-0.05 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-0.03 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率显著($p > 0.01$)下降;夏粮和秋粮生长季的苏北日照时数减小,且尤以秋粮生长季最为显著($-9.88 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$),而苏中和苏南地区分别增加和减小。

在月尺度上,三区和江苏的各气候要素均发生了不同程度的变化。对于江苏,除10月、11月、3月、5月和6月降水减少外,其他月份均增加,但并不显著;各月最低温度上升,其中2—10月显著($p > 0.01$);除12月外,最高温度均升高,以3月、9月和10月显著($p > 0.01$);大部分月份(除3月、

4月和6月)日较差减小,其中8—10月显著($p > 0.05$);1月、3月和4月日照时数略有增加,其他月份均减小,且9月显著($p > 0.05$)。对于三区,各月降水变化差异较大,但均不显著,且以3月或6月减小最多,以1月、7月或8月增加最大;除苏北1月最低温度略降,各地均上升,且大部分显著($p > 0.01$),其中9月或10月上升速率为 $0.10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右;苏北和苏中的1月、苏南的1月和2月最高温度略降,其他月份均升高,且以3月升高最为明显,均在 $0.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上;苏北和苏中多数月份的日较差下降,其中8—10月显著($p > 0.05$),而苏南3—7月略增,其他月份减小;除苏北7—9月日照时数显著($p > 0.05$)下降,其他地区各月日照时数变化不明显。

2.2 粮食产量对气候变化的响应关系

为了找出各地区对粮食产量有显著影响的气候要素,利用 Pearson 相关分析,计算了各地区粮食单产年际差与不同时间尺度的各气候要素年际差的相关系数(图4)。分析发现:苏北(图4a)粮食单产与作物年和夏粮生长季的降水呈显著($p > 0.01$)负相关,与作物年的最高温度、日较差、日照时数和秋粮

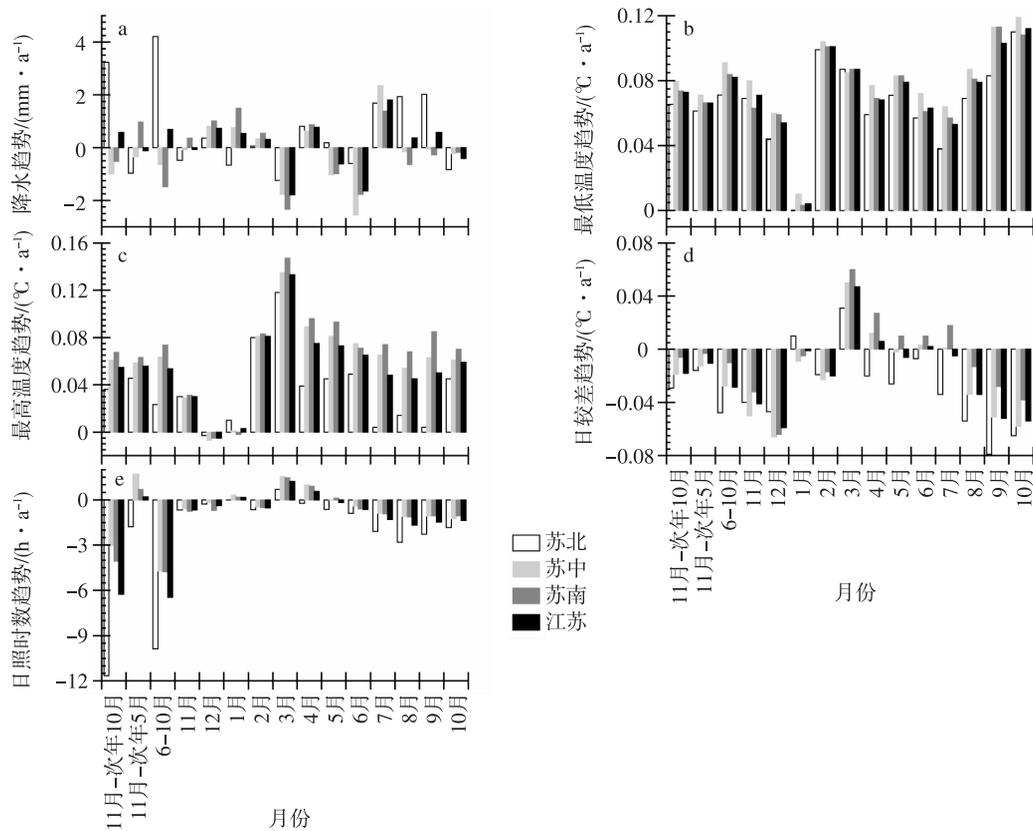


图3 1986—2010年苏北、苏中、苏南和江苏气候要素在不同时间尺度上的变化趋势 a. 降水; b. 最低温度; c. 最高温度; d. 日较差; e. 日照时数

Fig. 3 Trends of climatic factors on different time scales in north, central and south Jiangsu, and Jiangsu from 1986 to 2010 a. precipitation; b. minimum temperature; c. maximum temperature; d. diurnal temperature range; e. sunshine duration

生长季的最高温度、日较差以及夏粮生长季的日较差存在显著($p > 0.05$)正相关;苏中(图4b)粮食单产与作物年和夏粮生长季的降水呈显著($p > 0.01$)负相关;苏南(图4c)粮食单产与夏粮生长季的降水呈显著($p > 0.05$)负相关;就江苏(图4d)而言,作物年和夏粮生长季的降水与粮食单产呈显著($p > 0.01$)负相关,而与作物年的日较差呈显著($p > 0.05$)正相关。另外,从月尺度的气候要素年际差与粮食单产年际差的相关系数来看,粮食单产与逐月气候要素的相关关系与上述分析结果基本一致;但有趣的是,有的原本与粮食单产并不显著的气候要素,在月尺度上显著($p > 0.05$)相关,例如,苏北1月最低温度、苏南3月以及9月最低和最高温度、江苏9月最高温度。综上所述,表2列出了与粮食单产年际差呈显著相关的不同时间尺度的气候要素。

根据表2给出的与粮食单产年际差呈显著相关的不同时间尺度的气候要素,采用一元回归结合自助采样的方法可以获得粮食单产对单个气候因子的响应及其范围(图5)。就粮食单产对作物年气候要

素的响应,除苏南无明显响应外,苏北、苏中和江苏均表现出明显的响应关系,其中,与降水呈不随时间变化的负响应关系(即随降水增加而减小,减小而增大),均值分别为 $-0.19\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 、 $-0.09\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 和 $-0.11\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$;随时间变化,苏北和江苏粮食单产对日较差的正响应关系不变(即随日较差增加而增加,减小而减小),均值分别为 $8.30\% \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $5.31\% \cdot \text{°C}^{-1}$;另外,在苏北地区最高温度和日照时数对粮食单产也存在显著影响,分别为 $-1.07\% \cdot \text{°C}^{-1} \sim 10.70\% \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $-0.02\% \cdot (10 \text{ h})^{-1} \sim 0.43\% \cdot (10 \text{ h})^{-1}$ 。粮食单产对夏粮—秋粮生长季气候要素的响应关系主要表现为:苏北、苏中、苏南和江苏粮食单产均与秋粮生长季降水呈正的响应关系,且不随时间变化,均值分别为 $-0.21\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 、 $-0.13\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 、 $-0.07\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 和 $-0.15\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$;另外,苏北粮食单产基本表现为随夏粮生长季最高温度、日较差及秋粮生长季日较差的升高而增加,范围分别为 $-0.50\% \cdot \text{°C}^{-1} \sim 8.84\% \cdot \text{°C}^{-1}$ 、

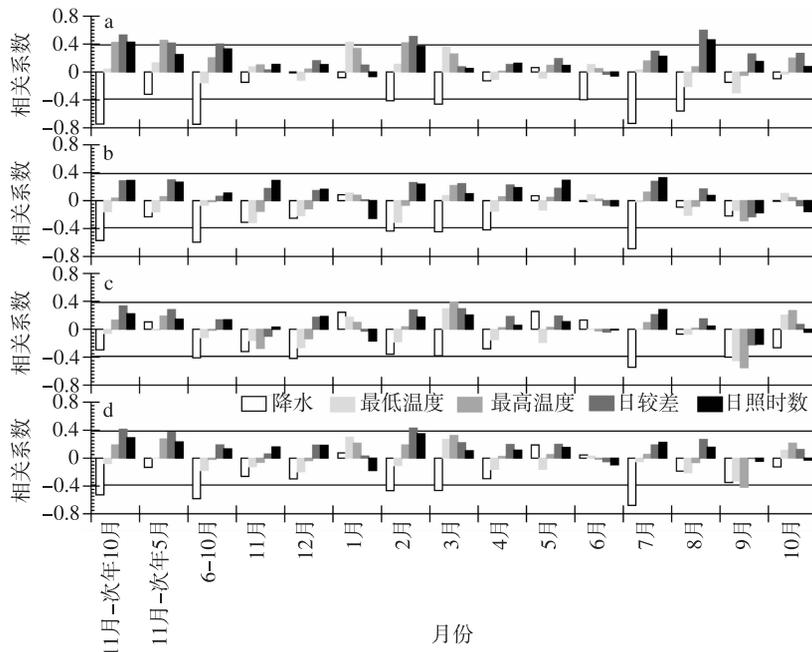


图 4 粮食单产年际差与不同时间尺度的各气候要素年际差的相关系数 a. 苏北地区;b. 苏中地区;c. 苏南地区;d. 江苏

Fig. 4 Correlation coefficients between the interannual difference of the food-crops yield per hectare and each climatic factor on different time scales a. north Jiangsu; b. central Jiangsu; c. south Jiangsu; d. Jiangsu

表 2 与粮食单产呈显著相关的气候要素

Table 2 Climatic factors significantly correlated with the interannual difference of the food-crops yield per hectare

时间尺度	苏北	苏中	苏南	江苏
作物年	降水;最高温度;日较差;日照时数	降水	—	降水;日较差
夏粮—秋粮	最高温度;日较差	—	—	—
生长季	降水;日较差	降水	降水	降水
月	2月、3月和6—8月降水;1月最低温度;2月最高温度;2月和8月日较差;8月日照时数	2—4月和7月降水	7月、9月和12月降水;9月最低温度;3月和9月最高温度	2月、3月和7月降水;9月最高温度;2月日较差

-0.44% · °C⁻¹ ~ 9.99% · °C⁻¹ 和 -1.13% · °C⁻¹ ~ 11.28% · °C⁻¹。粮食单产对各月气候要素的响应为:1) 苏北,除 3 月外,粮食单产对 2 月、6 月、7 月和 8 月降水呈不随时间变化的负响应关系,且对 2 月最敏感(对比均值),为 -1.33% · °C⁻¹;除 2 月最高温度,粮食单产对 1 月最低温度、2 月和 8 月日较差以及 8 月日照时数呈正响应关系,且不随时间改变。2) 苏中,粮食单产对 2—4 月和 7 月降水均呈正的、不随时间而变的响应关系,且对 2 月最敏感(对比均值),为 -0.66% · °C⁻¹。3) 苏南,粮食单产对 7 月、9 月和 12 月降水以及 9 月最低和最高温度均呈不随时间变化的负响应关系,而对 3 月最高温度基本呈正响应关系,范围为 0.20% · °C⁻¹ ~

1.81% · °C⁻¹。4) 江苏,粮食单产对月降水(2 月、3 月和 7 月)和 9 月最高温度的响应依然表现为负响应关系,而对 2 月日较差呈正的响应关系,且不随时间而变化。

2.3 评估 1986—2010 年气候变化对粮食产量的影响

由前述结果,利用方程(1),本研究分别计算了各区和江苏省 1986—2010 年气候变化对粮食单产(表 3)和总产(表 4)变化的贡献及其范围。总体来看(对比平均值),三类模型的估算结果均显示气候变化使得苏北、苏南和江苏粮食单产(总产)减小,但结果略有差异,其中,模型 C 估算显示气候变化对粮食单产(总产)的影响最大,其均值分别为

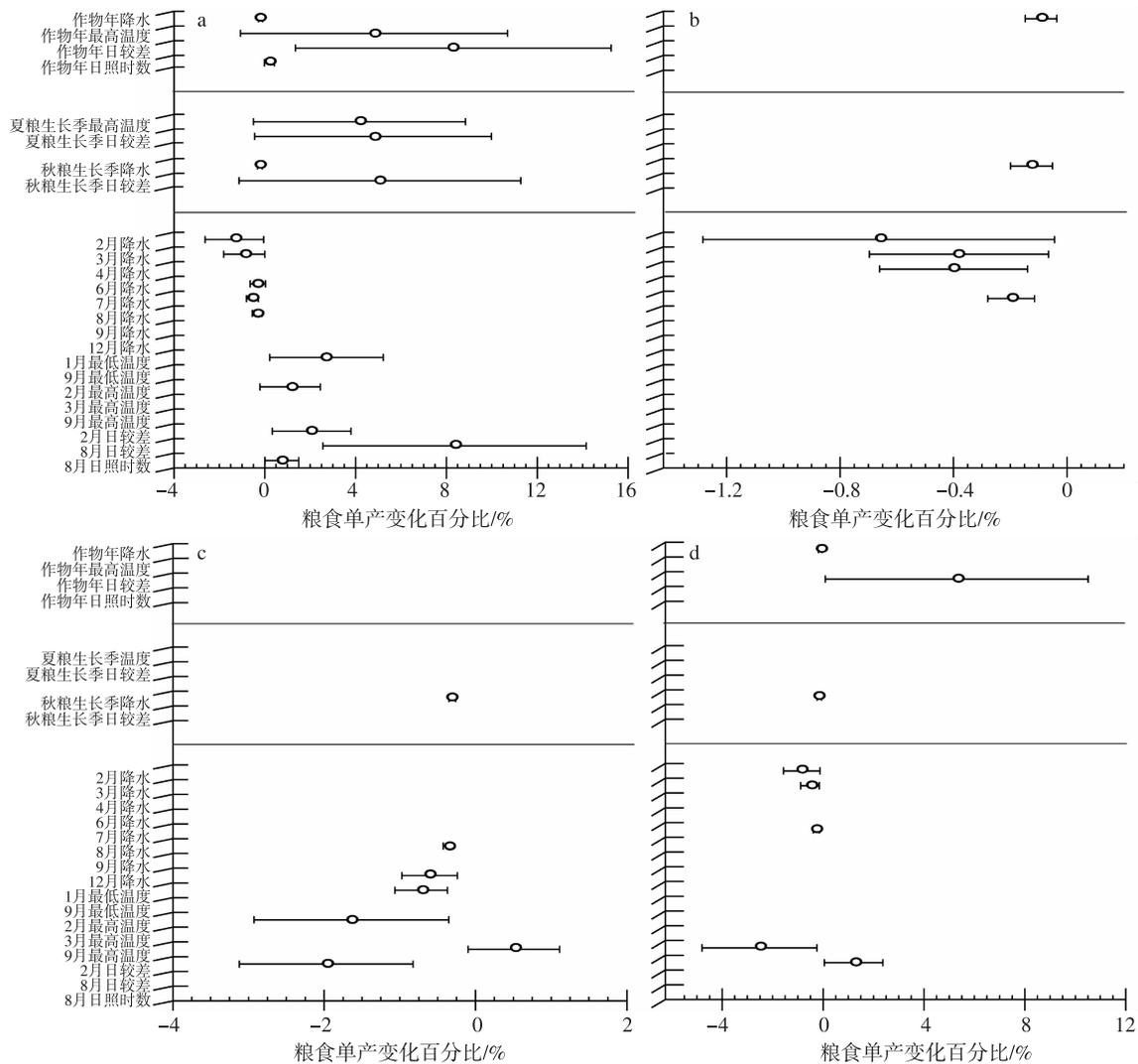


图 5 苏北(a)、苏中(b)、苏南(c)地区和江苏全省(d)粮食单产变化对单一气候要素变化的响应(粮食单产对最低和最高温度及日较差的响应:该要素变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粮食单产相对于 1986—2010 年平均的变化百分比, 单位为 $\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$; 粮食单产对降水和日照时数的响应:该要素变化 10 mm 或 10 h, 粮食单产相对于 1986—2010 年平均的变化百分比, 单位分别为 $\% \cdot (10\text{ mm})^{-1}$ 和 $\% \cdot (10\text{ h})^{-1}$; 误差线为 5% ~ 95% 分位数, 通过自助采样方法 1 000 次采样获得)

Fig. 5 Responses of food-crops yield per hectare to variation of one climatic factor in (a) north Jiangsu, (b) central Jiangsu, (c) south Jiangsu, and (d) Jiangsu (The responses of food-crops yield per hectare to minimum and maximum temperatures, and diurnal temperature range represent the change of food-crops yield per hectare against the mean from 1986 to 2010 when one of these factors varies at $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, with the unit of $\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$. The responses of food-crops yield per hectare to precipitation and sunshine duration show the change of food-crops yield per hectare relative to the mean from 1986 to 2010 when precipitation and sunshine duration varies at 10 mm and 10 h, with the unit of $\% \cdot (10\text{ mm})^{-1}$ and $\% \cdot (10\text{ h})^{-1}$, respectively. Error bars are between 5th and 95th percentile based on the bootstrap resampling of historical data with 1 000 replications)

$-6.51\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ($-11.28 \times 10^8\text{ kg} \cdot (10\text{ a})^{-1}$)、
 $-3.27\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ($-2.36 \times 10^8\text{ kg} \cdot (10\text{ a})^{-1}$)
 和 $-1.34\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ($-4.45 \times 10^8\text{ kg} \cdot (10\text{ a})^{-1}$)。
 对于苏中地区, 模型 A 和模型 B 结果均说明该地区
 气候变化有利于粮食的生产, 分别使得粮食单产(总
 产)趋势增加了 $0.09\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ($0.07 \times 10^8\text{ kg} \cdot$

$(10\text{ a})^{-1}$) 和 $0.08\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ($0.07 \times 10^8\text{ kg} \cdot$
 $(10\text{ a})^{-1}$); 而模型 C 结果显示气候变化使得该地
 区粮食单产(总产)趋势减小了 $0.26\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$
 $(0.21 \times 10^8\text{ kg} \cdot (10\text{ a})^{-1})$ 。不同月份同一气候要
 素的相反(相同)变化情况, 减弱(加剧)了该气候要
 素对粮食生产的影响, 这可能是模型结果存在差异

(尤其是模型 C 与其他两个模型)的原因。

另外,对比三区和江苏省三类模型(除苏中地区的模型 A)结果,不难发现:降水变化对粮食产量的影响均得到了体现,说明降水对这些地区的粮食生产是至关重要的;同时,值得注意的是,原本在模型 A 或模型 B 中未体现出来气候因子,在模型 C 中

得以展现,如:温度、日较差及日照时数对苏北地区粮食产量的影响,温度对苏南地区粮食产量的影响,最高温度和日较差对江苏省粮食产量影响;这些都说明月尺度的气候变化对粮食产量的影响不容忽视;因此,为了系统全面地评价气候变化对粮食产量的影响,考虑月尺度气候变化的影响是十分必要的。

表 3 1986—2010 年气候变化引起的粮食单产变化(相对 1986—2010 年多年平均单产)

Table 3 Percentage variations of food-crops yield per hectare due to climate change from 1986 to 2010(relative to the mean food-crops yield per hectare from 1986 to 2010)

地区	模型	变量	各气候要素变化引起的粮食单产的变化百分比/(%·(10 a) ⁻¹)		各气候要素变化引起的粮食单产变化之和/(%·(10 a) ⁻¹)	
			平均值	范围	平均	范围
苏北	模型 A	降水	-0.60	-0.89 ~ -0.32	-3.66	-10.72 ~ 3.4
		最高温度	1.74	-0.39 ~ 3.88		
		日较差	-2.42	-4.45 ~ -0.39		
		日照时数	-2.38	-5.00 ~ 0.23		
	模型 B	11 月—次年 5 月最高温度	1.89	-0.23 ~ 4.02	-2.19	-8.5 ~ 4.16
		11 月—次年 5 月日较差	-0.76	-1.58 ~ 0.07		
		6—10 月降水	-0.90	-1.33 ~ -0.47		
		6—10 月日较差	-2.43	-5.39 ~ 0.54		
	模型 C	2 月降水	-0.08	-0.16 ~ 0	-6.51	-15.39 ~ 2.37
		3 月降水	1.12	0.01 ~ 2.24		
		6 月降水	0.18	-0.02 ~ 0.38		
		7 月降水	-0.92	-1.37 ~ -0.47		
		8 月降水	-0.64	-1.06 ~ -0.23		
		1 月最低温度	-0.01	-0.02 ~ 0		
2 月最高温度		0.89	-0.17 ~ 1.95			
2 月日较差		-0.4	-0.73 ~ -0.06			
苏中	模型 A	降水	0.09	0.04 ~ 0.15	0.09	0.04 ~ 0.15
	模型 B	6—10 月降水	0.08	0.03 ~ 0.13	0.08	0.03 ~ 0.13
	模型 C	2 月降水	-0.23	-0.44 ~ -0.02	-0.26	-1.39 ~ 0.87
		3 月降水	0.68	0.12 ~ 1.24		
4 月降水		-0.25	-0.09 ~ -0.41			
苏南	模型 A	—	—	—	—	
	模型 B	6—10 月降水	-0.07	-0.13 ~ -0.02	-0.07	-0.13 ~ -0.02
	模型 C	7 月降水	-0.22	-0.33 ~ -0.11	-3.27	-8.40 ~ 1.85
		9 月降水	0.13	0 ~ 0.26		
		12 月降水	-0.63	-1.10 ~ -0.16		
		9 月最低温度	-2.09	-4.02 ~ -0.15		
		3 月最高温度	1.48	0.30 ~ 2.67		
9 月最高温度	-1.95	-3.24 ~ -0.65				
江苏	模型 A	降水	-0.06	-0.10 ~ -0.02	-1.02	-2.00 ~ -0.04
		日较差	-0.96	-1.9 ~ -0.02		
	模型 B	6—10 月降水	-0.10	-0.16 ~ -0.04	-0.10	-0.16 ~ -0.04
	模型 C	2 月降水	-0.27	-0.5 ~ -0.04	-1.34	-3.83 ~ 1.11
		3 月降水	0.93	0.27 ~ 1.58		
		7 月降水	-0.49	-0.71 ~ -0.26		
		9 月最高温度	-1.27	-2.42 ~ -0.12		
		2 月日较差	-0.24	-0.47 ~ -0.01		

表 4 1986—2010 年气候变化引起的粮食总产量变化(播种面积为 1986—2010 年平均)

Table 4 Variations of total food-crops production caused by climate change from 1986 to 2010(the sown area of food-crops is averaged from 1986 to 2010)

地区	模型	变量	各气候要素变化引起的粮食总产量变化/(10 ⁸ kg · (10 a) ⁻¹)		各气候要素变化引起的粮食总产量变化之和/(10 ⁸ kg · (10 a) ⁻¹)	
			平均值	范围	平均	范围
苏北	模型 A	降水	-1.04	-1.54 ~ -0.56	-6.34	-18.57 ~ 5.89
		最高温度	3.01	-0.68 ~ 6.72		
		日较差	-4.19	-7.71 ~ -0.68		
		日照时数	-4.12	-8.66 ~ 0.40		
	模型 B	11 月一次年 5 月最高温度	3.27	-0.40 ~ 6.96	-3.81	-14.72 ~ 7.21
		11 月一次年 5 月日较差	-1.32	-2.74 ~ 0.12		
		6—10 月降水	-1.56	-2.30 ~ -0.81		
		6—10 月日较差	-4.21	-9.34 ~ 0.94		
	模型 C	2 月降水	-0.14	-0.28 ~ 0	-11.28	-26.66 ~ 4.11
		3 月降水	1.94	-0.02 ~ 3.88		
		6 月降水	0.31	-0.04 ~ 0.66		
		7 月降水	-1.59	-2.37 ~ -0.81		
		8 月降水	-1.11	-1.84 ~ -0.40		
		1 月最低温度	-0.02	-0.04 ~ 0		
		2 月最高温度	1.54	-0.30 ~ 3.38		
		2 月日较差	-0.69	-1.27 ~ -0.10		
8 月日较差	-7.86	-13.31 ~ -2.41				
8 月日照时数	-3.65	-7.26 ~ -0.07				
苏中	模型 A	降水	0.07	0.03 ~ 0.12	0.07	0.03 ~ 0.12
	模型 B	6—10 月降水	0.07	0.03 ~ 0.11	0.07	0.02 ~ 0.11
	模型 C	2 月降水	-0.19	-0.36 ~ -0.02	-0.21	-1.13 ~ 0.07
		3 月降水	0.55	0.10 ~ 1.01		
		4 月降水	-0.20	-0.07 ~ -0.34		
7 月降水	-0.38	-0.54 ~ -0.22				
苏南	模型 A	—	—	—	—	
	模型 B	6—10 月降水	-0.05	-0.09 ~ -0.01	-0.05	
	模型 C	7 月降水	-0.16	-0.24 ~ -0.08	-2.36	-6.05 ~ 1.33
		9 月降水	0.09	0 ~ 0.19		
		12 月降水	-0.45	-0.79 ~ -0.12		
		9 月最低温度	-1.51	-2.90 ~ -0.11		
		3 月最高温度	1.07	0.22 ~ 1.92		
9 月最高温度	-1.41	-2.34 ~ -0.47				
江苏	模型 A	降水	-0.20	-0.33 ~ -0.07	-3.39	-6.64 ~ -0.13
		日较差	-3.19	-6.31 ~ -0.07		
	模型 B	6—10 月降水	-0.33	-0.53 ~ -0.13	-0.33	-0.53 ~ -0.13
	模型 C	2 月降水	-0.90	-1.66 ~ -0.13	-4.45	-12.71 ~ -3.68
		3 月降水	3.09	0.90 ~ 5.24		
		7 月降水	-1.63	-2.36 ~ -0.86		
		9 月最高温度	-4.22	-8.03 ~ -0.40		
2 月日较差	-0.80	-1.56 ~ -0.03				

3 结论与讨论

结合 1986—2010 年江苏省 63 个气象站的逐日气候资料,采用样条函数方法获得了苏北、苏中、苏南和江苏逐月的区域平均气候要素,分析了各地区不同气候要素在作物年(11 月一次年 10 月)、夏

粮—秋粮(11 月一次年 5 月和 6—10 月)生长季以及月尺度上的变化趋势;结合其同期粮食单产、总产量及播种面积,基于自助抽样方法分析了各区和江苏粮食产量对不同时间尺度气候要素的响应;并定量评价了气候变化对各区和江苏粮食产量的影响及其贡献,得到以下结论:

1)作物年尺度上,1986—2010年苏北和江苏省降水略增,而苏中和苏南略有减少;各区和江苏省最低和最高温度均显著($p > 0.05$)升高,而日较差和日照时数显著($p > 0.05$)下降。另外,在夏粮—秋粮生长季以及月尺度上,25 a间各气候要素在各区和江苏省均发生了不同程度的变化。而在农业管理措施和技术的不断进步以及气候的共同作用下,三区和江苏省粮食单产显著($p > 0.01$)增加,其中,江苏省增加趋势为 $66.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2)基于一元回归结合自助采样方法,分析发现:除苏南地区粮食产量在作物年尺度上对气候变化的响应不显著外,其他地区 and 江苏省粮食产量均与不同时间尺度气候要素呈显著响应关系。其中,各区及江苏省粮食产量对三种时间尺度的降水基本表现为负的响应关系(即随降水的增加而减小,减小而增加),且不随时间而变化。作物年尺度上,苏北、苏中和江苏省粮食单产随降水的增加(减少),将分别平均减小(增加) $0.19\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 、 $0.09\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 和 $0.11\% \cdot (10 \text{ mm})^{-1}$ 。

3)三类模型估算结果均显示气候变化使得苏北、苏南和江苏粮食单产(总产)减小,但不同模型计算结果略有差异,其中,利用月气候要素建立的模型C估算的气候变化对粮食产量的影响最大,其均值分别为 $-6.51\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-11.28 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)、 $-3.27\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-2.36 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)和 $-1.34\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($-4.45 \times 10^8 \text{ kg} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)。除苏中地区的模型A外,降水对各地区和江苏省粮食产量的影响均得到了体现,说明降水对粮食生产有着至关重要的影响。另外,原本在模型A或模型B中未出现的气候因子,在模型C中得以体现,这说明月尺度的气候变化对粮食产量的影响不容忽视;因此,为了系统而全面地评估气候变化对粮食产量的影响,考虑月尺度气候变化的影响是十分必要的。

本文利用作物产量和相关气候要素,基于自助采样法评估了气候变化对江苏省粮食产量的影响,并获得了相关结论。该方法虽然可以为较快速地评价气候变化对粮食生产的影响提供一个有效的手段,但依然存在一定的不足之处。作物产量对气候因子的响应规律十分复杂,各种气候因子间及气候因子对作物的作用都存在交互作用,最终收获的作物产量是对气候因子的综合反映。例如, Sitch et al. (2003)和孙善磊等(2010b)在研究自然植被对气候变化的响应时,均指出气候因子之间的相互作

用对植被生长的影响甚是重要。因此,利用作物产量数据建立统计模型时,忽略气候因子间(如温度和降水间等)的相互作用对作物产量的影响,势必会对评估结果产生一定影响。此外,该方法无法揭示气候因子影响作物的物理机制。综上所述,在今后的工作中仍需利用相关作物生长模型或田间试验就气候变化、各因子间的相互作用对作物产量的影响及其机制进行有益的探讨。

参考文献:

- 白仲林. 2008. 面板数据的计量经济分析[M]. 天津:南开大学出版社.
- 包云轩,刘维,高苹,等. 2012. 气候变暖背景下江苏省水稻热害发生规律及其对产量的影响[J]. 中国农业气象,33(2):289-296.
- 曹光平,陈永福. 2012. 气候变暖等因素对山东省种植业产出的影响[J]. 中国人口资源与环境,22(3):32-36.
- 高庆九,张荣,管兆勇. 2012. 近50 a来华北地区负积温变化特征[J]. 大气科学学报,35(4):448-457.
- 高永刚,顾红,姬菊枝,等. 2007. 近43年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究[J]. 应用气象学报,18(4):532-538.
- 郭建平. 1992. 气候变化对我国东部地区粮食产量的影响初探[J]. 地理研究,11(1):56-61.
- 孙善磊,周锁铨,金博,等. 2010a. 淮海地区降水周期及突变特征分析[J]. 气象科学,30(2):221-227.
- 孙善磊,周锁铨,薛根元,等. 2010b. 环杭州湾地区近36年自然植被净初级生产力的变化特征[J]. 自然资源学报,25(5):830-841.
- 孙善磊,周锁铨,薛根元,等. 2011. 环杭州湾地区自然植被净初级生产力的变化特征及其成因[J]. 大气科学学报,34(6):672-682.
- 肖卉,沈琪,刘杰,等. 2011. 连云港水稻产量的气象影响因子分析[J]. 气象科学,31(增刊):81-86.
- 张佩,高苹,刘彦丽. 2011. 江苏省冬小麦播种期对气候要素变化的响应[J]. 气象科学,31(6):763-769.
- 周国华,罗小莉,王盘兴,等. 2012. 中国冬季气温异常 EOF 分析的改进[J]. 大气科学学报,35(3):295-303.
- Chen C C, McCarl B A, Schimmelpfening D E. 2004. Yield variability as influenced by climate: A statistical investigation[J]. Climatic Change,66(1/2):239-261.
- Christopher J K, Navin R. 2005. Trends and variability in U. S. corn yields over the twentieth century[J]. Earth Interactions, 9(1): 1-25.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers[R]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis; Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Isik M, Devadoss S. 2006. An analysis of the impact of climate change on crop yields and yield variability[J]. Applied Economics, 38(7):835-844.
- Joshi N P, Maharjan K L, Piya L. 2010. Poverty and food insecurity in Nepal: A review[J]. Journal of International Development and Co-

- operation, 16(2):1-19.
- Joshi N P, Maharjan K L, Piya L. 2011. Effect of climate variable on yield of major food-crops in Nepal[J]. *Journal of Contemporary India Studies; Space and Society*, 1:19-26.
- Lobell D B, Asner G P. 2003. Climate and management contributions to recent trends in U. S. agricultural yields [J]. *Science*, 299(5609):1032.
- Lobell D B, Field C B. 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2(1):1-7.
- Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico [J]. *Field Crops Research*, 94:250-256.
- Nicholls N. 1997. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends [J]. *Nature*, 387:484-485.
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. *Global Change Biology*, 9:161-185.
- Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. 2008. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends [J]. *Climate Research*, 38:83-94.
- Vesselin A A, Gerrit H. 2001. Climate variation and crop production in Georgia, USA, during the twentieth century [J]. *Climate Research*, 17:33-43.

(责任编辑:倪东鸿)