

丁从慧, 申双和, 陶苏林. 江苏省农业气候资源及未来情景预估[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1309-1315.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.016

江苏省农业气候资源及未来情景预估

丁从慧¹, 申双和^{2,3}, 陶苏林²

(1. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230000; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 3. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用江苏省 60 个气象台站 1961–2012 年地面气象观测资料与 RegCM4.0 区域气候模式模拟的 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下数据, 分析江苏省近 52 年的农业气候资源的变化趋势并预估未来时段(2015–2050)光、温、水等农业气候资源的变化特征。结果表明: 近 52 年, 太阳总辐射呈下降趋势, 变化率为 -2.78 MJ/m^2 , $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温呈上升趋势, 气候倾向率变化为每 10 年 89°C , 降水量和参考作物蒸散量年际波动明显, 其中 1970s 的平均降水量和 1980s 的平均参考作物蒸散量最少。与基准气候相比(1961–2005 年), 未来 2 种气候情景下 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温、太阳总辐射均呈递增趋势; 全省大部分地区降水量在 RCP4.5 情景下呈现递增趋势, RCP8.5 情景下呈现递减趋势, 参考作物蒸散量在 2 种情景下大体变化趋势一致, 2 种情景下水分盈亏差异较大, 其中 RCP8.5 情景下苏北地区水分短缺显著。研究结果可为江苏省农业气候资源利用、农业生产和布局提供科学指导。

关键词: 农业气候资源; RCP4.5; RCP8.5

中图分类号: S162.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)06-1309-07

The characteristics of the agricultural climate resources and future scenarios in Jiangsu province

DING Cong-hui¹, SHEN Shuang-he^{2,3}, TAO Su-lin²

(1. Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230000, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using 60 the ground meteorological stations observation data of Jiangsu province from 1961 to 2012 and data of RCP4.5 and RCP8.5 emissions scenarios simulated by RegCM4.0 regional climate model, the change trend of agricultural climate resources in recent 52 years of Jiangsu province was analyzed and the change characteristics in the future period(2015–2050) were forecasted. The result showed that: Nearly 52 years, the solar total radiation decreased by 2.78 MJ/m^2 , the accumulated temperature increased in the case of $\geq 0^\circ\text{C}$, and the climatic tendency was 89°C every ten year. Precipitation and reference crop evapotranspiration fluctuated significantly, the average precipitation in the 1970s and the average reference crop evapotranspiration in the 1980s were the lowest. Compared with the baseline climate condition

(1961–2005), the accumulated temperature in the case of $\geq 0^\circ\text{C}$ and the sun total radiation increased in the two future climate scenarios. Precipitation in the most parts of the province increased in the RCP4.5 scenario and decreased in the RCP8.5 scenario. The reference crop evaporation in two scenarios showed the same trend. However,

收稿日期: 2017-06-20

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)

作者简介: 丁从慧(1990-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为应用气象。(E-mail) dconghui45@sina.com

通讯作者: 申双和, (E-mail) yqzhr@nuist.edu.cn

the water surplus-deficient in two scenarios showed a significant difference, and there was a significant water shortage in the RCP8.5 scenario in the north of Jiangsu province. These results can provide scientific guidance for the utilization of agricultural climate resources, agricultural production and layout in Jiangsu area.

Key words: agricultural climate resources; RCP4.5; RCP8.5

全球气候变化对生态环境和经济发展有重要影响^[1],已从科学问题转变为一个与全球利益相关的经济与政治问题。近 50 年全球平均温度和温室气体浓度增加已构成对气候的威胁。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出 21 世纪末全球平均地表温度在 1986–2005 的基础上将升高 0.3~4.8 °C,并且未来全球在干旱地区和湿润地区之间的季节平均降水差将会增大^[2-3]。中国是受全球气候变化影响显著的国家之一,主要是温度、作物产量和经济产量等受此影响^[4-5]。

农业对气候变化十分敏感,气候对农作物的影响研究成为当前科学关注的重要领域^[2-3,6-7]。大气中 CO₂ 浓度升高,气温升高,降水量的变化是全球气候变化对农业生产和农业生态系统影响最为重要的几个生态因子^[8];杨晓光等^[9-10]详细分析了中国不同区域农业气象资源时空变化特征以及气候特征对喜温、喜凉作物的影响;龚强等^[11]利用计算趋势系数等方法分析了辽宁省气候资源变化的基本特征及其对农业、能源的影响;康俊等^[12-13]研究了江苏省干湿变化的年代际特征和趋势并且分析了近 45 年江苏省年、季实测温度、降水的变化特征,苏南、苏中、苏北地带均表现出增温趋势,气温达 0.026 °C/a,降水量变化总体为上升趋势;于庚康等^[14]探讨了气候变化对江苏淮北地区大豆生育期内气候资源变化特征及其未来情景预估。研究气温、降水和日照等重要气象因素的演变特征是预测未来气候资源的方法之一^[15]。

本研究在前人的研究基础上拟用气候区域模式 RegCM4.0 输出未来 RCP4.5、RCP8.5 情景(2015–2050 年)及基准模拟气候条件(1961–2005 年)逐日气象资料,针对江苏省未来时段热量、光照、水分等农业气候资源时空特征进行预估,探讨江苏省未来应对气候变化的措施,以期各地充分利用气候资源指导农业生产,合理开发利用气候资源,为主要农作物种植、增产提供依据,为合理调整农业结构以及气候区划提供科学支撑。

1 研究方法

1.1 研究区概况

江苏是中国农业大省,位于东部沿海地区,具有明显季风气候特征,四季分明、光照充足、雨热同期,横跨长江淮河流域,水资源丰富。江苏具有得天独厚的气候条件,因此精确农业气候规划的研究更为重要。

1.2 数据来源

江苏省气候中心提供 60 个气象台站年逐日气象资料,要素含 1961–2012 年的平均气温(°C)、降水量(mm)、平均空气相对湿度(%)、平均风速(m/s)等常规气象要素。未来情景预估数据为国家气候中心提供的 RegCM4.0 区域气候模式模拟的江苏区域 RCP4.5、RCP8.5 排放情景下未来时段(2015–2050 年)以及基准时段(1961–2005 年)逐日气象格点资料,包括气温、降水、太阳总辐射、蒸散量等,空间分辨率为 50 km×50 km。模拟所得格点气象数据存在气候平均值的漂移和气候变率即标准差的漂移。

1.3 研究方法

(1)气候倾向率:以气象要素的时间为自变量,气象要素为因变量,构建一元回归方程。其中 Y 为气象要素, t 为时间(年),建立 y 与 t 之间的一元线性回归方程: $Y_i = A + at_i$, Y_i 为气象要素, t_i 为时间; a 为线性趋势, $10 \cdot a$ 为气象要素每 10 年的气候倾向率, $A < 0$ 表示气候要素序列随时间递减,反之递增。绝对值越大,趋势越明显。

(2)预估资料订正方法:非线性回归法建立模拟序列之间的传递函数,再采用方差放大法将模拟结果的方差订正至实测资料的方差水平^[16]。

(3)未来时段参考作物蒸散量:利用观测资料,根据文献[14]计算基准时段参考作物蒸散量,再根据未来情景预估数据及其订正方法计算。

2 结果与分析

2.1 农业气候资源的时空变化特征

2.1.1 热量资源时空变化特征 热量是农作物生长发育的基本条件,一定程度上制约着农作物的产

量以及耕作方式及其各种农事活动。在全球气候变化大背景下,江苏地区的热量资源存在着较为显著的变化特征。近 52 年来江苏省太阳总辐射存在显著下降的趋势(图 1A),线性趋势达 -2.78 MJ/m^2 ,太阳总辐射的下降现象与中国大部分地区太阳总辐射减少的现象一致,太阳总辐射变化呈现“波动平稳—波动剧烈”的特征。1981—2010 年大部分地区太阳总辐射的平均值为 3400.70 MJ/m^2 ,1980s 阶段的太阳总辐射平均值为 3389.80 MJ/m^2 ,相对于均值减少 10.90 MJ/m^2 ,整体呈现下降趋势。太阳总辐射的降低可能是由于气候变化造成大气气溶胶含量的增加所致,粒子散射太阳辐射,使得地面接收的太阳辐射减少,最终导致光合有效辐射减少,太阳辐射作为植物光合作用、蒸腾作用的主要驱动因子,是最基本最主要的农业气候资源^[17-18],影响着植物的光合、生长发育等,最终影响产量^[19]。

江苏省 0°C 以上的活动积温呈现增长趋势(图

1B),其中最高值和最低值分别出现在 2007 年($5999^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)和 1980 年($5188^\circ\text{C}\cdot\text{d}$),两者相差 $811^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,说明全省 0°C 以上的活动积温年际间变异性很大。近 52 年来全省 0°C 以上的活动积温呈现波浪式上升,10 年气候倾向率变化为 89°C ,说明温度多年来是升高的,与前人研究结果一致^[13]。近 52 年中在 1960s、1970s、1980s 是热量资源缺乏的阶段,平均值为 $5401^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,相较于多年平均值减少 $206^\circ\text{C}\cdot\text{d}$;1990s 阶段高于平均值,此阶段积温的平均值为 $5704^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,比多年平均值高出 $96^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,是江苏省热量资源最丰富的阶段。 10°C 以上的活动积温是气候热量资源评价中具有重要代表性的一个指标,与 0°C 以上活动积温相比(表 1), 10°C 以上活动积温低 $538^\circ\text{C}\cdot\text{d}$, 10°C 以上活动积温最大值出现在 2006 年,比均值高 $487^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,最小值出现在 1976 年,较均值减少 $396^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。

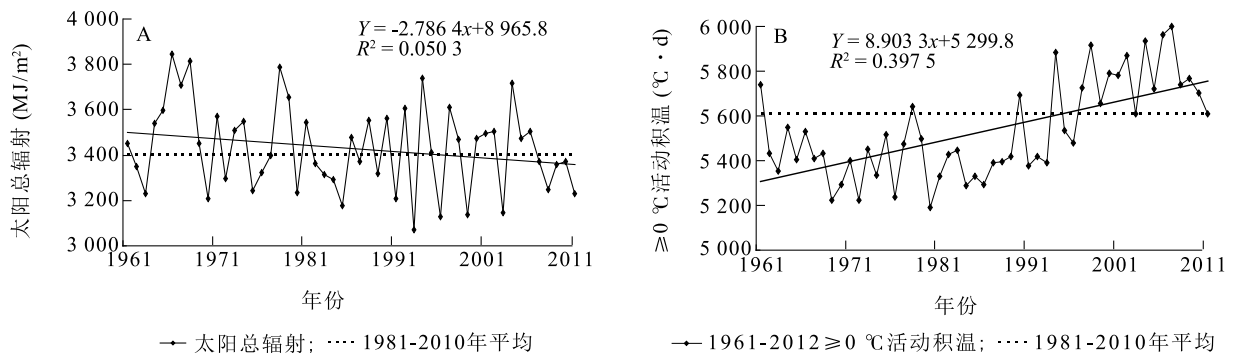


图 1 1961—2012 年太阳总辐射(A)和 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温(B)变化趋势

Fig.1 Change trend of solar total radiation (A) and $\geq 0^\circ\text{C}$ active accumulated temperature (B) from 1961 to 2012

表 1 不同标准活动积温的比较

Table 1 The comparison of different standards of active accumulated temperature

活动积温	1961—2012 年平均值 ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)	最大值 ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)	最小值 ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)	拟合趋势	R^2
$\geq 0^\circ\text{C}$	5 536	5 999	5 188	$y = 8.9033x + 5299.8$	0.397 5
$\geq 10^\circ\text{C}$	4 998	5 485	4 602	$y = 8.2870x + 4778.7$	0.337 5

x 为年份; y 为活动积温。

2.1.2 水资源时空变化特征 1961—2012 年,江苏省的年平均降水量呈现出“下降—上升”的气候变化特征(图 2A),1960s 至 1970s 阶段为下降期,1980s 至 2000s 阶段为上升期,1981—2010 年江苏省的气候平均降水量为 1023 mm ,在 1970s 阶段降水量最少。近 52 年中,在 1978 年、1994 年出现了极小值,全年的降水量不足 750 mm ;在 1962 年、1991

年、2003 年出现极大值,年降水量均超过 1200 mm 。与此同时,农业气候的适宜度还需考虑作物的蒸散量,此指标是评价气候干旱程度、植被耗水的重要指标。图 2B 为 1961—2012 年江苏省 60 个站点农业气候资源的年均参考作物蒸散量,在 1960s 至 1980s 蒸散量逐渐减小,1990s 至 2000s 参考作物蒸散量逐渐增加,在 1980s 阶段参考作物蒸散量最低。在

1978 年出现了近 52 年来的最大值 (1 066 mm), 2003 年出现了极小值 914 mm, 其中近 30 年 (1981–

2010 年) 江苏省气候年平均参考作物蒸散量为 959 mm。

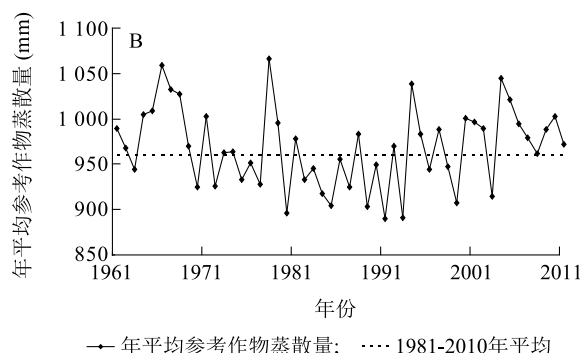
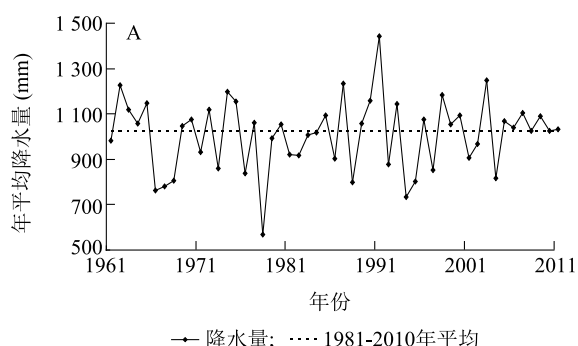


图 2 1961–2012 年降水量 (A) 和年平均参考作物蒸散量 (B) 变化趋势

Fig.2 Change trend of annual precipitation (A) and annual average reference crop evaporation (B) from 1961 to 2012

2.2 未来气候情景下热能、光能、水分资源等农业气候资源的变化

2.2.1 热量资源 图 3a 为基准年江苏省 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 活动积温的分布, 由图 3a 可见, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 活动积温的分布达 $4\,762\sim 5\,684^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 整体呈由北向南递增的变化趋势。与基准气候 (1961–2005 年) 条件相比, 未来 RCP4.5 气候情景下 (图 3b) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 活动积温整体呈现由西北向东南递增的变化趋势, 增幅为 $346\sim 483^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 在苏南地区 (苏州、无锡大部、常州东部)、苏中地区 (南通西南部、泰州南部、盐城东北部) 增量最大为 $441\sim 483^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; 其次是江淮大部分地区、常州西部、无锡西部, 增幅为 $411\sim 440^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。未来 RCP8.5 情景下, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 活动积温也呈增温趋势, 空间分布基本与 RCP4.5 情景类似, 增幅达 $356\sim 594^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 其中苏南地区 (苏州西南部、无锡大部、常州东部)、苏中地区 (泰州南部、盐城东部) 增幅最大达 $551\sim 594^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

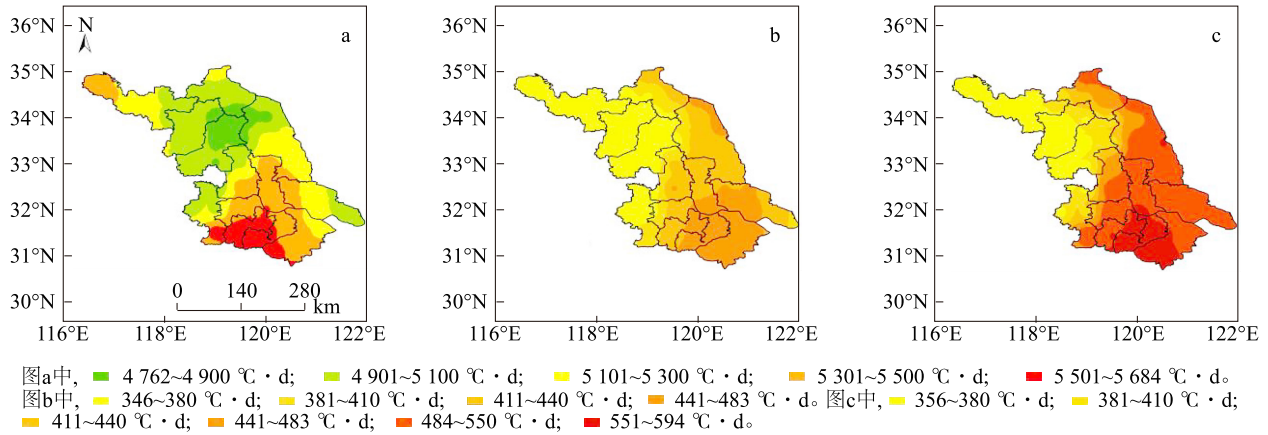
2.2.2 光能资源的变化 图 4a 为基准年江苏省太阳总辐射的分布, 整体呈现由西北向东南方向递减的变化趋势, 变幅在 $3\,799\sim 4\,385\text{ MJ}/\text{m}^2$ 。未来 RCP4.5 气候情景与基准气候条件相比差异较大, 未来 RCP4.5 气候情景下 (图 4b) 总辐射增量为 $41\sim 79\text{ MJ}/\text{m}^2$, 增幅最大的地区是苏南地区 (南京、常州西部、无锡西部)、苏中地区 (南通、盐城南部)、苏北地区 (淮安西南部), 变幅在 $71\sim 79\text{ MJ}/\text{m}^2$; 增幅最小的地区是徐州的西部、盐城的东北部, 变幅在 $41\sim 50\text{ MJ}/\text{m}^2$ 。未来 RCP8.5 情景 (图 4c) 与基准气候空间分布类似, 太阳总辐射增量变幅在 $45\sim 107\text{ MJ}/\text{m}^2$, 其中增幅最大的

地区在苏北地区 (徐州中东部、宿迁大部、淮安大部)、苏南地区 (南京西北部), 增幅达 $91\sim 107\text{ MJ}/\text{m}^2$ 。

2.2.3 水资源 图 5a 为基准年江苏省降水量的分布, 整体呈西北向东南递减的变化趋势, 降水量在 $822\sim 1\,548\text{ mm}$, 徐州西部降水量最多, 苏南南部降水量最少。未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景与基准年气候分布差异大。未来时段内与基准气候条件相比, RCP4.5 气候情景下 (图 5b) 降水量在徐州西北部、盐城北部、苏州南部的局地地区呈现减少趋势, 其值为 $-14\sim 0\text{ mm}$, 其他地区呈增加趋势, 其中苏北地区 (连云港西部、宿迁东北部、淮安北部)、盐城东南部增幅最大为 $42\sim 68\text{ mm}$ 。RCP8.5 情景下 (图 5c) 在全省大部地区呈现减少趋势, 在苏北地区 (宿迁西南部、淮安西南部)、盐城局部地区减幅最大范围在 $-76\sim -55\text{ mm}$, 仅在苏中地区 (盐城东南部、南通中部)、苏州东部呈增加趋势, 变化范围在 $1\sim 21\text{ mm}$ 。

2 种气候情景下增量相比较, 降水量分布差异大, RCP4.5 气候情景下江苏省大部分地区降水量呈增加趋势, 最大增加量达 68 mm , RCP8.5 气候情景下大部分地区降水量都呈现递减的趋势, 最大减少量达 76 mm 。

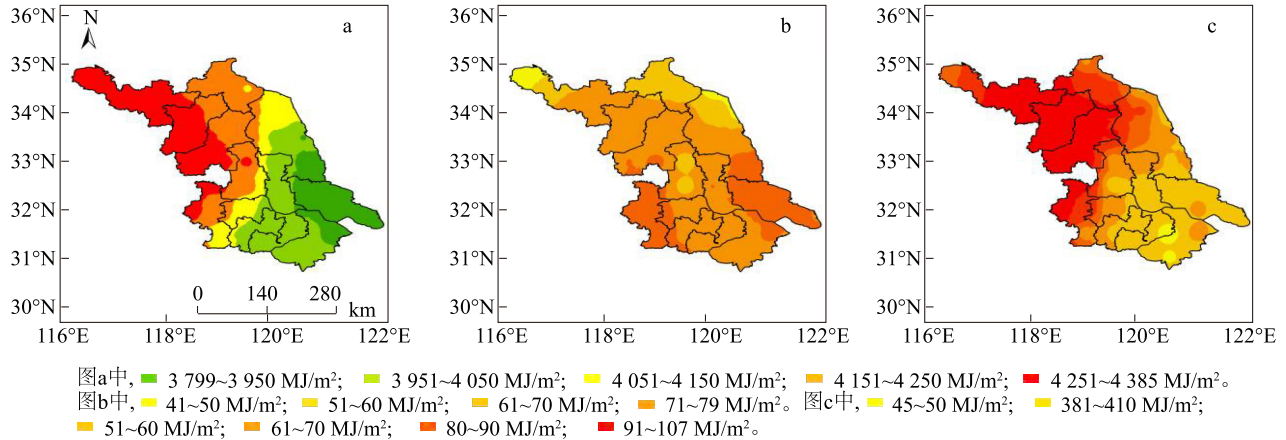
图 6a 为基准年江苏省参考作物蒸散量的分布, 整体呈西北向东南递减的变化趋势, 参考作物蒸散量在 $737\sim 1\,247\text{ mm}$ 。未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景与基准气候相比差异较大, 未来时段内与基准气候条件相比, RCP4.5 气候情景下 (图 6b), 江苏省大部分地区参考作物蒸散量呈增加趋势, 在扬州中部参考作物蒸散量增加最大, 增幅变化为 $41\sim 60\text{ mm}$; 仅在苏南地区 (常州东南部、无锡西南部) 参考



a: 基准年 ≥ 0 °C活动积温的分布;b: RCP4.5情景与基准年 ≥ 0 °C活动积温的差值;c: RCP8.5情景与基准年 ≥ 0 °C活动积温的差值。

图3 未来(2015~2050年)气候变化情景下 ≥ 0 °C活动积温的变化

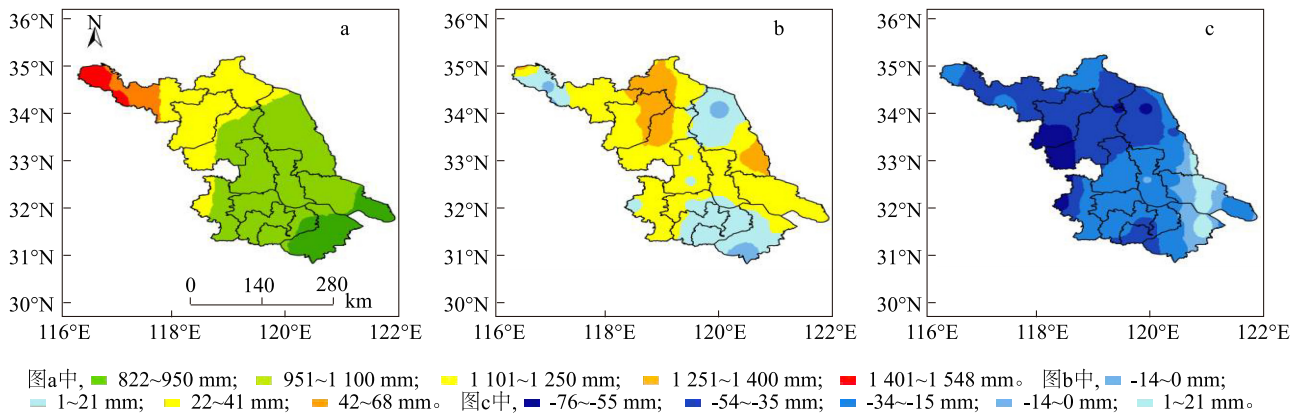
Fig.3 The change of ≥ 0 °C active accumulated temperature under the climate change situation in the future (2015~2050)



a: 基准年总辐射;b: RCP4.5情景与基准年总辐射的差值;c: RCP8.5情景与基准年总辐射的差值。

图4 未来(2015~2050年)气候变化情景下总辐射的变化

Fig.4 The change of solar total radiation under the climate change situation in the future (2015~2050)



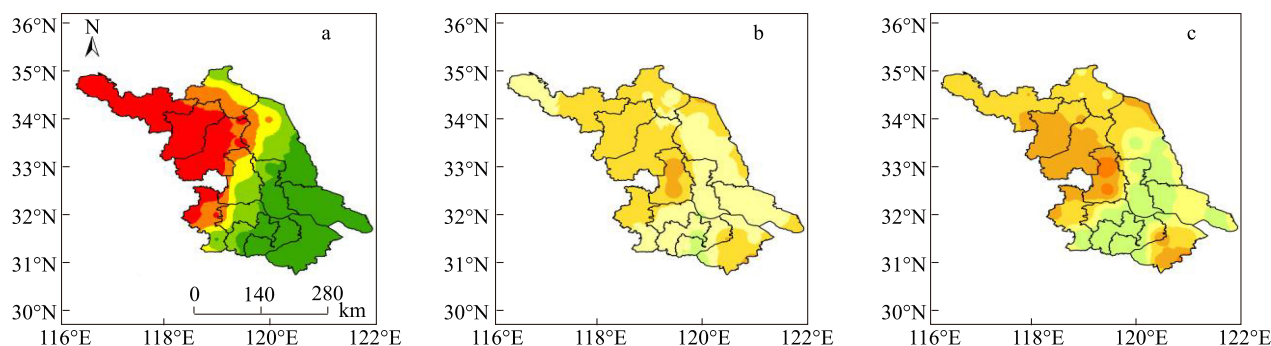
a: 基准年降水量;b: RCP4.5情景与基准年降水量的差值;c: RCP8.5情景与基准年降水量的差值。

图5 未来(2015~2050年)气候变化情景下降水量的变化

Fig.5 The change of precipitation under the climate change situation in the future (2015~2050)

作物蒸散量减小,减幅变化为0~10 mm。RCP8.5 情景下(图 6c)参考作物蒸散量也是扬州中部增加最大,增幅变化为61~93 mm;在苏中地区(盐城中南部、泰州大部、南通西北部和东南部)、苏南地区(常州、镇江南部、南京南部、无锡大部、苏州西部)参考作物蒸散量减小,

减幅为0~37 mm,空间分布大体与 RCP4.5 情景类似。RCP8.5 气候情景下的参考作物蒸散量减小的地区主要分布在江淮地区的中东部和江南地区(南京南部、镇江大部、常州、无锡大部、苏州西南部),比 RCP4.5 情景下的参考作物蒸散量减小的地区范围大。



图a中, 737~880 mm; 881~980 mm; 981~1 080 mm; 1 081~1 180 mm; 1 181~1 247 mm。图b中, -10~0 mm; 1~20 mm; 21~40 mm; 41~60 mm。图c中, -37~0 mm; 1~20 mm; 21~40 mm; 41~60 mm; 61~93 mm。

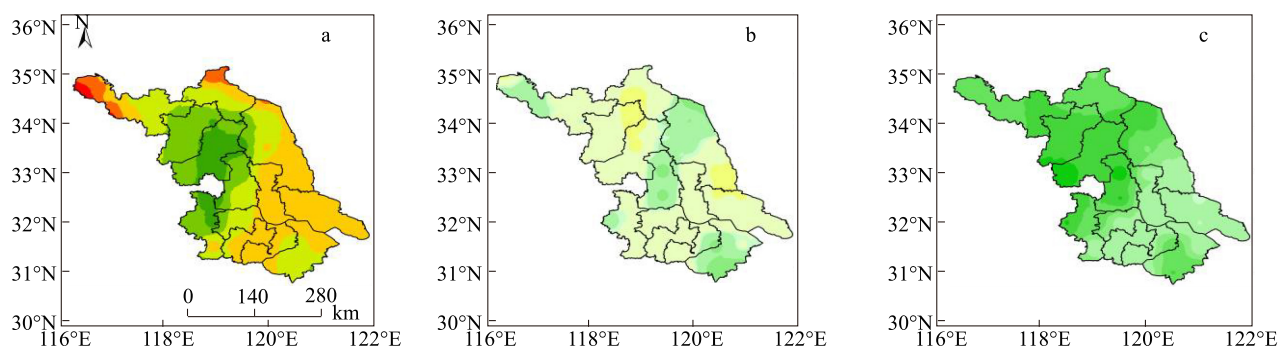
a: 基准年参考作物蒸散量; b: RCP4.5 情景与基准年参考作物蒸散量的差值; c: RCP8.5 情景与基准年参考作物蒸散量的差值。

图 6 未来(2015~2050 年)气候变化情景下蒸散量的变化

Fig.6 The change of reference crop evapotranspiration under the climate change situation in the future (2015~2050)

图 7a 为基准年江苏省水分盈亏的分布,江苏省年平均水分亏缺变化主要在苏北地区(徐州东部、连云港南部、宿迁、盐城西北部、淮安)、苏中地区(扬州中西部和北部)、苏南地区(南京、镇江西部),水分亏缺幅度为0~185 mm,除此之外为水分盈余地区,盈余变幅为1~341 mm,其中徐州西部水分盈余值最大达291~341 mm。未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景与基准气候相比,年平均水分盈亏增量差异较大。与基准气候条件相比,RCP4.5 气候情景下(图 7b)水分盈亏变化幅度为-45~41 mm;缺水显著的区域在徐州西

部、苏中地区(盐城北部、扬州大部)、苏南地区(南京中西部、苏州大部、无锡东南部),减幅为 0~45 mm;而在苏北地区(连云港西南部、宿迁东北部、淮安北部)、苏中地区(盐城东南部、南通北部)水分有盈余,达 26~41 mm。RCP8.5 气候情景下(图 7c),江苏省大部分地区水分短缺且与 RCP4.5 情景相差较大,水分显著短缺的地区为苏北地区(徐州东部、宿迁大部、淮安大部、连云港南部)、苏中地区(扬州大部、盐城北部)、南京西北部,其减幅达-128~-46 mm;水分盈余地区为南通东北部,增幅达1~4 mm。



图a中, -185~-95 mm; -94~0 mm; 1~95 mm; 96~190 mm; 191~290 mm; 291~341 mm。图b中, -45~-25 mm; -24~0 mm; 1~4 mm; 5~25 mm; 26~41 mm。图c中, -128~-105 mm; -104~-76 mm; -75~-46 mm; -45~-25 mm; -24~0 mm; 1~4 mm。

a: 基准年水分盈亏; b: RCP4.5 情景与基准年水分盈亏的差值; c: RCP8.5 情景与基准年水分盈亏的差值。

图 7 未来(2015~2050 年)气候变化情景下水分盈亏的变化

Fig.7 The change of water surplus-deficient under the climate change situation in the future (2015~2050)

3 讨论

利用 1961–2012 年江苏省的气象观测值,对江苏省的光温水资源的时空变化特征进行了分析。利用 RegCM4 区域气候模式的预估数据,对未来 RCP4.5、RCP8.5 排放情景下农业气候资源的可能变化进行预估。主要结论如下:

1961–2012 年,江苏省的太阳辐射整体呈线性递减的变化趋势, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的活动积温呈现上升趋势,气候倾向率为每 10 年 $89\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温年均 $5\ 536\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温年均 $4\ 998\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,与其他时间阶段相比,1990s 阶段是热量资源最为丰富的阶段。降水量呈现“下降—上升”的气候变化特征,1970s 阶段降水量最少,年平均参考作物蒸散量 1970s 期间达到巅峰值为 $1\ 066\text{ mm}$,1980s 阶段参考作物蒸散量最小。

基准年(1961–2005) $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温由北向南呈递增的趋势,太阳总辐射、年平均参考作物蒸散量均由西北向东南递减,水分变化呈现中西部亏缺向东南部盈余的趋势。与基准气候条件相比,2 种未来气候情景下, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温整体增量趋势由西北向东南递增,苏南地区增量最大,太阳总辐射也呈增加趋势。RCP4.5 情景下,降水量在苏北地区、盐城东南部,参考作物蒸散量在扬州地区,水分盈余在苏北中部、苏中东部有显著增加趋势;降水量在苏北和盐城局部地区、苏州地区,参考作物蒸散量在苏南中部,水分亏缺在扬州和无锡局部地区呈现显著减少趋势。RCP8.5 情景下,降水量和水分亏缺在苏北大部、苏中局部地区、南京西北部减幅最大,参考作物蒸散量在扬州增幅最大。

不同情景在分析气候及其影响变化的过程中显得日益重要,可构建未来社会经济变化的情景,对科学评估和决策是一种有用的工具。研究未来情景下的农业气候资源可为区域种植规划、优化结构、精准农业等提供最有效的科学依据,为政府决策者提供参考。未来情景下的农业气候资源波动显著,存在极端事件可能增多,目前模式也并不十分完善,由于对各物理量、生化反应缺乏相关的科学认识,同时对未来社会也缺乏完善的认识,因此未来农业气候资源的预估存在一定的不确定性。

参考文献:

- [1] SILVA C S D, WEATHERHEAD E K, KNOX J W, et al. Predicting the impacts of climate change-A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(1/2):19-29.
- [2] 董思言,高学杰. 长期气候变化 IPCC 第五次评估报告解读[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1):56-59.
- [3] ZHOU L H, HAUGER J S, LIU N, et al. Perceptions of climate change in China: the research and policy connection[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014(2):89-98.
- [4] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5):1068-1076.
- [5] 潘根兴,高 民,胡国华,等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9):1698-1706.
- [6] 许文龙,莫权芳,黄春华,等. 气候因子变化对广西上思县甘蔗产量影响分析[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(12):2146-2152.
- [7] 张 怡,史本林. 气候变化对豫东冬小麦产区的综合影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(2):336-339.
- [8] 肖国举,张 强,王 静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展应用[J]. *生态学报*, 2007, 18(8):1877-1885.
- [9] 杨晓光,李 勇,代姝玮,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12):3177-3188.
- [10] 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.
- [11] 龚 强,汪宏宇,张运福,等. 气候变化背景下辽宁省气候资源变化特征分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(4):671-678.
- [12] 康 俊,邱新法,曾 燕,等. 江苏地表湿润状况的变化趋势与区域特征分析[J]. *气象*, 2008, 34(9):89-96.
- [13] 康 俊. 江苏省气候变化与干旱研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2008.
- [14] 于庚康,徐 敏,徐经纬,等. 大豆生育期内气候资源变化特征及未来情景预估[J]. *气象科学*, 2014, 34(4):450-456.
- [15] 马雪宁. 近 51a 来黄河流域农业气候资源时空变化特征及未来趋势预估[D]. 兰州:西北师范大学, 2013.
- [16] 陶苏林,申双和,李雨鸿,等. 气候模拟数据订正方法在作物气候生产潜力预估中的应用—以江苏冬小麦为例[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(2):174-187.
- [17] ALLEN R G, PERREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. in *Fao irrigation & drainage paper 56* [M]. Rome:FAO, 1998.
- [18] 贺 琳. 东北地区生长季太阳辐射估算及其时空变化特征研究[D]. 吉林:东北师范大学, 2013.
- [19] 李晓文,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):24-31.

(责任编辑:陈海霞)