

江苏省水稻高温热害发生规律及未来情景预估

宋瑞明, 王卫光, 张翔宇, 丁一民

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 基于江苏省1961—2010年历史气象资料和CanESM2模式SDSM统计降尺度后的RCP情景数据,根据高温热害气象指标,分析了过去和未来江苏省水稻生育期内高温热害事件及其起始日期的发生规律和变化特征。结果表明,1961—2010年,各等级热害发生次数空间分布规律基本一致,均由东北向西南递增;2021—2070年3种RCP情景下,高温热害事件均呈增加趋势,以RCP 8.5情景增幅最大。高温热害事件起始时间变化不大,均在7月下旬。

关键词: 统计降尺度; 气候变化; 水稻; 高温热害

中图分类号: S166

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.007

宋瑞明,王卫光,张翔宇,等. 江苏省水稻高温热害发生规律及未来情景预估[J]. 灌溉排水学报,2017,36(1):40-46.

0 引言

全球气候呈以变暖为主要特征的显著变化,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次评估报告(AR5)指出,1901—2012年,全球表面气温已经升高了0.69~1.08℃^[1]。此外,持续的温室气体排放将引起全球平均气温进一步上升,预计到21世纪末,全球地表平均温度将上升1.5℃。气温每上升1℃,水稻将可能减产10%^[2]。江苏省是长江中下游地区主要水稻种植区之一,水稻产量占全省粮食总产量的56.2%,是该省的第一大粮食作物,水稻种植类型多以中、晚稻为主,夏季为水稻生长的关键时期,而此时期内常受副热带高压影响,水稻生育期内高温热害发生的可能性大。随着全球气候变暖的加剧,将进一步增加高温热害事件的发生频率^[3-5]。持续高温天气,易使水稻空粒率、秕粒率增加,千粒质量下降,最终导致减产,影响水稻的产量和效益。水稻的生产安全严重威胁着粮食安全,为此,研究江苏省水稻生育期内高温热害事件的发生规律,合理安排水稻生产、防灾减灾,以保障粮食安全。

1 材料和方法

1.1 数据来源

数据类型主要包括:站点实测气象数据、NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction)再分析数据以及GCM模式输出数据。其中,江苏省13个气象台站1961—2010年历史气象资料(站点分见图1),包括逐日平均气温、最高气温资料等均来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/site/index.html>)。

用于统计降尺度输入的NCEP数据(1961—2005年)、历史长期模拟数据(1961—2005年)以及未来情景预估数据(2006—2100年)均可在加拿大气候模式与分析中心下载(<http://www.ccsn.ec.gc.ca/?page=pred-canesm2>)。研究采用的NCEP再分析资料已经过网格

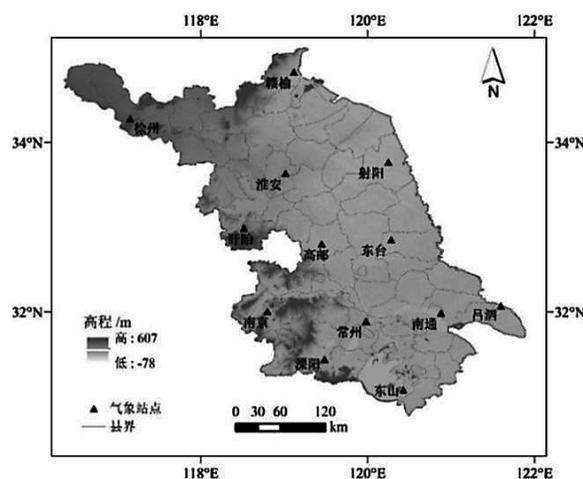


图1 江苏省位置示意及气象站点分布

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51379057)

作者简介:宋瑞明(1989-),女,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: songsunshine3@163.com

再划分与 CanESM2 模式的网格尺度相匹配, CanESM2 为加拿大最新一代试验数据, 该模式已在耦合模式比较计划第 5 阶段(简称 CMIP5)收录。数据分辨率为 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$, 共包括 26 个气象变量, 如平均海平面气压、地转风速、地表涡度、地表风向、地表散度以及 500 hPa / 850 hPa 高度场的地转风速、位势高度等。其中, 未来气候情景数据选用 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5^[6], 分别作为低、中、高 3 种温室气体体积分数路径排放情景, 以预估未来 2021—2070 年气候变化条件下江苏省水稻高温热害的变化情况。

1.2 高温热害气象指标确定

江苏省水稻生育期内高温热害以日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 、日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 、持续 3 d 以上时间作为高温热害指标, 以此分析自 1961—2012 年江苏省各地可能发生的高温热害的概率, 并根据高温时间划分热害等级^[7-9], 如表 1 所示。

表 1 高温热害等级指标

等级	日平均气温/ $^\circ\text{C}$	日最高气温/ $^\circ\text{C}$	持续时间/d
轻度	≥ 30	≥ 35	3~4
中度	≥ 30	≥ 35	5~7
重度	≥ 30	≥ 35	≥ 8

1.3 趋势分析方法

应用简单线性回归法分析了历史时期不同等级高温热害事件的长期变化趋势, 根据世界气象组织推荐的 Mann-Kendall (MK) 非参数检验法对高温热害事件时间序列趋势的显著性进行判别^[10-11]。对数据进行检验前, 采用 Trend Free Pre-Whitening 法去除时间序列相关性的影响^[12]。

1.4 统计降尺度模型(SDSM)

由 Wilby 等^[13]提出的统计降尺度模型(SDSM)综合了多元回归和随机天气发生器的原理, 是一种弥补 GCMs 预测区域气候情景的不足, 实现尺度降解的有效工具。该模型通过季节相关性分析、偏相关分析等进行预报因子的筛选, 建立预报因子(大尺度大气环流因子)和预报量(区域气候变量)之间的统计函数关系, 确定模型参数, 构建 SDSM 模型, 进而应用于 GCM 输出结果生成未来气候要素的日序列数据^[14-15]。研究表明, 该方法在许多地区都有较好的模拟效果, 模拟结果接近实际情况, 目前已在全球范围内广泛应用。

选择日平均气温、日最高气温作为预报量, 以 1961—1990 年为率定期, 1991—2000 年为验证期, 应用 SDSM 模型对江苏省高温热害气候因素进行降尺度。为评价降尺度效果, 采用相关系数 R 、效率系数 Ens 和相对偏差 $Bias$ 3 个评价指标对模型模拟能力进行评价, 指标最优值分别为 1、1 和 0, 具体计算公式见表 2。

表 2 降尺度效果的评价指标公式

评价指标	R	Ens	$Bias$
公式	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$

注 n 为样本数目; O_i 为实测值; S_i 为模拟值; \bar{O} 为实测平均值; \bar{S} 为模拟平均值。

2 结果与分析

2.1 1961—2010 年水稻高温热害时空分布特征

2.1.1 高温热害发生次数空间分布

基于江苏省 1961—2010 年数据, 该省 13 个气象站点水稻生育期内共发生高温热害的总次数、轻度、中度以及重度次数分别为 529、303、135 和 91 次。对江苏省各站点发生的高温热害总次数及不同等级热害次数进行空间插值, 其分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 江苏省水稻生育期内高温热害总次数以及各等级热害次数的空间分布规律基本一致。全省热害高发区主要位于以南京、溧阳为代表的西南部区域, 高温热害发生次数在 66~81 次之间; 其中, 轻度热害 37~46 次, 中度热害 18~28 次, 重度热害 12~15 次。高温热害低值区主要位于江苏省东北部, 代表站如赣榆、射阳, 高温热害发生总次数少于 25 次, 轻度热害 5~13 次, 中度热害 3~8 次, 重度热害 0~3 次。从全省来看, 1961—2010 年各站点重度热害次数均在 15 次以下, 重度热害次数较少, 主要为轻、中度热害区, 各等级热害发生次数总体均呈条带状由东北向西南递增分布。

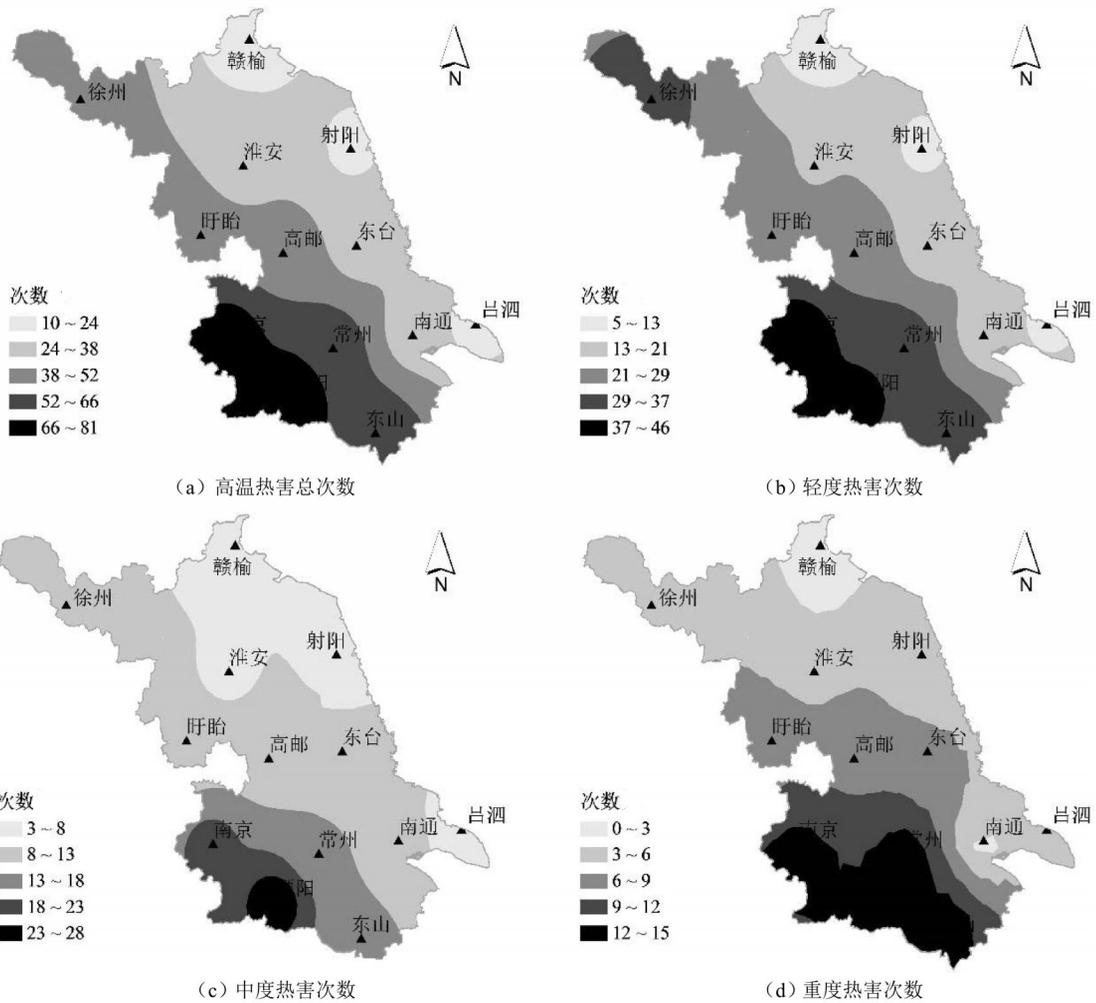


图2 江苏省不同等级高温热害发生次数

2.1.2 高温热害起始日期空间分布

1961—2010年水稻生育期间高温热害起始时间站点平均值分布如图3所示。从图3可以看出,江苏省热害发生时间均在7月下旬,其中站点发生时间平均值为7月20日。灾害发生时间由西北向东南递增,且苏南大部分地区发生时间均迟于灾害平均发生时间,代表站为东山,发生时间为7月25日;苏北的徐州、连云港等地区发生时间较早,约在7月19日以前,代表站如徐州、赣榆等。因此,此段时间中应注意高温对水稻生长的影响,并采取适当应对措施。

2.1.3 高温热害发生次数时间序列变化

1961—2010年研究区高温热害发生次数区域平均值时间序列变化如图4所示,采用简单线性回归分析与MK趋势检验的结果表明(表3),江苏省水稻高温热害总次数、轻度及中度热害次数均呈上升趋势,且轻度热害通过了95%置信水平的显著性检验;高温热害重度热害次数略呈下降趋势,下降速率约为0.000 8次/a。此外,1961—2010年,溧阳高温热害发生次数最多,高达75次,而赣榆发生热害仅10次,为各站最少。对研究区13个站点各等级高温热害次数求平均,并计算多年平均值,可得热害总次数区域平均值约为1次/a;其中轻、中、重度热害次数

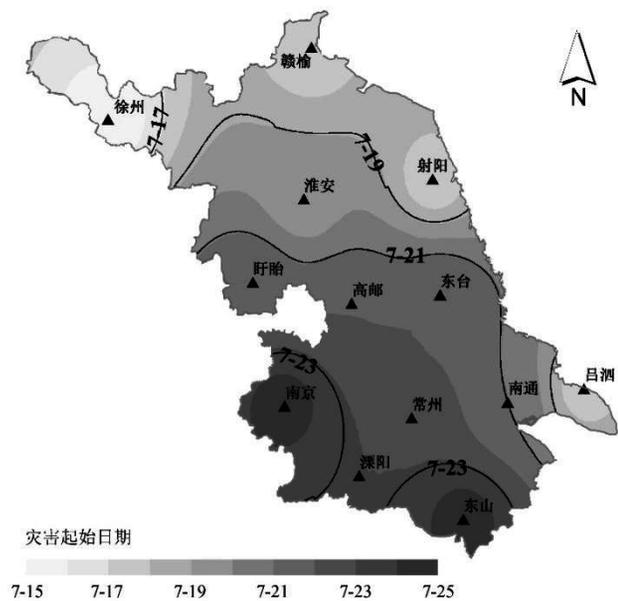


图3 高温热害起始时间分布图

区域多年平均值分别为0.48、0.22、0.14次/a。高温热害的总次数较多的年份有1966、1967、1971、1994和2010年,多站点平均灾害次数均在2次以上;仅1968、1982、1985、1989年无热害发生。轻度热害13个站点平均发生次数最大值出现在1967、1995、2006及2010年,均在1次/a以上;区域平均中度热害最大值在2010年,约为1.35次/a;重度热害发生次数最大值在1966年,各站点平均为0.86次/a。

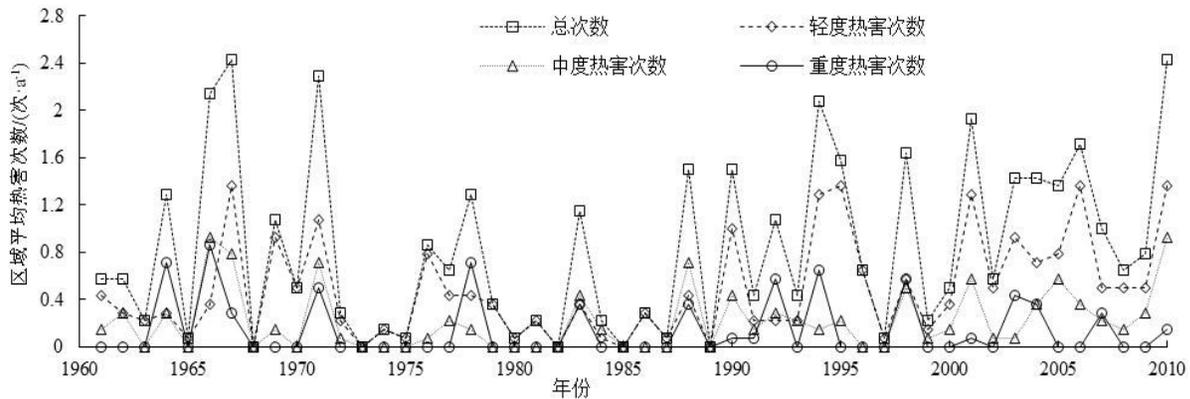


图4 多站点区域平均高温热害发生频次时间序列变化图

表3 不同等级高温热害趋势值及显著性

热害等级	总次数	轻度	中度	重度
趋势值	0.011 3	0.009 5	0.002 6	-0.000 8
显著性	1.905	2.371*	1.767	-0.352

注 *表明通过了95%置信水平的显著性检验

2.2 统计降尺度模拟效果评价

SDSM模型在率定期和验证期对日平均温度(T)和日最高温度(T_{max})的模拟效果见表4。由表4可知,不同气象变量 T 和 T_{max} 的平均相关系数 R 以及效率系数 Ens 在率定期和验证期均在0.99以上,模型相对偏差 $Bias$ 在率定期分别为0.001和0.000,验证期分别为0.004和-0.011。可见,无论是在率定期还是在验证期,统计降尺度模拟效果均较好,适合用于GCM输出结果的降尺度应用,降尺度结果可以用于进一步模拟计算。

表4 统计降尺度模型率定期和验证期的模拟效果评价

气象变量	时期	R	Ens	$Bias$
T	率定期	0.998	0.996	0.001
	验证期	0.998	0.996	0.004
T_{max}	率定期	0.997	0.993	0.000
	验证期	0.997	0.992	-0.011

2.3 未来气候变化情景下高温热害变化特征

2.3.1 未来气候变化情景下高温热害发生次数变化

以1961—2010年江苏省水稻生育期内高温热害各等级的多年平均值为现状,表5展示了未来2021—2070年不同情景下不同等级的高温热害出现次数较现状的变化情况。

表5 不同等级的高温热害次数现状平均值及3种不同情景下较现状的变化量

次/a

站点	现状期热害次数				RCP 2.6热害次数				RCP 4.5热害次数				RCP 8.5热害次数			
	总热害	轻度热害	中度热害	重度热害	总热害	轻度热害	中度热害	重度热害	总热害	轻度热害	中度热害	重度热害	总热害	轻度热害	中度热害	重度热害
东台	0.59	0.31	0.16	0.12	1.35	0.69	0.39	0.27	1.59	0.77	0.45	0.37	2.19	0.91	0.70	0.59
东山	1.29	0.73	0.27	0.29	1.53	0.54	0.36	0.63	1.95	0.56	0.48	0.91	2.08	0.64	0.36	1.08
南京	1.57	0.9	0.39	0.27	0.88	0.28	0.26	0.36	1.57	0.39	0.55	0.63	1.90	0.59	0.39	0.93
南通	0.55	0.31	0.2	0.04	1.00	0.47	0.11	0.41	1.61	0.67	0.41	0.53	1.76	0.51	0.45	0.80
吕泗	0.31	0.2	0.06	0.06	0.32	0.04	0.25	0.02	0.49	0.35	0.10	0.04	0.85	0.43	0.27	0.14
射阳	0.39	0.22	0.12	0.06	0.83	0.41	0.35	0.06	1.10	0.68	0.25	0.16	1.36	0.58	0.51	0.25
常州	1.24	0.69	0.27	0.27	0.98	0.55	0.26	0.18	1.41	0.49	0.59	0.34	1.78	0.64	0.44	0.71
徐州	0.9	0.63	0.18	0.1	1.57	0.66	0.57	0.33	1.77	0.82	0.58	0.35	2.43	1.00	0.82	0.61
淮安	0.61	0.39	0.14	0.08	1.06	0.43	0.55	0.08	1.37	0.69	0.37	0.31	1.80	0.79	0.61	0.41
溧阳	1.59	0.78	0.55	0.25	0.76	0.34	-0.02	0.46	1.37	0.40	0.20	0.79	1.35	0.38	0.14	0.85
盱眙	0.84	0.55	0.16	0.14	1.04	0.37	0.49	0.17	1.18	0.35	0.53	0.29	1.57	0.59	0.43	0.55
赣榆	0.2	0.1	0.1	0	0.64	0.47	0.12	0.06	1.00	0.59	0.33	0.08	1.27	0.78	0.29	0.20
高邮	0.84	0.51	0.18	0.16	0.83	0.49	0.27	0.06	0.89	0.51	0.23	0.13	1.26	0.49	0.49	0.27
平均	0.84	0.49	0.21	0.14	0.98	0.44	0.31	0.24	1.33	0.56	0.39	0.38	1.66	0.64	0.46	0.57

由表5可见,RCP 2.6情景下,高温热害发生次数以徐州的变化最为显著,东山次之,增幅最小的为吕泗,轻、中以及重度热害次数分别以东台、徐州及东山增幅最大;RCP 4.5情景下,东山热害总次数年平均增幅最大,吕泗热害发生次数增幅最小,轻、中以及重度热害次数增幅最大值分别发生在徐州、常州、东山;在RCP 8.5情景下,徐州年平均热害次数增幅最大,最小增幅发生在吕泗。轻、中及重度热害次数增幅最大值分别发生在徐州、徐州、东山。RCP 8.5情景下,江苏省水稻高温热害次数增加幅度最大,这主要与RCP 8.5情景为辐射强迫最高的排放情景有关。从13个站点平均来看(图5),2021—2070年,3种不同情景下高温热害总次数、轻、中以及重度热害次数均呈增加趋势,且变化量随着排放情景体积分数的增大而增大,即RCP 8.5情景下变化量最大,热害总次数增加量约为1.66次/a,约为现状期热害次数的2倍。此外,3种情景下,轻、中以及重度热害发生次数中,轻度热害年增加量所占比例最大,均占50%左右。

2.3.2 未来气候变化情景下高温热害起始时间空间分布

2021—2071年不同情景下水稻高温热害起始时间站点平均值分布及发生时间等值线如图5所示。从图5可以看出,江苏省热害发生时间大部分在7月下旬,与现状期较为一致。RCP 2.6情景下,13个站点中,东山热害起始时间最迟,在7月27日;苏北的徐州发生时间最早,约在7月10日以前。RCP 4.5情景下,站点发生时间平均值为7月22日,除徐州、溧阳以外,其他站点均迟于7月20日,以常州平均灾害起始时间最迟,为7月26日。RCP 8.5情景下,站点发生时间平均值为7月22日,除徐州、溧阳以外,其他站点灾害起始时间均在7月22—25日之间,与RCP 4.5情景较为一致。从空间分布来说,3种情景总体较为一致,起始时间由西北向东南依次推迟。

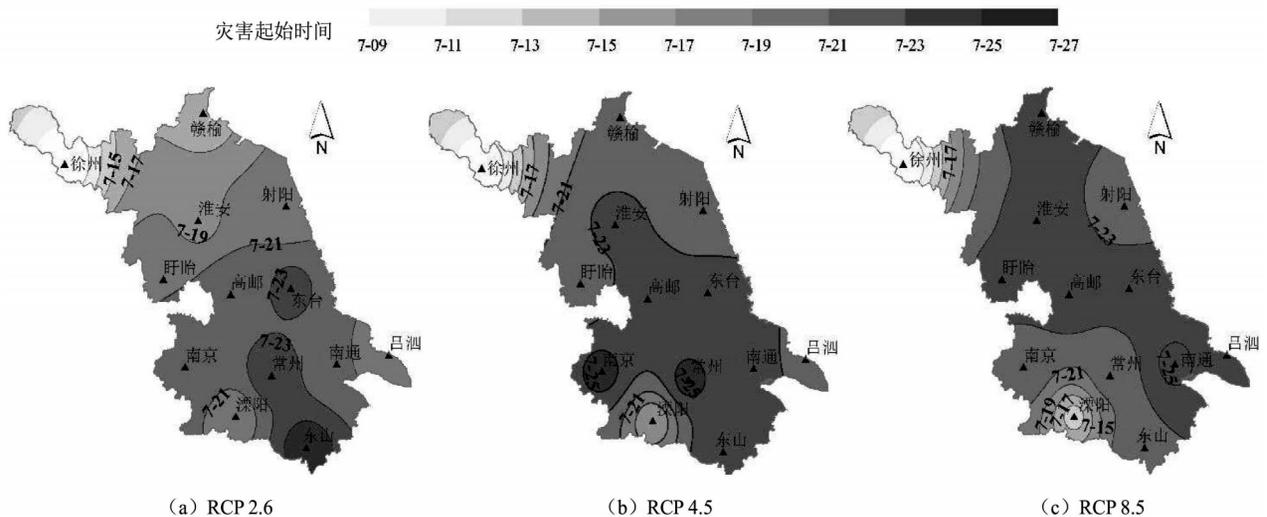


图5 不同情景下高温热害起始时间分布图

2.3.3 未来气候变化情景下高温热害发生次数时间序列变化

为了解未来情景下江苏省水稻生育期内高温热害次数的变化情况,图6给出了不同等级热害发生频次时间序列变化图。从图6可以看出,在气候变暖背景下,2021—2070年,3种情景高温热害次数区域平均值均远高于现状期。RCP 2.6情景下,水稻高温热害总次数最大值出现在2036年,各站点平均约4.5次/a;轻度热害最大值出现在2023年,多站点平均约2.8次/a;中度热害最大值出现在2064年,多站点平均约1.5次/a;重度热害最大值出现在2057年,多站点平均约1.9次/a。RCP 4.5情景下,水稻高温热害总次数最大值出现在2057年,多站点平均约4.5次/a;轻度热害最大值出现在2068年,约2.1次/a;中度热害最大值出现在2039年,约1.9次/a;重度热害最大值出现在2057年,约2.2次/a。2021—2070年间总次数、轻度、中度以及重度热害次数均呈上升趋势,其线性回归分析斜率分别为0.027、0.008、0.004及0.013。RCP 8.5情景下,水稻高温热害总次数最大值出现在2070年,多站点平均约5.2次/a;轻度热害最大值出现在2070年,约3次/a;中度热害最大值出现在2056年,约2.4次/a;重度热害最大值出现在2059年,约2.2次/a。可见,2021—2070年间总次数以及各等级热害次数均呈明显上升趋势。

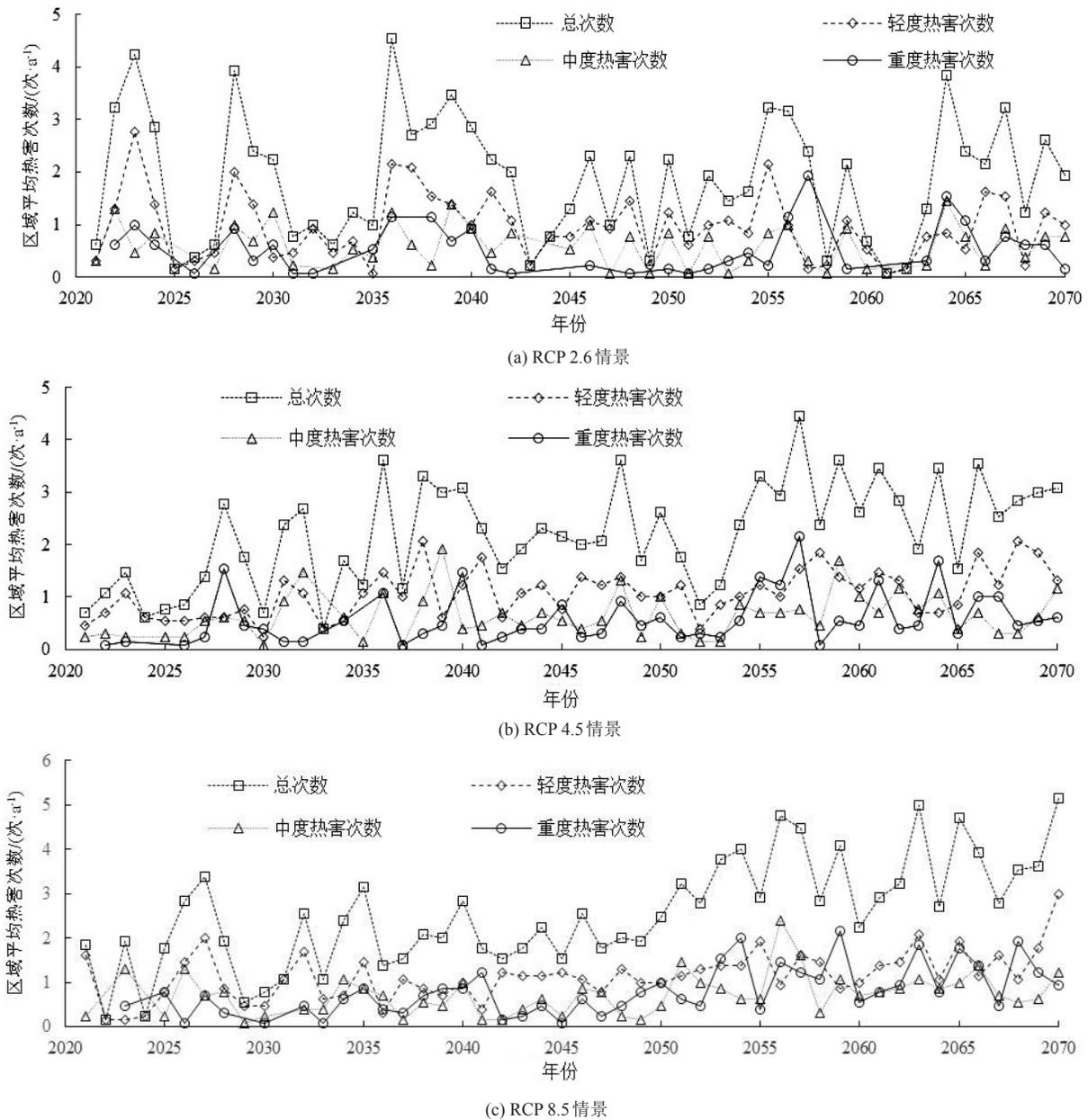


图6 多站点区域平均高温热害未来不同情景下发生频次时间序列变化图

3 结论

1) 1961—2010年江苏省水稻生育期内高温热害发生总次数、轻度、中度以及重度次数的空间分布基本一致,均由东北向西南递增,高值区主要位于江苏省西南地区。热害发生时间在7月下旬,平均值为7月20日,起始时间分布为由西北向东南递增。就时间序列而言,热害总次数、轻度热害次数略有上升趋势,但年际间波动较大,中度及重度热害次数微有下降趋势,且重度热害发生次数较少。

2) 相较于现状期(1961—2010年),3种情景下2021—2070年水稻生育期内高温热害次数总体呈上升趋势,RCP 8.5情景上升趋势最明显。就热害起始时间而言,RCP 2.6情景下,苏北地区稍有提前,苏南部分地区则略有推迟。RCP 4.5与RCP 8.5情景下,除徐州、溧阳以外,灾害发生时间均迟于7月20日。2021—2070年高温热害起始时间空间分布整体由西北向东南推迟,与现状期基本一致。时间序列上,除RCP 2.6情景外,2021—2070年高温热害总次数、轻度、中度以及重度热害次数均呈上升趋势。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013. The physical science basis [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 王子平. 灾害社会学[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1998.
- [3] 李守华, 田小海, 黄永平, 等. 江汉平原近50年中稻花期危害高温发生的初步分析[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 5-8.

- [4] 杨太明, 陈金华. 江淮之间夏季高温热害对水稻生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8 530-8 531.
- [5] 万素琴, 陈晨, 刘志雄, 等. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害时空分布[J]. 中国农业气象, 2009(S2):316-319.
- [6] VUUREN D P V, EDMONDS J, KAINUMA M, et al. The representative concentration pathways: an overview[J]. Climatic Change, 2011, 109 (1/2):5-31.
- [7] 强慧婷. 江苏省高温热害及其对水稻生产的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [8] 包云轩, 刘维, 高苹, 等. 基于两种指标的江苏省水稻高温热害发生规律的研究[C]// 第28届中国气象学会年会, 中国福建厦门, 2011.
- [9] 张倩. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010.
- [10] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945(13): 245-259.
- [11] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London, UK: Griffin, 1975.
- [12] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9):1 807-1 829.
- [13] WILBY R L, DAWSON B C W, BARROW E M. dsdm-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(2):145-157.
- [14] 邢万秋, 王卫光, 邵全喜, 等. 未来气候情景下海河流域参考蒸发蒸腾量预估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 239-251.
- [15] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286.

Occurrence Regularity of Rice Heat Injury and Projection for Future Scenarios in Jiangsu Province

SONG Ruiming, WANG Weiguang, ZHANG Xiangyu, DING Yimin

(College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on historical weather data from 1961 to 2010 and future climate data generated by CanESM2 simulation from 2021 to 2070 under RCP emission scenarios, the frequency and occurrence dates of heat stress in different grades during rice growth period in Jiangsu province were analyzed. The results indicated that the spatial distribution of the total number of times and the frequency of different grades during rice growth period for the period of 1961—2010 were consistently increasing from northeast to southwest. Under three different scenarios, the heat injury events will increase relative to the period of 1961—2010 and the increases were more under RCP 8.5 scenario than other two scenarios. In addition, the heat stress often occurred in late July.

Key words: SDSM; climate change; rice; heat stress

责任编辑:白芳芳