

极端气候变化及其对水稻气候产量影响的实证分析 ——以湖北省为例

高雪^{1,2} 李谷成^{1,2*} 尹朝静^{1,2}

(1. 华中农业大学 经济管理学院, 武汉 430070;

2. 湖北农村发展研究中心, 武汉 430070)

摘要 为考察湖北极端天气事件的时空变化,采用1980—2014年逐日气候数据,并利用实证分析法研究了极端气候对水稻气候产量的影响。研究表明:1)湖北极端降水量和降水天数均呈下降趋势,极端降水事件由东向西、由南向北递减。2)极端高温呈上升趋势,表现为极端高温天数和强度增加。鄂北、鄂西易发生极端高温事件。3)极端气候类因素对水稻气候产量具有负向影响,其中,最低气温的极小值每增加1%将会使水稻的气候产量降低0.197%。白天极端高温天数对水稻气候产量也具有抑制作用,其每增加1%将会使水稻气候产量降低0.046%。因此,应加强湖北省极端天气事件易发区在水稻生长期内的气候监测和防范。

关键词 极端降水;极端温度;水稻;气候产量

中图分类号 S162.8

文章编号 1007-4333(2017)05-0153-10

文献标志码 A

Empirical analysis of extreme climate events and its impact on climate yield of rice: A case study of Hubei Province

GAO Xue^{1,2}, LI Gucheng^{1,2*}, YIN Chaojing^{1,2}

(1. College of Economics & Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Rural Development Research Center, Wuhan 430070, China)

Abstract Extreme weather was assessed based on the daily data of temperature and precipitation from 1980 to 2014 in Hubei Province. The effects of extreme climatic factors on climate yield of rice were analyzed. The main conclusions were as follows: 1) Extreme precipitation and the days of precipitation showed a decreased trend, and extreme precipitation showed clear spatial decreasing distributions from east to west and from south to north; 2) Extreme high temperature showed an increasing trend, which mainly reflected in the increasing of both the number of days and intensity of extreme high temperature. The extreme high temperature events are easy to occur in the north and west of Hubei Province; 3) The impacts of extreme climate indicators on rice yield were negatively correlated. Among them, the minimum temperature increase of 1% would make the climate yield of rice decreased by 0.197%. The number of extreme high temperature days also inhibited the rice climatic yield, and the increase in the number of 1% would decrease the yield of rice by 0.046%. In conclusion, the climate monitoring should be strengthened to prevent the damages of extreme weather events on rice growth in Hubei Province.

Keywords extreme precipitation; extreme temperature; rice; climate yield

收稿日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(NSFC-CGIAR,71461010701); 国家自然科学基金资助项目(71273103); “万人计划”青年拔尖人才支持计划; 华中农业大学自主科技创新基金(2012YQ003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2662015PY093)

第一作者: 高雪, 硕士研究生, E-mail: g379034556@163.com

通讯作者: 李谷成, 教授, 主要从事农业技术经济研究, E-mail: lgcabc@foxmail.com

在气候变暖背景下,极端天气事件发生的频率呈上升趋势,并且极端天气事件发生存在区域性^[1]。近年来,有关气候变化的研究得到众多学者青睐,涉及极端气候的文献也极为丰富。例如 Alexander 等^[2]研究发现,进入 20 世纪中后期,全球极端降水和极端温度均呈上升趋势。Rahimzaden 等^[3]认为,极端降水事件在高纬度地区出现的范围在扩大。国内学者也进行了研究,牛旭等^[4]利用百分比阈值的方法对山西省的极端气温变化进行探讨。李晋昌等^[5]将研究时间具体化,着重研究了山西省春季的极端气候事件,结果表明其春季极端高温、低温频率分别呈增大与降低趋势。曹永旺等^[6]进一步发现山西省极端低温事件呈现下降趋势,其变化存在区域性差异。高妍等^[7]采用了 23 个极端气候指标,对祁连山讨赖河流域的极端气候进行探讨,得出了该地区极端温度升高、极端降水增多等结论。李洋等^[8]探讨了东北三省的极端气候事件的时间和空间分布及变化,发现其极端温度、极端降水的分布及变化均具有区域性不同。

然而,以往研究中^[4-8]较少涉及到湖北。湖北省位于长江中下游,南部面邻洞庭湖,三面环山,属于东西、南北气候过渡带,是气候变化的敏感区。近年来,依据《湖北省自然灾害历史资料》发现,20 世纪以来湖北旱涝出现频率有所增加。李菲等^[9]也指出近年来长江中下游地区极端强降水事件明显增多。另一方面,涉及湖北极端气候事件文献中选取的极端气候指标较为单一。吴翠红等^[10]选取湖北近 10 年极端降水指标,发现极端降水主要分布于鄂西山区和江汉平原南部。任新建等^[11]选取湖北近 49 年来的极端高温事件,发现湖北极端高温出现频次呈中部增加趋势,江汉平原更易出现极端高温事件。因此,以多指标的方式研究湖北极端气候变化更具有参考价值。

极端天气事件在一定程度上将给本地区的粮食作物生产带来直接影响。学者们倾向于将作物产量分为趋势产量和气候产量,进而研究极端天气事件变化与作物产量间关系。顾治家等^[12]利用云南省县域粮食产量数据,考察了包括气候因子在内的 17 个变量对粮食气候产量的作用。李辉等^[13]从玉米气候产量对气候敏感度为切入点,发现气候变化导致玉米产量下降。朱赟赟等^[14]认为,宁夏不同区域气候因子对马铃薯气候产量影响程度不同。苏喜福等^[15]研究表明,平均气温是影响忻州 5 县玉米气候

产量的主要因素。然而,学者们通常比较关注平均的降水量、温度和日照等影响,而忽略了极端温度、降水等指标对作物气候产量的影响,使气候变化对作物产量的影响分析存在一些偏差^[16]。

目前有关湖北极端气候变化及对水稻产量影响的报道较少,本研究在测算极端降水、极端气温类指标及气候产量指标的基础上,考察了湖北极端天气事件的时空变化,并实证分析了极端气候因素对水稻气候产量的影响,旨在为湖北不同区域应对极端天气事件,确保水稻产量安全提供依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

采用中国气象局国家气候中心提供的湖北 13 个气候站点 1980—2014 年的逐天数据,主要包括日最高气温、日最低气温、日平均气温、最小相对湿度、降水量和日照时数等。依据《中国主要农作物气候资料图集》,水稻生长期选取 4—10 月。本研究量化了湖北水稻生育期极端降水和极端温度。湖北水稻产量为 2000—2013 年分县农业统计数据,来源于《湖北省统计年鉴》、《中国县市社会经济统计年鉴》等,其中一部分水稻产量数据由县域粮食产量乘以水稻占粮食播种面积的比重计算得出。同时选择距离最近的气候站点与县域数据进行了匹配。

考虑到气候站 1980—2014 年日降水量、日最低气温、日最高气温等的时间连贯性,本研究选取的 13 个气候站点分别是武汉、麻城、英山、黄石、嘉鱼、恩施、荆州、来凤、老河口、天门、巴东和五峰。其中,麻城、英山代表鄂东北区域。黄石、嘉鱼代表鄂东南区域。枣阳、老河口代表鄂西北地区。恩施、来凤、巴东和五峰代表鄂西南地区。武汉、荆州和天门代表江汉平原。

1.2 研究方法

1.2.1 百分位阈值法

百分位阈值法,常被用来研究极端气候,极端事件是统计意义上的小概率事件,百分位选取不是绝对的,可以是 5%、10%、90% 和 95% 等。郭广芬等^[17]也采用百分位法来计算湖北省暴雨洪涝的阈值。本研究百分位阈值的核算如下,将其中一个站点 1980—2014 年内同一日期的同种指标进行从小到大升序排列,位于 5% 的值定义为极端低温事件阈值,位于 95% 的值定义为极端高温事件阈值。将

某一站的某日降水量、温度超过或低于该站的这一阈值,称为极端降水事件、极端高温事件、极端低温事件,具体指标说明见表1。与此同时,采用趋势分析法分析1980—2014年水稻生育期内极端降水类

指标、极端温度类指标的线性变化趋势,以认识1980年以来湖北省水稻生育期的极端气候的变化规律,为进一步研究极端气候因素对水稻气候产量的影响提供依据。

表1 极端气候指标名称及其释义

Table 1 Name and its interpretation of the extreme climate index

指标名称 Index name	具体定义及释义 Specific definition
极端降水量 (R_{95})	水稻生长期超过95%降水阈值的日降水量的总和,mm
非常极端降水量 (R_{99})	水稻生长期超过99%降水阈值的日降水量的总和,mm
雨日降水强度 (SDII)	水稻生长期日降雨量>1 mm的降水量总和除以降水天数,mm/d
日降水 ≥ 25 mm天数 (R_{25})	水稻生长期日降雨量 ≥ 25 mm的天数,d
最低气温极低值 (TNN)	水稻生长期各月日最低气温的最小值, $^{\circ}\text{C}$
极端气温天数 (TN_{10})	水稻生育期间日最低气温小于第10个百分位阈值的天数,d
最高气温极高值 (TXX)	水稻生长期各月日最高气温的最大值, $^{\circ}\text{C}$
夜间极端高温天数 (TN_{90})	水稻生育期间日最低气温大于第90个百分位阈值的天数,d
白天极端高温天数 (TX_{90})	水稻生育期的日最高气温大于第90个百分位阈值的天数,d

1.2.2 气候产量

农业技术发展促进了农业生产率的提高,但农业依旧是“靠天吃饭”的产业,这决定了农作物产量取决于自然与非自然因素。因此,一般可以将农作物的实际产量 Y 分解为趋势产量 Y_t 、气候产量 Y_i 、随机因素造成的产量波动差值 ξ 3个部分。其中,趋势产量主要反映着技术水平发展下的产量,涉及了良种、施肥措施、灌溉水平等因素。气候产量指受气候要素变化影响下的波动产量。 ξ 指的是随机因素影响下的产量分量,公式表现为 $Y=Y_t+Y_i+\xi$ 。由于扰动项的随机性比较强,经常被忽略不计,因此气候产量表示为 $Y_i=Y-Y_t$ 。

气候产量的计算方法较多,包括直线滑动平均法、HP滤波法、线性模拟法等。鉴于气候产量是从实际产量中剥离出来的,不同方法得到的结果可能不同。而滑动平均模拟法的使用最为广泛,且可以较好保证样本信息量,采用5年直线滑动均值法^[18]。

1.2.3 个体固定效应模型

利用个体固定效应模型实证分析气候因素对水稻气候产量的影响,个体固定效应相对于混合回归而言,能够降低混合模型中忽略个体间异质性而导致的估计不一致,具体模型式如下:

$$Y_{r,t} = Z_{r,t}\beta + \alpha_r + \epsilon_{r,t}$$

式中: r 和 t 分别代表县、年份; $Y_{r,t}$ 表示水稻气候产量;气候变量 $Z_{r,t}$ 主要包括影响水稻气候产量的极端气候因素;个体固定效应 α_r 控制了地区土壤质量、海拔等不随时间变化的要素; ϵ 为误差项。 β 的意义是:在其他气候要素不变的情况下,某一气候变量对水稻气候产量的影响程度。

2 结果与分析

2.1 水稻生长期内极端降水类指标的时空分析

以所选年份的95%及99%分位数日降水量作为阈值,依据该阈值核算出水稻生长期极端降水事件指标。统计发现,1980—2014年95%极端降水阈值为8.60~22.90 mm之间,阈值平均值为18.13 mm,其中最大值出现在英山,最小值出现在老河口。而1980—2013年99%极端降水阈值介于16.8~58 mm,阈值平均值为46.42 mm,与95%极端降水阈值一样,最大值和最小值分别位于鄂东北英山站、鄂西北老河口站。

分区来看,鄂西南、鄂西北、鄂东北和鄂东南以及江汉平原的95%极端降水阈值均值分别为18.30、10.70、21.90、22.70和18.80 mm;鄂西南、鄂西北、鄂东北、鄂东南以及江汉平原的95%极端

降水阈值的均值分别为 44.20、27.70、57.82、57.40 和 53.00 mm。这表明,极端降水阈值的区域差异明显,东部地区的极端降水阈值大于江汉平原,江汉平原的阈值大于西部地区,呈现由东向西递减的态势。

湖北省极端降水量在 35 年间变化趋势较为平

稳,年际倾向率为-2.978 mm/年(图 1),呈现降低趋势但不显著。其中,极端降水量多年的平均值为 679.61 mm,有 17 个年份在均值水平之上,最大值出现在 1983 年,最小值出现在 2001 年,极端降水量在 2000 年以前波动较大,波动幅度在 2000 年后有所减小。

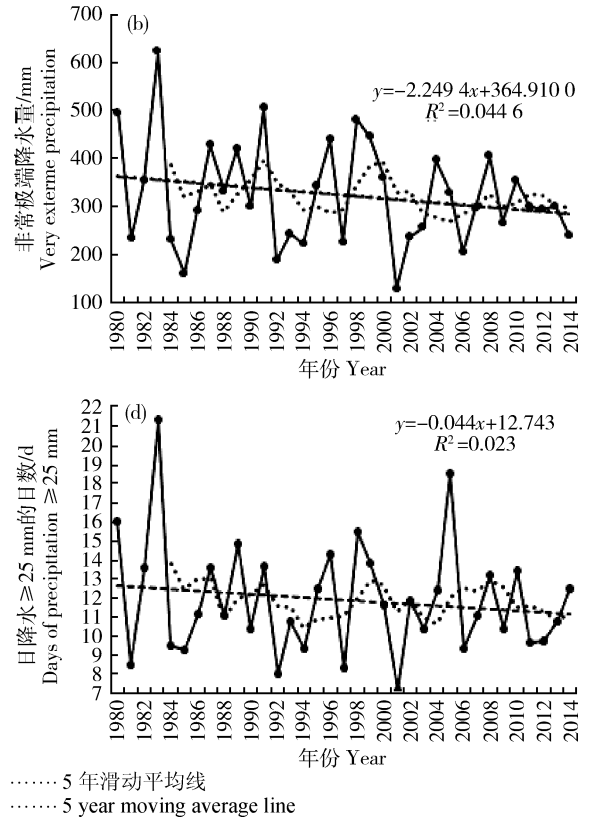
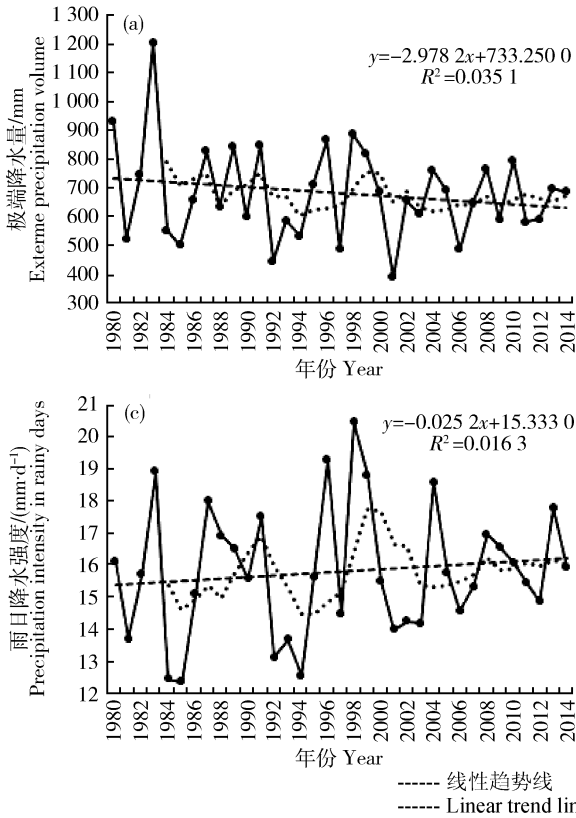


图 1 1980—2014 年湖北省极端降水类指标的变化趋势

Fig. 1 Trends of extreme precipitation indexes in Hubei Province from 1980 to 2014

全省非常极端降水量的变化相对极端降水量小,年际倾向率为-2.249 mm/年(图 1),呈现降低趋势但不显著。其中,有 16 个年份在均值水平之上,非常极端降水的最低值出现在 1983 年,最小值出现在 2001 年。具体到不同区域,变化最为明显的是鄂东北地区,鄂东南列为最后。对比极端降水与非常极端降水,各区域的这 2 个指标变化趋势大体一致。

期间水稻生育期的年均雨日降水强度是 15.79 mm/d,变异系数为 0.13。年际间变化十分微小,变化率也仅为 0.025 mm/(d·年)(图 1)。鄂西南、鄂东北、江汉平原、鄂东南、鄂西北的降水强度均值分别为 14.49、19.77、16.60、17.44 和 11.61 mm/d,仅鄂西北的变化稍微明显,其起点较低并有上升趋

势,倾向率为 0.130 mm/(d·年),满足显著性检验。枣阳作为西北地区降水强度变化的主力,变化幅度为 0.132 mm/(d·10 年)。空间上,年均雨日降水强度呈由东南向西北递减的趋势,鄂东北、鄂东南及江汉平原的降水强度处于前列。

湖北省日降水 ≥ 25 mm 的天数的均值是 12 d,时间上看,湖北日降水 ≥ 25 mm 的天数略微下降,年际倾向率为-0.044 d/年(图 1),趋势不显著。鄂东北的年际倾向率为-0.09 d/年,在所有区域中变化最为明显,但依旧不显著。西北地区的日降水 ≥ 25 mm 的天数与其极端降水、降水强度一致,都列于最后。空间上,该指标由东南向西北方向递减,呈现中间低,四周高分布,具有明显的高值区和低值区,高值区位于鄂东南,黄石站比较突出。低值区位

于鄂西北,鄂东北与鄂西南地区的该指标差距不大。

2.2 水稻生长期内极端温度类指标的时空分析

年日最低气温极低值的平均值为7℃,鄂西南、东北、东南、西北和江汉平原的日最低气温极低值年际变化率分别为0.24、0.10、0.28、0.44和0.40℃/

10年。由此可知,江汉平原与鄂西北区域上升程度,鄂东南与西南的上升程度一致。综合而言,湖北省及各区域的日最低气温极低值呈现上升趋势(图2)。从空间上看,不包括鄂东北区域,年日最低气温极低值由东南向西北递减,鄂东北最稳定。

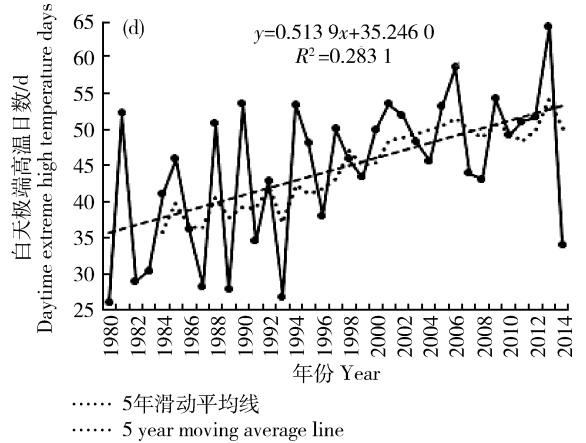
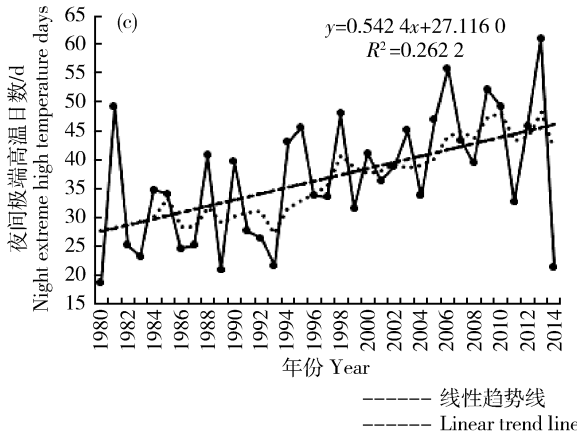
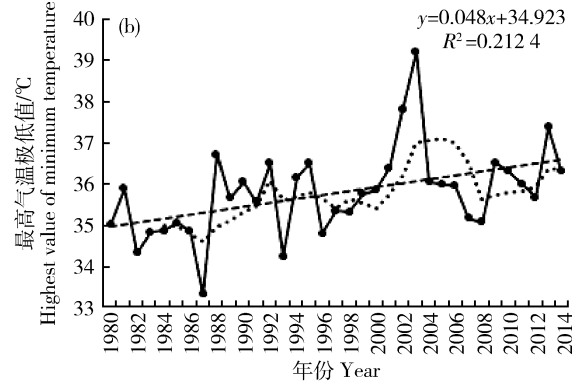
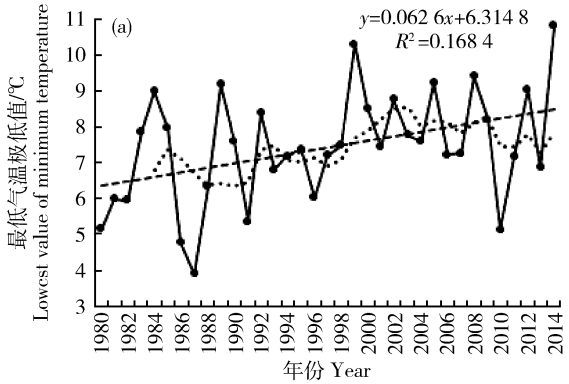


图2 1980—2014年湖北省极端温度类指标的变化趋势

Fig. 2 Trends of extreme temperature indexes in Hubei Province from 1980 to 2014

全省年日最高气温的极高值的变化率是0.048℃/年,呈现上升趋势(图2),而鄂东北、鄂西北地区该指标基本没有变化。全省、鄂西南、鄂东南地区的均值分别是35.70、37.30、38.00℃。从历年的最高值看,鄂东北的最高值是40.10℃,鄂西北的最高值为40.00℃,江汉平原列于第3位。

夜间极端高温天数的均值是36d,呈现一个上升趋势,上升率0.054d/年,通过了显著性检验(图2)。鄂西南、鄂西北高于全省均值,鄂东北与江汉平原该指标较低,而鄂东南与全省数值一致。空间上,各区域相差不大,但仍可显示出由西南向东北区域递减。白天极端高温天数呈上升趋势,其变化率是0.062d/年(图2)。全省该指标的均值为44d,鄂西南、东北、东南、西北和江汉平原的均值分

别为70、37、36、40和24d,其中鄂西北地区的高温天数最多,是全省均值的1.50倍,而江汉平原的天数相对较低,其余区域相差不大。

时间趋势上,不论是立于全省,还是不同区域,白天极端高温天数均呈上升趋势,但上升程度有所不同,鄂东北上升趋势最为明显,鄂东南最为平缓。空间上,出现白天极端高温天数较多的区域位于湖北周边,并且,西部出现的天数多于东部,中部地区出现白天极端高温的天数较少。

结合极端温度和降水类指标发现,极端降水的多发区集中在东面,并且近年来的变化率大,而极端温度的多发区集中在北面和西面,变化率大的地方位于鄂北方向。因此,关注鄂东及鄂北地区的极端气候变化具有一定意义。

2.3 水稻气候产量分析

依据 1.2.2 介绍的方法计算水稻气候产量,图 3 给出了 2000—2013 年湖北水稻气候产量的变化情况,近 13 年来,水稻气候产量呈现出规则的变动。具体来看,2004 年是气候产量由负变正的转折点,2000—2004 年气候产量一直在“0”以下波动,当气候产量低于 0 时,则反映当时的气候条件相对恶劣,不利于水稻生产,导致水稻产量减产,例如 2003 年湖北省高温灾害导致当年水稻严重减产。2004 年以后水稻气候产量在 0 以上波动,气候产量超过 0,表示当年的气候条件较为适宜,有利于水稻

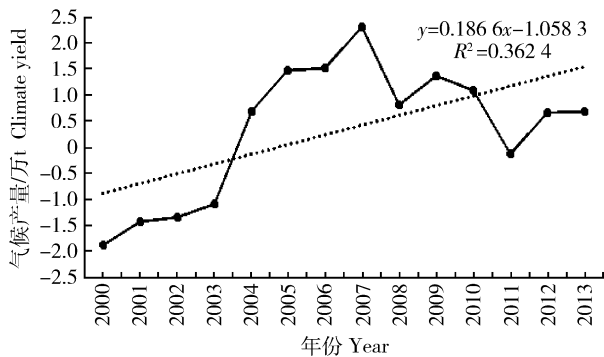


图 3 2000—2013 年湖北省水稻气候产量

Fig. 3 Rice climatic yield in Hubei Province from 2000 to 2013

表 2 湖北省水稻的气候产量与极端气候因子间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between rice climate yield and extreme climatic factors in Hubei

R_{95}	R_{99}	SDII	R_{25}	TNN	TN_{10}	TXX	TN_{90}	TX_{90}
0.005 4	0.032 3	0.001 1	-0.033 0	0.003 8	0.078 2	-0.012 4	0.011 9	-0.176 1*

注:对应英文缩写见表 1; * 代表在 10% 的显著水平。

Note: English abbreviations can be found in Table 1; * represents significant level at 10%.

另外,一般情况下,极端气候对水稻气候产量将产生不利影响,但积温等正常气候因子是保证水稻生长发育的基本条件,同时随着温度、降水量的逐年变动,农户的水稻种植习惯会有所改变,进而影响水稻生产,因此,为了尽可能准确度量极端气候的不利影响,在相关分析以及定量分析中均适当加入了非极端气候因素,鉴于本研究重点是极端气候因素,所以未对非极端气候因素的时空变化作具体说明,仅给出了相应的基本统计量(表 3)。借鉴段居琦等^[19]的研究变量,本研究选取的非极端气候因素包括 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、平均温度 $>18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数、生长期总降水量以及平均相对湿度。依据表 4 的相关系数发现,

生长发育,确保水稻增产,气候产量正值越大,表示气候因素对水稻生产的正面作用越大。

2.4 极端气候对水稻气候产量的影响分析

2.4.1 相关分析

由于涉及的极端气候指标较多,指标过多将会降低模型的自由度,导致分析偏误。不同的指标对水稻气候产量的影响强弱程度也有所不同,因此,有必要选出较为关键的极端气候指标。

气温升高会加快水稻发育,致使部分地区水稻的生育期提前,安全齐穗终止日拖后。而持续高温少雨会造成高温逼熟使早稻成熟期提前,质量下降。同时,气候多变将明显提高水稻病虫害发生的机率,为杂草生长提供适宜环境。随着气候变暖,冷害出现的机率有所减少,但并不能排除冷害的突然袭来,冷害一旦发生,将导致作物的一些组织受损,进而阻碍作物生理活动。通过上述现实判断,并结合表 2 发现,水稻气候产量与白天极端高温天数在 10% 的显著水平相关;与其余极端气候指标的相关性并不显著,但与日降水 $\geq 25\text{ mm}$ 天数、最高气温极高值呈负相关,符合极端气候对气候产量不利影响的预期,因此将日降水 $\geq 25\text{ mm}$ 天数、最高气温极高值及白天极端高温天数作为极端气候对水稻气候产量影响定量分析的关键指标。

水稻气候产量与白天极端高温天数、生长期总降水量、平均相对湿度在 10% 的显著水平相关,说明加入非极端气候因素是可行的,下面将进一步量化气候因素,尤其是极端气候因素,对水稻气候产量的影响程度。

2.4.2 定量影响分析

不同气候因素的影响程度不同,准确度量不同气候变量的影响作用,特别是极端气候的影响,进而趋利避害,现实意义重大。主要变量的描述性统计见表 3。

依据研究方法中的介绍,首先将个体固定效应与混合效应进行比较, $\text{Prob} > F = 0.000 7$,结果显示个体固定效应模型更合适;将个体随机效应与混

表 3 变量的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of variables

变量名称 Variable name	均值 Mean	标准差 Std. Dev	最大值 Maximum	最小值 Minimum
水稻气候产量/万 t	0.14	3.07	9.86	-11.19
>10 °C 积温/°C	1 961.12	548.69	8 088.50	19.76
平均气温>18 °C 天数/d	176.26	13.16	200.00	133.00
生长期总降水量/mm	728.25	201.15	1 349.80	172.51
最低气温的极小值/°C	7.83	6.43	31.5	0.90
白天极端高温天数/d	51.32	40.43	193.00	00.00
降水强度/(mm/d)	15.70	3.26	28.48	8.35
平均相对湿度	51.60	4.85	92.30	41.30

表 4 湖北省水稻的气候产量与气候因子间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between rice climate yield and climatic factors in Hubei

AT ₁₀	D ₁	TP	TNN	TX ₉₀	SDII	ARH
0.013 4	0.110 9	-0.140 4*	0.003 8	0.011 9*	0.001 1	-0.223 9*

注：AT₁₀ 为 >10 °C 积温，°C；D₁ 为平均温 >18 °C 天数，d；TP 为生长期总降水量，mm；ARH 为平均相对湿度。* 代表在 10% 的显著水平。

Note: AT₁₀, >10 °C accumulated temperature, °C; D₁, days of average temperature >18 °C, d; TP, total precipitation during growth period, mm; ARH, average relative humidity. * represents significant level at 10%.

合效应进行比较, Prob>F=0.010 2, 结果显示个体随机效应更合适。再进行豪斯曼检验发现 P>

chi²=0.015 1, 检验说明应选择个体固定效应模型。表 5 为模型结果:

表 5 气候变化对湖北省水稻产量影响的模型估计结果

Table 5 Model estimation results of effects of climate change on rice climate change in Hubei

解释变量 Explanatory variable	系数 Coefficient	标准差 Std. Dev	P 值 P value
平均气温>18 °C 天数/d	0.110***	0.027	0.000
生长期总降水量/mm	-0.024**	0.001	0.049
最低气温的极小值/°C	-0.197**	0.093	0.036
白天极端高温天数/d	-0.046*	0.027	0.093
平均相对湿度	-0.098*	0.050	0.051
>10 °C 积温/°C	-0.000 2	0.000 4	0.641
降水强度/(mm/d)	0.034	0.078	0.660
常数项	-7.491	6.091	0.194
样本个数		182	
组内 R ²		0.144	

注：***、**、* 分别代表在 1%、5% 和 10% 的显著水平。

Note: ***, ** and * represent significant levels at 1% 5% and 10%, respectively.

回归结果表明,不同气候因素对湖北省水稻气候产量的影响作用不同。自变量平均气温 $>18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数通过了1%水平的显著性检验,它对水稻增产具有正向影响。生长期总降水量、平均相对湿度分别通过了5%、10%水平的显著性检验,其对水稻增产具有负向影响。 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温并没有通过显著性,其中的原因可能是,湖北水稻生长期的热量条件能够满足其生长发育需要,热量不是制约因子。在其他条件不变的情况下,极端气候指标具有负向作用,最低气温的极小值每增加1%将会使水稻产量降低0.197%,白天极端高温天数对水稻气候产量也具有抑制作用,其每增加1%将会使水稻产量降低0.046%。降水强度作为一个极端气候指标,其对水稻气候产量的影响不显著,其中的原因可能是,湖北省的河流、湖泊众多,水资源充足,并且防洪排涝能力较强。总之,气候变化对水稻气候产量存在影响,温度的作用明显强于降水,但当相关指标超出一定范围或达到极端值后,其中的正向作用将会转换成消极作用,而负面影响则会加强,即呈现出极端气候对水稻产量的负面影响。

3 结 论

本研究在测算极端降水、极端气温类指标及气候产量的基础上,考察了湖北极端天气事件的时空变化,并实证分析了极端气候因素对水稻气候产量的影响。主要结论包括:

1)湖北极端降水量和降水天数呈下降趋势,非常极端降水量的波动幅度低于极端降水量,日降水强度呈上升趋势,综合表现出下降趋势。湖北极端降水事件由东向西、由南向北方向递减,其中,鄂东北、鄂东南易出现极端降水事件,鄂东地区的极端降水的发生倾向率较高。

2)湖北夜间、白天极端高温出现的天数增多,最高气温的极高值升高,全省极端高温呈现上升趋势。鄂北、鄂西易发生极端高温事件,其中,鄂西北地区的白天极端高温的天数相对较多,夜间极端高温天数较少。

3)气候因素对湖北水稻气候产量的影响作用不同。平均气温 $>18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数对水稻增产具有正向影响;极端气候类指标呈现消极影响,其中,最低气温的极小值每增加1%将会使水稻的气候产量降低0.197%。

4 讨 论

对于农业而言,极端天气事件频发给农业生产带来了实质影响和潜在威胁。中国地域辽阔,不同省份及同一省份不同地区的极端气候都存在差异,因此,研究某一区域的极端天气变化更具有针对性。本研究以湖北省为例的研究发现,鄂东地区的极端降水发生倾向率较高,这一结论与已有研究相似:王冀等^[20]指出,湖北东南部是极端降水指数高值分布区;杨玮等^[21]指出,鄂东是95%分位数降水阈值大值分布区,极端降水与其分布相似。极端温度类指标上升的主要区域集中在北、西部,由于研究的时间长度,具体范围界定不同,这一结论与吴翠红等^[10]的结论有所差异。

目前,学术界普遍认为极端天气事件多发可能会增加农业生产的脆弱性,本研究实证结果也表明极端气候对水稻生产具有不利影响。同时,万素琴等^[22]的研究发现2003年湖北省出现的严重的高温热害,导致湖北省水稻等粮食损失重大,本研究也得到白天极端高温天数对水稻气候产量具有显著负向影响这一结论。

极端天气事件的易发区,是湖北极端气候监测和防范的重点区域。在水稻生长期,各区依据当地极端气候情况,有必要防范影响水稻生产的主要极端气候因素,例如,鄂东北、鄂东南需加强对极端降水事件的监测和预警,鄂北和鄂西需加强对极端温度事件的监测。除了加强政府对极端气候的预测、预报之外,完善农田基础设施也必不可少,还要提高农户对气候变化的适应能力。

极端气候指标的选取虽具有一定代表性,但难免存在一些遗漏,不能充分反应出湖北省极端气候的时空变化情况。在极端气候对产量影响的实证过程中,虽尽可能分离出气候以外的因素作用,仍无法避免实证中存在的 uncertainty。

参考文献 References

- [1] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank A M G, Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212
- [2] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, Caesar J, Gleason B, Klein Tank A M G, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahinzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J,

- Griffiths G, Vincent L, Stephenson D B, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre J L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2012, 111(D5): 1042-1063
- [3] Rahinzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(3): 329-343
- [4] 牛旭, 严俊霞, 李洪建. 1951—2011年山西省极端气温变化基本特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 73-78
Niu X, Yan J X, Li H J. Characterization of general changes patterns of extreme temperature from 1951 to 2011 in Shanxi Province, China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(4): 73-78 (in Chinese)
- [5] 李晋昌, 刘勇, 张彩霞. 山西省春季气温、降水及其极端事件的变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 55-60
Li J C, Liu Y, Zhang C X. Variation in spring temperature, precipitation and their extreme events in Shanxi Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 55-60 (in Chinese)
- [6] 曹永旺, 延军平. 1961—2013年山西省极端气候事件时空演变特征[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 2086-2098
Cao Y W, Yan J P. Temporal and spatial analysis of extreme climatic events in Shanxi Province from 1961 to 2013 [J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 2086-2098 (in Chinese)
- [7] 高妍, 冯起, 李宗省, 王钰, 宋智渊, 张晗. 祁连山讨赖河流域1957—2012年极端气候变化[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 814-826
Gao Y, Feng Q, Li Z S, Wang Y, Song Z Y, Zhang H. The variation of climate extremes in the Taolaihe River Basin in the Qilian Mountains of China during 1957—2012 [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 814-826 (in Chinese)
- [8] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 叶永昌, 汲玉河. 1961—2013年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2501-2513
Li Y, Wang Y H, Lv X M, Ye Y C, Ji Y H. Spatial distribution and temporal change in extreme weather events in three provinces in Northeast China [J]. *Resources Science*, 2015, 37(12): 2501-2513 (in Chinese)
- [9] 李菲, 张明军, 李小飞, 汪宝龙, 王圣杰, 王琼. 1962—2011年来宁夏不同等级降水的变化特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2154-2162
Li F, Zhang M J, Li X F, Wang B L, Wang S J, Wang Q. Variation characteristics of different-level precipitation in Ningxia of Southwest in 1962—2011 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2154-2162 (in Chinese)
- [10] 吴翠红, 王晓玲, 龙利民, 牛奔, 王珊珊, 李银娥. 近10年湖北省强降水时空分布特征与主要天气概念模型[J]. *暴雨灾害*, 2013(2): 113-119
Wu C H, Wang X L, Long L M, Niu B, Wang S S, Li Y E. Spatial and temporal characteristics of severe precipitation in Hubei Province during the past 10 years and main weather conceptual model [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2013, 32(2): 113-119 (in Chinese)
- [11] 任永建, 杜良敏, 肖莺, 万素琴, 孙善磊. 近49年来湖北省极端高温事件及其对区域增温的贡献[J]. *气象*, 2012(9): 1145-1149
Ren Y J, Du L M, Xiao Y, Wan S Q, Sun S L. The extreme high temperature events and contribution to regional warming in recent 49 years in Hubei Province [J]. *Meteorological Monthly*, 2012(9): 1145-1149 (in Chinese)
- [12] 顾治家, 白致威, 段兴武, 丁剑宏, 冯德泰, 帅小宁, 韩絮. 环境因子对山区粮食气候产量的影响: 以云南省为例[J]. *中国农业气候*, 2015(4): 497-505
Gu Z J, Bai Z W, Duan X W, Ding J H, Feng D T, Shuai X N, Han X. Quantitative effects of environmental factors on climatic yield in the mountainous area: A case study in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015(4): 497-505 (in Chinese)
- [13] 李辉, 姚凤梅, 张佳华, 郝翠. 东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J]. *中国农业气候*, 2014, 35(4): 423-428
Li H, Yao F M, Zhang J H, Hao C. Analysis on climatic maize yield and its sensitivity to climate change in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 423-428 (in Chinese)
- [14] 朱赞赞, 王连喜, 李琪, 宋玉芝, 李剑萍. 气候因子对宁夏不同区域马铃薯气候产量的影响效应分析[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011(6): 89-95
Zhu Y Y, Wang L X, Li Q, Song Y Z, Li J P. Influence of climatic factors on meteorological yield of potato in different regions of Ningxia [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2011(6): 89-95 (in Chinese)
- [15] 苏喜福, 李芬, 张岳军. 气候变化对忻州玉米气候产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2013, 41(6): 599-606
Su X F, Li F, Zhang Y J. Impact of climate change to corn yield in Xinzhou City [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2013, 41(6): 599-606 (in Chinese)
- [16] 魏星, 王品, 张朝, 陈一, 宋骁, 帅嘉冰, 史培军, 陶福禄. 温度三区间理论评价气候变化对作物产量影响[J]. *自然资源学报*, 2015(3): 470-479
Wei X, Wang P, Zhang C, Chen Y, Song X, Shuai J B, Shi P B, Tao F L. Assessing the impact of climate change on crop yield based on three-interval temperature theory: A case study of maize in Heilongjiang Province (1960-2009) [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015(3): 470-479 (in Chinese)
- [17] 郭广芬, 周月华, 史瑞琴, 李兰, 万君. 湖北省暴雨洪涝致灾指标研究[J]. *暴雨灾害*, 2009, 28(4): 357-361
Guo G F, Zhou Y H, Shi R Q, Li L, Wan J. Study on index of heavy rain flood disaster grade in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2009, 28(4): 357-361 (in Chinese)

- Chinese)
- [18] 吴珊珊,王怀清,黄彩婷. 气候变化对江西省双季稻生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 207-215
Wu S S, Wang H Q, Huang C T. Influence of climate change on double-harvest rice yield in Jiangxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(2): 207-215 (in Chinese)
- [19] 段居琦,周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6659-6668
Duan J Q, Zhou G S. Potential distribution of rice in china and its climate characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6659-6668 (in Chinese)
- [20] 王冀,江志红,严明良,张金玲. 1960—2005年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J]. 气象科学, 2008(4): 384-388
Wang J, Jiang Z H, Yan M L, Zhang J L. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960 to 2005[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008(4): 384-388 (in Chinese)
- [21] 杨玮,程智. 近53年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J]. 气象, 2015(9): 1126-1133
Yang W, Cheng Z. Variation characteristics of extreme precipitation during meiyu flood period over Yangtze-Huaihe Basin in recent 53 years[J]. *Meteorological Monthly*, 2015(9): 1126-1133 (in Chinese)
- [22] 万素琴,陈晨,刘志雄,周月华,邓环,高素华. 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, 30(S2): 316-319
Wan S Q, Chen C, Liu Z X, Zhou Y H, Deng H, Gao S H. Space-time distribution of heat injury on rice in Hubei Province under climate change[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(S2): 316-319 (in Chinese)

责任编辑: 苏燕