

江淮分水岭地区一季稻气候生产潜力评估

李 威¹, 王学林¹, 杨太明², 蒋跃林³, 柳冬青⁴, 王 志¹

(1.合肥市气象局, 合肥 230000; 2.安徽省气象研究所, 合肥 230000;

3.安徽农业大学, 合肥 230000; 4.浙江大学 土地与国家发展研究院, 杭州 310000)

摘 要:为找出江淮分水岭地区水稻限制气象因子,提高研究区水稻现实生产力,利用江淮分水岭地区 13 个站点 1980—2016 年逐日地面观测资料,采用逐步订正法对江淮分水岭地区一季稻生长季光合生产潜力(Y_Q)、光温生产潜力(Y_T)、气候生产潜力(Y_W)及气候资源利用率的时空分布进行了研究,并分析了气象因子对气候生产潜力的影响。结果表明:江淮分水岭地区 Y_Q 、 Y_T 与 Y_W 总体呈下降趋势,气候资源利用率随时间变化呈缓慢上升趋势。江淮分水岭地区 Y_Q 、 Y_T 在空间分布上较为一致,均沿分水脊线阶梯状平行分布。江淮分水岭分水脊线西北侧为 Y_Q 、 Y_T 高值区,脊线附近地区为 Y_Q 、 Y_T 中值区,脊线东南侧为低值区。江淮分水岭地区西南部及东北部 Y_W 高、中部 Y_W 低。气候资源利用率在空间分布表现为自西向东递增。降水、日最高气温和参考作物蒸散是影响研究区气候生产潜力最主要的 3 个气象因子。本研究可为江淮分水岭地区一季稻种植优化调整提供理论依据。

关键词:一季稻; 气候生产潜力; 气候资源利用率; 时空变化趋势

中图分类号:S162.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0276-08

Climate Production Potential Assessment of Single-Season Rice in Jianghuai Watershed

LI Wei¹, WANG Xuelin¹, YANG Taiming², JIANG Yuelin³, LIU Dongqing⁴, WANG Zhi¹

(1.Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230000, China; 2.Anhui Institute of

Meteorological Science, Hefei 230000, China; 3.Anhui Agricultural University, Hefei 230000,

China; 4.Institute of Land and National Development, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to found out the limiting meteorological factors of rice in the Jianghuai watershed area, and to improve the actual rice productivity in the study area, based on daily ground observation data of 13 sites in Jianghuai Watershed area from 1980 to 2016, growing season photosynthesis (Y_Q) of Jianghuai Watershed area single-season rice, the potential productivities of potential (Y_T), climate productive potential (Y_W) and the time and space distribution of climate resource utilization were studied, and the meteorological factors impact on the climate productive potential were analyzed. The results show that Y_Q , Y_T and Y_W in the watershed area of Jianghuai River Basin generally showed a downward trend, and the utilization rate of climate resources showed a slow upward trend with the change of time; the spatial distribution of Y_Q and Y_T in the watershed area of Jianghuai was relatively consistent, and they distributed in a stepped parallel manner along the water-splitting ridge line; to the northwest of the ridge line of Jianghuai Watershed, Y_Q and Y_T were high; to the vicinity of the ridge line, Y_Q and Y_T were medium; to the southeast of the ridge line, Y_Q and Y_T were low; Y_W was high and Y_W was low in the southwest and northeast of Jianghuai Watershed; the utilization rate of climatic resources increased from west to east in spatial distribution; precipitation, daily maximum temperature and reference crop evapotranspiration were the three main meteorological factors affecting the climatic production potential of the study area. These results can provide the theoretical basis for the optimization and adjustment of rice planting in the area of Jianghuai Watershed.

Keywords: single-season rice; climate production potential; utilization of climatic resources; spatiotemporal trend

收稿日期:2021-04-06

修回日期:2021-05-28

资助项目:国家重点研发计划项目课题“粮食作物生产灾害防控与产后安全绿色储藏技术集成”(2018YFD3000905)

第一作者:李威(1992—),男,安徽肥东人,硕士,助理工程师,主要从事农业气候资源评估研究。E-mail:1627428499@qq.com

通信作者:王学林(1987—),男,安徽舒城人,硕士,工程师,主要从事农业气象灾害研究。E-mail:912856253@qq.com

江淮分水岭地区位于安徽省中部丘陵、浅山区,地处长江淮河之间,是长江流域与淮河流域的分界线,包括合肥、六安、滁州、淮南等4市在内的13个县市,国土总面积近2万km²,耕地面积占30%以上^[1]。本区地处亚热带湿润气候区北缘,是亚热带湿润季风气候区向暖温带半湿润季风气候区转换的过渡带,光照充足,热量丰富。该区常年平均气温15.8℃,≥0℃积温5 783.6℃,平均日照5.3 h,平均降水量1 007.6 mm。但由于季风气候的影响,使本地冬夏两季温度各异^[2];江淮分水岭的分水作用又导致江淮分水岭脊线两侧降水量等气候条件存在显著差异,气候资源分布不均导致该区域不同地区气候生产潜力存在较明显差异。

水稻是江淮分水岭地区最重要的粮食作物,种植品种以一季稻为主。一季稻生产对气候条件高度依赖,随着全球气候变暖,极端天气气候事件增多,加上江淮分水岭地区旱涝灾害频发,使得江淮分水岭地区气候资源不太稳定,一季稻生长发育及产量将发生改变,农业生产的不稳定因素加大。气候生产潜力是评价地区气候资源优劣的重要依据之一。气候生产潜力是指在一定的光、温、水资源条件下,其他环境因素(CO₂,养分等)和作物群体因素处于最适宜状态时,作物利用当地的光、温、水资源的潜在生产力。通过对区域农业气候生产潜力的评估,可直接反映地区农业生产中光、热和水资源间配置是否满足作物的生长所需,有利于找出区域农作物生长的主要气候限制因子^[3]。

近年来对于关于气候生产潜力的研究愈来愈多,并提出大量有价值的估算模型。刘江等^[4]采用机制法估算玉米生育期气候生产潜力,利用EOF和RE-OF分解法分析其时空特征。王春学等^[5]使用Miami模型重建了1850年以来川西高原北部植被的气候生产潜力。李敏^[6]采用逐级订正法估算气候生产潜力,并用gis空间插值法分析了辽宁省近30 a的水稻气候生产潜力的时空分布特征。闫军辉等^[7]采用Thorntwaite Memorial模型估算了上海市近145年的气候生产潜力,并定量评估了气温和降水对上海市气候生产潜力的相对贡献率,指出降水对气候生产潜力的变化起主导作用。卢燕宇等从气候的资源 and 灾害的双重属性出发,构建了冬小麦气候生产潜力和胁迫风险评价指标^[8]。黄爱军^[9]研究指出江淮地区1960—2007年水稻光合生产潜力呈下降趋势,而光温生产潜力与气候生产潜力呈上升趋势。还有一些学者对于国内外各地区的气候生产潜力都进行了研究^[10-16]。但在气候变化及区域经济快速发展背景下,对于区域及关键作物的气候生产潜力进行研

究具有更加重要和具体的意义。

本文通过对江淮分水岭地区一季稻气候生产潜力进行计算分析,并根据实际产量与估算结果之间的差距,分析水稻生产的气候资源利用率,找出低资源利用率区域的气象限制因子,分析其气候资源利用率较低的原因,并从气候生产潜力角度针对性提出增产指导建议,挖掘其最大生产潜力,可为江淮地区农业种植适宜性区划提供技术支撑和数据基础,为提高水稻现实生产力提供理论依据,对制定适应气候变化的策略具有重要参考和指导意义。

1 资料与方法

1.1 资料来源

所用资料为中国气象数据网下载的江淮分水岭13个站点1980—2016年逐日气候资料(包括日照、气温、降水、风速等)、台站经纬度坐标,以及安徽省统计年鉴网下载的1980—2014年江淮地区13个县市一季稻产量数据。

1.2 研究方法

气候生产潜力估算基于潜力衰减法,按光合、光温、气候潜力三级订正进行计算,先计算不同生育期,再累加得到全生育期生产潜力^[17]。利用ArcGIS 10.2空间插值分析绘制江淮分水岭地区气候生产潜力空间分布图,用Origin软件绘制散点图与趋势线,利用Mann-Kendall(M-K检验)法对研究区气候生产潜力变化趋势进行趋势性检验^[18],利用SPSS软件进行气候资源与气象因子的相关性分析与逐步回归。

1.2.1 光合生产潜力 光合生产潜力(Y_Q)指的是作物在不考虑其他因素条件下,即假设水分温度土壤农科技术等均处于适宜条件下,由光能资源形成的在单位时间及单位面积内的产量理论值。

计算公式如下^[6]:

$$Y_Q = \frac{\sum Q_i \times C \times S \times \varepsilon \times q \times (1-a) \cdot (1-\beta) \times (1-\rho) \times (1-\gamma) \times (1-\omega) \times f(L) \times E}{q \times (1-\eta) \times (1-\xi)}$$

式中: Y_Q 为单位面积光合生产潜力(kg/hm²); C 为单位转换系数,取值为10 000; $\sum Q_i$ 为生育期总辐射量(MJ/m²),采用气候学日照百分率计算可得。其他相关系数的物理含义及赋值见表1,参数参照网络文献^[2]。

1.2.2 光温生产潜力 光温生产潜力(Y_T)是指在光合生产潜力条件下,假设CO₂,水分、温度、土壤、农科技术等均处于事宜条件下考虑温度及辐射因素并通过温度订正系数得出的单位时间单位面积的最高产量。计算公式为^[4]:

$$Y_T=Y_Q\times f(T)$$
$$f(T)=\frac{[(T-T_1)(T_2-T)]^B}{[(T_0-T_1)(T_2-T_0)]^B}$$
$$B=\frac{T_2-T_0}{T_0-T_1}$$

式中： T 为水稻生育期各月平均气温； T_0, T_1, T_2 是作物生产三基点温度，即作物生育的最适温度、作物生育的下限温度和作物生育的上限温度，赋值见表 2^[17]。

表 1 水稻光合生产潜力各参数含义及数值

参数	含义	数值
S	作物光合固定能力比例	0.90
ϵ	光合有效辐射比	0.49
φ	光量子转化效率	0.22
α	植物群体反射率	0.06
β	植物群体透射率	0.06
ρ	作物非光合器官截获辐射比率	0.08
γ	超过光饱和点的光的比率	0.05
ω	呼吸消耗占光合产物比重	0.33
$f(L)$	作物叶面积动态变化订正值	0.56
E	作物经济系数	0.40
η	成熟作物的含水率	0.15
ξ	作物灰分率	0.08
q	单位干物质的含热量	17.5

表 2 一季稻各生育期三基点温度 ℃

生育期	T_1	T_0	T_2	生育期	T_1	T_0	T_2
秧苗期	10	25	40	拔节—孕穗期	18	27	35
移栽—返青期	14	28	35	抽穗—开花期	20	30	35
分蘖期	15	30	37	灌浆—成熟期	10	25	40

1.2.3 气候生产潜力 气候生产潜力(Y_w)是假设 CO_2 、土壤、农科技术等均处于适宜条件下，作物在光温生产潜力基础上考虑水分限制因素所估算的生产潜力。计算公式如下[6]：

$$Y_w=Y_T\times f(W)$$
$$f(W)=\begin{cases} \frac{P_e}{ET_c} & (0\leq P_e\leq ET_c) \\ 1 & (P_e\geq ET_c) \end{cases}$$

式中： P_e 为作物生育期内有效降水量(mm)； ET_c 为作物理论需水量(mm)，采用 FAO 推荐的公式：

$$ET_c=K_c\times ET_0$$

式中： K_c 为作物需水系数，水稻各生育期需水系数见表 3； ET_0 为参考作物蒸散量(mm)，采用 Penman-Monteith 公式估算得来，计算公式及参数取值参照参考文献[6]。

表 3 水稻各生育阶段作物系数

生育阶段	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
作物系数	1.02	1.26	1.47	1.57	1.44	1.06

1.2.4 气候资源利用率 作物的气候资源利用率即将作物生育期内的气候资源转化为实际产量的比率，是作物生长过程中对农业开发、技术推广的综合反映^[19]。计算公式为：

$$\text{气候资源利用率}=\text{作物实际产量}/\text{气候生产潜力}\times 100\%$$

1.2.5 气候倾向率分析 本研究在分析水稻生产潜力变化趋势时，采用气候倾向率进行分析，计算公式为：

$$Y=at+b\ (t=1,2,3,\cdots,n)$$

式中： t 为时间； a, b 为系数，由最小二乘法来确定；当 $a>0$ 时，生产潜力与时间 t 呈正比，当 $a<0$ 时，生产潜力与时间 t 呈反比。 a 的大小代表生产潜力升降程度，一般以 $a\times 10[kg/(hm^2\cdot 10\ a)]$ 作为气候倾向率^[20]。

2 结果与分析

2.1 光合生产潜力时空变化分析

2.1.1 时间变化趋势 由图 1 看出，1980—2016 年江淮分水岭地区一季稻生育期内的光合生产潜力在 19 000~25 000 kg/hm²，平均光合生产潜力为 21 783.45 kg/hm²，年际变化波动较大，最大值出现在 1981 年，为 24 590.22 kg/hm²，最小值出现在 2014 年，为 19 306.48 kg/hm²，相差 5 283.74 kg/hm²。由线性趋势可知，江淮分水岭地区一季稻生育期平均光合生产潜力随时间变化呈下降趋势，下降趋势较为明显，平均下降幅度为 550.95 kg/(hm²·10 a)。

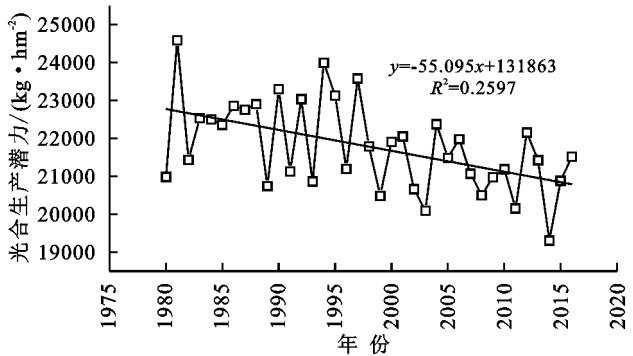


图 1 江淮分水岭地区一季稻生长季光合生产潜力年际变化

根据 MK 突变检验图(图 2)所示，江淮分水岭地区各站点光合生产潜力在 2002 年附近发生突变。1980—2002 年呈现不显著上升趋势；2001—2016 年呈下降趋势，其中 2002—2009 年的下降速率为 332.47 kg/(hm²·10 a)，下降趋势不显著，2009 年后则以 1 470.74 kg/(hm²·10 a)的速率显著下降。

2.1.2 空间分布特征 由于江淮分水岭地区各站点地理经纬度较为接近，因此江淮分水岭地区光合生产潜力分布特点同太阳辐射分布较为相似。江淮分水岭西北部淮南寿县等地区在脊线西侧，降水量少于东

部滁州全椒等地,加上一季稻生长季期间地理纬度偏北地区白昼时间多于南部地区,因而日照时数多于西南部地区,导致太阳辐射量在空间上表现为西北多,东南少。利用 ArcGIS 空间插值将 1980—2016 年江淮分水岭地区光合生产潜力空间分布划分为高、中、低 3 个等级(图 3),可以发现,江淮分水岭地区分水脊线对该区域光合生产潜力有非常明显的分界作用。该地区光合生产潜力沿其分水脊线两侧呈阶梯状分布,走向为东北—西南走向,空间分布区域特征明显。分水脊线西北侧的淮南市、凤阳县等地为光合生产潜力高值区,该区域光合潜力平均值约为 $22\ 270\text{ kg/hm}^2$;脊线附近的六安市、长丰县、定远县等低为光合生产潜力中值区,该区域光合潜力平均值为 $22\ 180\text{ kg/hm}^2$;脊线东南侧的合肥市、全椒县等地为低值区,光合生产潜力平均为 $21\ 060\text{ kg/hm}^2$ 。江淮分水岭地区光合生产潜力平均值为 $21\ 783.45\text{ kg/hm}^2$,最小值为滁州市 $20\ 979.62\text{ kg/hm}^2$,最大值为来安县 $22\ 453.93\text{ kg/hm}^2$ 。

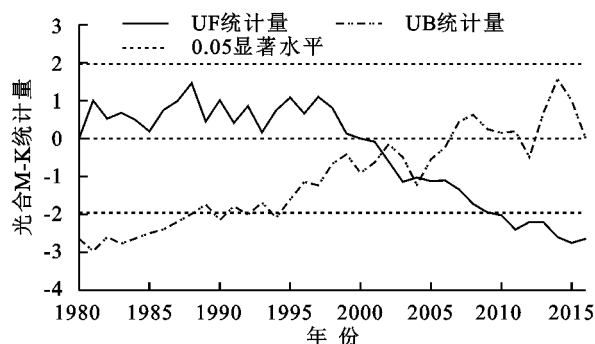


图2 江淮分水岭地区一季稻生长季光合生产潜力 M-K 突变检验

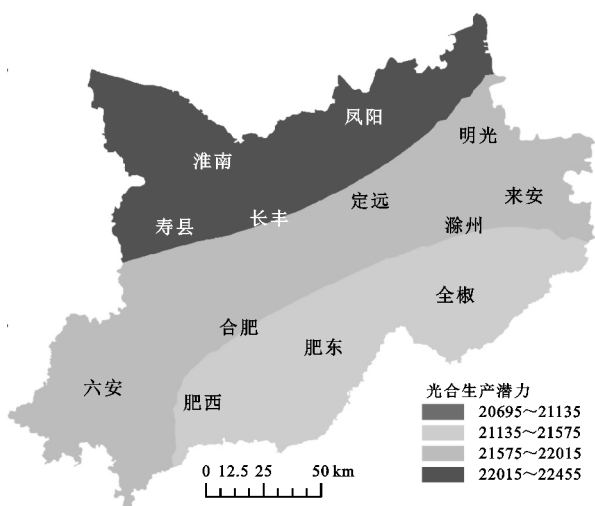


图3 江淮分水岭地区一季稻生长季光合生产潜力分布

2.2 光温生产潜力时空变化分析

2.2.1 时间变化趋势 由图 4 看出,1980—2016 年江淮分水岭地区一季稻生育期内的光温生产潜力值与光合生产潜力较为接近,各站点的光温生产潜力在 $19\ 000\sim 25\ 000\text{ kg/hm}^2$,平均光温生产潜力为 $21\ 408.93\text{ kg/hm}^2$,

年际变化波动同样较大,1981 年达到最大值 $24\ 183.44\text{ kg/hm}^2$,2014 年则达到最小值 $19\ 085.12\text{ kg/hm}^2$,相差 $5\ 098.32\text{ kg/hm}^2$ 。江淮分水岭地区一季稻生育期平均光温生产潜力随时间变化同样呈下降趋势,但由于气候变暖等因素的影响,导致光温生产潜力下降速度较光合生产潜力下降速度略有回升,平均下降幅度为 $526.53\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{ a})$ 。

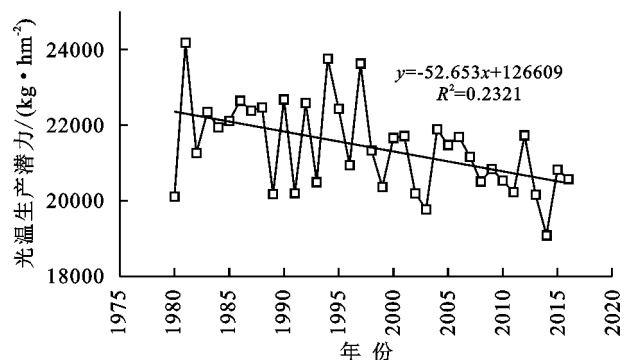


图4 江淮分水岭地区一季稻生长季光温生产潜力年际变化

如图 5 所示,江淮分水岭地区光温生产潜力年际变化趋势同光合生产潜力较为类似,光温 M-K 统计的突变年份则发生于 2007 年前后。江淮分水岭地区光温生产潜力在 2007 年之前较为平稳,无显著性下降趋势;2007—2016 年,光温生产潜力则以 $325.1\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{ a})$ 的速率下降,2011 年后下降速度超过 0.05 显著水平。

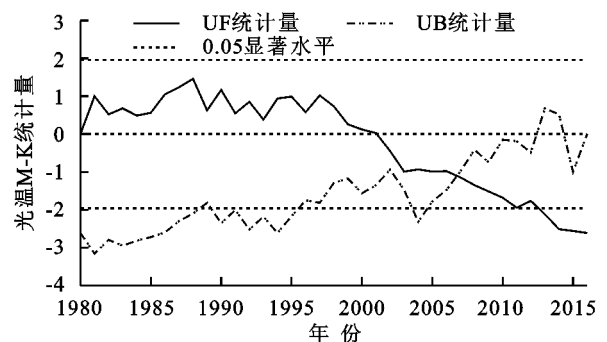


图5 江淮分水岭地区一季稻生长季光温生产潜力 M-K 突变检验

2.2.2 空间分布特征 江淮分水岭地区光温生产潜力在空间分布上与光合生产潜力非常相似。图 6 为江淮分水岭地区光合生产潜力分布图。从图中可以看出,1980—2016 年,江淮分水岭地区一季稻生长期间光温生产潜力总体表现为由东南向西北逐渐增加。西北部淮南凤阳等地为高值区,平均值约为 $21\ 930\text{ kg/hm}^2$;分水脊线附近的六安、长丰定远为中值区,平均约 $21\ 800\text{ kg/hm}^2$;东南部滁州全椒等地为低值区,平均 $20\ 700\text{ kg/hm}^2$ 。江淮分水岭地区光温生产潜力平均值为 $21\ 408.93\text{ kg/hm}^2$,最小值为滁州市 $20\ 270.46\text{ kg/hm}^2$,最大值为寿县 $22\ 047.28\text{ kg/hm}^2$ 。

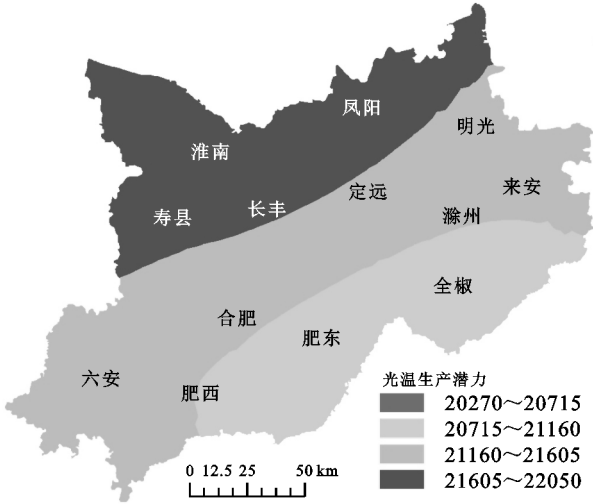


图 6 江淮分水岭地区一季稻生长季光温生产潜力分布

2.3 气候生产潜力时空变化分析

2.3.1 时间变化趋势 由图 7 看出,1980—2016 年江淮分水岭地区一季稻生育期内的气候生产潜力值在 7 000~21 000 kg/hm²,平均值为 14 567.56 kg/hm²。年际变化波动较大,最大值出现在 1987 年,为 20 749.56 kg/hm²,最小值出现在 2001 年,骤减为 7 415.05 kg/hm²,相差 13 334.51 kg/hm²。查阅江淮分水岭地区降水量资料得知,2001 年江淮分水岭地区各站点一季稻发育期降水均量为 309 mm,仅为常年的 45.8%,因而导致该年气候生产潜力值远低于常年。由线性趋势可知,江淮分水岭地区一季稻生育期平均光合生产潜力随时间变化呈缓慢下降趋势,下降趋势不明显,平均下降幅度为 208.92 kg/(hm² · 10 a)。

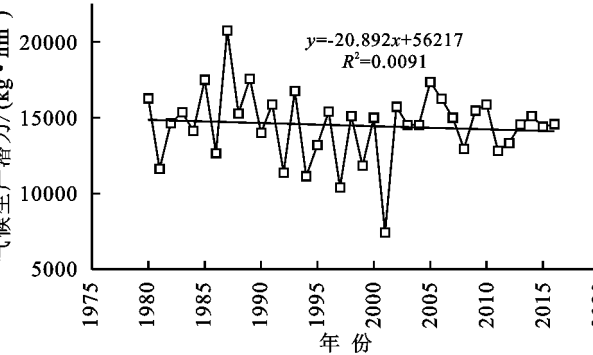


图 7 江淮分水岭地区一季稻生长季气候生产潜力年际变化

根据 MK 突变检验图(图 8)所示,江淮分水岭地区气候生产潜力在 1992 年之前呈上升趋势,但未通过 0.05 显著水平,上升趋势不显著;1993—2016 年,江淮分水岭地区一季稻气候生产潜力则以 282.3 kg/(hm² · 10 a)的速率下降,下降趋势不显著。

2.3.2 空间变化趋势 由图 9 看出,江淮分水岭地区一季稻生长季气候生产潜力呈现西南部及东北部高、中部低的特点。西南部六安、肥西和东北部来安等地气候生产潜力较高,其中最高值为六安,该区域

一季稻生长季降水量最高,达到 15 637.58 kg/hm²,中部合肥、定远、淮南等地气候生产潜力值较低,其中合肥为 14 208.71 kg/hm²,为江淮分水岭地区各站点最低值,造成这一结果的原因为合肥地区一季稻发育期内的总降水量及光照总时数均为江淮分水岭地区低值区,这表明降水及光照是合肥地区主要气象限制因子。

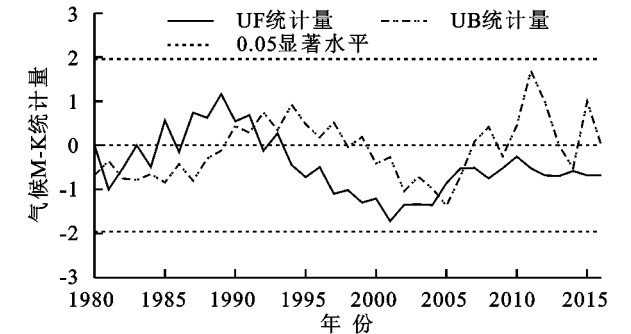


图 8 江淮分水岭地区一季稻生长季气候生产潜力 M-K 突变检验

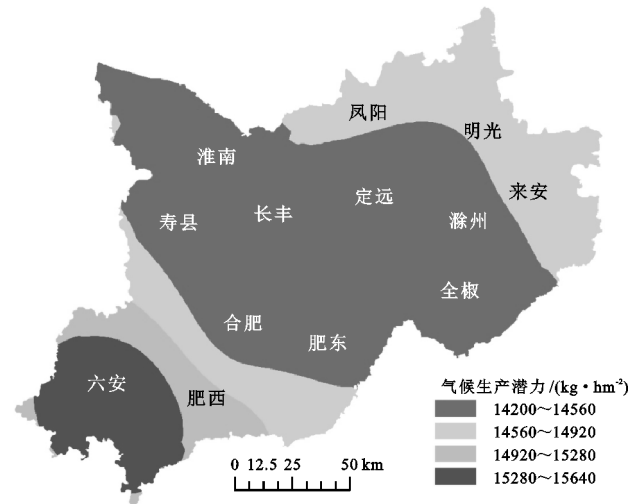


图 9 江淮分水岭地区一季稻生长季气候生产潜力分布

2.4 气候资源利用率时空变化分析

2.4.1 时间变化趋势 如图 10 所示,1980—2016 年江淮分水岭地区一季稻生育期内的气候资源利用率在 25%~85%,年际变化波动较大,气候资源利用率最高年份出现在 2001 年,达到了 82.4%。1980 年达到了 27.99%,为江淮分水岭地区气候资源利用率最低值。由线性趋势可知,江淮分水岭地区一季稻生育期平均光合生产潜力随时间变化呈缓慢上升趋势,平均上升幅度为 3.1%/(10 a)。这体现了随着农业现代化与农业科技水平的不断进步,江淮分水岭地区不利气候因子对农作物生长发育的限制力越来越低,对于气候资源的利用率越来越高。

根据 MK 突变检验图(图 11),江淮分水岭地区气候资源利用率呈上升趋势。在 1980—1996 年,江淮分水岭地区一季稻平均资源利用率为 45.20%,气候资源利用率缓慢上升,上升趋势不显著;在 1997—2015 年平均资源利用率则为 52.94%,上升趋势显著。

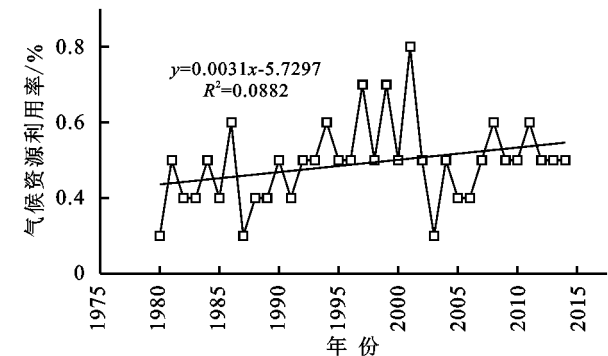


图 10 江淮分水岭地区一季稻生长季
气候资源利用率年际变化

2.4.2 空间变化趋势 如图 12 所示,江淮分水岭地区一季稻生长季气候资源利用率在空间分布上同气候生产潜力的分布呈现相反的特点,总体上表现为自西向东递增,东南部全椒滁州为高值区,西南部六安、东北部定远明光为低值区。气候资源利用率最高的站点为全椒县,表明其生产潜力开发程度最高,达到了 60.85%;最低的站点为六安,由于地形条件及经济发展水平等多种因素,造成六安市气候资源利用率较低,仅为 40.22%,说明该地区一季稻有近 60%的增产潜力。该地区应该增加农业科技投入,提高耕种技术和管理方法,充分利用其优越自然条件,优化种植结构,以提高其气候资源利用率。

2.5 气象因子对气候生产潜力影响分析

对江淮分水岭地区一季稻气候生产潜力同日均温、日照时数等气象因子进行相关分析及回归分析。江淮分水岭各站点一季稻气候生产潜力同日照时数相关系数见表 4。从表中可以得知,降水量、日最高气温和参考作物蒸散是影响江淮分水岭地区气候生产潜力最重要的 3 个气象因子。其中,江淮分水岭地区 13 个站点的降水量均与气候生产潜力呈极显著正

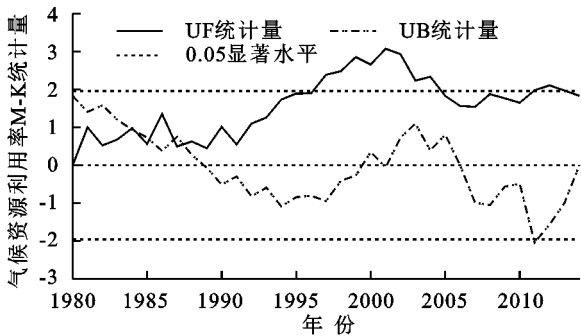


图 11 江淮分水岭地区一季稻生长季
气候资源利用率 M-K 突变检验

相关,84.6%的站点日最高气温与气候生产潜力显著负相关,61.5%的站点参考作物蒸散与气候生产潜力显著负相关。对整个江淮分水岭地区平均气候生产潜力与气象因子进行相关分析得出,江淮分水岭地区降水量同气候生产潜力极显著正相关,日照与气候生产潜力显著正相关,而日均温、≥15℃积温及参考作物蒸散量同气候生产潜力呈显著负相关关系,最低气温与气候生产潜力则无显著相关关系。

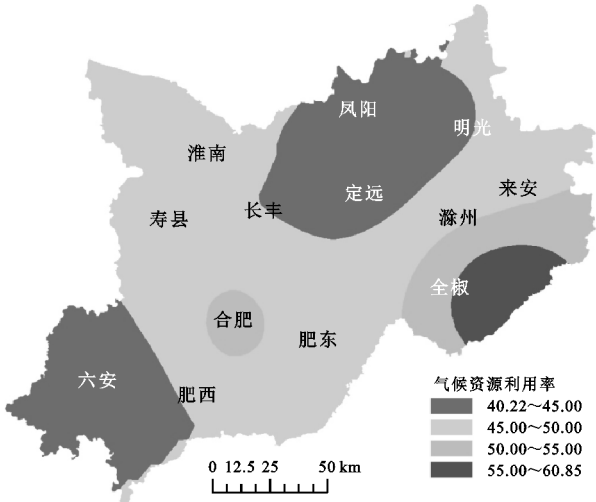


图 12 江淮分水岭地区一季稻生长季气候资源利用率分布

表 4 气候生产潜力与气象因子相关分析

站点	日均温	日最高气温	日最低气温	日照	≥15℃积温	参考作物蒸散	降水	太阳辐射
滁州	-0.257	-0.343 *	-0.181	-0.254	-0.246	-0.421 **	0.605 **	-0.253
定远	-0.287	-0.397 *	-0.134	-0.254	-0.258	-0.334 *	0.593 **	-0.245
肥东	-0.405 *	-0.458 **	-0.200	-0.115	-0.394 *	-0.321	0.735 **	-0.092
肥西	-0.470 **	-0.573 **	-0.282	0.198	-0.460 **	-0.114	0.793 **	0.309
凤阳	-0.193	-0.353 *	-0.035	-0.042	-0.175	-0.203	0.690 **	-0.025
合肥	-0.291	-0.349 *	-0.200	-0.229	-0.306	-0.512 **	0.787 **	-0.232
淮南	-0.364 *	-0.386 *	-0.289	-0.131	-0.361 *	-0.323	0.674 **	-0.060
来安	-0.235	-0.285	-0.066	0.084	-0.200	-0.135	0.647 **	0.087
六安	-0.535 **	-0.576 **	-0.398 *	-0.566 **	-0.533 **	-0.636 **	0.773 **	-0.570 **
明光	-0.218	-0.309	0.025	-0.204	-0.228	-0.360 *	0.735 **	-0.190
全椒	-0.353 *	-0.409 *	-0.295	-0.049	-0.318	-0.374 *	0.684 **	-0.049
寿县	-0.294	-0.430 *	-0.081	-0.284	-0.285	-0.513 **	0.667 **	-0.276
长丰	-0.427 **	-0.500 **	-0.114	-0.273	-0.425 **	-0.512 **	0.739 **	-0.265
江淮分水岭地区	-0.374 *	-0.456 **	-0.190	0.326 *	-0.365 *	-0.513 **	0.733 **	-0.298

注: * 代表 p=0.05; ** 代表 p=0.01。

气象要素对江淮分水岭地区气候生产潜力的逐步回归方程见表 5。由表可知,江淮分水岭地区气候生产潜力的主要贡献气象因子为降水、日最高气温和参考作物蒸散,逐步回归方程的决定系数为 0.504,表明江淮分水岭地区降水等气象因子的变化率可以解释整个区域 50.4%的气候生产潜力变化率。滁州、定远、淮南、来安、明光、全椒这 6 个站点气候生产潜力只以降水量为主要贡献因子,这些站点主要分布在降

水量较多的江淮分水岭脊线以东地区;肥东县和长丰县以降水量和日最高气温为主要贡献因子;肥西县和凤阳县以降水量和太阳辐射为主要贡献因子;合肥市和寿县以降水量和作物蒸散为主要贡献因子;六安市降水量、太阳辐射、 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温都是其气候生产潜力主要贡献因子,这表明江淮分水岭地区六安市的光、温、水等气象组合条件皆适宜一季稻的生长发育,该地区一季稻种植具有非常大的增产潜力。

表 5 气候生产潜力与气象因子回归分析

站点	回归方程	R^2	p	主要贡献因子
滁州	$Y=8970.957+7.282X_1$	0.348	<0.001	降水
定远	$Y=8596.408+8.69X_1$	0.334	<0.001	降水
肥东	$Y=18783.444+9.804X_1-373.637X_2$	0.524	<0.001	降水、日最高气温
肥西	$Y=-3677.258+11.868X_1+4.104X_3$	0.678	<0.001	降水、太阳辐射
凤阳	$Y=-6512.141+13.29X_1+4.51X_3$	0.514	<0.001	降水、太阳辐射
合肥	$Y=4260.029+12.322X_1+2.762X_4$	0.598	<0.001	降水、参考作物蒸散
淮南	$Y=7068.896+10.687X_1$	0.439	<0.001	降水
来安	$Y=8846.711+8.436X_1$	0.401	<0.001	降水
六安	$Y=20116.634+8.968X_1-0.0838X_3-2.27X_5$	0.572	<0.001	降水、太阳辐射、 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温
明光	$Y=6406.819+12.064X_1$	0.527	<0.001	降水
全椒	$Y=8302.421+8.379X_1$	0.453	<0.001	降水
寿县	$Y=17049.36+8.604X_1-13.034X_4$	0.433	<0.001	降水、参考作物蒸散
长丰	$Y=26550.164+9.783X_1-651.134X_2+0.882X_4$	0.526	<0.001	降水、日最高气温、参考作物蒸散
江淮分水岭地区	$Y=16227.813+10.273X_1-463.727X_2+7.427X_4$	0.504	<0.001	降水、日最高气温、参考作物蒸散

注:表中 X_1 为降水, X_2 为日最高气温, X_3 为太阳辐射, X_4 为参考作物蒸散, X_5 为 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温。

3 结 论

本研究主要根据江淮分水岭地区 1980—2016 年地面观测气象数据,采用逐级订正法计算出各站点光合、光温、气候生产潜力值,并根据实际产量,计算出研究区的气候资源利用率。结果表明,江淮分水岭地区光合生产潜力、光温生产潜力与气候生产潜力总体呈下降趋势,这表明江淮分水岭地区 1980 年以来光、温、水等气候组合条件越来越不利于一季稻的生长发育;气候资源利用率总体呈现上升趋势,表明随着科学技术水平的发展,气候条件对于江淮分水岭地区一季稻的生长发育限制性影响越来越小。

江淮分水岭地区光合生产潜力与光温生产潜力空间分布相似,江淮分水岭脊线西北侧为高值区,东南侧为低值区;气候生产潜力则呈现西南部及东北部高、中部低的特点,最高值为六安。气候资源利用率总体上则表现为自西向东递增,气候资源利用率最高的站点为全椒县,表明其生产潜力开发程度为研究区最高,最低的站点则为气候生产潜力最高的六安,该地区一季稻有近 60%的增产潜力。

降水量、日最高气温和参考作物蒸散是影响江淮分水岭地区气候生产潜力最主要的 3 个气象因子。江淮分水岭地区降水、气温等气象因子的变化率可以解释研究区域 50.4%的气候生产潜力变化率,其中又以降水因子对气候生产潜力变化值的贡献率为最高。六安一季稻生长季降水量为研究区最高,因此其气候生产潜力值为研究区最高,这与闫军辉等人的研究成果一致。

江淮分水岭地区光合生产潜力、光温生产潜力、气候生产潜力等值的地理分布与现实一季稻产量的实际分布并不一致,这是由于农业实际产量除了受光、温、水等气候条件影响之外,还受到地形、土壤、农业技术水平等众多因素制约^[21]。六安市、定远县等地区气候资源利用率明显低于其他地区,表明这些地具有较大的气候资源开发潜力,应该因地制宜,对增产潜力高的地区增加科技投入与投资,最大化提高其气候资源利用率,最大限度发挥农业投资的经济效益。

本研究还存在一些不足之处,比如该区域所选站点有限,且站点分布不均匀,未考虑到地形等因子对气候生产潜力的影响,计算公式中的部分参数还需要根据研究区实际进行本地化调整与修正等。

参考文献:

[1] 王孟和,何桂芳,徐建辉,等.基于 GIS 的安徽省江淮分水岭区域气象干旱研究[J].水土保持研究,2018,25(4):162-167.

[2] 袁媛,王心源,雷能忠,等.基于 GIS 的江淮分水岭地区旱涝灾害时空分析[J].水文,2007(6):36-38,49.

[3] 金志凤,杨栋,姚益平,等.浙江省茶叶气候生产潜力评估[J].生态学杂志,2016,35(7):1791-1798.

[4] 刘江,潘宇弘,王平华,等.1966—2015 年辽宁省玉米气候生产潜力的时空特征[J].生态学杂志,2018,37(11):3396-3406.

[5] 王春学,秦宁生,周斌,等.1850 年以来川西高原北部植被气候生产潜力时空变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):188-195.

[6] 李敏.近 30 年辽宁省水稻气候生产潜力时空变化分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.

[7] 闫军辉,王娟,马彩杰,等.上海市近 145 年气候变化对气候生产力的影响[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2020,33(3):392-397.

[8] 卢燕宇,孙维,唐为安,等.气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(1):17-30.

[9] 黄爱军.江淮地区近 50 年农业气候资源时空变化及稻麦生产响应特征研究[D].南京:南京农业大学,2011.

[10] 张志高,耿益新,蔡茂堂,等.1978—2017 年河南省气候生产潜力时空演变及趋势分析[J].水土保持研究,2020,27(6):247-253.

[11] 张玉芳,庞艳梅,刘琰琰,等.近 50 年四川省水稻生产潜力变化特征分析[J].中国生态农业学报,2014,22(7):813-820.

[12] 安彬,肖薇薇,张淑兰,等.近 58 年江西省气候及其生产潜力时空变化特征[J].水土保持研究,2020,27(4):122-127.

[13] 杨文彪,张慧芋,李莹,等.山西省冬小麦生产潜力时空分布与气象因子分析[J].作物杂志,2020(1):161-167.

[14] Li Zhonghui, Hu Peicheng, Huang Wanhua. Research on the dynamic climatic production potential of middle-season rice in Jiangxi Province[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010,1:50-52.

[15] Qin Yuanwei, Liu Jiyuan, Shi Wen-jiao, et al. Spatial-temporal changes of cropland and climate potential productivity in northern China during 1990—2010[J]. Food Security, 2013,5:499-512.

[16] 王小军,刘光旭,相爱存,等.江西省油茶综合生产潜力与资源利用效率评估[J].应用生态学报,2020,31(4):1175-1184.

[17] 王胜,宋阿伟,谢五三,等.未来气候变化对安徽淮河以南一季稻气候生产潜力的影响评估[J].干旱气象,2020,38(2):179-187.

[18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.

[19] 潘宇弘.近 50 年辽宁省玉米气候生产潜力的时空分布特征分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.

[20] 李萌,申双和,褚荣浩,等.近 30 年中国农业气候资源分布及其变化趋势分析[J].科学技术与工程,2016,16(21):1-11.

[21] 孙卫国.气候资源学[M].北京:气象出版社,2008.

[29] Li J W, Li W, Xi Y H, et al. Role of reservoir construction in regional land use change in Pengxi River basin upstream of the Three Gorges Reservoir in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(13):1-15.

[30] Conine A, Xiang W N, Young J, et al. Planning for multi-purpose greenways in Concord, north Carolina[J]. Landscape and Urban Planning, 2004,68(2):271-287.

[31] 李雪,张婧,于婉晴,等.京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响研究[J].生态学报,2021,41(13):5242-5253.

[32] 李硕,沈占锋,柯映明,等.1974—2019 年大清河流域土地利用景观时空变化[J].水土保持研究,2021,28(1):195-203,210.

[33] 朱强,俞孔坚,李迪华.景观规划中的生态廊道宽度[J].生态学报,2005,25(9):2406-2412.

[34] Esteban F J. Avian spatial segregation at edges and interiors of urban parks in Madrid, Spain[J]. Biodiversity and Conservation, 2001,10(8):1303-1316.

[35] Hinsley S A, Bellamy P E, Newton I, et al. Habitat and landscape factors influencing the presence of individual breeding bird species in woodland fragments[J]. Journal of Avian Biology, 1995,26(2):94-104.

(上接第 275 页)