

引用格式:姚筠,许莹,马晓群.淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制[J].资源科学,2017,39(3):490-500. [Yao Y, Xu Y, Ma X Q. Influence of precipitation change on climatic potential productivity of major crops in the Huaihe River Basin[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 490-500]. DOI: 10.18402/resci.2017.03.11

淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制

姚 筠^{1,2}, 许 莹³, 马晓群^{1,2}

(1. 安徽省气象科学研究所/安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031;
2. 寿县国家气候观象台, 寿县 232200; 3. 安徽省农业气象中心, 合肥 230031)

摘 要:针对淮河流域粮食主产区旱涝灾害频繁, 严重制约粮食作物生产能力的问题, 本文基于淮河流域 171 站 1971-2010 年的气象资料及 121 站作物历年生育期资料, 采用气候生产潜力逐级订正模型计算了冬小麦、夏玉米和一季稻的气候生产潜力, 着重分析了气候变暖背景下降水变化对作物气候生产潜力的影响。结果表明: 近 40 年淮河流域三种主要农作物的气候生产潜力以一季稻最高, 其次是夏玉米, 冬小麦最低; 各作物气候生产潜力的年际间变异系数均超过 10%, 其中冬小麦超过 20%, 但三种作物均无显著的时间变化趋势。各作物气候生产潜力占光温生产潜力的比例(简称气候比)以冬小麦最低, 多年平均值仅为 49.7%, 且变异系数达到 25.4%; 夏玉米和一季稻的多年平均值分别为 67.3% 和 66.4%, 变异系数仅为 12.9% 和 16.3%。降水变化对三种作物气候生产潜力的限制以冬小麦最大, 其次是夏玉米, 一季稻最小。冬小麦生育期间降水量严重不足, 且降水变异系数大, 构成了对气候生产潜力的双重限制作用; 夏玉米生长季内降水量的偏多偏少和变异系数均是限制夏玉米的气候生产潜力的主要因素; 一季稻的气候比则仅与生长季降水量相关显著, 气候生产潜力主要受降水量多少的影响。

关键词:淮河流域; 主要农作物; 气候生产潜力; 降水变化

DOI: 10.18402/resci.2017.03.11

1 引言

农业气候生产潜力是指在当地自然光、热、水等气候因素的作用下, 假设作物品种、土壤肥力、耕作技术等得到充分发挥时, 单位面积可能达到的最高产量^[1]。农业气候生产潜力定量地表达了在一定气候、土壤及农业技术水平下农业生产或具体作物可能达到的生产能力, 客观反映了某区域在一定时期内气候资源总量和配置状况对农业生产的优劣, 因此是科学衡量区域粮食生产力、农业发展和人口承载力的重要指标之一^[2]。

全球气候变暖已是不争的事实。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出, 1951-2012 年, 全球平均地表温度的升温速率

几乎是 1880 年以来升温速率的两倍^[3]。气候变化改变了作物生长发育进程中光、温、水的匹配状况, 从而直接影响作物的生产潜力。国内外许多专家学者对此开展了很多的探讨和研究, 其方法大体可分为光生理学-统计学方法和作物生长数学模拟方法两大类^[4]。研究表明, 理论上作物生产潜力与温度、日照时数呈正相关^[5]; 与降水关系复杂, 在缺水地区呈正相关, 在水分充足地区降水过多可能会引起负作用。在诸多气候变化产生的不利影响中, 降水对农业的影响被认为是最重要的^[5]。因此, 需要对气候变暖背景下降水变化对作物生产潜力的影响进行深入研究。目前作物气候生产潜力的计算大多为通过逐发育期或逐月累加得到全生育期

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2017-02-08

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006027)。

作者简介: 姚筠, 女, 安徽歙县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为农业气候资源影响评价、农业气象灾害评估研究。

E-mail: yaoyun358@126.com

通讯作者: 马晓群, E-mail: ah_mxq@sina.com

2017年3月

的数值;其中对水分影响的订正大多仅考虑缺水情况,考虑降水过多情况的较少;研究结果通常是给出气候变化背景下作物气候生产潜力的时间变化趋势和空间分布^[6-10]。

淮河流域是中国重要的农业生产基地。流域面积约为 27 万 km², 仅占全国陆地国土面积的 2.9%, 但其耕地面积占到了全国耕地面积的 12%。生产的粮食产量约占全国粮食总产的 1/6, 提供的商品粮约占全国总量的 1/4, 在中国农业和经济发展中占有举足轻重的地位^[11,12]。淮河流域属于一年两熟作物种植区, 夏粮以冬小麦为主;秋粮中北部地区多种植夏玉米, 南部沿淮地区多种植一季稻。由于地处暖温带和北亚热带的过渡区, 其气候具有过渡型特征, 南北冷暖气团交汇频繁, 天气多变。在气候变暖背景下极端降水事件频发, 导致农业旱涝灾害更趋严重, 对当地的农业生产能力产生了很大影响。但作物产量的高低不仅与气候变化有关, 在很大程度上还取决于作物的田间管理水平^[5]。为了深入分析年际和年内降水波动对作物生产潜力的影响, 本文采用应用广泛的气候生产潜力逐级订正模型^[6,7], 以作物生育期内旬为基础时间尺度计算、累加得到作物气候生产潜力, 并研究了水分不足和水分过多时的订正方法, 定量分析降水量和降水变异系数对作物气候生产潜力的影响, 为淮河流域农业生产优化布局, 选用适宜的作物品种, 制定合理的栽培管理方案, 趋利避害, 提高作物的现实生产力提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究所需资料为淮河流域境内河南、安徽、山东和江苏 4 省共 171 站逐日气象要素, 包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、水汽压、平均风速、相对湿度、降水量, 境内和周边共 8 个辐射观测站的太阳总辐射, 以及淮河流域冬小麦(171 站)、夏

玉米(121 站)和一季稻(52 站)的发育期资料。考虑到资料的完备性, 故资料时段为 1971-2010 年。以上资料均来源于中国气象局国家气象信息中心(离线数据)。

2.2 研究方法

2.2.1 作物发育期的确定

由于淮河流域地理跨度较大, 境内地理气候多样, 作物品种各异, 自南向北发育期有所差异, 因此按照作物农业气候分区^[13](图 1)分别确定各作物发育期(表 1)。

2.2.2 气候生产潜力的计算方法

光合生产潜力是指在环境因子、作物因子, 以及农业技术措施均处于最佳状态时, 在当地自然条件下仅由光能资源和作物群体光合效率决定的单位面积可能达到的最高产量。

光温生产潜力是指在一定的光、温条件下, 在农业生产条件得到充分保证, 无不利因素的条件下, 其他环境因素和作物群体因素均处于最适宜状态时, 利用当地的光、温资源能实现的最大生产能力, 通常采用光合生产潜力乘以温度订正函数进行估算^[14]。

根据太阳辐射、量子效率等计算作物的光合生产潜力, 并用温度和水分进行逐级订正, 得到气候生产潜力^[7]:

$$Y_c = Y_p \times F(T) \times F(W) \quad (1)$$

式中 Y_c 为气候生产潜力; Y_p 为光合生产潜力; $F(T)$ 为温度订正函数; $F(W)$ 为水分订正函数。各项计算方法分别为:

(1) 光合生产潜力 (Y_p) 的计算公式为^[6]:

$$Y_p = Ch \times \sum Q \varepsilon \alpha (1 - \rho) (1 - \gamma) \varphi (1 - \omega) (1 - X)^{-1} H^{-1} \quad (2)$$

式中 Y_p 为光合生产潜力; Ch 为作物经济系数, 表示经济产量与生物学产量之比(经济系数因作物种

表 1 淮河流域主要农作物全生育期

Table 1 Growth period of major crops in the Huaihe River Basin

作物	I 区	II 区	III 区	IV 区
冬小麦	10月中旬-次年6月上旬	10月中旬-次年5月下旬	10月中旬-次年5月下旬	10月下旬-次年5月下旬
夏玉米	6月中旬-9月中旬	6月上旬-9月中旬	6月上旬-9月中旬	-
一季稻	5月上旬-10月中旬	-	-	-

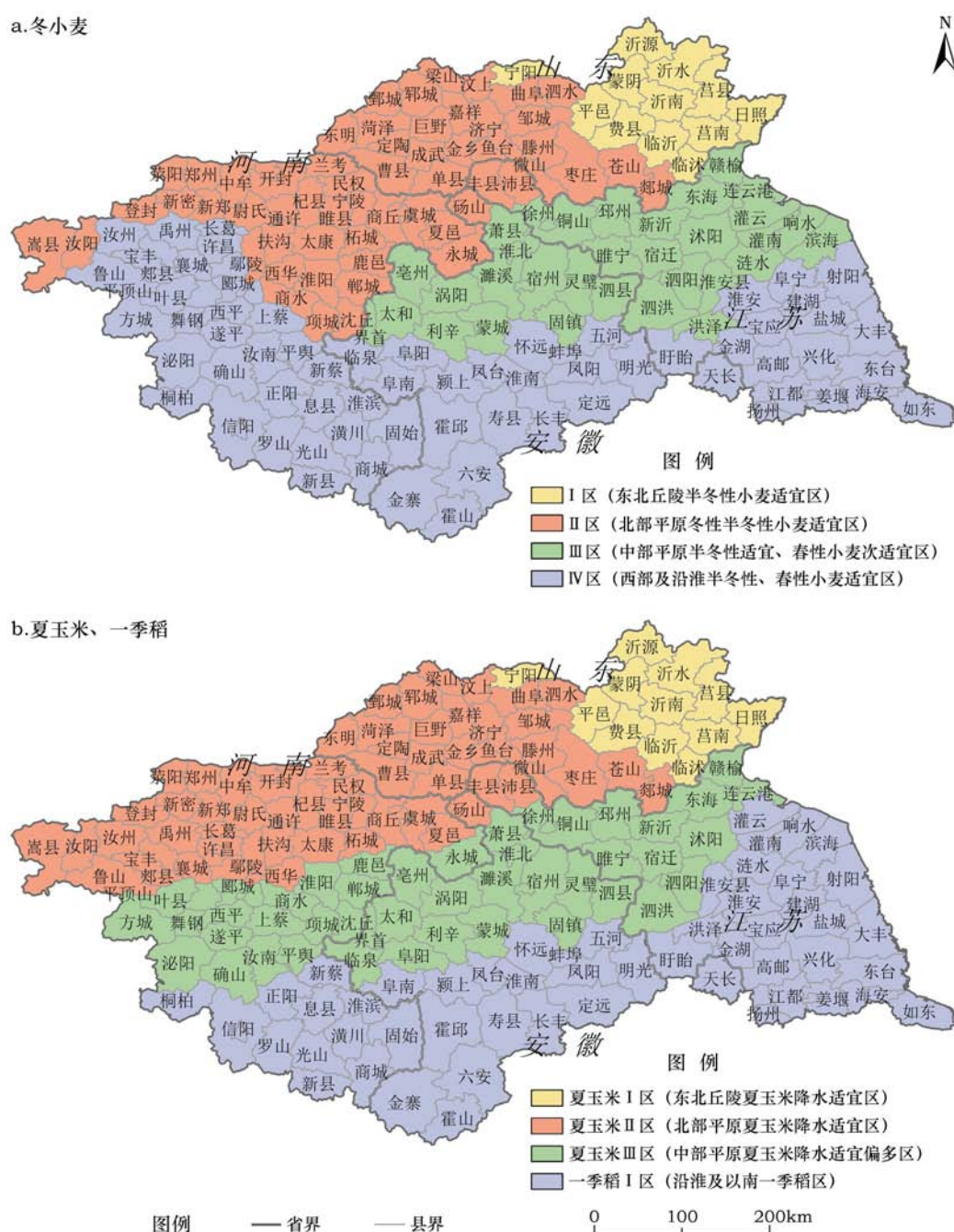


图1 淮河流域主要农作物农业气候分区

Figure 1 Agroclimatological zoning of major crops in the Huaihe River Basin

注:一季稻基本分布在沿淮地区,因此不再分区,即一季稻只有 I 区。

类、品种、自然条件和栽培措施而不同,本文冬小麦取 0.40^[4]、玉米取 0.45^[15-17]、水稻取 0.50^[8]; $\sum Q$ 为作物生长季内太阳总辐射; ε 为生理辐射系数,通常取 0.49^[6]; α 为作物群体的吸收率,在整个作物生育期间里,可写成随叶面积增长的线性函数: $\alpha = 0.83 \frac{L_i}{L_0}$ ^[6],

式中 L_0 为最大叶面积指数; L_i 为某一时段的叶面积指数,本文冬小麦和一季稻叶面积指数采用淮河流域境内安徽省农业气象观测站实测值,夏玉米由于观测站点少,采用叶面积指数增长普适模型^[18]计算见公式(3); ρ 为无效吸收率,取 0.1^[7]; γ 为光饱和和限制率,取 0; φ 为量子效率,取 0.224^[7]; ω 为呼吸

2017年3月

损耗率,取0.3^[7]; X 为有机物含水率,取0.08^[7]; H 为每形成 1g 干物质所需要的热量,为 17.765MJ/kg^[6]。

$$RLAI = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{10.5038 - 23.5066 \times DS + 9.3053 \times DS^2}{1} \right)}} \quad (3)$$

式中 $RLAI$ 为某日归一化后的叶面积指数; DS 为积温归一化数值。

(2) 温度订正函数 $F(T)$ 公式为^[19]:

$$F(T) = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \quad (4)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1) \quad (5)$$

式中 T 为逐旬平均气温; T_1 , T_2 和 T_0 分别是该时段内作物生长发育的下限温度、上限温度和最适温度,且令当 $T \leq T_1$ 时, $F(T) = 0$ 。

冬小麦、夏玉米和一季稻的三基点温度^[20]见表 2,三基点温度是某一范围的,在计算中取中值。

(3) 水分订正采用反映逐旬农田水分状况的降水蒸散比为基本指标:

$$F(W) = \frac{P}{ET_m} \quad (6)$$

式中 $F(W)$ 为逐旬降水蒸散比,即逐旬的水分状况指数; P 为相应时段的降水量; ET_m 为相应时段的作物潜在蒸散量,即作物需水量。其计算公式为:

$$ET_m = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

式中 ET_0 为相应时段的参考作物蒸散量,采用 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 模型^[21]; K_c 为相应时

段的作物系数。FAO P-M 模型参数和淮河流域各作物 K_c 的确定见参考文献^[22]。

由于逐旬降水量的波动程度较之于逐发育期和逐月的更加显著,因此降水对农作物的影响更复杂,比如一句无降水的情况经常发生,但这并不代表当旬土壤水分为零,作物没有干物质积累。由于降水(或干旱)对土壤水分影响的延续性和滞后性,在基础时间尺度较小的情况下,作物气候生产潜力的水分订正需要考虑前期水分条件对当旬干物质积累的贡献,以便使估算的气候生产潜力更加符合真实情况。

前效影响考虑的时间尺度因作物和不同的生长季有所差异。对于玉米和水稻这些生长于夏半年的作物,由于生长季气温高,蒸散强烈,农田水分消耗较快,前效影响主要考虑前一句的水分状况,将前一句和当旬的降水蒸散比分别以 0.3 和 0.7 的权重相加^[23],作为本旬的水分状况指数 $F(W)$ 。而对于主要生长于冬半年的冬小麦来说,由于生育期较长,分不同生长季确定前效影响的旬数和权重。冬季(12、1、2月)以前四旬和当旬的降水蒸散比分别以 0.1、0.1、0.2、0.2 和 0.4 的权重^[23]相加,春秋(3、4、5 月和 10、11 月)以前三旬和当旬的降水蒸散比分别以 0.1、0.2、0.3 和 0.4 的权重^[23]相加、夏季(6 月上旬)则以前两旬和当旬的降水蒸散比分别以 0.2、0.3 和 0.5 的权重^[23]相加,得到本旬的水分状况指数 $F(W)$ 。

对 $F(W)$ 数值采取下列方法实现归一化,得到逐旬水分订正指数 $F(W_1)$:

$$F(W_1) = \begin{cases} F(W) & F(W) < 1 \\ 1 & 1 \leq F(W) < 2 \\ 1 - \frac{F(W) - F(W)_{\min}}{F(W)_{\max} - F(W)_{\min}} & F(W) \geq 2 \end{cases} \quad (8)$$

由于淮河流域降水量南北差异较大,各作物品种对水分适应性也有差异,因此最大最小值按照各作物的农业气候分区设定。其中 $F(W)_{\max}$ 为某作物区各站 1971-2010 年逐旬 $F(W)$ 的最大值; $F(W)_{\min}$ 为某作物区各站 1971-2010 年逐旬 $F(W)$ 的最小值。

经过以上订正,水分订正指数 $F(W_1)$ 的数值无论旱涝均分布在 0~1 之间,越接近 1,水分条件越适

表 2 淮河流域主要农作物各发育期的三基点温度

Table 2 Cardinal temperatures of developmental stages of major crops in the Huaihe River Basin (°C)

作物	发育期	最低温度	最适温度	最高温度
冬小麦	出苗-分蘖	3~5	15~18	32~35
	越冬期	0~2	10~12	25
	拔节-抽雄	8~10	12~20	30~35
	抽雄-开花	9~11	18~24	30~32
夏玉米	出苗-拔节	10	24	38
	拔节-抽雄	18	25	35
	抽雄-开花	18	27	35
	灌浆-成熟	16	23	30
一季稻	苗期	12~14	26~32	40
	移栽	13~15	25~30	35
	分蘖期	15	29~31	37
	抽穗-开花	20~22	28~30	35
	灌浆-成熟	13~15	20~28	32

宜;越接近0,水分偏少或偏多越显著。由于淮河流域作物需水量比较稳定,而降水量的年际年内变化很大(表3),因此该指数值实际上反映了降水量变化对作物气候生产潜力的影响。

表3 淮河流域农作物全生育期降水量和潜在蒸散量
Table 3 Precipitation and potential evapotranspiration during crop growth period in the Huaihe River Basin

作物	降水量		蒸散量	
	平均值 /mm	变异系数 /‰	平均值 /mm	变异系数 /‰
冬小麦	291.9	31.33	479.7	7.99
夏玉米	531.6	20.84	474.5	8.97
一季稻	717.6	23.44	683.6	6.45

2.2.3 分析方法

计算淮河流域冬小麦、夏玉米和一季稻气候生产潜力的统计特征值,如平均值、最大值、最小值、变异系数和时间趋势系数,分析各作物气候生产潜力的大小、统计分布状况及其年际波动和时间变化趋势;采用统计分析法分析各作物生长期降水量、降水变异系数与其气候生产潜力占光温生产潜力的比值(简称气候比,下同)以及与气候比 $\leq 50\%$ 站数的相关关系,定量地分析降水量、降水变异系数对各作物气候生产潜力的影响程度。

3 结果分析

3.1 淮河流域主要农作物气候生产潜力的基本特征

气候变暖背景下淮河流域主要农作物气候生产潜力的基本特征为,气候生产潜力的平均值以一季稻最高,其次是夏玉米,冬小麦最低。从年际波动看,三种作物气候生产潜力的变异系数均超过10%,其中以冬小麦最大,超过20%,一季稻和夏玉米基本相近,为11%~12%;各作物气候生产潜力随年代均有所下降,但趋势均不显著(表4)。三种作物的气候比以冬小麦最低,气候生产潜力仅约占光温生产潜力的50%,且变异系数超过25%,表明非常不稳定(表5);一季稻和夏玉米接近,气候生产潜力约占光温生产潜力的2/3,其变异系数分别为16.3%和12.9%,稳定性较高(表5)。其原因为,淮河流域冬小麦生长期降水量普遍不能满足其需求,且变异率大,而夏季生长的一季稻和夏玉米,生育期间正处于淮河流域全年降水的集中时段,虽然

表4 淮河流域主要农作物的气候生产潜力特征值

Table 4 Statistical characteristics of climatic potential productivity (CPP) of major crops in the Huaihe River Basin

作物	平均值 /(kg/hm ²)	最大值 /(kg/hm ²)	最小值 /(kg/hm ²)	变异系数 /‰	时间趋势 系数
冬小麦	7 847	8 851	5 366	22.2	-0.074 8
夏玉米	9 025	11 118	6 556	11.2	-0.287 4
一季稻	10 655	13 055	7 742	12.4	-0.170 4

表5 淮河流域作物气候生产潜力占光温生产潜力的比值

Table 5 The ratio of CPP to light and temperature potential productivity (abbreviation: climate ratio) of three crops in the Huaihe River Basin (%)

作物	平均值	最大值	最小值	变异系数
冬小麦	49.7	84.7	26.6	25.4
夏玉米	67.3	80.6	46.1	12.9
一季稻	66.4	86.2	45.0	16.3

降水量变异率也大,但总体可满足其需求并略有盈余(表3)。据研究表明淮河流域各作物生长期间的降水量均没有显著的年代变化趋势^[23],由此可见,作物气候生产潜力的大小、稳定程度以及时间趋势深刻地反映了作物生长期降水条件变化的影响。

3.2 降水变化对各作物气候生产潜力的限制

3.2.1 冬小麦

分析淮河流域冬小麦逐年气候比与相应生育期内的降水量、逐旬降水量变异系数平均值的关系,结果表明,该比值与二者存在显著的相关性。冬小麦气候比与全生育期降水量呈二次曲线相关($P < 0.01$),在当前的生产水平下,当全生育期降水量 $< 550\text{mm}$ 时,气候比随降水量的增加而增加(图2a);而气候比与全生育期逐旬降水量变异系数平均值则呈显著负相关(图2b)。由于淮河流域冬小麦全生育期内降水总量仅能满足需求量的60%,且降水变率大,达到31.33%(表3),因此,降水不足和降水的不稳定是限制冬小麦气候生产潜力的重要因素。

进一步分析逐年冬小麦气候比 $\leq 50\%$ 的站数与相应年的冬小麦生长季降水量以及降水量变异系数的关系。结果表明,冬小麦气候比 $\leq 50\%$ 的站数与二者显著相关。其中与生长季降水量为极显著二次曲线相关($P < 0.01$),当降水量为350~550mm时,气候比 $\leq 50\%$ 的站数最少(图3a);气候比 $\leq 50\%$

2017年3月

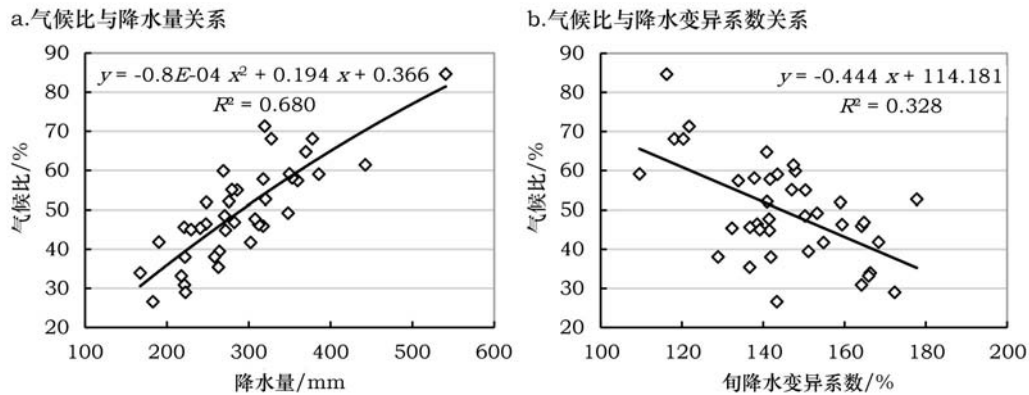


图2 冬小麦气候比与全生育期降水量、降水变异系数的关系

Figure 2 Scatter diagram of wheat climate ratio and precipitation(a)/variation coefficient(b) during growth period

的站数与全生育期逐旬降水量变异系数平均值也呈现极显著的相关(图3b),说明淮河流域冬小麦气候生产潜力受到生长季降水量和降水变异的双重制约,其适宜降水量高于该区域冬小麦全生育期内的平均降水量,即该区域冬小麦生育期间降水量普遍不足,且降水分布严重不均,干旱风险大。冬小麦全生育期内降水量越少,越不稳定,对气候生产潜力限制的程度越大,范围越广。

3.2.2 夏玉米

淮河流域夏玉米逐年气候比与全生育期降水量、逐旬降水量变异系数平均值存在显著的相关性。其中夏玉米气候比与全生育期降水量呈极显著二次曲线相关($P < 0.01$),在当前生产水平下,当全生育期降水量 $< 700\text{mm}$ 时,气候比随降水量的增加而增加,当降水量超过 800mm 以后呈下降趋势,说明降水量在一定范围内对增加气候生产潜力有

利,但是达到一定程度也会对气候生产潜力产生限制作用(图4a);而气候比与玉米全生育期降水量变异系数平均值呈极显著直线负相关($P < 0.01$),随着变异系数的增大而迅速降低(图4b)。淮河流域夏玉米生育期间降水总量略大于需水量,但降水变率较大(表3),因此,降水量的偏多偏少均会限制夏玉米的气候生产潜力,同时年内降水的不稳定性也是限制玉米气候生产潜力的重要因素。

进一步分析夏玉米气候比 $\leq 50\%$ 的站数与生长季降水量和逐旬降水变异系数平均值的关系。结果表明,夏玉米气候比 $\leq 50\%$ 的站数与生长季降水量也呈现显著的二次曲线相关($P < 0.01$),当降水量为 $600\sim 800\text{mm}$ 时,气候比 $\leq 50\%$ 的站数最少,与夏玉米气候比和玉米生长季降水量关系的阈值一致(图5a);气候比 $\leq 50\%$ 的站数与降水变异系数的为显著二次曲线相关($P < 0.01$),当生育期内旬降水变

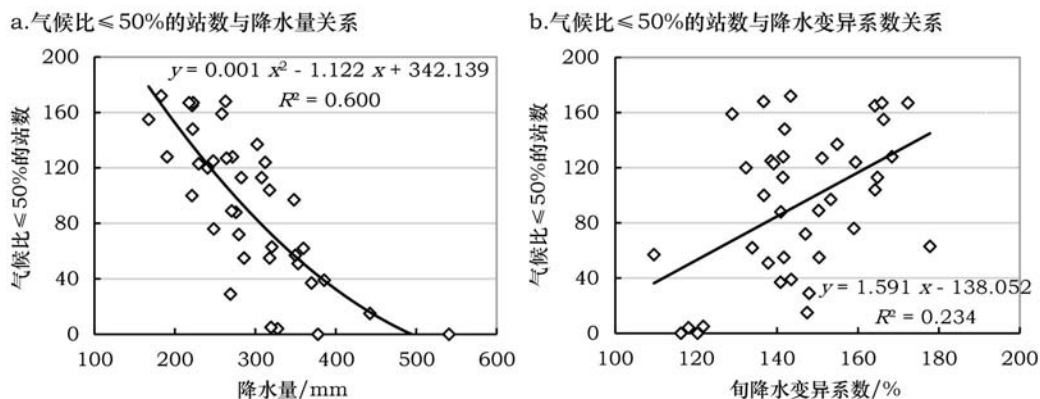
图3 冬小麦气候比 $\leq 50\%$ 的站数与全生育期降水量、降水变异系数的关系

Figure 3 Scatter diagram of station number whose wheat climate ratio is equal or lesser than 50% and precipitation (a)/variation coefficient (b) during growth period

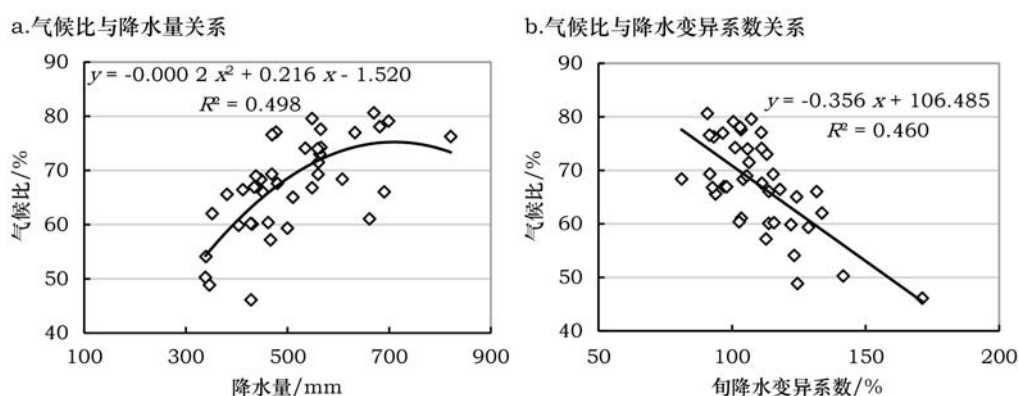


图4 夏玉米气候比与全生育期降水量、降水变异系数的关系

Figure 4 Scatter diagram of crop climate ratio and precipitation (a)/variation coefficient (b)

系数超过77.1%时(1971-2010年淮河流域夏玉米生育期内旬降水变异系数均超过该值),随着降水变异系数的增大,气候比 $\leq 50\%$ 的站数显著增多(图5b)。后者的相关系数大于前者。可见,玉米气候生产潜力也受生长季降水量和降水变异系数的双重影响,当玉米全生育期降水量为600~800mm时,对气候生产潜力的限制最小,大于或小于此数值,降水量对气候生产潜力的限制作用增大;与此同时,气候生产潜力尚受到降水变异的制约。

3.2.3 一季稻

淮河流域一季稻逐年气候比和生长季降水量、逐旬降水变异系数平均值的关系分析结果表明,一季稻气候比与生长季降水量存在显著的二次曲线相关($P < 0.01$),总体趋势为,当降水量 $< 800\text{mm}$ 时,气候比随降水量的增加而增加,当降水量超过1000mm以后,气候比呈下降趋势,说明降水量在一

定范围内增加对提高气候生产潜力有利,但是超过一定限度也会对气候生产潜力产生限制作用(图6a);气候比与一季稻生长季降水量变异系数平均值呈不显著负相关(图6b),因此一季稻气候生产潜力的限制因素主要是降水量的多寡。

进一步分析逐年一季稻气候比 $\leq 50\%$ 站数的与相应的生长季降水量和降水变异系数的关系。结果表明,一季稻气候比 $\leq 50\%$ 的站数与生长季降水量的关系也为极显著二次曲线相关($P < 0.01$),当降水量为800~1000mm时,气候比 $\leq 50\%$ 的站数最少,和一季稻气候比与生长季降水量关系的阈值一致(图7a);气候比 $\leq 50\%$ 的站数与降水变异系数的也为不显著正相关(图7b),与气候比和降水量、降水变异系数的分析结论一致。

4 结论与讨论

淮河流域三大粮食作物的气候生产潜力平均

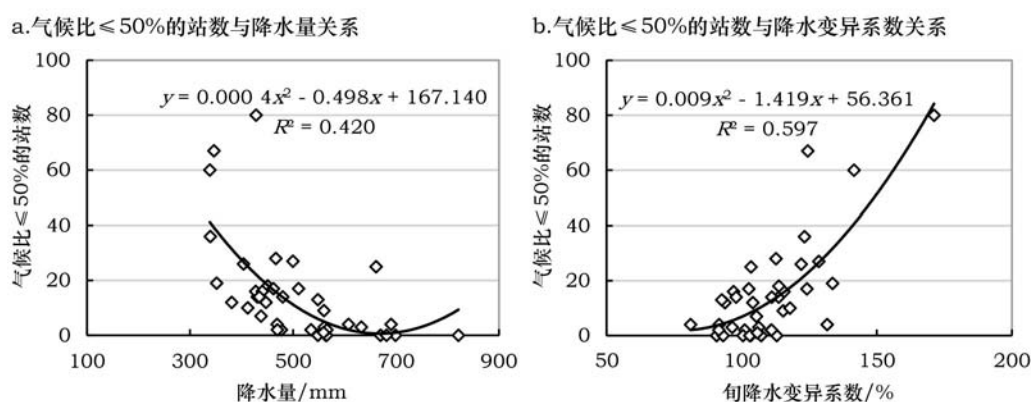


图5 夏玉米气候比 $\leq 50\%$ 的站数与全生育期降水量和降水变异系数的关系

Figure 5 Scatter diagram of station number whose maize climate ratio is equal or lesser than 50% and precipitation (a)/variation coefficient (b) during growth period

2017年3月

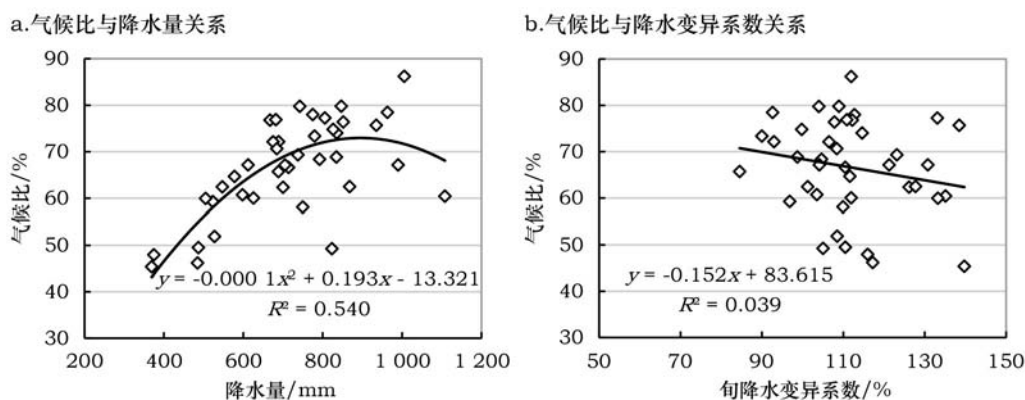


图6 一季稻气候比与全生育期降水量、降水变异系数的关系

Figure 6 Scatter diagram of single-season rice climate ratio and precipitation(a)/ variation coefficient(b)

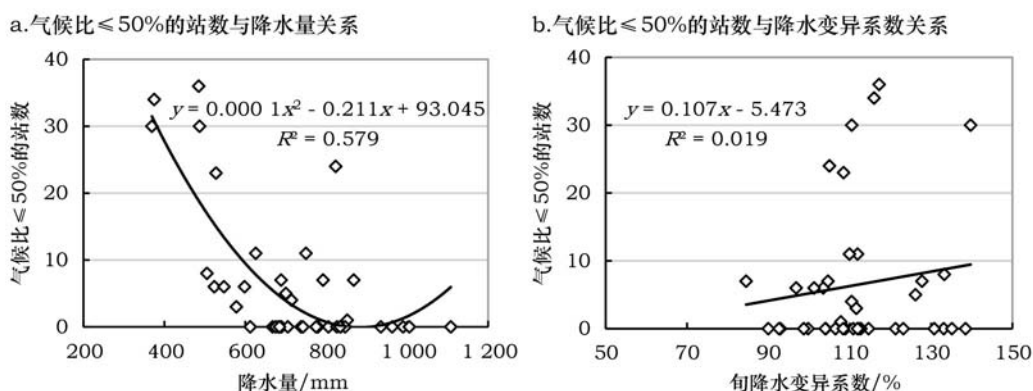


图7 一季稻气候比≤50%的站数与全生育期降水量、降水变异系数的关系

Figure 7 Scatter diagram of station number whose single-season rice climate ratio is equal or lesser than 50% and precipitation (a)/variation coefficient(b) during growth period

值以一季稻最高,其次是夏玉米,冬小麦最低;其变异系数均大于10%,其中冬小麦超过20%。三种作物气候生产潜力随年代均有所下降,但趋势均不显著。三种作物气候生产潜力占光温生产潜力的比例(简称气候比)以冬小麦最低,仅为50%,且变异系数超过25%,非常不稳定;水稻和玉米的气候比接近,为66%~67%,且稳定性较高。各作物气候生产潜力的大小、稳定程度以及时间趋势深刻地反映了该地区作物生长期降水条件变化的影响。

淮河流域三大粮食作物的气候比与生长季降水量均呈极显著的二次曲线相关,当冬小麦、夏玉米和一季稻生长季降水量分别<550mm、<700mm和<800mm时,随降水量的增加各作物的气候比增加,气候比≤50%的站数减少;当冬小麦、夏玉米和一季稻生长季降水量分别为500~600mm、600~800mm和800~1000mm时,各作物气候生产潜力最

高,气候比≤50%的站数最少,当降水量大于上限值则会导致各作物气候比下降。冬小麦和夏玉米的气候比与生长季降水逐旬变异系数平均值呈极显著负相关,而一季稻的气候比与该指标的相关则不显著。

淮河流域冬小麦气候生产潜力受到生育期降水量不足和降水变率大的双重限制,而研究表明^[22]气候变暖背景下该区域冬小麦生长期间的降水量没有显著的年代变化趋势,即冬小麦生育期降水量不足的情况没有改善的迹象;同时目前淮河流域降水正处于高气候变率时期^[24],因此冬小麦气候生产潜力可能进一步下降,所以在冬小麦生长发育期进行灌溉将对稳定和开发冬小麦气候生产潜力具有积极意义。夏玉米气候生产潜力受生育期降水量偏离常态的程度和降水变率大的双重限制。目前夏玉米生长季降水总量可以满足作物的需水要求

并略有盈余,研究表明^[22]夏玉米生长季降水量呈不显著增加趋势,表明其气候生产潜力受降水偏多影响而下降的风险加大。一季稻气候生产潜力主要受生长期降水量的制约,其适宜降水量略高于全生育期的平均降水量。在其生长季降水量随年代呈不显著的增加的背景下^[22],一季稻的气候生产潜力有望稳定或有所增加。

本文在前人研究的基础上,在计算气候生产潜力中的水分订正项时,一方面将时间尺度细化到了“旬”,另一方针对淮河流域旱涝频发的实际特点,同时考虑了水分亏损和水分盈余的情况,从而使该指数更准确地反映淮河流域降水情况对作物气候生产潜力的影响。但由于气候变化对作物生产潜力的影响存在一定的复杂性,目前尚有很多不确定的地方,且不同方法和模型之间统一性和可比性差^[7];本文得到的各作物气候生产潜力最大时的适宜降水量高于表3中的作物需水量,表明与较高的气候生产潜力相对应的是更加充分的水分供给。当然,作物需水量是一个动态的数值,受环境因素、作物品种和作物产量水平等的影响,同品种作物不同产量水平的需水量也存在较大差异。此外该指标尚需要通过田间试验、模型模拟与宏观区域调查研究等相结合的方法进一步验证和完善。

参考文献(References):

- [1] 程纯枢,冯秀藻,刘明孝,等. 中国农业百科全书·农业气象卷[M]. 北京:农业出版社,1986. [Cheng C S, Feng X Z, Liu X M, et al. China Agriculture Encyclopedia·Agro-meteorology Volume[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.]
- [2] 赖荣生,余海龙,黄菊莹. 作物气候生产潜力计算模型研究述评[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 11-14. [Lai R S, Yu H L, Huang J Y. Review on the research of crop climatic potential productivity calculation model[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(5): 11-14.]
- [3] 秦大河, Stocker T. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. [Qin D H, Stocker T. Highlights of IPCC working group I fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 1-6.]
- [4] 张养才,王石立,李文,等. 中国亚热带山区农业气候资源研究[M]. 北京:气象出版社,2001. [Zhang Y C, Wang S L, Li W, et al. Research on Agricultural Climate Resources in China Sub-tropical Mountainous Area[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.]
- [5] 张耀耀,刘建刚,杨萌,等. 气候变化对作物生产潜力的影响研究进展[J]. 农学学报, 2015, 5(1): 119-123. [Zhang Y Y, Liu J G, Yang M, et al. Summary of the effects of climate change on crop production potential[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 119-123.]
- [6] 侯光良,刘允芬. 我国气候生产潜力及其分区[J]. 资源科学, 1985, (3): 52-59. [Hou G L, Liu Y F. China climatic potential productivity and regionalization[J]. Resources Science, 1985, (3): 52-59.]
- [7] 谢云,王晓岚,林燕. 近40年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化[J]. 资源科学, 2003, 25(2): 7-13. [Xie Y, Wang X L, Lin Y. Temporal and spatial variation of climatic potential productivity for grain crops in eastern China within forty years[J]. Resources Science, 2003, 25(2): 7-13.]
- [8] 李忠辉,胡培成,黄晚华. 江西省中稻动态气候生产潜力研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6388-6390. [Li Z H, Hu P C, Huang W H. Research on the dynamic production potential of middle-season rice in Jiangxi Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(12): 6388-6390.]
- [9] 赵俊芳,郭建平,邬定荣,等. 2011-2050年黄淮海冬小麦、夏玉米气候生产潜力评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3189-3195. [Zhao J F, Guo J P, Wu D R, et al. Climatic potential productivity of winter wheat and summer maize in Huanghuaihai Plain in 2011-2050[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3189-3195.]
- [10] 钟新科,刘洛,徐新良,等. 近30年中国玉米气候生产潜力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 94-101. [Zhong X K, Liu L, Xu X L, et al. Characteristics of spatial-temporal variation of maize climate productivity during last 30 years in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 94-101.]
- [11] 许朗,欧真真. 淮河流域农业干旱对粮食产量的影响分析[J]. 水利经济, 2011, 29(5): 56-59. [Xu L, Ou Z Z. Study on effects of agricultural drought on grain production in Huaihe River basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 29(5): 56-59.]
- [12] 王情,刘雪华,岳天祥. 淮河流域粮食生产潜力空间格局研究[J]. 生态经济, 2014, 30(7): 24-27. [Wang Q, Liu X H, Yue T X. Study on the spatial patterns of food production potential in the Huaihe River Basin[J]. Ecological Economy, 2014, 30(7): 24-27.]
- [13] 马晓群,马玉平,葛道阔,等. 淮河流域农作物旱涝灾害损失精细化评估[M]. 北京:气象出版社,2013. [Ma X Q, Ma Y P, Ge D K, et al. Refined Assessment of Flood and Waterlogging

2017年3月

- Disaster Loss of Crop Yields in Huaihe River Basin[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.]
- [14] 王小平. 气候变化背景下黄淮海地区冬小麦气候生产潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011. [Wang X P. The Study on Climate Potential Productivity of Winter Wheat in Huang-Huai-Hai Region under the Background of Climate Change[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2011.]
- [15] 戴俊英, 沈秀英, 李维典, 等. 高产玉米的光合作用系统参数与产量的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1988, 19(3): 1-8. [Dai J Y, Sheng X Y, Li W, *et al.* Relationship between photosynthesis system parameter and yield of maize[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1988, 19(3): 1-8.]
- [16] 佟屏亚, 程延年. 玉米高产栽培经济系数的研究[J]. 北京农业科学, 1996, 14(4): 1-3. [Tong P Y, Cheng Y. Research on economic coefficient in maize high-yield cultivation[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 1996, 14(4): 1-3.]
- [17] 董子梅. 玉米高产的几个主要生理指标[J]. 现代农业, 2009, (3): 40-41. [Dong Z M. Main physiological indexes of high-yield maize[J]. *Modern Agriculture*, 2009, (3): 40-41.]
- [18] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 69-72. [Lin Z H, Xiang Y Q, Mo X G, *et al.* Normalized leaf area index model for summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 69-72.]
- [19] 何永坤, 郭建平. 基于实际生育期的东北地区玉米气候生产潜力研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(7): 67-75. [He Y K, Guo J P. Study on climatic potential productivity of maize in Northeast China based on actual growing stages[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 34(7): 67-75.]
- [20] 于波, 鲍文中, 吴必文, 等. 安徽农业气象业务服务手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013. [Yu B, Bao W Z, Wu B W, *et al.* Anhui Agro-meteorological Service Handbook[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.]
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. FAO Irrigation & Drainage Paper 56, 1998.
- [22] 王晓东, 马晓群, 许莹. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 665-672. [Wang X D, Ma X Q, Xu Y. Temporal analysis of the crop water surplus deficit index for the whole growth period in the Huaihe Basin[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 665-672.]
- [23] 马晓群, 吴文玉, 张辉. 农业旱涝指标及在江淮地区监测预警中的应用[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 186-194. [Ma X Q, Wu W Y, Zhang H. The agricultural drought and flood index and its operational application to monitoring and early warning in Jianghuai Area[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 186-194.]
- [24] 卢燕宇, 吴必文, 田红, 等. 基于Kriging插值的1961-2005年淮河流域降水时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(5): 567-573. [Lu Y Y, Wu B W, Tian H, *et al.* Spatial and Temporal Variability Characteristics Ofprecipitation in Huai River Basin During 1961-2005[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(5): 567-573.]

Influence of precipitation change on climatic potential productivity of major crops in the Huaihe River Basin

YAO Yun^{1,2}, XU Ying³, MA Xiaoqun^{1,2}

(1. Anhui Institute of Meteorological Sciences / Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China;

2. Shouxian National Climate Observatory, Shouxian 232200, China;

3. Anhui Agricultural Meteorological Center, Hefei 230031, China)

Abstract: Frequent droughts and floods in the Huaihe River basin have severely restricted crops production capabilities. To evaluate the influence of climate change on crop productivity, the climatic potential productivity (CPP) of wheat, maize and single-season rice were calculated using weather data from 171 stations and crop growth period data from 121 stations from 1971 to 2010 and stepwise correction modeling. The influence of precipitation changes on crop CPP under the background of climate warming was emphatically analyzed. In the last 40 years, in the Huaihe River basin the single-season rice CPP was the maximum, then maize; wheat was the minimum. The inter-annual variation coefficient of each crop's CPP was more than 10%, among which wheat CPP was more than 20%. However, each did not have an obvious change over time. The ratio of CPP to light and temperature potential productivity (abbreviation: climate ratio) of three crops was also analyzed. Multiyear mean climate ratio of wheat was the lowest, only 49.7%, and the variation coefficient was 25.4%, while that of maize and rice were 67.3% and 66.4% respectively, and the variation coefficients were 12.9% and 16.3%. The influence of precipitation change on wheat CPP is most serious, then maize CPP and that of rice CPP is the lowest. Serious shortages in precipitation during the wheat growing season and high precipitation variation coefficient both restricted wheat CPP. The main reasons limiting maize CPP were more precipitation, fewer precipitation and precipitation variation during the growing season. The climate ratio of single-season rice was only significantly correlated to precipitation during the growing season, thus rice CPP was mainly influenced by the amount of precipitation.

Key words: Huaihe River Basin; major crops; climatic potential productivity; precipitation change