

气候变化背景下中国玉米生产潜力变化特征

周美君¹, 李飞^{1,2*}, 邵佳琪¹, 杨海娟¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表过程与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要:玉米作为中国第一大粮食作物,探究其生产潜力在气候变化背景下的时空变化特征对中国有效应对气候变化具有重要意义。论文结合全球农业生态区模型、极点对称模态分解方法和集对分析方法,探讨了中国玉米生产潜力的周期性波动特征及长期变化趋势,进而分析了其空间格局演变过程。结果表明:1960—2010年间,中国玉米生产潜力呈增加趋势,由1960年代的9.10亿t增至2000年代的9.45亿t左右。在年际尺度上,中国玉米生产潜力主要以准3 a和准5 a的周期进行波动;在年代际尺度上,存在准10 a和准20 a的波动周期。其中,准3 a的周期波动是中国玉米生产潜力长时间变化的最主要特征,这主要是受年降水量变化的影响。从空间格局来看,中国玉米生长适宜区主要集中在加格达奇—锡林浩特—临河—西宁—天水—中甸沿线以东;1960—2000年间,玉米生产潜力界线在中国东北部和临河—西宁沿线发生了较为明显的移动。华北平原、辽河平原、四川盆地等地区的玉米单产潜力变化趋势具有较强的一致性,松嫩平原、三江平原、关中盆地、长江中下游平原等地区的玉米单产潜力变化过程与上述地区恰好相反。在这2类地区,玉米单产潜力的变化均较显著,但变化方向在年代际尺度上具有交替性。

关键词:玉米生产潜力;周期性;空间格局;气候变化;中国

玉米是中国第一大粮食作物,其产量占中国粮食总产量的比重日益上升,对保障中国粮食安全具有重要意义^[1-3]。目前,气候变化已成为不争的事实。科学研究和观测数据表明,全球气候正在经历以变暖为特征的变化,而中国是气候变化最为显著的国家之一^[4-5]。气候变化导致与玉米生产有关的农业气候资源在时空上发生量和质的变化^[6],最终影响中国的玉米产量^[7-8]。然而,玉米生产过程是一个自然-技术-经济组成的复杂系统,从玉米实际产量出发难以直接窥探气候变化对玉米生产能力的影 响^[9]。玉米生产潜力是某种土地利用状态(包含了地形、土壤等)在一年内仅受气候条件限制、不考虑病虫害及其他生产条件制约的情况下能够实现的最大玉米产量。研究自然条件下的玉米生产潜力可以更清楚地解释气候变化的影响^[10-11]。为此,诸多学者开展了大量研究。钟新科等^[12]分析了

1981—2010年中国东北地区春玉米气候潜力年际变化特征和变化趋势,发现其主要影响因子是水分条件,其次是光照和热量。杜国明等^[13]在更长的时间尺度上分析了1961—2015年气候变化导致的东北玉米生产潜力时空格局演变特征,指出东北玉米平均生产潜力波动较大,整体上以80 kg/(hm²·10 a)的线性倾向率增加,且在20世纪末和21世纪初变化较为频繁。葛亚宁等^[14]结合雨养和灌溉2种情景下的玉米生产潜力,得出1960—2010年中国玉米生产潜力呈下降趋势的结论。这些研究为在气候变化背景下合理安排中国玉米生产空间布局提供了重要理论支撑。

然而,各气候要素的变化趋势不是持续上升或下降,而是存在几年到几十年的波动周期^[15-17]。气温、降水等气候要素的周期性波动将不可避免地导致玉米生产潜力也发生相应的周期性波动,这应当

收稿日期:2019-04-09;修订日期:2019-10-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(41701094);陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ4024)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41701094; Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China, No. 2018JQ4024.]

第一作者简介:周美君(1996—),女,陕西榆林人,硕士生,主要从事生态系统服务权衡研究。E-mail: 979530303@qq.com

*通信作者简介:李飞(1989—),男,河南开封人,副教授,主要从事土地系统变化及效应研究。E-mail: lifei@nwu.edu.cn

引用格式:周美君,李飞,邵佳琪,等. 气候变化背景下中国玉米生产潜力变化特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 443-453. [Zhou Meijun, Li Fei, Shao Jiaqi, et al. Change characteristics of maize production potential under the background of climate change in China. Progress in Geography, 2020, 39(3): 443-453.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.009

纳入相关研究当中^[18-19]。一些学者已经对气候波动对粮食生产的影响表示关注,但缺乏一种系统的方法来描述各气候要素的周期性波动对玉米生产潜力的影响,并且仍然不确定哪个气候要素在影响玉米生产潜力的周期性波动中起最重要的作用^[20-21]。故而,本文利用全球农业生态区(Global Agro-ecological Zone, GAEZ)模型评估1960—2010年间中国历年的玉米生产潜力,结合极点对称模态分解方法和集对分析方法,探究中国玉米生产潜力的周期波动特征及主要影响因素,并根据其周期波动性分析中国玉米生产潜力的空间格局演变,以期加深对气候变化背景下中国玉米生产能力时空变化特征的认识,更好地应对气候变化带来的机遇与挑战。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究中使用的数据主要包括气象、土壤、地形、土地利用和社会经济统计等数据。

气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)下载,包括全国756个气象站点1960—2010年降水量、平均最高气温、平均最低气温、平均风速、平均相对湿度、降水频率和总太阳辐射的月值和年值,并利用Anusplin插值软件^[22-23]对站点数据进行空间插值,获得全国1000 m×1000 m的月和年气象要素空间格网数据。

土壤数据(包括土壤类型、土壤组成、土壤深度、土壤持水力和其他属性)从中国科学院资源环境科学数据中心1:100万国家土壤数据集(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)获得。

地形数据来自美国航天飞机雷达地形任务(SRTM)提供的数字高程模型(DEM)数据(<https://dds.cr.usgs.gov/srtm/>),本研究中使用的SRTM-DEM的空间分辨率为90 m。

土地利用数据(2010年)来自中国科学院资源环境科学数据中心的土地利用遥感监测数据(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),分辨率为1000 m,包括耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地共6个一级土地利用类型。

社会经济数据主要来自《新中国五十五年统计资料汇编(1949—2008)》《新中国60年(1949—2008)》和《中国统计年鉴(1981—2011)》。

1.2 全球农业生态区模型

全球农业生态区(GAEZ)模型用于估算中国玉

米生产潜力。GAEZ模型是由联合国粮农组织(FAO)和国际应用系统分析研究所(IIASA)共同开发的用于评估作物生产潜力的模型。它首先根据不同温度带内温度大于0℃生长期、温度大于5℃生长期、温度大于10℃生长期、0℃积温、10℃积温、温度大于5℃生长期积温、温度大于10℃生长期积温7大指标的相互关系获取区域潜在熟制空间分布,然后根据降水、气温、光照等条件来评价作物的气候适宜性,最后采用逐步限制法计算作物生产潜力。中国玉米种植主要包括春玉米和夏玉米,本文利用气象数据分别计算出春玉米和夏玉米的种植适宜区,并计算出相应的玉米生产潜力;在春玉米和夏玉米种植适宜区重合的地区,取生产潜力较高的值。有关GAEZ的详细介绍及计算过程,请参阅Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)^[24]。

由于基础数据的易获得性、计算过程的简洁性以及结果可以较好地反映区域作物生产潜力的多年平均状态,GAEZ模型已在世界范围内广泛使用,特别是在发展中国家^[25-27]。GAEZ模型在中国的适用性已得到广泛验证^[10-12,28]。该模型的结果包括2种模拟情景下的作物生产潜力,即雨养和灌溉。本文仅考虑雨养情景下的作物生产潜力以更好地反映气候变化背景下的玉米生产潜力变化趋势。另外,玉米生产潜力受气候变化和土地利用变化的共同影响,为了探究气候因素的单独影响,本文假设土地利用保持2010年的状态不变。

1.3 极点对称模态分解

极点对称模态分解(Extreme-Point Symmetric Mode Decomposition, ESMD)是经验模态分解(EMD)方法的一种新发展,能够将原始信号序列中内在的不同尺度或周期性振荡和趋势分量逐级提取出来,得到若干具有不同特征尺度或固有周期的本征模函数(IMF)以及真实的变化趋势分量(R),它可以有效解决EMD方法中模态叠加的问题。ESMD的分解过程如下(更具体的推导过程请参阅《极点对称模态分解方法》^[29]):

(1) 求出坐标系中时间序列 Y 的所有极大值和极小值点,表示为 $E_i (i = 1, 2, \dots, M)$;

(2) 用线段连接相邻的极值点,并将线段的中点记为 $F_i (i = 1, 2, \dots, M-1)$;

(3) 以某种方式补充左右边界的中点,表示为 F_0 和 F_M ;

(4) 利用获得的 $M+1$ 个中点构造内插曲线($L_1, L_2, \dots, L_p, p \geq 1$),并计算其平均值 $L^* = (L_1 + L_2 + \dots + L_p) / p$;

(5) 对 $Y-L^*$ 重复上述步骤,直到 $|L^*| \leq \varepsilon$ (ε 是预设的允许误差)或重复次数达到预设的最大次数 (K);此时,第一个本征模函数 (IMF₁) 被分解出来;

(6) 对 $Y-IMF_1$ 重复上述步骤,直到剩余序列 R 为单一信号或极值点数不再大于预定极值点数;

(7) 在整数区间 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 内改变 K 值并重复上述步骤;计算方差比 (σ/σ_0) 并绘制其随 K 的变化, σ 和 σ_0 分别为 $Y-R$ 和原始序列 Y 的标准差;

(8) 求出与区间 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 中的最小方差比对应的 K 值,表示为 K_0 ,即步骤 (5) 中预设的最大重复次数;

(9) 重复前 6 个步骤以得到分解结果 (IMF₁, IMF₂, ..., IMF_n 和 R)。

1.4 集对分析

利用 ESMD 可以得到玉米生产潜力和各气候要素的 IMF_s,进而获得其波动周期。如果某气候要素与玉米生产潜力的变化具有相同的周期,则认为该气候要素是影响玉米生产潜力周期性波动的因素。例如,若玉米生产潜力的 IMF₁ 的平均周期为 3 a 且降水量的 IMF₂ 的平均周期也为 3 a,则玉米生产潜力的准 3 a 周期波动受降水的影响。可能有多个气候要素具有与玉米生产潜力相同的波动周期,集对分析可以识别何种气候要素是最主要的。具体分析过程如下:

(1) 使用以下公式对玉米生产潜力的 IMF_s 进行无量纲处理:

$$x_{kl} = \frac{X_{kl}}{\max |X_{kl}|} \quad (1)$$

式中: X_{kl} 是玉米生产潜力的第 k 个 IMF 第 l 年的值, x_{kl} 是玉米生产潜力的第 k 个 IMF 第 l 年的无量纲值; $k = 1, 2, \dots, n$ (n 是 IMF 的个数); $l = 1, 2, \dots, N$ (N 是时间序列的长度);

(2) 把玉米生产潜力的每个无量纲 IMF 分为 5 个等级 (I、II、III、IV 和 V),使得 $n \times N$ 均匀分布在 5 个等级中;判断 x_{kl} 所在的等级并获得 n 个等级序列,分别记为 $Mpy_1, Mpy_2, \dots, Mpy_n$;

(3) 对每个气候要素的每个 IMF 重复前 2 个步骤,获得各自的等级序列,分别记为 $Cf_{jk}, j = 1, 2, \dots, m$ (m 是气候要素的个数), $k = 1, 2, \dots, n$ (n 是对应的气候要素的 IMF 个数,玉米生产潜力以及各个气候要素的 IMF 的个数不一定相等);

(4) 将和 Mpy_i 具有相同周期的 Cf_{jk} 分别与 Mpy_i 进行配对分析,使 2 个等级序列一一对应;若处于同

一等级,认为它们是“同”;若相差 1 个等级 (如 I 和 II, II 和 III),认为它们是“异 1”;若相差 2 个等级 (如 I 和 III, II 和 IV),认为它们是“异 2”;若所处等级相差超过 2 个 (如 I 和 V, II 和 V),则称之为“反”;

(5) 统计同、异 1、异 2 和反的个数,分别记为 S, F_1, F_2 和 $P, S + F_1 + F_2 + P = N$;

(6) 根据以下公式计算 Mpy_i 和 Cf_{jk} 之间的联系度 (μ_{ij}):

$$\mu_{ij} = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N} I_1 + \frac{F_2}{N} I_2 + \frac{P}{N} J \quad (2)$$

式中: I_1, I_2, J 分别是异 1、异 2 和反的系数,根据均分原理, $I_1 = 0.5, I_2 = -0.5, J = -1$ ^[30];为了规范化计算,将联系度按照下式进行线性转换:

$$U_{ij} = (\mu_{ij} \times 0.5 + 0.5) \times \beta_{jk} \quad (3)$$

式中: β_{jk} 是第 j 个气候因子的 IMF_k 的方差贡献率。

(7) 使用以下公式计算影响度 (φ_{ij}):

$$\varphi_{ij} = \frac{U_{ij}}{\sum_j U_{ij}} \quad (4)$$

式中: φ_{ij} 表示第 j 个气候因子对玉米生产潜力的第 i 个 IMF 的周期性波动的影响程度,由此可以区分影响玉米生产潜力周期性波动的主要气候要素。有关集对分析的更多详细信息,请参见《集对分析及其初步应用》^[31]。

2 结果与分析

2.1 GAEZ 模型模拟结果验证

本文利用 GAEZ 模型估算了 1960—2010 年间中国历年玉米生产潜力,为了验证模拟结果,对中国除香港、澳门、台湾以外的 31 个省 (市、区) 的 2000—2010 年平均玉米生产潜力和实际玉米产量之间的相关性 (图 1a),以及各省每年的玉米生产潜力和实际玉米产量的相关性 (图 1b) 进行分析。结果表明,玉米生产潜力和实际玉米产量在 0.01 的显著性水平上显著相关,相关系数分别为 0.675 和 0.630 (图 1)。因此,模拟结果具有较高的可信度。

2.2 中国玉米生产潜力周期性分析

(1) 中国玉米生产潜力时间变化

气候变化背景下,1960—2010 年间中国玉米生产潜力呈增加趋势 (图 2a),由 1960 年代的 9.10 亿 t 增至 2000 年代的 9.45 亿 t 左右,增加了约 4% (图 2b)。受气候变化的影响,中国玉米生产潜力的年际波动明显,尤其是在 1990 年代和 1960 年代;在 1990 年

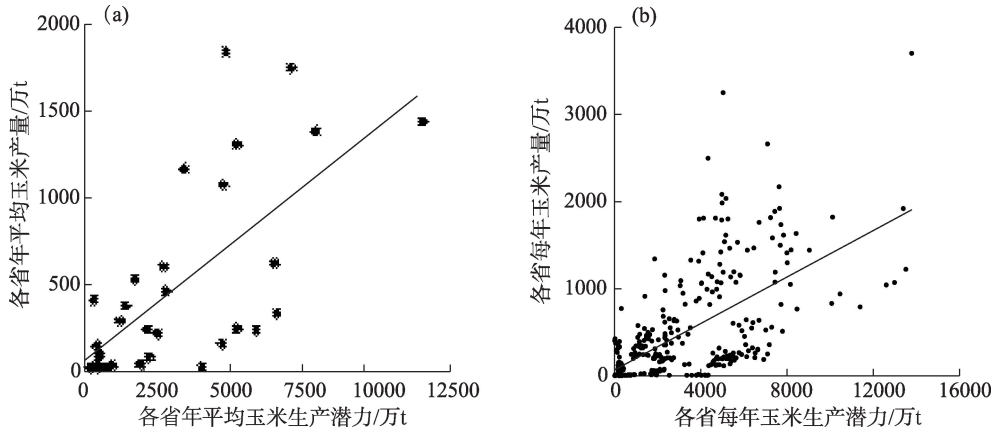


图1 2000—2010年中国玉米生产潜力与实际产量的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between maize production potential and actual yield, 2000–2010

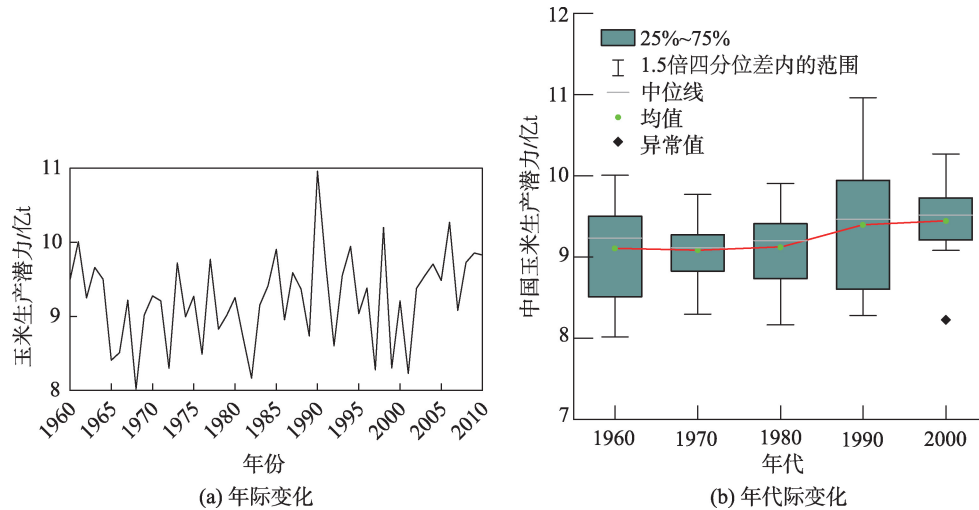


图2 中国玉米生产潜力年际变化和年代际变化

Fig.2 Interannual and interdecadal changes in China's maize production potential

代,中国玉米生产潜力的1.5倍四分位差(1.5 IQR)约为3亿t,这一时期是中国玉米生产潜力年际波动最为显著的年代;1960年代次之,其1.5 IQR将近2亿t。在2000年代,中国玉米生产潜力的年际波动相对较小,其1.5 IQR约为1亿t。然而,在2001年中国玉米生产潜力异常偏低,仅为8.23亿t,远低于2000年代的平均水平,是近50 a玉米生产潜力最低的年份之一。这主要是由于北半球大气环流造成中国降水减少、气温偏高所致^[32]。此外,由于降水充沛、气温相对较高,在1990年中国玉米生产潜力高达10.96亿t,是近50 a来玉米生产潜力最高的年份。

(2) 中国玉米生产潜力周期波动特征

通过对1960—2010年间中国玉米生产潜力时间序列的分析可以发现,中国玉米生产潜力具有明

显的周期波动特征。极点对称模态分解的结果显示,中国玉米生产潜力具有4个IMF分量,即存在4个显著的波动周期(图3)。在年际尺度上,中国玉米生产潜力主要以准3 a(IMF₁)和准5 a(IMF₂)的周期进行波动。在年代际尺度上,中国玉米生产潜力的波动周期主要为准10 a(IMF₃)和准20 a(IMF₄)。IMF₁的方差贡献率为62.7%,大于其他IMF_s和趋势项(R)的方差贡献率之和,表明准3 a的周期波动是中国玉米生产潜力长时间变化的最主要特征(表1)。IMF₂的方差贡献率为16.4%,仅次于IMF₁;IMF₃和IMF₄的方差贡献率都在10%左右;虽然趋势项R的方差贡献率不足2%,但增加的趋势较为明显,由1960年的8.96亿t增至2010年的约9.22亿t;特别是在1960—1980年间,中国玉米生产潜力的增加趋势尤为显著(图3)。综上所述,中国玉米生产潜

力主要在年际尺度上发生周期波动,在波动中有所增加。

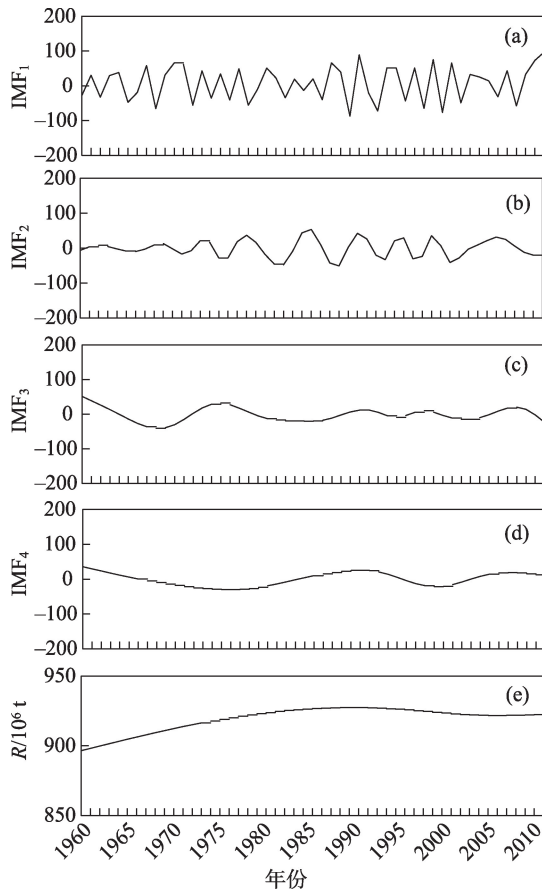


图3 由ESMD分解出的中国玉米生产潜力IMF₁和R
Fig.3 Intrinsic mode functions (IMF₁) and R of maize production potential decomposed by extreme-point asymmetric mode decomposition (ESMD)

(3) 影响中国玉米生产潜力周期波动的主要气候要素

为了辨识影响中国玉米生产潜力周期波动的主要气候要素,运用极点对称模态分解模型分别分析年降水量(Pre)、年辐射总量(Rad)、年均相对湿度(Rhu)、年均最低气温(Tmn)、年均最高气温(Tmx)、年降水频率(Wdf)和年均风速(Wnd)的周期波动特征(表1)。结果显示,Pre、Rhu和Wdf主要以准3 a为周期进行波动;从变化趋势看(图4),Pre表现出先升后降的变化趋势,且在20世纪80年代达到最大值,但与周期性波动相比,这种趋势不甚显著(趋势项R的方差贡献率仅为0.9%);Rhu表现出微弱的一减少—增加的长期趋势;对于Wdf,趋势项R的方差贡献率仅次于IMF₁,表明除了准3 a周期性变化外,Wdf也具有明显的下降趋势;Rad的长期变化以下降为主,并伴有较明显的准3 a周期性波动;Tmn和Tmx的升高是其最主要的长期变化特征,即气温变化的周期性不明显,特别是Tmn,最显著的波动周期是准3 a,但其IMF₁的方差贡献率仅为7.5%;Wnd变化的周期性极不显著,主要呈现先增加后减小的长期变化趋势。

从表2可以发现,各气候要素在年际波动上都具有与玉米生产潜力相同的波动周期(准3 a和准5 a),即各气候要素对中国玉米生产潜力的年际波动都产生影响。在年代际尺度上,影响中国玉米生产潜力准10 a周期波动的气候要素主要是Pre、Rad、Tmn、Tmx和Wdf;中国玉米生产潜力的准20 a周期波动则主要受Pre和Rhu的影响。

表1 玉米生产潜力和各气候要素的变化周期和方差贡献率

Tab.1 Maize production potential and period and variance contribution rates of climatic factors

分量	指标	玉米生产潜力	Pre	Rad	Rhu	Tmn	Tmx	Wdf	Wnd
IMF ₁	周期/a	3	3	3	3	3	3	3	3
	方差贡献率/%	62.7	61.3	29.4	38.0	7.5	22.1	44.7	2.9
IMF ₂	周期/a	5	5	5	5	5	5	5	5
	方差贡献率/%	16.4	20.3	15.0	20.9	5.0	8.1	13.5	1.3
IMF ₃	周期/a	10	10	10	7	10	10	10	13
	方差贡献率/%	10.0	14.6	6.2	18.8	1.2	4.7	11.9	2.8
IMF ₄	周期/a	20	15		15			17	
	方差贡献率/%	9.0	1.8		19.0			2.9	
IMF ₅	周期/a		20		20				
	方差贡献率/%		0.1		1.8				
R	方差贡献率/%	1.9	0.9	49.3	1.5	86.3	65.1	27.0	93.0

注: Pre、Rad、Rhu、Tmn、Tmx、Wdf和Wnd分别代表年降水量、年辐射总量、年均相对湿度、年均最低气温、年均最高气温、年降水频率和年均风速。

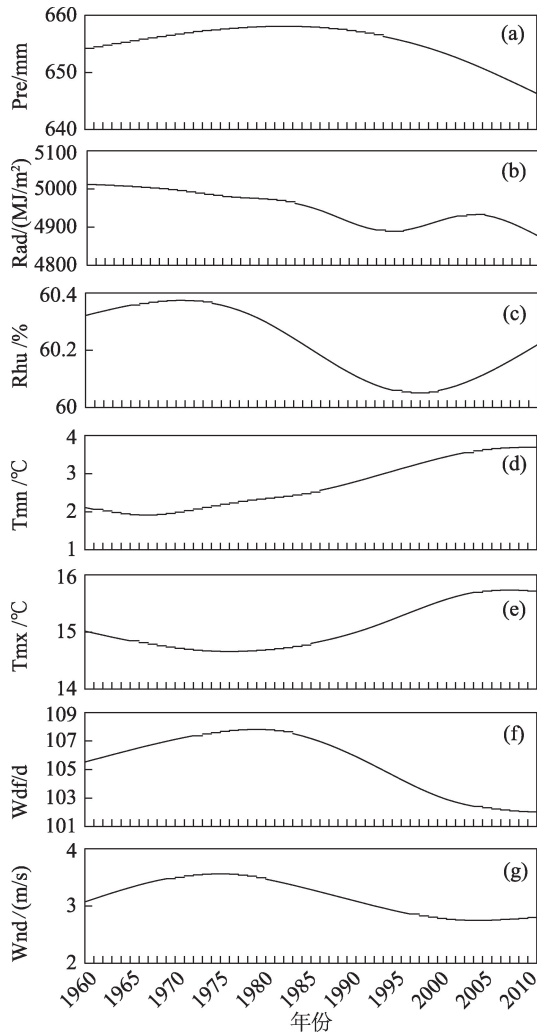


图4 由ESMD分解出的各气候要素的趋势项(R)

Fig.4 Trend item (R) of climatic factors decomposed by extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD)

集对分析的结果表明,中国玉米生产潜力的准3 a和准10 a周期波动都是受Pre的影响最大,影响度分别为33.6%和43.64%(表2)。年降水量变化不仅改变了玉米生长过程中水资源的可利用性,而且会导致日照减少、气温下降,限制着光合作用效率,进而影响到玉米生产潜力^[33]。尽管其原因尚不明确且存在争议,但许多研究已经证实了中国降水变化的准3 a周期性^[34-37]。作为中国目前种植制度下玉米生产潜力最具决定性的气候因素,Pre的准3 a周期性波动导致中国玉米生产潜力具有与之相同的波动周期。Pre反映了年降水总量,而Wdf反映了一年内的降水频率,两者高度相关(相关系数为0.558, $P < 0.01$)。Wdf的周期波动特征与Pre类似;尤其是在年际尺度上,Wdf和Pre具有相同的波动周期,但Wdf的波动强度略低于Pre。因此,Wdf对

表2 影响玉米生产潜力周期性波动的气候要素
Tab.2 Climatic factors affecting periodic fluctuations in maize production potential

周期	气候要素	方差贡献率 $\beta_{ij}/\%$	U_{ij}	影响度 $\phi_{ij}/\%$
IMF ₁ (准3 a)	Pre IMF ₁	61.3	0.4387	33.60
	Rad IMF ₁	29.4	0.1283	9.82
	Rhu IMF ₁	38.0	0.2589	19.83
	Tmn IMF ₁	7.5	0.0445	3.41
	Tmx IMF ₁	22.1	0.1213	9.29
	Wdf IMF ₁	44.7	0.3002	22.99
	Wnd IMF ₁	2.9	0.0138	1.06
IMF ₂ (准5 a)	Pre IMF ₂	20.3	0.1234	25.69
	Rad IMF ₂	15.0	0.0772	16.07
	Rhu IMF ₂	20.9	0.1332	27.73
	Tmn IMF ₂	5.0	0.0270	5.61
	Tmx IMF ₂	8.1	0.0433	9.01
	Wdf IMF ₂	13.5	0.0695	14.47
	Wnd IMF ₂	1.3	0.0068	1.42
IMF ₃ (准10 a)	Pre IMF ₃	14.6	0.1124	43.64
	Rad IMF ₃	6.2	0.0340	13.22
	Tmn IMF ₃	1.2	0.0085	3.29
	Tmx IMF ₃	4.7	0.0396	15.39
IMF ₄ (准20 a)	Wdf IMF ₃	11.9	0.0630	24.47
	Pre IMF ₄	0.1	0.0002	2.33
	Rhu IMF ₄	1.8	0.0099	97.67

中国玉米生产潜力的准3 a和准10 a周期波动的影响小于Pre,但大于其他气候要素。Rhu主要通过影响蒸腾作用和控制植物孔隙的开启与关闭来影响作物产量^[38]。故而,具有显著周期性波动的Rhu对玉米生产潜力的周期性变化也具有不可忽略的影响。特别地,Rhu对中国玉米生产潜力的准5 a和准20 a周期性波动的影响大于Pre,这主要是因为Rhu的准5 a和准20 a周期性波动比Pre更明显。

综上所述,中国玉米生产潜力的周期性波动主要是受年降水量Pre、年降水频率Wdf和年均相对湿度Rhu的影响;气温变化对中国玉米生产潜力周期波动的影响小于降水变化。

2.3 中国玉米生产潜力空间格局演变

(1) 中国玉米生产潜力界线变化

由于玉米生产潜力具有波动性,仅用个别年份的玉米生产潜力探讨其格局变化特征有失偏颇。考虑到中国玉米生产潜力具有准10 a的波动周期,故而,本文分别计算了1960年代、1970年代、1980年代、1990年代和2000年代的平均玉米生产潜力,以便于准确分析其空间格局演变。

本文将玉米单产潜力大于零的地区界定为玉米生长适宜区, 等于零的地区为玉米生长不适宜区。总体而言, 中国玉米生长适宜区主要集中在加格达奇—锡林浩特—临河—西宁—天水—中甸沿线以东; 尤其是在松嫩平原、华北平原和四川盆地, 玉米单产潜力普遍较高, 是中国最适宜种植玉米的地区(图5)。通过对比1960年代和2000年代中国玉米生产潜力界线可以发现, 近50 a来中国玉米单产潜力的总体空间格局变化不大, 玉米生产潜力界线仅在中国东北部和临河—西宁沿线发生了较为明显的移动。其中, 在鄂伦春自治旗, 玉米生产潜力界线向西北方向移动了约120 km; 在额尔古纳市南部、陈巴尔虎旗、鄂温克族自治旗、海拉尔市以及牙克石市中部, 玉米生产潜力界线东扩了近160 km。然而, 在阿拉善左旗, 玉米生产潜力界线向东南方向收缩了80 km左右。

(2) 中国玉米单产潜力空间变化特征

1960年代—1970年代期间, 中国玉米单产潜力总体略微减少; 玉米单产潜力增加地区的面积约为83.72万 km^2 。其中, 在华北平原、辽河平原、四川盆地等地区, 玉米单产潜力的增加趋势最为明显, 平均提高了500 kg/hm^2 以上; 而在松嫩平原、三江平原和长江中下游平原等地区, 玉米单产潜力则有所下降(图6a)。

1970年代—1980年代期间, 中国玉米单产潜力呈增加趋势, 玉米单产潜力的变化格局与1960年代



注: 本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作, 底图无修改。下同。

图5 1960s—2000s中国玉米生长界线变化

Fig.5 Maize growth boundary change in China, 1960s—2000s

—1970年代正好相反, 即在松嫩平原、三江平原、关中盆地、长江中下游平原等地区, 玉米单产潜力显著增加, 而辽河平原、华北平原和四川盆地的玉米单产潜力普遍下降。在此期间, 共有81.61万 km^2 土地的玉米单产潜力有所增加, 而玉米单产潜力下降的地区约为84.21万 km^2 (图6b)。

1980年代—1990年代期间, 中国玉米单产潜力整体有所增加; 其中, 玉米单产潜力增加地区的面积近100万 km^2 , 主要集中在松嫩平原东北部、三江平原、四川盆地以及华北平原部分地区; 而在关中盆地等地区, 玉米单产潜力则显著下降(图6c)。

相较于1990年代, 三江平原、华北平原中西部、关中平原、长江中下游平原等地的玉米单产潜力在2000年代有较大提升, 而松嫩平原和辽河平原大部分地区的玉米单产潜力呈下降趋势(图6d)。

综上所述, 受气候波动的影响, 华北平原、辽河平原、四川盆地等地区的玉米单产潜力变化趋势具有较强的一致性, 松嫩平原、三江平原、关中盆地、长江中下游平原等地区的玉米单产潜力变化过程与上述地区恰好相反; 这2类地区是玉米单产潜力变化较为显著的主要区域, 但其变化方向在年代际尺度上具有交替性(图6)。

3 结论与讨论

在气候变化背景下, 中国玉米生产潜力由1960年代的9.10亿t增至2000年代的9.45亿t左右; 在1960年代和1990年代, 中国玉米生产潜力的年际波动明显。1960—2010年间, 中国玉米生产潜力具有4个显著的波动周期, 即准3 a、准5 a、准10 a和准20 a; 其中, 准3 a的周期性波动是中国玉米生产潜力长时间变化的最主要特征。中国玉米生产潜力的周期性波动主要受年降水量变化的影响, 其次为年降水频率和相对湿度; 其中, 年降水量对其准3 a和准10 a周期波动的影响度分别为33.60%和43.64%。由于相对湿度的准5 a和准20 a周期性波动比年降水量更显著, 因而其对中国玉米生产潜力的准5 a和准20 a周期性波动的影响大于年降水量。中国玉米生长适宜区主要集中在加格达奇—锡林浩特—临河—西宁—天水—中甸沿线以东; 其中, 松嫩平原、华北平原和四川盆地的玉米单产潜力相对较大。近50 a来, 中国玉米生产潜力界线在中国东北部和临河—西宁沿线的变化最为明显; 在鄂伦春自治旗, 玉米生产潜力界线向西北方向扩展

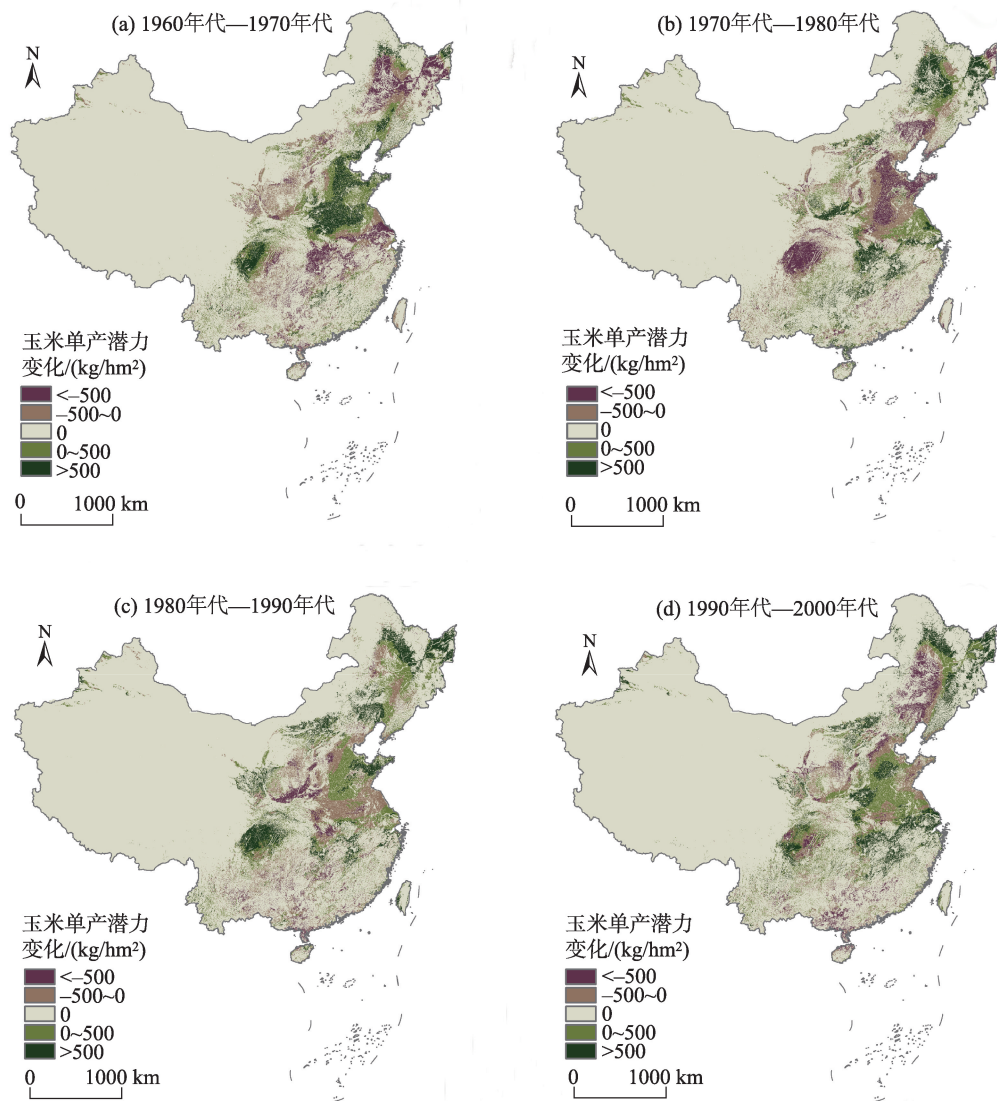


图6 中国玉米单产潜力变化的空间格局

Fig.6 Spatial pattern of changes in maize production potential in China

了约 120 km;然而,在临河—西宁沿线,玉米生产潜力界线向东南方向收缩了 80 km 左右。气候变化导致的中国玉米单产潜力变化主要集中在 2 类区域:华北平原、辽河平原、四川盆地等地区 and 松嫩平原、三江平原、关中盆地、长江中下游平原等地区;上述 2 类地区的玉米单产潜力变化过程恰好相反,且其变化方向在年代际尺度上具有交替性。

玉米作为中国 3 大粮食作物之一,其生产能力在气候变化背景下的时空动态受到诸多学者的关注,这对于深刻理解气候变化对中国粮食安全的影响、积极采取有效措施以应对气候变化具有重要意义。然而,目前的研究对中国玉米生产潜力变化的周期性重视不够,致使对玉米生产受气候变化影响的评估结果可能存在偏差。由于周期性是气候变

化的固有规律,受气候资源直接支配的玉米生产潜力变化必然具有与气候变化相似的周期。本文的研究结果表明,中国玉米生产潜力变化具有准 3 a、准 5 a、准 10 a 和准 20 a 的周期,这可以与中国粮食单产波动特征相互印证。刘忠等^[21]的研究指出,中国粮食单产具有一个平均周期约为 4 a 的短期波动和一个平均周期约为 9 a 的中期波动。这间接佐证了本文关于中国玉米生产潜力变化周期性的结论具有一定可信度。此外,中国玉米单产潜力空间格局变化在年代际尺度上的交替性也是中国玉米生产潜力变化具有周期性的一种反映。例如,东北地区的玉米单产潜力在 1960 年代—1970 年代和 1980 年代—1990 年代呈下降趋势,而在 1970 年代—1980 年代和 1990 年代—2000 年代有所增加;与之

相反,华北地区的玉米单产潜力在1960年代—1970年代和1980年代—1990年代呈增加趋势,而在1970年代—1980年代和1990年代—2000年代有所下降。

本文基于极点对称模态分解和集对分析方法,发现影响中国玉米生产潜力周期波动的主要气候要素是年降水量的变化。然而,这并不表明气温变化对中国玉米生产潜力的影响要小于降水变化。因为中国气温在1960—2010年间呈明显增加趋势,变化的周期性不显著,导致气温变化对玉米生产潜力周期波动的影响较小。若从长期趋势来看,气温变化对中国玉米生产潜力变化的影响很可能大于降水变化,但我们未对此深入分析,是本文的局限性所在。此外,中国幅员辽阔,各地玉米种植制度不一,也会影响到玉米的生产潜力。虽然本文利用GAEZ模型进行了熟制的划分,但没有将局部地区的两年三熟制(春玉米—冬小麦—夏玉米)纳入研究中;另外,CO₂浓度、极端气象条件(如冷冻、高温、暴雨、暴雪、大风)等也都是影响玉米生产潜力变化的重要因素,由于数据获取的限制,本文也未对其进行分析,今后的研究将重点改进。

参考文献(References)

- [1] 何奇瑾,周广胜. 我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究 [J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1443-1450. [He Qijin, Zhou Guangsheng. Climatic suitability of potential summer maize planting zones in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1443-1450.]
- [2] 谭杰扬,李正国,杨鹏,等. 基于作物空间分配模型的东北三省春玉米时空分布特征 [J]. 地理学报, 2014, 69(3): 353-364. [Tan Jieyang, Li Zhengguo, Yang Peng, et al. Spatiotemporal changes of maize sown area and yield in Northeast China between 1980 and 2010 using spatial production allocation model. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 353-364.]
- [3] 陈欢,王全忠,周宏. 中国玉米生产布局的变迁分析 [J]. 经济地理, 2015, 35(8): 165-171. [Chen Huan, Wang Quanzhong, Zhou Hong. Empirical analysis of corn spatial distribution variation in China. *Economic Geography*, 2015, 35(8): 165-171.]
- [4] IPCC. *Climate change 2014* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [5] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883. [Qin Dahe. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.]
- [6] Bocchiola D, Nana E, Soncini A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po Valley of Italy [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116(2): 50-61.
- [7] Chen Y, Han X, Si W, et al. An assessment of climate change impacts on maize yields in Hebei Province of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581-582: 507-517.
- [8] 秦雅,刘玉洁,葛全胜. 气候变化背景下1981—2010年中国玉米物候变化时空分异 [J]. 地理学报, 2018, 73(5): 906-916. [Qin Ya, Liu Yujie, Ge Quansheng. Spatiotemporal variations in maize phenology of China under climate change from 1981 to 2010. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 906-916.]
- [9] Li F, Li Y, Ma S. Regional difference of grain production potential change and its influencing factors [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2019, 156(9): 1-11.
- [10] Liu L, Xu X, Chen X. Assessing the impact of urban expansion on potential crop yield in China during 1990-2010 [J]. *Food Security*, 2015, 7: 33-43.
- [11] Xu X, Wang L, Cai H, et al. The influences of spatiotemporal change of cultivated land on food crop production potential in China [J]. *Food Security*, 2017, 9: 485-495.
- [12] 钟新科,刘洛,宋春桥,等. 1981年至2010年中国东北地区春玉米气候潜力时空变化分析 [J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2164-2169. [Zhong Xinke, Liu Luo, Song Chunqiao, et al. Temporal-spatial variation of spring maize climatic productivity from 1981 to 2010 in Northeastern China. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2164-2169.]
- [13] 杜国明,张露洋,徐新良,等. 近50年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析 [J]. 地理研究, 2016, 35(5): 864-874. [Du Guoming, Zhang Luyang, Xu Xinliang, et al. Spatial-temporal characteristics of maize production potential change under the background of climate change in Northeast China over the past 50 years. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 864-874.]
- [14] 葛亚宁,刘洛,徐新良,等. 近50 a气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 784-795. [Ge Yaning, Liu Luo, Xu Xinliang, et al. Temporal and spatial variations of Chinese maize production potential on the background of climate change during 1960-2010. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 784-795.]
- [15] Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years [J]. *Nature*, 1994, 367: 723-726.
- [16] Plaut G, Ghil M, Vautard R. Interannual and interdecadal

- variability in 335 years of central England temperatures [J]. *Science*, 1995, 268: 710-713.
- [17] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(9): 1139-1161.
- [18] Liu Y, Yu D, Su Y, et al. Quantifying the effect of trend, fluctuation, and extreme event of climate change on ecosystem productivity [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, 186(12): 8473-8486.
- [19] Wang Z, Shi P, Zhang Z, et al. Separating out the influence of climatic trend, fluctuations, and extreme events on crop yield: A case study in Hunan Province, China [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 3: 1-19.
- [20] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 基于EMD的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析 [J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 745-751. [Liu Huiyu, Lin Zhenshan, Zhang Mingyang. Analysis on the fluctuation of grain output in China and its causes at multi-time scale based on Empirical Mode Decomposition Method. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 745-751.]
- [21] 刘忠, 黄峰, 李保国. 基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 7-13. [Liu Zhong, Huang Feng, Li Baoguo. Analysis on characteristics and influential factors of grain yield fluctuation in China based on empirical mode decomposition. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(2): 7-13.]
- [22] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [23] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part II: Analysis of topographic dependence [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 152-167.
- [24] IIASA/FAO. Global agro-ecological zones (GAEZ v3.0) [M]. Laxenburg, Austria: IIASA and Rome, Italy: FAO, 2010.
- [25] Fischer G, Sun L. Model based analysis of future land-use development in China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1-3): 163-176.
- [26] Fischer G, Shah M, Velthuizen H, et al. Agro-ecological zones assessments [M]. Oxford, UK: Eolss Publishers, 2006.
- [27] Li F, Zhang S, Zhang Y, et al. Changes of grain production potential in farming-pastoral ecotone: A case study in West Jilin, China [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2018, 156: 151-161.
- [28] 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 等. 1990—2010年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响 [J]. *地理学报*, 2014, 69(12): 1767-1778. [Liu Luo, Xu Xinliang, Liu Jiyuan, et al. Impact of farmland changes on production potential in China during 1990–2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1767-1778.]
- [29] 王金良, 李宗军. 极点对称模态分解方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. [Wang Jinliang, Li Zongjun. Extreme-point symmetric mode decomposition method. Beijing, China: Higher Education Press, 2015.]
- [30] Kliensky D M, Oreshko N I, Geppener V V. Empirical mode decomposition in segmentation and clustering of slowly and fast changing non-stationary signals [J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2009, 19(1): 14-29.
- [31] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. [Zhao Keqin. Set pair analysis and its preliminary application. Hangzhou, China: Zhejiang Science and Technology Press, 2000.]
- [32] 艾秀. 2001年北半球大气环流特征及其对中国气候异常的影响 [J]. *气象*, 2002, 28(4): 21-24. [Ai Xiu. General circulation over the Northern Hemisphere in 2001 and its impact on the climate in China. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(4): 21-24.]
- [33] Kassie B T, Ittersum M K V, Hengsdijk H, et al. Climate-induced yield variability and yield gaps of maize (*Zea mays* L.) in the Central Rift Valley of Ethiopia [J]. *Field Crops Research*, 2014, 160: 41-53.
- [34] Wang W C, Li K. Precipitation fluctuation over semiarid region in northern China and the relationship with El Niño/Southern Oscillation [J]. *Journal of Climate*, 1990, 3(7): 769-783.
- [35] Yang F, Lau K M. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(13): 1625-1644.
- [36] Liang L, Li L, Liu Q. Precipitation variability in North-east China from 1961 to 2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(1-2): 67-76.
- [37] Chen J, Wen Z, Wu R, et al. Influences of northward propagating 25-90-day and quasi-biweekly oscillations on eastern China summer rainfall [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(1-2): 105-124.
- [38] Ballesteros J, García-Llamas C, Ramirez M C, et al. Low relative humidity increases haploid production in durum wheat X maize crosses [J]. *Plant Breeding*, 2010, 122(3): 276-278.

Change characteristics of maize production potential under the background of climate change in China

ZHOU Meijun¹, LI Fei^{1,2*}, SHAO Jiaqi¹, YANG Haijuan¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China)

Abstract: Maize is China's largest food crop. Exploring the temporal and spatial characteristics of maize production potential in the context of climate change is of great significance for China to effectively adapt to climate change. This study combined global agro-ecological zone (GAEZ) model, extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD) method, and set-pair analysis method to explore the periodic fluctuation characteristics and long-term trend of maize production potential in China and analyzed the process of spatial pattern change. The results show that China's maize production potential increased during 1960–2010, from 910 million tons in the 1960s to 945 million tons in the 2000s. On the interannual scale, China's maize production potential mainly fluctuated in the quasi-three-year and quasi-five-year periods; on the interdecadal scale, there were quasi-10-year and quasi-20-year fluctuation periods. The quasi-three-year periodic fluctuation was the most important feature of the long-term change of maize production potential, which was mainly affected by the change of annual precipitation. Spatially, maize growing areas were mainly concentrated in the region east of Jiagedaqi–Xilinhot–Linhe–Xining–Tianshui–Zhongdian. During the 1960s–2000s, the maize production potential boundary moved in the northeastern part of China and along the Linhe–Xining line. The trend of change of maize production potential in the North China Plain, Liaohe Plain, and Sichuan Basin showed strong consistency; however, the change process in the Songnen Plain, Sanjiang Plain, Guanzhong Basin, and the middle and lower reaches of the Yangtze River was the opposite of the above. In both types of regions, the changes in maize production potential were significant, and the direction of change was alternating on the interdecadal scale.

Keywords: maize production potential; periodic fluctuations; spatial pattern; climate change; China