

引用格式:罗海平,邹楠,胡学英,等. 1980-2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1234-1247. [Luo H P, Zou N, Hu X Y, et al. Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China, 1980-2019[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1234-1247.] DOI: 10.18402/resci.2021.06.14

1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率

罗海平¹, 邹楠¹, 胡学英², 王圣云¹

(1. 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330031; 2. 中共江西省委党校, 南昌 330108)

摘 要:随着全球性极端气候频发, 粮食生产安全越来越受到气候变化的威胁。在此背景下, 实现农业气候资源的高效持续利用意义重大。粮食主产区是粮食安全保障的核心区域, 本文应用逐级订正的机制法模型测算了1980—2019年中国粮食主产区玉米、水稻、小麦三大主要粮食作物的气候生产潜力, 并应用重心迁移模型分析了粮食主产区186个地级市现实作物生产水平与气候生产潜力的时空属性, 在市域尺度上评估了农业气候资源利用效率。研究得出: ①1980—2019年粮食主产区玉米、水稻、小麦气候生产潜力的倾向率分别为-156.80、68.82、121.92 kg/(hm²·10 a); ②玉米气候生产潜力高值区和低值区范围均缩小, 水稻气候生产潜力空间结构较为稳定, 小麦气候生产潜力高值区范围扩大; ③主要粮食作物气候生产潜力的重心迁移距离均小于现实迁移距离, 并呈同向化特征; ④黄淮海农业区、东北农业区、西南农业区等地主要粮食作物气候资源利用率较高, 长江中下游农业区等地气候资源利用率较低。对此, 应调整粮食生产重心, 缓解气候条件较差地区的粮食生产压力, 挖掘气候资源丰富地区的气候生产潜力, 全面提高粮食主产区气候资源利用效率。

关键词:气候生产潜力; 中国粮食主产区; 农业气候资源利用效率; 重心迁移; 粮食作物; 机制法

DOI: 10.18402/resci.2021.06.14

1 引言

农业气候资源主要包括光资源、热量资源和水分资源^[1]。光、热、水资源的数量及相互关系构成了农作物生长发育的基本自然条件, 农业气候资源关系作物产量的高低和品质的优劣^[2]。随着气候变化对粮食生产的影响加剧, 中国农业气候资源的时空格局发生了深刻变化, 光、热、水资源的时空变化影响农业资源利用效率, 并最终影响到粮食安全^[3]。因此, 在全球共同应对气候变化的背景下, 如何衡量和评价农业气候资源利用效率, 实现农业气候资源的高效持续利用是粮食生产安全保障的重要前提。

学界关于农业气候资源利用效率的研究主要集中于气候资源的配置状态变化及其与粮食生产的适应程度等领域。气候生产潜力指除气候条件外其他条件都得到满足的情况下, 仅由农业气候资源决定的单位面积土地上作物的生物学产量最大值^[4]。气候生产潜力是农业气候资源配置优劣的有效衡量指标。为此, 学界多利用气候生产潜力来评价和评估农业气候资源利用效率。具体方法主要有两种: ①以气候生产潜力占气候资源的比率衡量单一气候资源的作物产出效率。采用此方法, 王晓煜等^[5]研究了中国东北地区6种主要农作物的光能利用效率和降水利用效率; 崔读昌^[6]研究了全国

收稿日期: 2020-05-06, 修订日期: 2020-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061026); 江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD20111); 江西省社会科学基金项目(20MJ02)。

作者简介: 罗海平, 男, 四川南充人, 副研究员, 研究方向为粮食与生态安全。E-mail: lhp6322@126.com

通讯作者: 王圣云, 男, 山西河曲人, 研究员, 研究方向为福祉地理学。E-mail: wangshengyun@163.com

各省区粮食作物的光能、热量和降水量利用率;钱锦霞等^[7]研究了山西省玉米作物的光能、热量和降水量利用率。②以实际单产占气候生产潜力的比率衡量当时当地农业生产条件下能实现的气候生产潜力程度。采用此方法,高素华等^[8]研究了中国三北地区12个省(市)6种粮食作物的气候资源利用率;王宗明等^[9]研究了松嫩平原玉米、水稻和大豆3种粮食作物的气候资源利用率;段晓凤等^[10]研究了黑龙江省黑土区主要作物的资源组合利用率。相较单一气候资源的利用率研究,实际单产占气候生产潜力的比率能更综合地反映气候变化对粮食生产的影响,也能更直观地揭示中国现实粮食生产中的气候资源利用效率问题。

纵观现有文献不难发现,目前学术界对气候生产潜力与作物实际单产之间的空间联系与分异关注仍较少,且多倾向于从单一地理单元及省域尺度衡量农业气候资源利用效率,缺乏针对中国粮食主产区及地市尺度气候资源利用效率的测度与评估。根据国家财政部2003年发布的《关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见》,粮食主产区是中国粮食生产的核心区域,包括了河南、湖北、安徽、四川、河北、湖南、吉林、内蒙古、江西、辽宁、黑龙江、江苏、山东等13个省(区)。粮食主产区是中国重要的商品粮供应基地,主要种植的粮食作物包括玉米、水稻和小麦等,粮食产量占全国粮食产量的78.89%(2019年)。为此,本文测算1980—2019年粮食主产区玉米、水稻和小麦3种主要粮食作物的气候生产潜力,并基于13个粮食主产省(区)186个地级市的作物单产数据,对比分析粮食主产区气候生产潜力与实际单产在时空动态上的联系与分异,衡量和评价各地级市主要粮食作物的农业气候资源利用效率。通过研究以期发现气候变化背景下中国粮食生产存在的气候资源利用问题,厘清粮食增产潜力空间的区域差异,为中国应对气候变化、因地制宜实现农业气候资源可持续高效利用

提供科学依据和政策参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

13个粮食主产省(区)如图1所示。1980—2019年的降水量、日照时长、日均温、10 m处平均风速等在内的逐日气象数据均源自国家气象局的中国气象科学数据共享服务网。气象站点选择上,经过数据筛选和剔除,选择了中国粮食主产区内数据较为完备的341个气象站点。如图1所示,站点分布集中度整体呈现自东南向西北递减的特征,其中内蒙古自治区最为分散。186个地级市玉米、水稻、小麦的实际单产数据源自13个粮食主产省(区)的统计年鉴及农业(农村)统计年鉴。由于大部分省(区)自1995年才开始统计粮食单产数据,考虑到数据的完整性和可比性,选取了1995年、2000年、2010年、2018年4个年份收集并整理单产数据。表1显示了粮食主产区各省气象站点的分布数量及2019年各

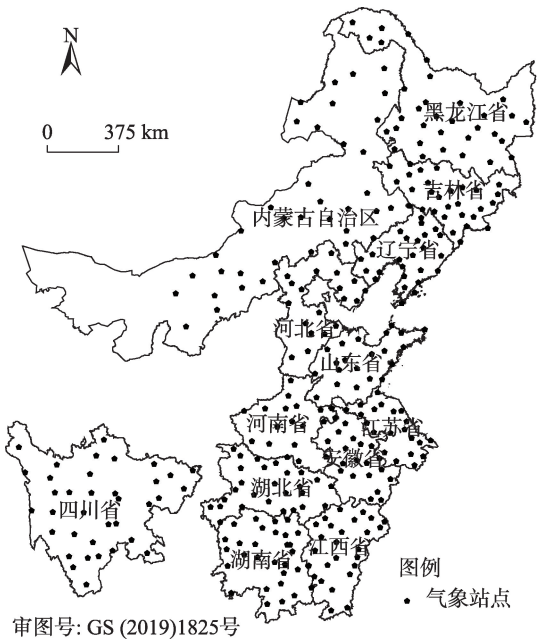


图1 研究区与气象站点

Figure 1 The study area and meteorological stations

表1 2019年粮食主产区粮食播种面积及气象站点数量

Table 1 Grain planting area and the number of meteorological stations in the main grain production areas of China, 2019

省(区)	安徽	河北	河南	黑龙江	湖北	湖南	吉林	江苏	江西	辽宁	内蒙古	山东	四川
粮食播种面积/千hm ²	7287	6469	10735	14338	4609	4616	5645	5381	3665	3489	6828	8313	6279
气象站点数量/个	21	19	17	34	27	29	29	21	26	25	36	21	36

省粮食播种面积。由于气象站点的选址要求四周空旷平坦,避免局部地形对气象观测的影响,总体来看符合中国粮食作物种植区域分布规律,因而选取以上气象站点的地面观测数据作为本文气候生产潜力的测算依据具有一定的代表性和精准度。

2.2 研究方法

2.2.1 作物生长期的划分与确定

气候生产潜力测算的时间范围为玉米、水稻、小麦作物的田间生长全生育期实际时间。鉴于粮食主产区地理跨度较大,各地玉米、水稻和小麦等粮食作物的种植种类不同,作物生育期具有显著地域差异。为此,研究根据《中国综合农业区划》中确定的九大一级农业区,将粮食主产区按省域划入其中五大农业区(表2)。从作物种植结构上看,东北区、内蒙古区种植春小麦,其余农业区种植冬小麦;黄淮海区种植春、夏玉米,其余农业区种植春玉米;长江中下游区种植双季稻,其余农业区种植一季稻^[1]。表2显示了粮食主产区各农业区玉米、小麦、水稻3种主要粮食作物的全生育期分布情况。

2.2.2 气候生产潜力计算方法

研究采用逐级订正的机制法模型计算气候生产潜力,计算公式如下^[9]:

$$Y_3 = Y_1 \cdot F(T) \cdot F(P) = Y_2 \cdot F(P) \quad (1)$$

式中: Y_3 为气候生产潜力; Y_1 为光合生产潜力; $F(T)$ 为温度订正函数; $F(P)$ 为水分订正函数; Y_2 为

光温生产潜力。光合生产潜力 Y_1 是指理想栽培状态下,仅由太阳辐射量决定的一个地区单位面积土地上作物最大可能产量。计算公式如下^[9]:

$$Y_1 = \sum Q_i \cdot E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varphi \cdot f(L) \cdot (1-a) \cdot (1-b) \cdot (1-\mu) \cdot (1-\eta) \cdot (1-\gamma) \cdot (1-\kappa)^{-1} \cdot (1-\lambda)^{-1} \cdot H^{-1} \quad (2)$$

式中: $\sum Q_i$ 为投射到单位面积上的太阳总辐射量,辐射量的计算公式参考了对中国太阳辐射计算的已有研究成果^[12]; E 为收获系数; α 为作物对光合有效辐射的吸收率; β 为光合有效辐射比率; φ 为光合作用量子转化效率; $f(L)$ 为叶面积时间变化动态订正函数(取整个生育期平均值); a 、 b 分别为作物群体的反射率、漏射率; μ 为作物非光合器官对太阳辐射的无效吸收率; η 为超过光饱和点的光的比率; γ 为光合产物中呼吸损耗比率; κ 为成熟作物含水率; λ 为作物灰分率; H 为能量转换系数。上述光合生产潜力测算所需的全部参数在不同农业区具有普适性,但不同作物间有差异^[11,13-15]。所有粮食主产区水稻、小麦、玉米光合生产潜力测算所需主要参数取值参考许艳等^[13],收获系数取值参考曹卫星^[16],具体取值见表3。

光温生产潜力 Y_2 是指在理想栽培状态下,由太阳辐射和温度共同决定的一个地区单位面积土地上作物的最大产量。利用温度订正函数 $F(T)$ 修订光合生产潜力后得到光温生产潜力,温度订正函数 $F(T)$ 的计算公式如下^[9]:

表2 粮食主产区主要粮食作物全生育期

Table 2 Growth period of major grain crops in the main grain production areas of China

农业区	包含省(区)	玉米	小麦	水稻
西南区	四川	5—9月	10月—次年5月	5—9月
东北区	黑龙江、吉林、辽宁	5—9月	4—7月	5—9月
黄淮海区	河北、山东、河北	5—9月	10月—次年5月	5—9月
长江中下游区	湖北、湖南、江西、安徽、江苏	5—9月	10月—次年5月	4—10月
内蒙古区 ^a	内蒙古	5—9月	4—7月	5—9月

注: a. 九大一级农业区中,内蒙古及长城沿线区包含内蒙古东部,甘新区包含内蒙古西部,为便于计算本文将这两部分合并为内蒙古区。

表3 光合生产潜力计算公式参数取值

Table 3 Values of parameters of photosynthetically potential productivity

作物	E	$\alpha/\%$	$\beta/\%$	$\varphi/\%$	$f(L)$	$a/\%$	$b/\%$	$\mu/\%$	$\eta/\%$	$\gamma/\%$	$\kappa/\%$	$\lambda/\%$	$H/(MJ/kg)$
水稻	0.43	90	49	22	0.56	6	8	10	5	33	14	8	16.90
玉米	0.40	100	49	22	0.58	8	6	10	1	30	15	8	17.20
小麦	0.43	85	49	22	0.50	10	7	10	5	33	14	8	17.58

2021年6月

$$F(T)=\begin{cases} 0, & \bar{T}<T_1\text{或}\bar{T}>T_2 \\ \frac{(\bar{T}-T_1)(T_2-\bar{T})^B}{(T_0-T_1)(T_2-T_0)^B}, & T_1\leq\bar{T}\leq T_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $B=\frac{T_2-T_0}{T_0-T_1}$; T_1 、 T_0 、 T_2 分别为作物不同生长发育时期的下限温度、最适温度、上限温度; \bar{T} 为不同生长期内的平均温度。作物生长发育主要可分为苗期(播种-移栽)、营养生长期(移栽-拔节)、营养生殖并进期(拔节-抽穗)、开花灌浆期(抽穗-乳熟)和成熟期(乳熟-成熟)5个阶段。不同地区不同作物各生育期的三基点温度不同,其中内蒙古区参照东北区三基点温度进行取值,具体取值见表4。

利用水分订正函数 $F(P)$ 修订光温生产潜力后得到气候生产潜力 Y_3 , 水分订正函数 $F(P)$ 的计算公式如下^[15]:

$$F(P)=\begin{cases} 1, & P\geq ET_m \\ \frac{P}{ET_m}, & 0<P<ET_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 为各生长期降水量; ET_m 为各生长期作物需水量, $ET_m=w\cdot ET_0$, 其中 w 为作物系数, 具体取值如表5所示; ET_0 为最大可能蒸散, 可应用FAO推荐的Penman-Monteith公式计算得到^[18]。

2.2.3 倾向率及显著性检验

倾向率用于量化气候要素在一段时间内的增减变化趋势。本文运用倾向率分析粮食主产区各气象站点气候生产潜力1980—2019年的时间变

化情况。倾向率计算公式如下^[22]:

$$y=c+dt \quad (t=1, 2, \dots, 40) \quad (5)$$

式中: y 表示样本量为40的某一站点气候生产潜力; t 表示相对应的时间; c 、 d 分别为回归常数和回归系数。对此一元线性回归方程进行最小二乘法估计, 回归结果中定义 $d\times 10$ 为倾向率。研究采用相关系数检验法对回归结果进行显著性检验, 在通过0.05水平显著性检验的情况下, 若 $d>0$, 为显著上升; 若 $d<0$, 为显著下降。未通过显著性检验为线性趋势不显著。

2.2.4 重心迁移模型

重心模型是研究物质和能量要素空间变动的常用方法, 其中“地理重心”能较为直观地反映研究对象的空间分布特征, “重心迁移”则能反映空间现象的“高密度”部位及其位移规律。本文将重心迁移模型用于研究气候生产潜力与实际单产的时空变迁分析, 公式如下^[23]:

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n (G_{ij} \cdot x_i) / \sum_{i=1}^n G_{ij} \quad \bar{z}_j = \sum_{i=1}^n (G_{ij} \cdot z_i) / \sum_{i=1}^n G_{ij} \quad (6)$$

式中: G_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$) 为粮食主产区第 i 个地级市单元第 j 年的要素值; (x_i, z_i) 为第 i 个地级市单元的空间区位; (\bar{x}_j, \bar{z}_j) 为粮食主产区某要素第 j 年的重心坐标。

2.2.5 气候资源利用率

本质上看, 气候生产潜力是单位面积土地上雨养(灌溉)条件下的潜在产量。而在此基础上考虑

表4 粮食主产区主要粮食农作物各生育期的三基点温度

Table 4 Cardinal temperatures of different developmental stages of major crops in the main grain production areas of China

农业区	作物	苗期/℃			营养生长期/℃			营养生殖并进期/℃			开花灌浆期/℃			成熟期/℃		
		T_1	T_0	T_2	T_1	T_0	T_2	T_1	T_0	T_2	T_1	T_0	T_2	T_1	T_0	T_2
黄淮海区 ^[14]	水稻	13.0	29.0	40.0	14.0	27.5	35.0	15.0	30.0	37.0	21.0	29.0	35.0	14.0	24.0	32.0
	玉米	10.0	24.0	38.0	18.0	25.0	35.0	18.0	27.0	35.0	16.0	23.0	30.0	16.0	23.0	30.0
	小麦	4.0	16.5	33.5	1.0	11.0	25.0	9.0	16.0	32.5	10.0	21.0	31.0	10.0	21.0	31.0
长江中下游区 ^[13]	水稻	9.0	21.0	28.0	12.5	25.0	32.0	15.0	27.8	33.0	15.0	26.3	33.0	10.5	19.3	30.0
	玉米	8.0	20.0	27.0	11.5	24.5	30.0	14.0	27.0	33.0	14.0	25.5	32.0	10.0	19.0	30.0
	小麦	5.0	18.0	27.0	7.0	24.0	30.0	14.0	27.0	33.0	14.0	25.0	33.0	10.0	18.0	30.0
西南区 ^[13,16]	水稻	11.0	25.8	45.0	14.0	27.5	35.0	16.0	28.5	40.0	19.0	28.5	35.5	14.0	25.5	35.0
	玉米	8.0	20.0	27.0	11.5	24.5	30.0	14.0	27.0	33.0	14.0	25.5	32.0	10.0	19.0	30.0
	小麦	1.5	19.5	33.5	1.5	13.5	29.0	9.5	15.3	33.5	10.0	21.0	32.5	10.5	20.0	33.5
东北区和内蒙古区 ^[15,17]	水稻	9.0	21.0	28.0	12.5	25.0	32.0	15.0	27.8	33.0	15.0	26.3	33.0	10.5	19.3	30.0
	玉米	8.0	20.0	27.0	11.5	24.5	30.0	14.0	27.0	33.0	14.0	25.5	32.0	10.0	19.0	30.0
	小麦	0.0	21.0	32.0	3.0	21.5	33.0	3.3	24.5	35.0	8.0	25.5	35.0	8.0	25.5	35.0

表5 粮食主产区主要粮食作物各生育期的作物系数

Table 5 Crop coefficient of different developmental stages of major crops in the main grain production areas of China

农业区	作物	苗期	营养生长期	营养生殖并进期	开花灌浆期	成熟期
黄淮海区 ^[19]	水稻	1.10	1.21	1.28	1.27	1.02
	玉米	0.60	1.08	1.57	1.23	1.23
	小麦	0.63	0.69	0.94	1.29	0.60
长江中下游区 ^[13]	水稻	1.13	1.30	1.20	1.00	1.00
	玉米	0.40	0.78	1.13	0.88	0.68
	小麦	0.35	0.75	1.13	0.70	0.23
西南区 ^[13,20]	水稻	1.07	1.22	1.30	1.34	1.21
	玉米	0.79	1.78	1.18	0.95	1.09
	小麦	0.35	0.75	1.13	0.70	0.23
东北区和内蒙古区 ^[15,21]	水稻	0.94	1.32	1.34	1.20	1.00
	玉米	0.38	0.75	1.22	1.10	0.60
	小麦	0.76	0.77	1.11	1.16	0.46

土壤、氮肥、农户行为、农业技术等要素后则为实际单产。因此,实际单产占气候生产潜力的比率可以反映出当前农业栽培管理和投入水平下所实现的潜在产量的水平,即农业气候资源利用率。同时,光、温、水气候资源是不易改变的农业生产资源条件,农业气候资源利用率就是实际生产中通过改良土壤、采用良种良法等农业技术方法而实现的资源效率,这样就可以反映出不同地区不同作物的增产空间和农业技术水平。计算公式如下^[10]:

$$R = RP/Y_s \quad (7)$$

式中: R 为气候资源利用率; RP 为主要粮食作物的实际单产。

为进一步观察农业气候资源利用效率的市域空间差异,分别计算出1995年、2000年、2010年、2018年4个年份粮食主产区186个地级市实际单产和气候生产潜力的均值。计算各市实际单产大于均值的年份数,当年份数 ≥ 3 为高产区,年份数 < 3 则为低产区。计算各市气候生产潜力大于均值的年

份数,当年份数 ≥ 3 为高潜力区,年份数 < 3 则为低潜力区。同是高产区和高潜力区时,定义为气候资源高配合区;同是低产区和低潜力区时,定义为气候资源低配合区;既是高产区又是低潜力区时,定义为气候资源高利用区;既是低产区又是高潜力区,定义为气候资源低利用区。

3 结果与分析

3.1 气候生产潜力时空动态分析

3.1.1 时间演变分析

表6为粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力的测算结果。1980—2019年粮食主产区气候生产潜力平均值玉米>水稻>小麦,这与其他学者的研究结果基本一致^[11,13,15]。究其原因主要有两点:①玉米作为C4作物相比水稻、小麦等C3作物有较强的光合作用,因而光合生产潜力及光温生产潜力较高;②水稻相较玉米对水分的需求量更大,而中国粮食主产区降水分布极不均衡,内蒙古、东北等地区的严重缺水限制了水稻气候生产潜力的进一步提升。与已有研究结果相比,粮食主产区三大主要粮食作物的气候生产潜力相较全国平均水平更高,同时也较大部分其他省区高,这符合中国粮食生产的实际情况。其中,粮食主产区玉米气候生产潜力测算结果与松嫩平原较为接近^[9],远低于江苏省沿海地区^[13],较高于全国春、夏玉米种植区^[11]、河南省^[24]、四川盆地^[25]及淮河流域^[14]。粮食主产区水稻气候生产潜力测算结果同样与松嫩平原较为接近^[9],较低于江苏省沿海地区^[13],较高于四川盆地^[25]、全国一季稻种植区、全国双季早稻种植区、全国双季晚稻种植区^[11]及淮河流域^[14]。粮食主产区小麦气候生产潜力测算结果与安徽省较为接近^[26],较高于江苏省沿海地区^[13]、淮河流域^[14]、四川盆地^[25]、黄淮冬麦区、北部冬麦区、西南冬麦区及长江中下游冬麦区^[27]。

1980—2019年,粮食主产区玉米气候生产潜力

表6 1980—2019年粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力时间演变特征值

Table 6 Statistical characteristics of temporal change of major grain climatic production potential in the main grain production areas of China,

1980-2019

粮食作物	平均值/(kg/hm ²)	最大值/(kg/hm ²)	最小值/(kg/hm ²)	倾向率/(kg/(hm ² ·10 a))
玉米	17334.11	19171.04	15548.65	-156.80
水稻	16794.49	18899.59	14429.69	68.82
小麦	12458.63	14103.35	10993.88	121.92

显著下降,而水稻和小麦的气候生产潜力显著上升。图2显示了三大主要粮食作物的具体波动情况。①玉米:波动—下降—回升。1980—1994年玉米气候生产潜力波动较为平缓,总体围绕17500 kg/hm²上下浮动。而1994—2003年下降了14.08%,下降幅度较大,2003年后有所回升,但上升幅度有限,不能抵消之前10年下降期的负面影响。②水稻:大幅波动—小幅波动。1980—2000年水稻气候生产潜力波动较为明显,最大值与最小值之间差距达3280.92 kg/hm²,2000年后波动幅度有所收缩,主产区水稻气候生产潜力逐渐趋向稳定。③小麦:波动上升—波动回落。1980—1998年小麦气候生产潜力增长了10.41%,其中1988—1998年区间段波动幅度较大,为主要的增长时间段,1998年达到整个测算时间段内的最高值。1999—2019年小麦气候生产潜力下降了14.02%,虽然有所回落,但此区间内小麦气候生产潜力相较玉米和水稻波动幅度更小,表明小麦气候生产潜力具有较好的稳定属性。综上,粮食主产区玉米、水稻和小麦气候生产潜力的时间演变特征与不同地区、不同研究时段的大部分研究结果具有高度的一致性^[11,24,25,27],可见玉米气候生产潜力呈下降趋势、水稻和小麦呈上升趋势在空间上具有普遍性,在时间上具有持续性。

主要粮食作物气候生产潜力时间演变呈现上述特征源于中国气候资源的变化,即日照资源减少、温度资源增长趋势明显、水分资源表现出一定增长趋势。1980—2019年粮食主产区日照时长的倾向率为-0.075 h/10 a。有研究指出,大气中气溶胶含量的显著上升会导致太阳总辐射强度的下降

和日照时长的减少,对主要农业区的农作物生长发育和农产品质量具有重要影响^[28]。因而,中国粮食主产区的粮食生产将受到来自日照减少的严重威胁。1980—2019年粮食主产区平均温度上升了1.85℃,倾向率为0.29℃/10 a。气候变暖在不考虑高温低温胁迫的情况下有利于气候生产潜力的上升,尤其是对水稻而言。但气候变暖也拉大了生育期内平均气温与玉米生长最适气温之间的差距,结合日照资源减少的现实,成为玉米气候生产潜力下降的主要原因。1980—2019年粮食主产区年平均降水量波动明显,倾向率为20.078 mm/10 a,总体来看呈现一定的增长趋势,但空间分布不均的问题愈发严重。总的来说,光、温、水资源综合作用下中国气候变化形势利于粮食主产区水稻和小麦气候生产潜力增长,不利玉米气候生产潜力增长。

3.1.2 空间结构分析

运用Kriging空间插值方法更直观地反映粮食主产区气候生产潜力的空间结构。图3可以看出粮食主产区主要粮食作物的气候生产潜力均呈现自东南向西北递减的空间结构特征,且水稻和小麦的梯度递减特征相对玉米更明显。水分是影响中国粮食气候生产潜力及产量的首要因素^[14,24,29],因而气候生产潜力的空间结构与中国水资源分布情况相似度较高。并且,小麦和水稻为C3作物,其蒸腾系数明显高于作为C4作物的玉米,更高的需求要求使得小麦和水稻的气候生产潜力分布更贴近现实的土壤水分含量分布。①粮食主产区玉米气候生产潜力可大致以吉林省中心位置和四川省中心位置的连线为界,界线以南的潜力显著高于界线以

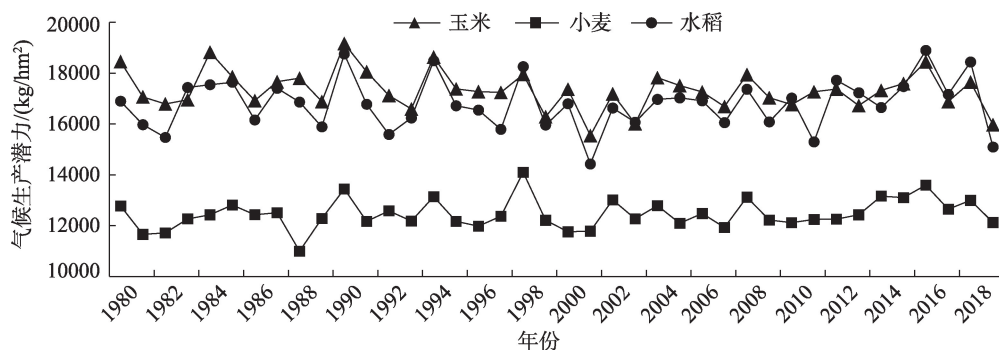


图2 1980—2019年粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力时间演变

Figure 2 Temporal change of major grain climatic production potential in the main grain production areas of China, 1980-2019

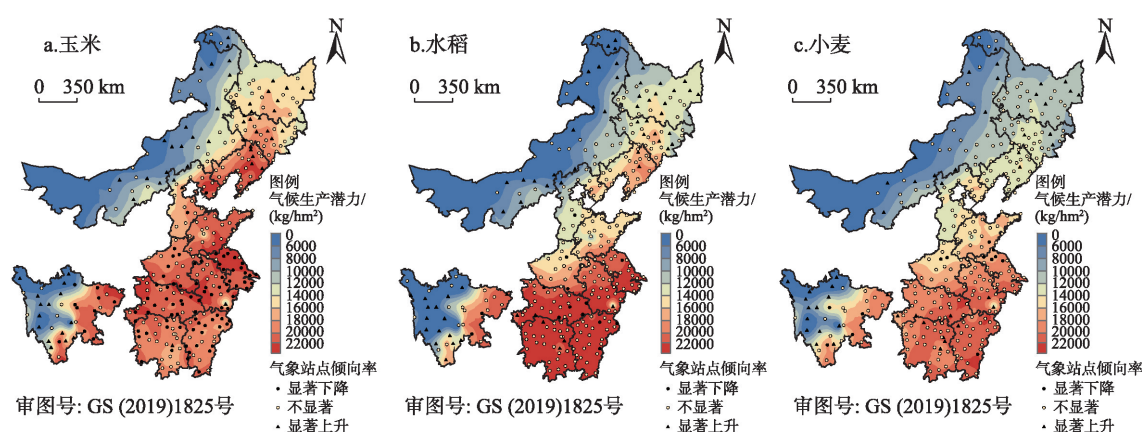


图3 1980—2019年粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力空间结构及演化

Figure 3 Spatial structure and change of major grain climatic production potential in the main grain production areas of China, 1980-2019

北,因而根据此界线可将粮食主产区大致划分为玉米播种气候适宜区和玉米播种气候不适宜区。②粮食主产区水稻气候生产潜力高值区和低值区的分布较为集中,其中,长江中下游农业区的水稻气候生产潜力较高,超过22000 kg/hm²,主要原因在于长江中下游区播种双季稻,作物生育期较长,且该地在季风气候作用下温度和降水的配合较好,利于水稻生长;内蒙古西北部和四川西部位于干旱半干旱地区,水稻生长过程中缺水严重,因而气候生产潜力较低。③粮食主产区小麦气候生产潜力自东南向西北梯度递减特征十分明显,高值区和低值区范围均较小,阶梯状的空间分布结构表明粮食主产区小麦生长的气候适宜性从沿海到内陆逐渐减弱。

为方便把握主要粮食作物气候生产潜力空间结构的演化规律,统一定义气候生产潜力高于22000 kg/hm²为高值区,低于6000 kg/hm²为低值区。具体情况如下:①玉米:1980—2019年粮食主产区玉米气候生产潜力的高值区和低值区范围均在缩小,尤其是2010年后此趋势更为明显。其中,高值区范围由1980年的包括四川东部、河北南部、辽宁、山东及长江中下游地区为主,逐渐转变为2019年的集中在山东半岛。341个气象站点中有157个气候生产潜力倾向率通过了显著性检验,其中,91个站点表现为显著下降,集中在长江中下游农业区和四川东部的“原高值区”。66个站点表现为显著上升,集中在内蒙古、四川西部和东北地区等低值区和中间值区域。②水稻:1980—2019年粮食主产区水稻气候生产潜力空间结构大体保持不

变,倾向率不显著的气象站点占比73.90%。显著上升的站点占比20.53%,且主要集中在四川西部、内蒙古及东北地区等低值及中间值区域,使得空间差异性有所减弱。③小麦:1980—2019年粮食主产区小麦气候生产潜力表现为高值区范围扩大,由1980年零散分布在江西、湖南小部分地区,转变为2019年集中分布在江西省大部分地区;显著上升的气象站点占比15.54%,集中在四川西部、内蒙古、东北地区及湖南东北部。总的来说,中国1980—2019年的气候变化利于粮食主产区小麦种植气候适宜区的扩张,而在一定程度上不利于玉米种植气候适宜区范围的持稳。同时,气候变化更利于四川西部、内蒙古及东北地区等地区的粮食气候生产潜力增长,有效削弱了粮食主产区气候生产潜力的空间差异性。

3.2 气候生产潜力与作物实际单产的重心迁移分析

本文选取粮食主区内共186个地级市的作物实际单产数据与气候生产潜力作对比。通过考察生产潜力与实际产量空间变化上的联系和差异,进而研究分析农业资源气候利用效率空间差异及变化产生的原因。为使气候生产潜力与作物实际单产在同一空间尺度上进行对比和比较,利用ArcGIS10.2软件将341个气象站点的气候生产潜力Kriging插值结果按地级市分区统计,选取平均值作为空间统计结果。研究结果如图4所示。

(1)通过对1995、2000、2010、2018年的考察发现,粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与实际单产水平重心迁移同向化特征明显。具体来说,玉

2021年6月

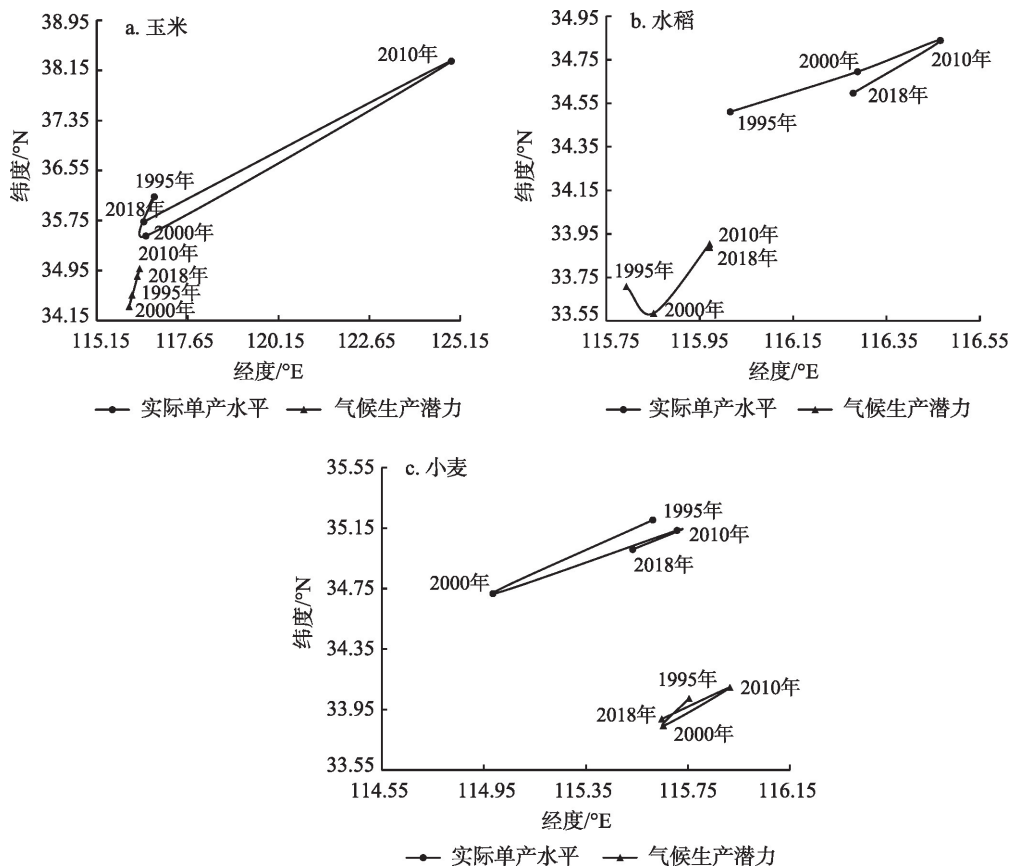


图4 1995、2000、2010和2018年粮食主产区主要粮食作物实际单产水平与气候生产潜力重心迁移

Figure 4 Gravity center changes of major grain actual yield and climatic production potential in the main grain production areas of China, 1995, 2000, 2010 and 2018

米实际单产和气候生产潜力重心迁移均表现出“先北进东移,再南退西往”的特征,尤以实际单产的变动幅度较大,变动特征较清晰;水稻实际单产和气候生产潜力重心迁移总体上均表现出“北进东移”的特征,但阶段性变动方位有所不同——实际单产先东北后西南,气候生产潜力先东南后东北;小麦实际单产与气候生产潜力的重心迁移方向完全一致,均表现出“南退西往”的特征。气候生产潜力是仅考虑气候资源要素的最大可能生产水平,是构成作物实际单产的一部分,因此二者在地理重心转移方位上大致具有同向性。但同时也说明了中国粮食生产对自然条件的依赖性较强,难以控制的气候要素仍是影响现实粮食生产的主要因素,尤其表现在小麦作物的种植上。有研究也得出了类似的结论,认为气温、降水和日照等对小麦单产具有显著影响^[30],气候变化已成为威胁中国粮食产量稳定性的主要作用因素^[31]。

(2)粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力地理重心的迁移距离相比实际单产水平较短。具体来说,从1995年和2018年的重心位置来看,玉米实际单产和生产潜力地理重心分别迁移了51.75 km、36.10 km,实际单产的重心位置在2000—2010年及2010—2018年两个时间段内的迁移距离较长;从1995年到2018年,水稻实际单产和生产潜力重心分别向东北方向迁移了25.91 km、25.93 km,整个研究期来说迁移距离几乎相等,但就各阶段的迁移特征而言,实际单产地理重心的位置变动更明显;从1995年到2018年,小麦实际单产和生产潜力重心分别向西南方向迁移了22.84 km、18.04 km,迁移距离较短,生产重心变动不大。粮食生产是一个由自然因素和经济因素共同决定的复杂过程,受到多种难以预测的不可控因素的影响,因而实际单产重心的形成和变化比气候生产潜力更具有不确定性和不稳定性。

(3)粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力的地理重心均位于实际单产水平地理重心的偏南处,玉米和水稻位于偏西南处,小麦位于偏东南处。具体来说,2018年玉米实际单产和气候生产潜力的地理重心相较1995年分别向南偏西 $53^{\circ}38'$ 、北偏东 $64^{\circ}41'$ 的方位变动,最终分别落在了山东省济宁市西北部、山东省菏泽市东南部;2018年水稻实际单产和气候生产潜力的地理重心相较1995年分别向北偏东 $18^{\circ}00'$ 和 $45^{\circ}23'$ 的方位变动,最终分别落在了河南省商丘市东北部和安徽省亳州市北部;2018年小麦实际单产和气候生产潜力的地理重心相较1995年分别向南偏西 $67^{\circ}54'$ 和 $51^{\circ}44'$ 的方位变动,最终分别落在了山东省菏泽市西部和安徽省亳州市北部。仅从气候条件考虑,中国南方地区光、热、水资源组合较好,是粮食作物播种的最适宜区,因此气候生产潜力地理重心偏南的状况符合农业气象学理论。但在实际生产中,中国北方地区农业机械化 and 水利化水平较高,耕种经验丰富,技术先进,因此单产重心靠北,与气候生产潜力产生了偏移。

3.3 气候资源利用率分析

图5为1995年和2018年粮食主产区186个地级市玉米、水稻、小麦的气候资源利用率。由于在省级统计年鉴中缺少内蒙古水稻单产及吉林小麦单产等相关数据,为确保数据来源的统一,将其定义为无数据区。另外需要说明的是,实际单产很难达到气候生产潜力水平,但研究区域内内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔市及四川阿坝、甘孜藏族自治州等地位于干旱半干旱地区,受到缺水的严重限制不利于气候生产潜力的积累,而实际生产采用地下水、人工浇灌等方式解决缺水问题,使得气候资源利用率接近或超过100%。总的来说,1995年、2000年、2010年、2018年4个年份中,粮食主产区气候资源利用率水稻>玉米>小麦,此结论与已有研究具有一致性^[8-10,32]。究其原因,中国人多地少,粮食需求尤其是稻米的需求量大,水稻单产水平普遍较高,能够实现较多的气候生产潜力,故水稻气候资源利用效率高于玉米和小麦。2018年粮食主产区大部分地区水稻气候资源利用率在14.96%~70.94%之间,

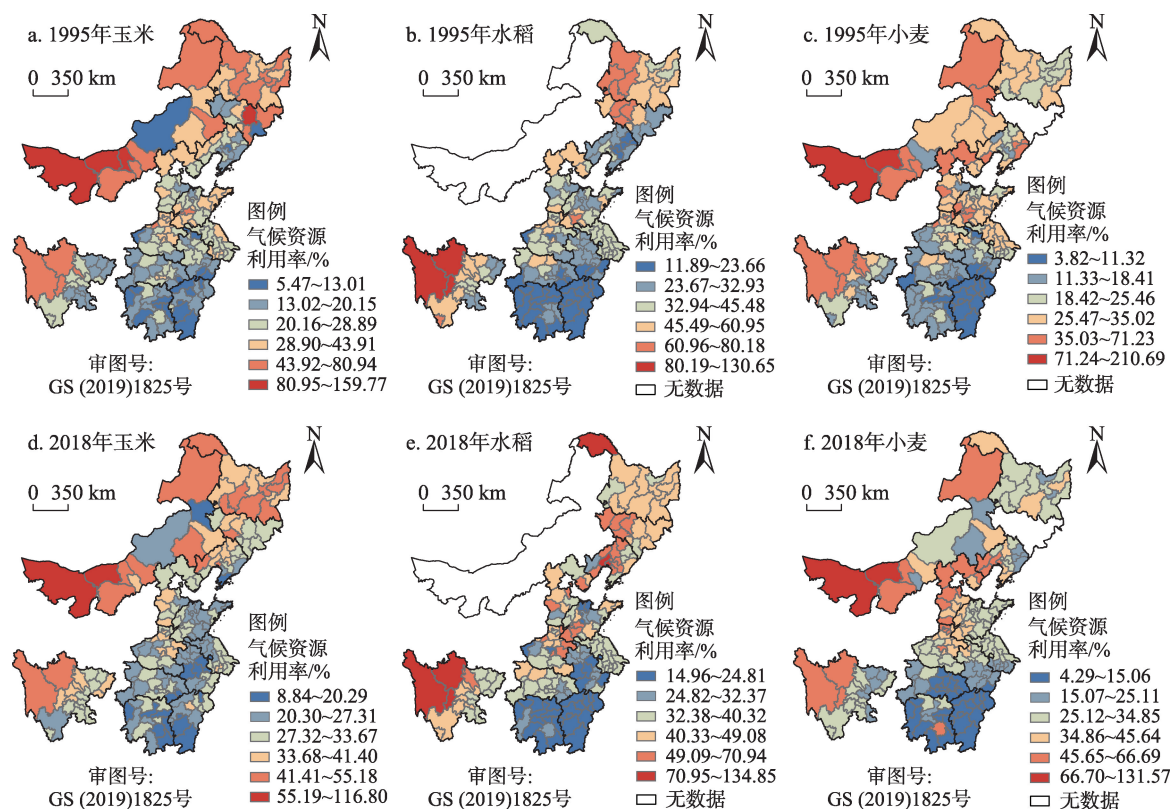


图5 1995年和2018年粮食主产区主要粮食作物气候资源利用率

Figure 5 Major grain climatic resources utilization rate in the main grain production areas of China, 1995 and 2018

2021年6月

玉米在8.84%~55.18%之间,小麦在4.29%~66.69%之间。现有相关研究大多集中在东北地区,且结果相似^[9,10,32]。相较而言,粮食主产区玉米气候资源利用率略低于东北地区,水稻气候资源利用率略高于东北地区。

相较1995年,2018年中国粮食主产区主要粮食作物气候资源利用率的增长较少,其中黄淮海区、东北区及湖南部分地级市增长幅度相对较大,而四川和内蒙古变化较小。从粮食作物来看,玉米和小麦的气候资源利用率增长幅度相对水稻更大。以玉米和小麦为代表的粮食作物气候资源利用率增长主要源于农业技术进步对作物收获的贡献和影响加大^[33]。但受限于种植制度与气候条件的不协调,以及光、热、水资源不相匹配下的相互制约、粮食生产种植结构调整不当、农业灌溉用水浪费严重等问题^[6,34],中国气候资源利用效率整体相对较低且较难在短期内实现迅速增长。具体来看:①2018年相较1995年,粮食主产区内玉米气候资源利用率增长的地级市有125个,占比67.20%,增长主要集中在辽宁北部、河北南部、四川东部及长江中下游农业区。根据3.1.2小节对气候生产潜力的研究,上述地区玉米气候生产潜力具有显著下降特征,可能是这些地区气候资源利用率有所增长的部分原因。玉米气候资源利用率下降的地级市有61个,占比32.80%,分布在四川中西部、内蒙古、黑龙江、山东等地。这些地区玉米气候生产潜力显著上升,在单产水平不能及时同步同幅度提高的情况下带来了气候资源利用率的下降。②水稻气候资源利用率增长的地级市有91个,占比48.92%,增长主要集中在

在长江中下游农业区及辽宁。这些地区在气候生产潜力下降的同时实际单产有小幅提升。水稻气候资源利用率下降的地级市有95个,占比51.08%,主要集中在黄淮海农业区。这些地区虽然气候生产潜力倾向率以不显著为主,但2018年的气候生产潜力相较1995年上升较多。③小麦气候资源利用率增长的地级市有133个,占比71.51%,主要集中在四川及黄淮海农业区。小麦气候资源利用率下降的地级市有53个,占比28.49%,主要集中在内蒙古中西部及湖北东部。小麦的气候生产潜力变化总体呈增长趋势,空间变化上高值区范围在扩大,在这种情况下,小麦气候资源利用率仍以增长为主,可能主要源于小麦单产水平的普遍提高。

从空间结构来看,西南区、东北区、黄淮海区、内蒙古区等气候资源相对有限(尤其是水分资源)的农业产区主要粮食作物气候资源利用率较高,而长江中下游区等光温水要素配合较好、气候资源相对丰富地区的气候资源利用率较低。从气候要素角度,崔读昌^[6]将其解释为水分改变了气候资源利用效率的分布结构和规律,北方凭借远高于南方的降水利用效率在农业气候资源利用率上更胜一筹。从粮食生产角度,长江中下游区作为气候生产潜力的高值区而气候资源利用效率却较低的原因主要是工业化、城镇化发展下粮食产量增长率下降,导致主产区重心向东北区、黄淮海区转移^[35]。为此,气候资源相对丰富地区的资源浪费以及气候资源相对有限地区的产粮压力严重将极不利于中国粮食生产的可持续发展。

表7为粮食主产区主要粮食作物气候资源利用

表7 粮食主产区主要粮食作物气候资源利用情况

Table 7 Condition of climatic resources utilization in the main grain production areas of China

气候资源利用情况	地级市
高配合区	巴中市、常州市、淮安市、连云港市、临沂市、南京市、南通市、日照市、泰州市、无锡市、宿迁市、徐州市、盐城市、扬州市、镇江市
低配合区	阿坝藏族羌族自治州、白城市、白山市、包头市、赤峰市、大兴安岭地区、鹤岗市、黑河市、呼和浩特市、呼伦贝尔市、三门峡市、通辽市、乌海市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、兴安盟、延边朝鲜族自治州
高利用区	德阳市、焦作市、濮阳市、泰安市、新乡市、雅安市
低利用区	安庆市、常德市、郴州市、恩施土家族苗族自治州、抚州市、赣州市、合肥市、怀化市、黄石市、吉安市、九江市、六安市、娄底市、邵阳市、神农架林区、铜陵市、咸宁市、湘西土家族苗族自治州、新余市、宣城市、益阳市、岳阳市、张家界市

注:表格根据1995、2000、2010、2018年数据均值统计得出;受篇幅所限,仅显示了玉米、水稻、小麦均表现出相同气候资源利用特征的地级市。

情况。根据2.2.5小节的定义,气候资源高配合区表明该地气候资源配合较好;低配合区表明该地农业气候资源数量及组合较差,阻碍粮食生产;高利用区表明该地充分利用农业技术和良耕良种克服了气候困难;低利用区则表明该地良好的气候条件未能带来较高的粮食单产。表7显示,粮食主产区主要粮食生产气候资源高配合区15个、低配合区17个、高利用区6个、低利用区23个。气候资源高配合区、低配合区和高利用区都易达到较高的气候资源利用效率,其中低配合区主要涵盖了内蒙古的大部分地级市,这些地方气候条件并不适宜粮食生产,加之耕地面积广阔等因素,单产水平相对较低,较高的气候资源利用效率表明农业技术的使用和投入较多,但需要注意避免出现资源过度开发的状况。主产区内低利用区较多,这些地方存在较丰裕的气候生产潜力待开发,可以采取改善农业农田管理、优化与气候相适应的作物栽培技术等方法改进气候资源利用效率。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过对粮食主产区主要粮食作物1980—2019年的气候生产潜力时空动态分析以及市域尺度上实际单产与气候生产潜力的重心迁移和农业气候资源利用效率研究,得到以下结论:

(1)粮食主产区气候生产潜力平均值玉米>水稻>小麦,玉米气候生产潜力显著下降,而水稻和小麦的气候生产潜力显著上升。1980—2019年粮食主产区玉米气候生产潜力平均值为17334.11 kg/hm²,水稻为16794.49 kg/hm²,小麦为12458.63 kg/hm²,可见光、温、水气候组合更利于玉米生长。中国粮食主产区气候变化表现为日照下降,温度和降水有所增加,更利于水稻和小麦生产潜力的提升。

(2)粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力呈现自东南向西北递减的空间结构,且水稻和小麦的梯度递减特征相对玉米更明显。玉米气候生产潜力可大致以吉林省和四川省中心位置的连线为界,划分为东南部玉米播种气候适宜区和西北部玉米播种气候不适区。水稻气候生产潜力以长江中下

游农业区和四川东部为高值区,内蒙古西北部和四川西部为低值区。小麦气候生产潜力表现出明显的自东南向西北阶梯递减特征。

(3)相对气候生产潜力重心,中国粮食主产区实际单产重心向北偏移,影响粮食生产气候资源利用效率。受到主产区重心北移的影响,长江中下游农业区粮食单产难以提升,导致了农业气候资源利用效率的偏低,从而造成气候资源的浪费;而黄淮海区、东北区需要以有限的农业气候资源完成较高的粮食生产指标,生产压力较大。在这样的背景下,形成了气候资源相对稀缺地区的气候资源利用率较高,而气候资源相对丰裕地区的气候资源利用率较低的失衡格局。

(4)中国农业气候资源的低效利用是造成中国粮食供给稳定性降低的关键因素。总体而言,粮食主产区实际单产与气候生产潜力的重心迁移轨迹表现出高度一致的特征,可见粮食生产仍存在一定程度上的气候依赖性。同时主产区内气候资源低利用区较多,存在较大的气候生产潜力待开发。在气候变化加剧的背景下,粮食供给稳定性将受到威胁。此外,水稻气候资源利用率相对较高,小麦气候资源利用率相对较低。

4.2 讨论

本文对地理跨度较大的粮食主产区进行了区域划分,较好地提高了大尺度区域范围气候生产潜力计算的精度,且从地级市尺度测算了气候资源利用效率,为中国农业技术发展提供了实证参考。但气候变化系统具有相当的复杂性,其对土壤环境的影响不容忽视,机制法模型目前只做到光、温、水层面,对于评估气候变化影响下的粮食生产需要进一步考虑更为复杂的系统环境因素。此外,基于数据可得性,本文仅选取了有稳定监测数据的341个气象站点作为研究对象,由于气象雷达架设要求周围没有遮挡,为此大多数设置在县域及城市郊外,但也有部分设置在城市高楼顶上,因此其数据会受到城市热岛效应等的影响而与粮食产区真实气候情况有细微偏离,从而可能会使计算结果存在一定偏差。未来需要将气候变化而导致的作物生长环境因素变化纳入考虑,并充分利用遥感影像,添加区域土地利用图层数据。

2021年6月

参考文献(References):

- [1] 芦鑫,殷淑燕,王水霞,等. 秦岭南北地区农业气候资源时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1866–1878. [Lu X, Yin S Y, Wang S X, et al. Temporal and spatial variation of agricultural climatic resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1866–1878.]
- [2] 石延英,郭尔静,张镇涛,等. 东北三省水稻生长季农业气候资源及障碍型冷害的时空特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1625–1635. [Shi Y Y, Guo E J, Zhang Z T, et al. Spatial-temporal characteristics of agricultural climate resources and sterile-type chilling injury in rice growing season in three provinces of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1625–1635.]
- [3] 郭建平. 气候变化对农业气候资源有效性的影响评估[M]. 北京: 气象出版社, 2016. [Guo J P. Assessment of the Impact of Climate Change on the Availability of Agricultural Climate Resources [M]. Beijing: Meteorological Press, 2016.]
- [4] 徐雨晴,於琰,周波涛,等. 气候变化背景下未来中国气候生产潜力时空动态格局[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 72–80. [Xu Y Q, Yu L, Zhou B T, et al. Temporal-spatio dynamic pattern of climatic potential production under the background of climate change in the future in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 72–80.]
- [5] 王晓煜,杨晓光,孙爽,等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091–3102. [Wang X Y, Yang X G, Sun S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food in three provinces of Northeast China under climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3091–3102.]
- [6] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 25–32. [Cui D C. Climatic resources utilization coefficient of cereal crops in China and development measures[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 25–32.]
- [7] 钱锦霞,胡良温. 山西省玉米气候资源利用效率分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 192–195. [Qian J X, Hu L W. Analysis of climatic resources utilization efficiency of maize in Shanxi Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 192–195.]
- [8] 高素华,郭建平. 提高中国三北地区气候资源利用率的对策研究[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 54–57. [Gao S H, Guo J P. An examination of the countermeasures for increasing climatic resources utilization rate in the Three Norths of China[J]. Resources Science, 1999, 21(4): 54–57.]
- [9] 王宗明,张柏,张树清,等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 1–6. [Wang Z M, Zhang B, Zhang S Q, et al. Studies on agricultural climatic potential productivity and natural resources utilization ratio in Songnen Plain of Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(1): 1–6.]
- [10] 段晓凤,张磊,张慧,等. 黑龙江省黑土区主要作物对农业资源利用率评价[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 185–189. [Duan X F, Zhang L, Zhang H, et al. Evaluation of agricultural resource utilization in the black soil region of Heilongjiang Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 185–189.]
- [11] 马润佳. 我国作物主要种植区气候生产潜力及种植适宜性分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017. [Ma R J. Climatic Potential Productivity and Planting Suitability of Main Crop Growth Areas in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.]
- [12] Wang C L, Yue T X, Fan Z M. Solar radiation climatology calculation in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 132–138.
- [13] 许艳,濮励杰,朱明. 基于作物生长期的江苏省沿海地区气候生产潜力估算[J]. 地理科学, 2015, 35(5): 658–664. [Xu Y, Pu L J, Zhu M. Calculation of climate potential productivity at coastal zone of Jiangsu Province based on crop growing period[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(5): 658–664.]
- [14] 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 J, 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.]
- [15] 刘博,杨晓光,王式功. 东北地区主要粮食作物气候生产潜力估算与分析[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(3): 57–60. [Liu B, Yang X G, Wang S G. Calculation and analysis of climate productive potential of major grain crops in Northeast China[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2012, 37(3): 57–60.]
- [16] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Cao W X. General Crop Cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [17] 刘其,刁明,王江丽,等. 滴灌春小麦生育期模拟模型研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(7): 1177–1183. [Liu Q, Diao M, Wang J L, et al. A model for simulating phenological development in drip irrigation spring wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(7): 1177–1183.]
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No.56, 1998.
- [19] 王晓东,马晓群,许莹,等. 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, et al. 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.]
- [20] 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995. [Chen Y M, Guo G S, Wang G X, et al. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1995.]

- [21] 宋常吉, 王振华, 郑旭荣, 等. 北疆滴灌春小麦耗水特征及作物系数的确定[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 58–63. [Song C J, Wang Z H, Zheng X R, et al. Determination of water consumption characteristics and crop coefficient of spring wheat under drip irrigation condition in Northern Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(3): 58–63.]
- [22] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 中国温带地区不同界限温度下农业热量资源的时空演变[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2104–2115. [Zhang X T, Pan X B, Xu L, et al. Spatio-temporal variation of agricultural thermal resources at different critical temperatures in China's temperate zone[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2104–2115.]
- [23] 王凯, 杨亚萍, 张淑文, 等. 中国旅游产业集聚与碳排放空间关联性[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 362–371. [Wang K, Yang Y P, Zhang S W, et al. Spatial correlation between the agglomeration and CO₂ emissions of China's tourism industry[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 362–371.]
- [24] 高军波, 楚冰洋, 闫军辉, 等. 1960年以来河南省玉米气候生产潜力估算与种植空间优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 245–254. [Gao J B, Chu B Y, Yan J H, et al. Estimation of climate production potential of corn and optimization of planting space in Henan Province from 1960[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 245–254.]
- [25] 庞艳梅, 陈超, 徐富贤, 等. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1661–1672. [Pang Y M, Chen C, Xu F X, et al. Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1661–1672.]
- [26] 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. [Lu Y Y, Sun W, Tang W A, et al. Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 17–30.]
- [27] 孙爽. 中国不同区域冬小麦产量潜力及资源利用效率研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [Sun S. The Potential Yield and Resource Use Efficiency for Winter Wheat in Different Regions in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.]
- [28] 方笑莹, 陈志炜, 程兆康, 等. 太阳辐射减弱对水稻光合生理特性和中微量元素积累的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1345–1351. [Fang X K, Chen Z W, Cheng Z K, et al. Effects of reduced solar radiation on photosynthetic physiological characteristics and accumulation of secondary and micro elements in paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1345–1351.]
- [29] 常明, 王西琴, 贾宝珍. 中国粮食作物灌溉用水效率时空特征及驱动因素: 以稻谷、小麦、玉米为例[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2032–2042. [Chang M, Wang X Q, Jia B Z. Driving factors and spatiotemporal differentiation of irrigation water use efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(11): 2032–2042.]
- [30] 陈帅, 徐晋涛, 张海鹏. 气候变化对中国粮食生产的影响: 基于县级面板数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2016, (5): 2–15. [Chen S, Xu J T, Zhang H P. Impact of climate change on China's grain production: An empirical analysis based on county panel data[J]. *Chinese Rural Economy*, 2016, (5): 2–15.]
- [31] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 45–57. [He K, Song H Y. China's food security under the constraints of resources and environment: Connotation, challenges and policy orientation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2021, 21(3): 45–57.]
- [32] 戴尔阜, 王昊, 吴绍洪, 等. 东北温带旱作农业主要作物生产潜力及资源利用效率评价: 以黑龙江海伦市为例[J]. 地理研究, 2007, (3): 461–469. [Dai E F, Wang H, Wu S H, et al. A method for calculating potential productivity of main crops in dry farming system as well as assessment of agricultural resources utilization in temperate zone, Northeast China: A case study of Hailun County, Heilongjiang Province[J]. *Geographical Research*, 2007, (3): 461–469.]
- [33] 李昊儒, 毛丽丽, 梅旭荣, 等. 近30年来我国粮食产量波动影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(10): 1–10. [Li H R, Mao L L, Mei X R, et al. Analysis on influencing factors of grain production fluctuation during the last 30 years in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(10): 1–10.]
- [34] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14–25. [Jin T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 14–25.]
- [35] 郑亚楠, 张凤荣, 谢臻, 等. 中国粮食生产时空演变规律与耕地可持续利用研究[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 120–131. [Zheng Y N, Zhang F R, Xie Z, et al. Research on spatial-temporal evolution of grain production and sustainable use of cultivated land in China[J]. *World Regional Studies*, 2019, 28(6): 120–131.]

Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China, 1980–2019

LUO Haiping¹, ZOU Nan¹, HU Xueying², WANG Shengyun¹

(1. Research Center of Central China Economic and Social Development, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Party School of CPC of Jiangxi, Nanchang 330108, China)

Abstract: Food production has been increasingly threatened by the frequent occurrences of global extreme climate. Under this background, it is of great significance to realize the efficient and sustainable utilization of agricultural climatic resources. The main grain production areas in China are a core region for food security of the country. This study empirically calculated maize, rice, and wheat crop climatic potential productivities in the main grain production areas of China from 1980 to 2019 by using step-correcting mechanism model, and analyzed the spatial and temporal dynamics of actual production level and climatic potential productivity in 186 cities in these areas by using a gravity center shift model. It also comprehensively assessed agricultural climatic resources utilization efficiency at the city scale. Important results are as follows: (1) Tendency rate of maize, rice, and wheat crop climatic potential productivity in the main grain production areas of China from 1980 to 2019 was $-156.80 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$, $68.82 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$, and $121.92 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$ respectively. (2) Spatial change of climatic potential productivity showed three characteristics higher and lower maize climatic potential productivity areas both narrowed; spatial structure of rice climatic potential productivity basically remained unchanged; and higher wheat climatic potential productivity area enlarged. (3) Gravity centers of actual production level and climatic potential productivity changed in the same direction and the distance of migration of climatic potential productivity gravity center was shorter than that of actual production level. (4) Agricultural climatic resources utilization efficiency was higher in the agricultural areas of the North China Plain, Northeast China, and Southwest China, and agricultural climatic resources utilization efficiency was lower in the agricultural area of the Lower Yangtze Region. Therefore, it is necessary to adjust the focus of grain production. The utilization efficiency of climatic resources in the main grain producing areas can be comprehensively improved by alleviating the pressure of grain production in areas with poor climatic conditions, and tapping the climatic potential productivity of areas with rich climatic resources.

Key words: climatic potential productivity; main grain production areas of China; agricultural climatic resources utilization efficiency; migration of gravity center; grain crops; mechanism method