

黑龙江省旱作玉米生产降水利用效率潜力演变特征

赵放^{1,2,3}, 王锐¹, 田宝星⁴, 赵慧颖⁴, 林伟楠^{5,6}, 李秀芬⁴

(1. 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2. 哈尔滨市气象局, 哈尔滨 150028;

3. 中国气象局 东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030;

5. 成都信息工程大学 大气科学学院, 成都 610225; 6. 内蒙古自治区陈巴尔虎旗气象局, 内蒙古 巴彦库仁镇 021500)

摘要:研究旱作玉米降水利用效率潜力可反映降水对其产量的贡献,对作物布局具有重要意义。利用黑龙江省 80 个气象站 1961—2017 年逐日气象资料及玉米生育期和产量资料,运用 EOF 经验正交函数、小波分析及数理统计方法,分析了旱作玉米降水利用效率潜力时空演变特征。结果显示:1961—2017 年玉米降水利用效率潜力总体呈现阶段性微升态势,振幅为 $33\sim 59\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$,且依次存在 28,15,5,8 a 周期变化,1961—1979 年和 1992—1998 年为上升阶段、1980—1991 年和 1999—2017 年为下降阶段;玉米降水利用效率潜力空间分布高值中心以黑河—齐齐哈尔东南部—大庆—哈尔滨—双鸭山—佳木斯—伊春为闭合区域,高值为黑河的五大连池,低值中心在大兴安岭地区的呼玛北部地及牡丹江市的宁安一带,高值区域内玉米降水利用效率潜力振幅变化稳定,其他区域以高值区域为中心向外侧逐渐递减;玉米降水利用效率潜力齐齐哈尔东南部—大庆—哈尔滨闭合区域尚有 $30\sim 50\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ 潜力可以挖掘,在大兴安岭地区的呼中以北地区可挖掘潜力不足 $10\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ 。不同的玉米种植区域,可采取合理密植、保墒耕作、适时施肥等措施提高玉米降水利用效率潜力。

关键词:气候资源;生产潜力;旱作玉米;黑龙江;降水利用效率

中图分类号:S513.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0345-07

Evolution Characteristics of Precipitation Use Efficiency Potentiality of Maize in Dry Farming Area of Heilongjiang Province

ZHAO Fang^{1,2,3}, WANG Rui¹, TIAN Baoxing⁴, ZHAO Huiying⁴, LIN Weinan^{5,6}, LI Xiufen⁴

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Harbin Meteorological Bureau,

Harbin 150028, China; 3. Innovation and Opening Laboratory of Eco-Meteorology in Northeast China, CMA,

Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China;

5. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

6. Chen Barag Banner Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Renhe Town, Bayan, Inner Mongolia 021500, China)

Abstract: Study on the precipitation use efficiency potentiality of maize can reflect the contribution of precipitation to its output and is of great significance to crop distribution. Based on the daily meteorological data of 80 weather stations from 1961 to 2017, maize growth period data and maize yield data, the spatial-temporal evolution characteristics of the precipitation use efficiency potentiality of maize in dry farming area were analyzed by using the methods of Empirical Orthogonal Function (EOF), wavelet transformation analysis and mathematical statistics. The results showed that the evolution characteristics of the precipitation use efficiency potentiality of maize presented a phase micro rise situation from 1961 to 2017. The amplitude was $33\sim 59\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$, and there were 28-year, 15-year, 5-year and 8-year periodic changes, respectively. It can be divided into two stages. The rising stages were observed from 1961 to 1979 and from 1992 to 1998, respectively, while decreasing stages occurred from 1980 to 1991 and from 1999 to 2017, respectively. The high value area of the precipitation use efficiency potentiality of maize was a closed area. The approximate

location includes Heihe, southeastern Qiqihar, Daqing, Harbin, Qitaihe, Shuangyashan, Jiamusi, Hegang and Yichun. The maximum value was observed in Wudalianchi, Heihe. The low value center is located in the northern part of Huma, Greater Khingan Range, and Ning'an District, Mudanjiang. In the high-value area, the amplitude of the precipitation use efficiency potentiality was stable, while in the other regions, it gradually decreased from the high-value region to the outward side. The precipitation use efficiency potentiality of maize can improved with a potential of $30\sim 50\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ in the closed area surrounded by the Southeast Qiqihar, Daqing and Harbin. But in the northern region of Greater Khingan Range, the potential promotion is less than $10\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$. In different maize planting areas, the precipitation use efficiency potentiality of maize can be improved by adopting dense planting, soil moisture conservation tillage, timely fertilization and so on.

Keywords: climatic resources; potential productivity; dry farming maize; Heilongjiang Province; precipitation use efficiency

黑龙江省地处中高纬度、地球环境变率最大的季风气候区,亦是典型的雨养农业区,气候变化非常剧烈,对作物生长影响较大^[1],作物生长季(5—9月)降雨量为 $310\sim 510\text{ mm}$,时空分布极不均匀,且与作物需水关键期之间出现严重供需错位^[2-3],是制约旱作农业区粮食生产的主要因素。黑龙江省旱作玉米生长期需水量大,在气候变暖的背景下,水分则是控制玉米生长发育主要生态因子。因此,研究旱作玉米生产降水利用效率演变特征,提高玉米产量、无效降水的有效转化已成为目前倍受关注的研究内容^[4-6]。

玉米是全球最重要的粮食作物之一,为全球 94 个国家超过 45 亿人口提供了 30% 的食物热量^[7]。玉米(*Zea mays* L)是我国第一大粮食作物,而北方地区玉米在我国玉米产业中占有举足轻重的地位,其中,黑龙江省玉米播种面积占全国玉米总播种面积的 10%,产量占全国玉米总产量的 9% 左右,玉米产量的波动不仅影响黑龙江的粮食总产量,还与国家粮食安全息息相关^[8-9]。已有研究成果表明,气温的升高和降水量的减少必然会导致干旱化程度的加重,直接导致玉米产量下降^[10-12]。黑龙江省是我国降水量减少趋势明显的地区之一^[13],气候变化背景下因降水量偏少使干旱呈现常态化,随着全球变暖,干旱对玉米的影响程度加重趋势明显^[14-15]。目前,关于旱作玉米降水利用效率的成果报道较多,一类从品种、种植方式和农技措施改变的角度研究水分利用率^[16-17],另一类从玉米实际单产和农业气候资源利用率的角度分析水分利用率^[18-19],但基于气候生产潜力的角度研究降水利用效率的成果十分鲜见。因此,本文利用黑龙江省玉米生育期数据、玉米生长季内的气象数据计算玉米气候生产潜力及降水利用效率潜力,旨在揭示旱作玉米生产降水利用效率潜力时空演变特征,明确北方地区旱作玉米对降雨量响应程度,为有效制定旱

作玉米种植规划和农业气候资源高效利用及保障粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑龙江省位于我国最东北部,北纬 $43^{\circ}26'\sim 53^{\circ}33'$,东经 $121^{\circ}11'\sim 135^{\circ}05'$,总面积 $4.73\times 10^5\text{ km}^2$ 。地势大致是西北部、北部和东南部高,东北部、西南部低,主要由山地、台地、平原和水域构成。属温带大陆性季风气候。农业界限温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $1\ 800\sim 2\ 800^{\circ}\text{C}$,年降水量为 $400\sim 650\text{ mm}$,6—8 月为集雨期,无霜期为 $100\sim 150\text{ d}$ 。以旱作为主的农业主要分布在西部的松嫩平原和东北部的三江平原,适宜玉米、水稻、大豆生产。在气候变暖的背景下,干旱是粮食安全的最大威胁。

1.2 资料来源

本文所用气象资料来源于黑龙江省气象局 83 个基本气象站,剔除观测年代不足 10 a 及数据不连续的 3 个台站的资料。最终选取 80 个气象站 1961—2017 年逐日气象资料及玉米生育期资料,各县级单元玉米产量资料,1:250 000 地理信息数据,所有资料分别来自黑龙江省气象局、统计局和国家基础地理信息中心(NGCC)(研究区气象站点分布见图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 降水利用效率潜力计算 作物降水利用效率一般为作物实际单产与作物生长季降水量总和之比^[20],而本研究把降水利用效率定义为降水利用效率潜力,即作物气候生产潜力与作物生长季降水量总和之比^[21]。计算公式:

$$\text{WUE} = Y_w / \sum R$$

式中:WUE 为玉米生长季内的降水利用效率潜力; Y_w 为玉米气候生产潜力(kg/hm^2); $\sum R$ 为玉米生长季内的降水总量(mm)。

1.3.2 气候生产潜力(Y_w)计算模型 本研究采用

联合国粮食和农业组织(FAO)推荐的逐步订正法来计算玉米气候生产潜力^[1,21-22],本研究选定玉米生长季为 5—9 月。气候生产潜力的计算公式如下:

$$\begin{aligned} Y_w &= Q \times f(Q) \times f(t) \times f(W) \\ &= Y_Q \times f(t) \times f(W) \\ &= Y_T \times f(W) \end{aligned}$$

式中: Y_w 为气候生产潜力(kg/hm^2); Q 为作物生长季(5—9 月)的太阳总辐射(MJ/m^2); $f(Q)$ 为光合有效系数; Y_Q 为单位面积光合生产力(kg/hm^2); $f(t)$ 为作物光合作用的温度订正系数; $f(W)$ 为水分订正系数; Y_T 为光温生产力(kg/hm^2)。



图 1 研究区气象站点分布

1.3.3 EOF 经验正交函数 EOF 经验正交函数^[23]又称为主分量分析方法,在对变量场特征进行分解时能将多个变量大部分信息最大限度地集中在有限个独立变量的主分量上,即将 m 个空间点 n 次观测值构成变量 $X_{m \times n}$ 分解为 p 个空间特征向量和对应的时间权重系数的线性组合: $X_{m \times n} = V_{m \times p} T_{p \times n}$

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \Delta & 0 \\ M & M & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & 0 \end{bmatrix}$$
$$A = X \cdot X^T$$
$$V^T A V = \Lambda$$

式中: V, Λ 分别是 A 阵特征向量组成的正交阵和特征值组成的对角阵。时间函数满足 $T \cdot T^T = \Lambda$, 则 $T = V^T \cdot X$ 。本文用于分析降水利用效率潜力空间变化特征。

1.3.4 小波分析方法 本文采用小波分析理论^[24-25]分析玉米气候生产潜力序列随时间的变化和周期变化。

令满足一定条件的小波函数 $\psi(t)$, 时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换或小波系数; $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数; $a > 0$ 为频率参数,反映小波周期长度; b 为时间参数,表示波动在时间上的平移。 $W_f(a, b)$ 随参数 a, b 变化。 $W_f(a, b)$ 的二维不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度(周期)下的变化特征^[23-25]。墨西哥帽小波函数形式如下:

$$\psi(t) = (1 - t^2) e^{\left(-\frac{t^2}{2}\right)}$$

为了判断各序列的主要周期,即对气候序列变化起主要作用的周期,采用小波方差检验:

$$W_p(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 dt$$

式中: $W_p(a)$ 为小波方差。在一定的时间尺度下,小波方差表示时间序列在该尺度中周期波动的强弱,对应峰值处的尺度即为该序列的主要时间尺度,即主要周期。

2 结果与分析

2.1 玉米降水利用效率潜力时间变化特征

由图 2 和表 1 可知,近 60 a 来,黑龙江省玉米降水利用率潜力变化总趋势为“M”型曲线,呈现两高两低态势,6 阶主旨方程通过了 0.001 的信度检验($p \leq 0.001$)。1961—2017 年平均玉米降水利用效率潜力为 $46.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,最大值为 $58.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,最小值 $33.4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。玉米降水利用效率潜力阶段性变化显著,1961—1979 年和 1992—1998 年为上升阶段,玉米降水利用效率潜力平均值、最大值、最小值分别为 $47.1, 58.2, 34.8, 46.7, 51.8, 38.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$;1980—1991 年和 1999—2017 年为下降阶段,玉米降水利用效率潜力平均值、最大值、最小值分别为 $43.6, 50.5, 37.8, 48.5, 58.1, 33.4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。如果将图 2“M”型曲线沿对称轴切开,1988 年为对称点,分割成两个时间段为 1961—1988 年和 1989—2017 年,前 28 a 和后 29 a 演变趋势一致,玉米降水利用效率潜力平均值后 29 a 比前 28 a 偏多 $1.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,最大值和最小值相差不大,前后两个时间段变化趋于稳定,呈现微升态势。

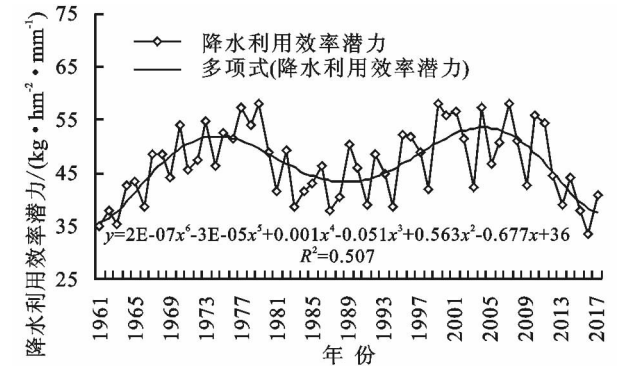
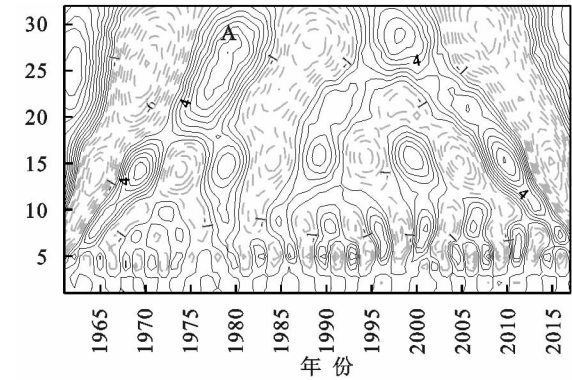


图 2 1961—2017 年玉米降水利用效率潜力变化

表 1 各阶段玉米降水利用效率潜力变化特征值

时段	kg/(hm ² ·mm)			变化特征
	WUE _{avg}	WUE _{max}	WUE _{min}	
1961—1979	47.1	58.2	34.8	上升期
1980—1991	43.6	50.5	37.8	下降期
1992—1998	46.7	51.8	38.5	上升期
1999—2017	48.5	58.1	33.4	下降期
1961—1988	46.0	58.2	34.8	一升一降
1989—2017	47.5	58.1	33.4	一升一降
1961—2017	46.8	58.2	33.4	两升两降



2.2 玉米降水利用效率潜力周期变化特征

小波分析显示,黑龙江省 1961—2017 年旱作玉米降水利用效率潜力存在不同时间尺度的周期变化特征(图 3),这种变化主要体现在 28,15,5,8 a 共 4 种时间尺度的周期变化,最高峰值为尺度和主周期依次为 28,15,5,8 a,且在其左右的周期振荡最强。这 4 个周期波动控制着整个时域内的旱作玉米降水利用效率潜力变化特征。

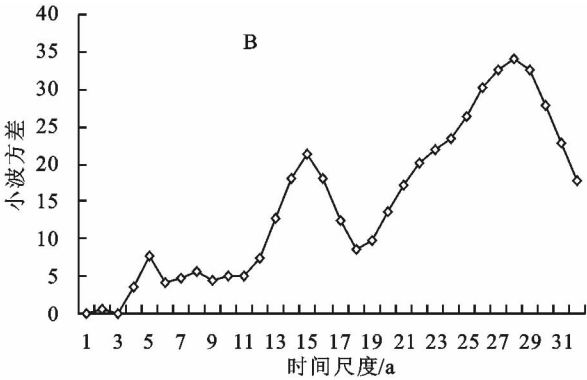


图 3 1961—2017 年旱作玉米降水利用效率潜力小波方差

2.3 玉米降水利用效率潜力空间变化特征

EOF 分析得出研究区玉米降水利用效率潜力的前 3 个特征向量的方差贡献依次为 44.5%,10.9%,7.6%,累计方差贡献为 63.0%,因此,可以反映该区域玉米降水利用效率潜力的空间分布特征。第 1 特征向量方差贡献率为 44.5%,体现该区域玉米降水利用效率潜力变化的显著空间分布状态。如图 4 所示,黑龙江省玉米降水利用效率潜力呈现一致的正变化趋势,并形成闭合的高值区域,大致位置为黑河—齐齐哈尔东南部—大庆—哈尔滨—七台河—双鸭山—佳木斯—鹤岗—伊春,区内

高值中心在黑河的德都和鹤岗市附近且等值线密集,低值中心在大兴安岭地区的呼玛以北地区及牡丹江市的宁安和东宁一带,且等值线相对稀疏。高值区域玉米降水利用效率潜力振幅变化不大,其他区域以高值区域为中心向外侧逐渐递减。第 1 特征向量所对应的时间序列图 4 表征的研究区域玉米降水利用效率潜力年际趋势变化,可以看出第 1 特征向量的时间系数为 -118~139,绝对值最大,表示这一时刻玉米降水利用效率潜力年际趋势变化差异较大,最大值出现在 2001 年,最小值出现在 1966 年。

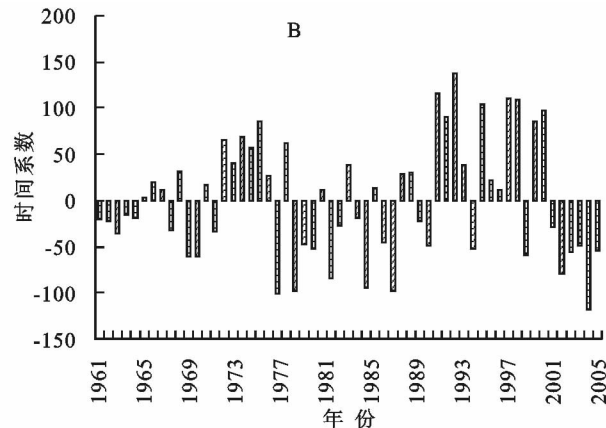
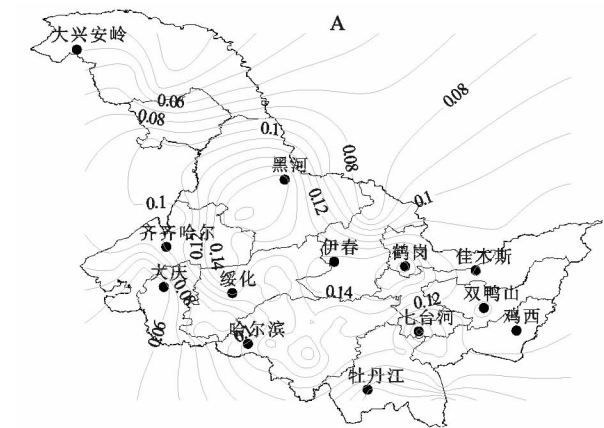


图 4 黑龙江省玉米降水利用率潜力第 1 特征向量和时间系数

第 2 特征向量方差贡献率为 10.9%,也是研究区玉米降水利用率潜力一种较显著的空间分布状态。如图 5 所示,黑龙江省玉米降水利用效率潜力空间分布呈现正、负相间的变化趋势,区内高值中心在克山、

龙江附近,中心特征值绝对值在 0.2 以上且等值线密集,低值中心在虎林、林口附近且等值线密集。第 2 特征向量值为正负相间,玉米降水利用效率潜力变化呈相反位相的分布型式,这种分布类型,突出呈现了

灌溉条件较差,旱作农业占有相当比重,农用耕地 $1.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,在气候变暖背景下,旱作农业的控制因子主要是降水量,其次是生长季前期的土壤水分,在基本无灌溉条件下,降水利用效率则是农田生产效果的重要评价指标^[4]。以往研究农田气候资源利用效率成果,大多采用作物实际单产与各级产量潜力的比率表征气候资源利用效果^[1],该指标能整体反映一个地区可以利用的气候资源,但不能单独针对降水利用效率进行分析,而本文选取的是王晓煜等^[21]的研究方法,计算单位面积上单位旱作玉米气候生产潜力与降水量的比值,重点揭示了旱作玉米降水利用效率潜力时空演变特征及降水量对玉米产量的贡献,为提高玉米降水利用效率和产量提供科学依据。

黑龙江省玉米降水利用效率潜力空间分布呈现闭合的高值区域,大致位置为黑河—齐齐哈尔东南部—大庆—哈尔滨—七台河—双鸭山—佳木斯—鹤岗—伊春,区内高值中心在黑河的德都和鹤岗市附近,低值中心在大兴安岭地区的呼玛以北地区及牡丹江市的宁安和东宁一带,高值区域玉米降水利用效率潜力振幅变化稳定,其他区域以高值区域为中心向外侧逐渐递减。这一趋势与东北地区作物生长季内降水量的空间分布特征一致^[26]。1961—2017年玉米降水利用效率潜力呈现阶段性微升态势,1961—1979年和1992—1998年为上升阶段,1980—1991年和1999—2017年为下降阶段,上升和下降幅度在 $33 \sim 59 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 之间,玉米降水利用效率潜力平均值后29 a比前28 a偏多 $1.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,且存在4种时间尺度的周期变化,主周期依次为28, 15, 5, 8 a。对于玉米降水利用率潜力提升空间而言,齐齐哈尔东南部—大庆—哈尔滨闭合区域尚有 $30 \sim 52 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 潜力可以挖掘,在大兴安岭地区的呼中 $[6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$ 以北地区及伊春市的乌伊岭 $[16 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$ 一带挖掘潜力较小。

玉米各生育期对水分都十分敏感,干旱是影响玉米生长发育和产量的最主要灾害,在黑龙江省玉米中晚熟品种全生育期总耗水量一般为 $500 \sim 1\,000 \text{ mm}$ ^[27],而实际作物生长季(5—9月)降雨量为 $310 \sim 510 \text{ mm}$,时空分布极不均匀,且与作物需水关键期之间出现严重供需错位^[2-3],玉米生理需水量常常亏缺,因降水量少导致干旱是制约旱作玉米农业区粮食生产的主要因素。降水又是黑龙江省旱作玉米主要水分来源^[21]。尽管研究区旱作玉米降水利用效率潜力 $[46.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$ 较东北地区 $[33 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$ 偏高^[21],但玉米降水利用效率潜力还有 $10 \sim 50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 的提升空间。要想提高玉米降水利用效率潜力,对于玉米生长严重缺水地

区,灌溉无疑是解决玉米生理干旱的有效方法,但黑龙江省自然降水量多少在短期内无法改变,又不具备大面积灌溉条件,挖掘玉米降水利用效率潜力唯一途径,只能采取农业技术措施。如可以采取改良土壤、提高地力、增加农业技术投入、加强蓄水保墒耕作、培育和推广新品种以及优化作物布局等措施^[21]。不同的玉米种植区域,可以根据玉米生长所需要的耗水量,结合短期气候预测,选择适宜品种及品种搭配布局,采用集雨种植、覆膜种植和密植种植方式,推广免耕和深松耕保水保墒技术,优化施肥和秸秆还田等增加土壤肥力措施,有效提高玉米产量及降水量利用效率^[2-3,5,16-17]。

本研究分析旱作玉米降水利用效率潜力的目的旨在了解当地玉米在雨养条件下能够达到的最高产量,在气候变暖的背景下,理想认为降水量多少及其有效利用是驱动玉米产量高低的重要因子,而没有考虑玉米生长前期土壤水分的作用、光温水资源有效匹配及其气象灾害的限制,虽然本研究结论可为黑龙江省优化农业结构布局提供参考依据,但暖干化气候对旱作农业稳产高产带来的正效应能否获得最大发挥,还需要精细的、高分辨率的数据和严谨的、多元的试验验证以及更深层面的研究。

参考文献:

- [1] 李秀芬,赵慧颖,朱海霞,等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2561-2570.
- [2] 刘化涛,黄学芳,池宝亮,等. 春玉米不同品种耗水特征及水分利用率差异分析研究[J]. 节水灌溉, 2017(4): 11-14, 18.
- [3] 魏欢欢,王仕稳,杨文稼,等. 免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(3): 461-473.
- [4] 李玉玲,张鹏,张艳,等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084-1096.
- [5] 战秀梅,宋涛,冯小杰,等. 耕作及秸秆还田对辽南地区土壤水分及春玉米水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 666-672.
- [6] 刘志娟,杨晓光,吕硕,等. 气候变化背景下东北三省春玉米产量潜力的时空特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 103-112.
- [7] Shiferaw B, Prasanna B M, Hellin J, et al. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security[J]. Food Security, 2011, 3: 307-327.
- [8] 李秀芬,陈莉,姜丽霞. 近50年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(5):

- 336-341.
- [9] 李秀芬,马树庆,宫丽娟,等.基于 WOFOST 的东北地区玉米生育期气象条件适宜度评价[J].中国农业气象,2013,34(1):43-49.
- [10] Campos H, Cooper M, Habben J E, et al. Improving drought tolerance in maize: a view from industry[J]. Field Crops Research, 2004,90(1):19-34.
- [11] 董朝阳,刘志娟,杨晓光.北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J].农业工程学报,2015,31(11):157-164.
- [12] Aslam M, Zamir M S I, Afzal I, et al. Drought stress, its effect on maize production and development of drought tolerance through potassium application[J]. Cercetari Agronomice in Moldova, 2013,46(2):99-144.
- [13] Zhang Q, Sun P, Singh V P, et al. Spatial temporal precipitation changes (1956—2000) and their implications for agriculture in China[J]. Global and Planetary Change, 2012,82/83:86-95.
- [14] Zhang Jiquan. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004,102(2):133-153.
- [15] Asseng S, Foster I, Turner N C. The impact of temperature variability on wheat yields[J]. Global Change Biology, 2011,17(2):997-1012.
- [16] 李尚中,樊廷录,赵刚,等.品种、密度与覆膜方式对旱地春玉米产量和水分利用效率的影响[J].草业学报,2017,26(12):35-47.
- [17] 王浩,王淑兰,徐宗贵,等.耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):856-864.
- [18] 张谋草,赵玮,周忠文,等.旱作区玉米田土壤水分变化对产量的影响及水分利用效率分析[J].中国农学通报,2013,29(33):242-247.
- [19] 裴雪霞,党建友,张定一,等.不同降水年型下播种期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(4):553-562.
- [20] 段斌,宋世枝,何世界,等.信阳地区粳稻晚播气候资源利用率分析[J].中国稻米,2016,22(6):42-45.
- [21] 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(1):3091-3102.
- [22] 庞艳梅,陈超,潘学标,等.未来气候变化对四川盆地玉米生育期气候资源及生产潜力的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(12):1526-1536.
- [23] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,等.近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J].生态学报,2017,37(6):1900-1911.
- [24] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011,26(6):1001-1011.
- [25] 贺伟,布仁仓,熊在平,等.1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.
- [26] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等.气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J].应用生态学报,2009,20(9):2199-2206.
- [27] 何奇瑾.我国玉米种植分布与气候变化关系研究[D].北京:中国气象科学研究院,2012.

(上接第 344 页)

- [32] 程杰,高压军.镉毒害对小麦生理生态效应的研究进展[J].水土保持研究,2006,13(6):218-221,227.
- [33] Han Y, Yuan H, Huang S, et al. Cadmium tolerance and accumulation by two species of Iris[J]. Ecotoxicology, 2007,16(8):557-563.
- [34] 朱雪梅,林立金,杨远祥,等.锌铬复合胁迫对水稻植株碳氮代谢的影响[J].水土保持研究,2008,15(5):149-151.
- [35] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2):117-128.
- [36] 焦念元,宁堂原,尹飞,等.小麦晚套露地花生间作玉米高产高效栽培技术[J].作物杂志,2012(1):137-138.
- [37] 黄超,刘丽君,章明奎.生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2011,37(4):439-445.
- [38] 姜圆圆,郑毅,汤利,等.豆科禾本科作物间作的根际生物过程研究进展[J].农业资源与环境学报,2016,33(5):407-415.
- [39] 朱彦霖,朱奕豪,张秀省.生物炭对百合生长发育的影响[J].北方园艺,2018(1):86-91.
- [40] Guo X F, Li H S, Chen H Y. The effects of biochar and intercropping on the Cd, Cr and Zn speciation in soils and plant uptake by *Machilus pauhoi* [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2017, 98(4):1-8.
- [41] 王吉秀,湛方栋,李元,等.铅胁迫下小花南芥与玉米间作对根系分泌物有机酸的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(3):365-372.