

宁夏中部干旱带玉米生育期热量 条件时空特征分析

陈璐^{1,2}, 刘静³, 王连喜^{1,2}, 李琪^{1,2}, 许晨纯^{1,2}

(1. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044;
3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要: 利用宁夏中部干旱带盐池、同心及海原三地 1988—2013 年逐日气象资料建立玉米全生育期及各主要生育阶段温度适宜度模型, 并对宁夏中部干旱带玉米生育期温度适宜度及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温进行时空变化分析。结果表明: 宁夏中部干旱带玉米全生育期温度适宜度以及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温均呈波动上升趋势, 三地的温度适宜度从大到小依次为同心、盐池、海原, 数值分别为: 0.966, 0.911 和 0.726。温度适宜度在播种~出苗, 出苗~拔节, 拔节~抽雄, 开花吐丝~成熟阶段均呈上升趋势, 其中拔节~抽雄阶段上升速率最快, 速率为 $0.03 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。盐池玉米的热量关键期为抽雄~开花吐丝阶段, 同心为播种~出苗阶段, 而海原为拔节~抽雄阶段。

关键词: 玉米生育期; 温度适宜度; 积温; 热量时空变化; 宁夏中部干旱带
中图分类号: S513; S161.2 **文献标志码:** A

Variation of heat condition of maize in the middle arid region of Ningxia

CHEN Lu^{1,2}, LIU Jing³, WANG Lian-xi^{1,2}, LI Qi^{1,2}, XU Chen-chun^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster prevention and Reduction, Yinchuan Ningxia 750002, China)

Abstract: Maize growth period data and daily climate data of Yanchi, Tongxin and Haiyuan counties in the middle arid region of Ningxia were used to build the maize temperature suitability degrees. And spatio-temporal analysis of these degrees and active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$. The result indicated that: the maize temperature suitability degrees and active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ were in ascent, and the suitability degrees in these three counties from high to low listed as Tongxin county, Yanchi county and Haiyuan county, and the suitability degrees are 0.966, 0.911 and 0.726 respectively. The temperature suitability degrees in sowing to emergence, emergence to jointing, jointing to tasseling and silking to maturity periods represented an increase, while the degrees in jointing to tasseling period increased the fast, and the degrees are $0.03 \cdot 10\text{a}^{-1}$. Active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in sowing to emergence and emergence to jointing periods represented an increase.

Keywords: maize growth period; temperature suitability degrees; active accumulated temperature; temporal and spatial variation; the middle arid region of Ningxia

近百年来,以全球气候变暖为主要特征的气候变化对我国农业生态环境、作物生长及产量造成了重大影响。尤其是我国西北地区生态环境脆弱,农业生产对气候变化尤为敏感^[1]。

玉米是我国三大粮食作物之一,已有的研究表明:气候变暖导致玉米种植北界北移,种植面积扩大,但也加快了玉米生育进程,缩短生育期而导致玉

米减产^[2-4]。对宁夏中部干旱带的研究表明:气温对玉米生长影响较大,总体来讲,生育前期的高温与后期低温都将导致玉米减产;降水量是影响本地区春玉米生产潜力的制约因子^[5-6]。气候环境适宜度直接制约着玉米的生长发育,影响当地玉米产量。目前,气候环境适宜度分析已经逐步从定性化发展为量化^[7-10],气候适宜度通过模糊数学中隶属度

收稿日期: 2016-01-24
基金项目: 中国气象局气候变化专项“气候变化对宁夏旱作农业的影响与适应对策”(CCSF201315); 国家科技支撑计划(2012BAH29B03)
作者简介: 陈璐(1991—), 女, 江苏常州人, 研究生, 研究方向为农业气象。E-mail: 844313487@qq.com。
通信作者: 王连喜(1959—), 男, 河南省郑州人, 教授。E-mail: wlx4533@sina.com。

函数的方法把气候因子(光照、温度及降水)数量变化转化为对作物生长发育、产量形成的适宜程度,国内不少专家对不同区域尺度玉米气候适宜度进行了研究分析,但研究区域多集中在华中、华北及东北三省,对西北尤其是宁夏自治区的研究较少^[11-15]。

宁夏中部干旱带位于宁夏中部地区,包括盐池县、同心县、海原县等地,海拔 1 300~2 100 m,是我国北方地区与天然草地牧区接壤的过渡带^[16]。玉米生长喜温喜光,在生长关键期需水量大。宁夏中部干旱带日照充足,降水少,在当地实际生产中,玉米需水关键期通常通过补充灌溉来保证玉米生长发育的水分需求,因此,在该地区的大田生产中,日照与降水对玉米生长影响不大。本文以当地玉米的热量条件作为研究对象,分析 1988—2013 年宁夏中部干旱带玉米温度适宜度及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的时空分布特征,以对当地玉米种植适应气候变化决策建议提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

本文气象资料来自同心县、盐池县和海原县三个气象站观测的 1988—2013 年的逐日观测资料。产量数据包括同心县、盐池县及海原县 1988—2013 年玉米单产,由宁夏自治区统计局提供提供。

取这三个站点温度适宜度平均值作为该地区温度适宜度的时间序列值,各个县的单产逐年平均值作为该地区单产的时间序列值。

1.2 研究方法

1.2.1 分离气象产量 玉米作物产量组成包括趋势产量 Y_t 和气象产量 Y_w ,所以

$$Y = Y_t + Y_w \tag{1}$$

$$Y_w = Y - Y_t \tag{2}$$

利用盐池县、同心县及海原县统计产量,运用 11 a 直线滑动平均法提取趋势产量 Y_t ,再运用公式(2)分离气象产量。该方法为滑动平均法和线性回归法的结合,以 11 a 为步长,在每个 11 a 将产量看作线性函数,随着时间滑动,直线不断改变位置,后延滑动,依次建立各 11 a 内的线性回归方程,并得到模拟值,然后每一年的线性回归模拟值的平均值就是当年的趋势产量。用该方法既不用主观判定产量历史演变的曲线类型,也不损失样本量^[18]。分离得到的气象产量将代表玉米产量中受气象条件影响的那部分产量,即表示对气象条件变化的响应情况。

1.2.2 温度适宜度计算方法 根据相关文献研究^[19-20],结合宁夏地区的实际情况,各个生育阶段玉米的温度适宜度函数可以表达为:

$$S_{(T)} = [(T - T_1)(T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B] \tag{3}$$
$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1)$$

式中, $S(T)$ 为平均气温为 T 时温度适宜度; T_0 为玉米发育的最适气温($^{\circ}\text{C}$),不同发育阶段最适气温不同; T_1 为玉米发育的最低气温($^{\circ}\text{C}$),低于这一气温,发育速率为 0; T_2 为玉米发育的最高气温($^{\circ}\text{C}$),高于这一气温,发育速率为 0。根据文献对不同生育阶段选取玉米三基点温度^[14-15](表 1)。

表 1 玉米不同生育阶段 T_0, T_1 及 $T_2/^{\circ}\text{C}$
Table 1 T_0, T_1 and T_2 values in maize growth period

参数 Parameter	播种~出苗 Sowing to emergence	出苗~拔节 Emergence to jointing	拔节~抽雄 Jointing to tasseling	抽雄~开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝~成熟 Silking to maturity
T_1	6	8	16	18	14
T_0	13	20	24	26	22
T_2	32	30	30	28	26

玉米在各个生育阶段对热量条件的要求不同,同时各个生育阶段热量条件对玉米生长发育及产量的影响也不同。所以,为客观反映不同生育阶段热量条件对玉米生长发育的影响强度,需要为玉米各个生育阶段的温度适宜度设定权重。本文采用加权平均法,确定各个生育阶段温度适宜度的权重^[20],结果见表 2。

$$b_i = |a_i| / \sum |a_i| \tag{4}$$
$$S_m(T) = \sum b_i S_{i(T)}$$

式中, b_i 为第 i 个生育期温度适宜度的权重系数; a_i

为第 i 个生育期平均气温与玉米气象产量的相关系数; $S_{m(T)}$ 为全生育期玉米的温度适宜度; $S_{i(T)}$ 为第 i 个生育期的温度适宜度。

2 结果与分析

根据多年观测资料,宁夏中部干旱带玉米种植在 4—9 月份,其中播种~出苗期大致在 4 月中旬—5 月上旬,出苗~拔节期大约在 5 月中旬—6 月中旬,拔节~抽雄阶段在 6 月下旬—7 月上旬,抽雄~开花吐丝阶段时间较短,在 7 月中旬,开花吐丝~成

熟阶段在 7 月中旬—9 月上旬。

播种~拔节阶段为玉米生长的苗期,该阶段根系发育快,地上部生长较慢,对环境要求不高,但怕冷不怕热,怕涝不怕旱,轻度干旱有益于根系的发育和下扎。拔节~抽雄阶段为穗期,该阶段是玉米生长发育最旺盛的时期,对水分要求迫切;抽雄前 10 d 至抽雄后 20 d,是水分临界期、穗分化及开花期对水分要求敏感。抽雄~成熟阶段为花粒期,此时叶片、株高已定,营养生长基本停止,该阶段对水分需求量减少。

宁夏中部干旱带 1988—2003 年玉米气象产量呈波动持平状态,在 1988—1997 年这 10 年中呈增加趋势,2000 年气象产量为 28 年中最低,2005—2013 年中部干旱带玉米气象产量呈平稳下降趋势,但趋势不显著。盐池、同心和海原玉米气象产量变化情况与中部干旱带整体相似,同心玉米气象产量变化幅度较小,盐池于 1995 年气象产量表现最高;海原玉米气象产量变化幅度较为剧烈,并且于 1998 年和 2000 年分别出现气象产量最高和最低值。

三个地区气象产量变化情况大体一致,但最值出现年份不同,因为三个地区所在的地理位置和当地气象条件存在差异(见图 1)。

2.1 玉米生育期平均气温时空分布特征

宁夏中部干旱带玉米生育期从 4 月中旬开始,

到 9 月上旬结束,用盐池、同心及海原三地气温的平均值代表宁夏中部干旱带的平均气温,1988—2013 年全生育期平均气温呈周期性波动,并以 $0.35^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.487, P<0.01$) 的速率升高。从空间分布上看,生育期内同心的平均气温最高而海原最低。三地均呈周期性波动增温趋势。其中,盐池以 $0.22^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率增温,同心以 $0.40^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.519, P<0.01$) 速率增温,海原以 $0.44^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.563, P<0.01$) 速率增温,可以看出宁夏中部干旱带在玉米生育期中部气温最高,南部气温低于北部,但南部增温速率最高(见图 2)。

平均气温的时间变化在不同生育期趋势不同,在抽雄~开花阶段平均气温呈减小趋势,但趋势不明显;在播种~出苗阶段,中部干旱带平均气温以 $0.81^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.458, P<0.05$) 的速率增温,同心增温最快,海原增温速率较慢。出苗~拔节阶段中部干旱带平均气温以 $0.48^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.449, P<0.05$) 的速率增温,增温趋势明显;其中同心增温速率最快,其次是海原,但盐池增温不明显。在拔节~抽雄阶段,海原增温明显,增温速率为 $0.61^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R=0.390, P<0.05$)。总体来说,播种~出苗阶段增温速率最快,抽雄~开花吐丝阶段平均气温呈减小趋势(表 3)。

表 2 各个生育期温度适宜度权重系数(b_i)

Table 2 Weight coefficient in different growth period(b_i)

地区 Region	播种~出苗 Sowing to emergence	出苗~拔节 Emergence to jointing	拔节~抽雄 Jointing to tasseling	抽雄~开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝~成熟 Silking to maturity
盐池 Yanchi	0.207	0.248	0.012	0.485	0.048
同心 Tongxin	0.071	0.093	0.086	0.086	0.664
海原 Haiyuan	0.095	0.027	0.395	0.260	0.223

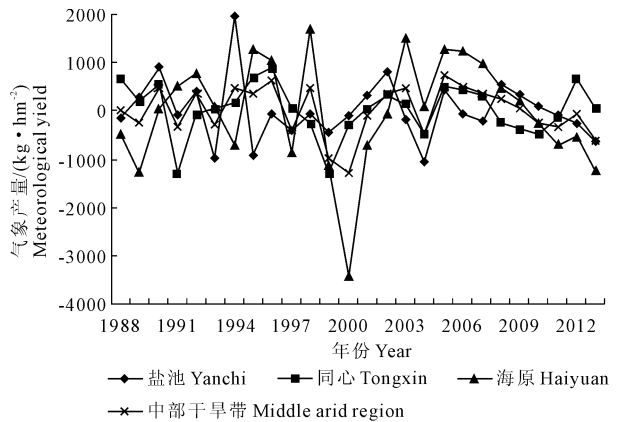


图 1 中部干旱带玉米气象产量时间变化
Fig.1 Variations of meteorological yield of
maize in middle arid region

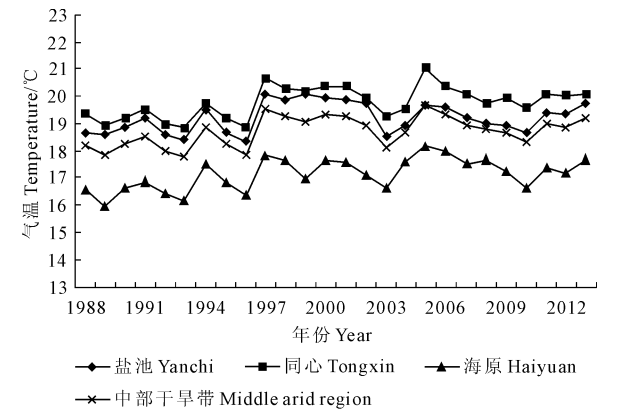


图 2 宁夏中部干旱带玉米全生育期平均气温时间变化
Fig.2 Variations of average temperature in middle
arid region of whole growth period

表 3 近 26 年玉米各生育期平均气温增温速率/(℃·10a⁻¹)

Table 3 Increase rate of average temperature in different growth period in the last 26 years

地区 Region	播种 ~ 出苗 Sowing to emergence	出苗 ~ 拔节 Emergence to jointing	拔节 ~ 抽雄 Jointing to tasseling	抽雄 ~ 开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝 ~ 成熟 Silking to maturity	全生育期 Whole growth period
盐池 Yanchi	0.78 **	0.21	0.30	-0.31	-0.04	0.22
同心 Tongxin	0.93 ***	0.64 ***	0.39	-0.21	0.03	0.40 ***
海原 Haiyuan	0.72 **	0.59 ***	0.61 **	-0.03	0.18	0.44 ***
中部干旱带 Middle arid region	0.81 **	0.48 **	0.44	-0.19	0.06	0.35 ***

注: *, **, *** 分别表示通过 0.1, 0.05 及 0.01 显著性水平检验, 下同。
Note: *, **, and *** indicated significant test by $P < 0.1$, $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.2 玉米生育期 ≥ 10℃ 积温时空变化特征

≥ 10℃ 积温(即活动积温)反映了生育期内玉米对热量的要求。从图 2 可以看出, 1988—2013 年近 26 年宁夏中部干旱带不同地区玉米全生育期内 ≥ 10℃ 积温时间变化趋势大致相同, 中部干旱带 ≥ 10℃ 积温呈波动上升趋势, 以 $69.3^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.515$, $P < 0.01$) 的速率增加。海原为三地积温增温速率最高的区域, 其增温速率为 $88.5^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.542$, $P < 0.01$); 其次为同心, 增温速率为 $75.2^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.549$, $P < 0.01$); 盐池增温速率为 $44.0^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 增温趋势不明显(图 3)。

利用 MK-突变检验方法对宁夏中部干旱带玉米全生育期 ≥ 10℃ 积温的时间序列进行分析, 结果表明: 宁夏中部干旱带玉米全生育期 ≥ 10℃ 积温在 1994 年左右发生突变, 积温由增加不明显突变为增加明显。盐池全生育期积温于 1991 年由增加不明显突变为增加明显, 但仅在 2000—2002 年增温达到显著性水平; 积温于 2007 年由增大趋势突变为减少趋势。同心及海原两地玉米全生育期 ≥ 10℃ 积温突变情况相似, 在 1994 年突变为增加明显, 并且从 2006 年开始积温增温趋势达到显著性水平(图 4)。

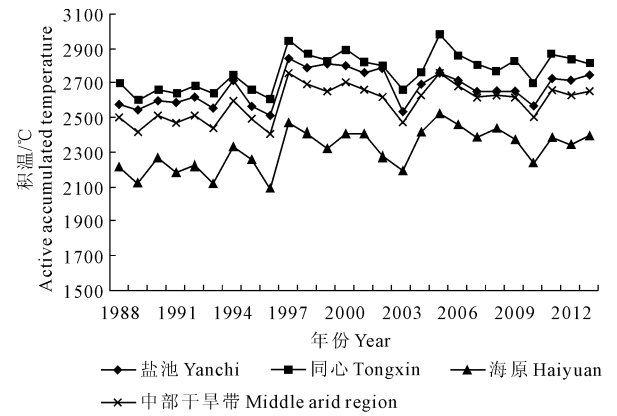


图 3 宁夏中部干旱带玉米全生育期 ≥ 10℃ 积温时间变化
Fig.3 Variations of active accumulated temperature in whole growth period in middle arid region

表 4 的统计结果表明: 近 26 年来玉米不同生育阶段 ≥ 10℃ 积温变化趋势表现各不相同。播种 ~ 出苗及出苗 ~ 拔节阶段 ≥ 10℃ 积温波动增加, 中部干旱带在播种 ~ 出苗阶段增温速率较大, 为 $48.1^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.542$, $P < 0.01$), 其中海原增温速率最大, 为 $53.2^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.563$, $P < 0.01$), 其次为同心, 增温速率为 $47.8^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.527$, $P < 0.01$), 最后为盐池, 增温速率为 $46.3^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.483$, $P < 0.05$)。出苗 ~ 拔节阶段中部干旱带增温速率为 $19.4^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.404$, $P < 0.05$), 其中同心增温速率最大, 其次为海原; 虽然盐池在该阶段也表现出增温趋势, 但趋势不明显。中部干旱带在拔节 ~ 抽雄阶段积温呈波动增加趋势, 但除海原以 $12.3^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($R = 0.386$, $P < 0.05$) 明显增温外, 其它地区增温趋势不明显。抽雄 ~ 开花吐丝及开花吐丝 ~ 成熟阶段中部干旱带大部分地区积温呈波动下降趋势, 趋势不明显。

2.3 全生育期温度适宜度时空分布

中部干旱带自 1988—2013 年, 玉米全生育期温度适宜, 适宜度为 0.869, 且呈波动上升趋势, 上升速率为 $0.012 \cdot 10\text{a}^{-1}$, 波动较为平缓。从距平上看, 中部干旱带玉米全生育期温度适宜度距平基本在 ± 0.1 内波动, 1988—1999 年正负距平交替出现, 进入 21 世纪后, 正距平增多, 以正距平为主。

空间分布上, 盐池、同心及海原三地年际变化情况基本一致, 其中同心全生育期温度适宜度最高, 平均为 0.966, 呈波动上升趋势, 上升速率为 $0.005 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。距平波动范围较小, 1988—1999 年负距平较多, 进入 21 世纪后正距平增多, 转变为以正距平为主。盐池温度适宜度次之, 多年平均为 0.911, 呈波动下降趋势, 下降速率为 $0.005 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。年际波动情况与同心相似, 但波动幅度较同心大。海原全生育期温度适宜度较低, 平均为 0.726, 多年呈波动上升趋势, 上升速率为三地最快, 为 $0.037 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。海原温度适宜度波动最剧烈, 其距平在 ± 0.2 间波动, 且

出现较强距平现象频繁,进入 21 世纪后正距平增

多,由以负距平为主转变为以正距平为主(图 5)。

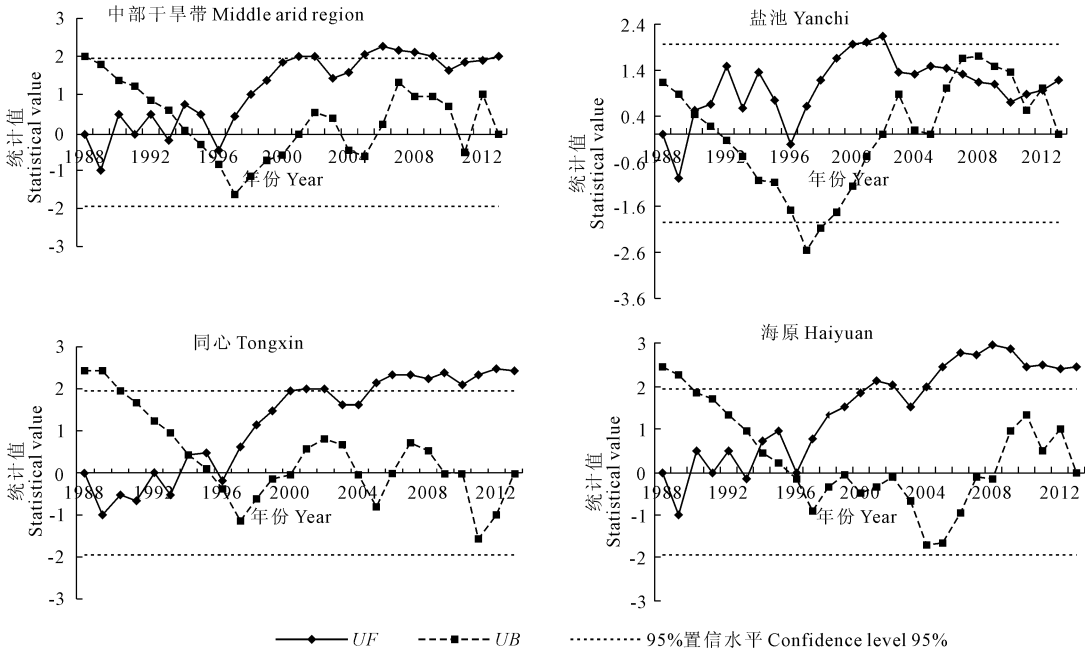


图 4 玉米全生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 MK-突变检验

Fig.4 MK-mutation test of active accumulated temperature during whole growth period

表 4 近 26 年玉米各生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温增温速率/ $(^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1})$

地区 Region	播种~出苗 Sowing to emergence	出苗~拔节 Emergence to jointing	拔节~抽雄 Jointing to tasseling	抽雄~开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝~成熟 Silking to maturity	全生育期 Whole growth period
盐池 Yanchi	43.3**	8.2	6.1	-3.1	-10.4	44.0
同心 Tongxin	47.8***	27.1***	7.8	-2.1	-5.3	75.2***
海原 Haiyuan	53.2***	22.7**	12.3**	-0.3	0.5	88.5***
中部干旱带 Middle arid region	48.1***	19.4**	8.7	-1.9	-5.1	69.3***

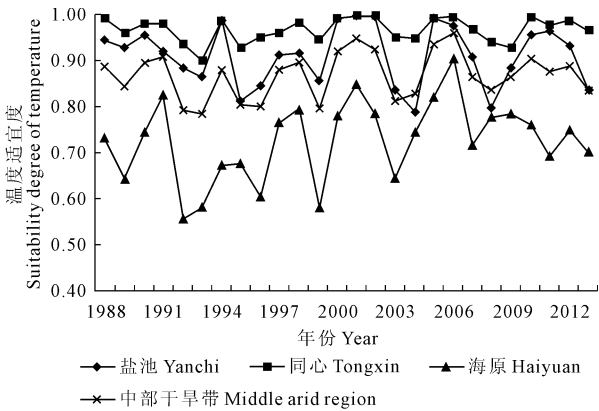


图 5 玉米全生育期温度适宜度变化

Fig.5 Variations of temperature suitability
degrees during the whole growth period

2.4 不同生育阶段温度适宜度时空分布

2.4.1 播种~出苗阶段温度适宜度时空分布 宁夏中部干旱带玉米播种~出苗阶段温度适宜度较

高,平均为 0.965,波动较平缓,以 $0.004\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升。距平在 $-0.15\sim 0.05$ 之间波动,且正距平较多。由于 1991 年该生育阶段中部干旱带平均气温为 26 年最低值,其温度适宜度明显偏低,负距平为 26 年来最大负距平值。

盐池、同心及海原三地在该生育阶段温度适宜度均在 0.96 以上,其中盐池温度适宜度最高,为 0.971,波动平缓,以 $0.002\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升。除较冷的 1991 年外,距平均在 $-0.1\sim 0.05$ 间小幅波动,21 世纪后正距平逐渐增多。同心次之,平均为 0.963,以 $0.013\cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率减少;从 2004 年开始,负距平增多,且有增大的趋势。海原为 0.962,波动较剧烈,以 $0.021\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升;在最冷的 1991 年,负距平较强,1992—2000 年距均为正值,21 世纪后负距平增多(图 6)。

2.4.2 出苗~拔节阶段温度适宜度时空分布 近 26 年,宁夏中部干旱带玉米出苗~拔节阶段温度适

宜度较好,平均适宜度为 0.963,以 $0.014 \cdot 10a^{-1}$ ($R = 0.543, P < 0.01$) 速率平缓上升。距平在 $-0.05 \sim 0.04$ 间波动,21 世纪以前以负距平为主,较强负距平出现在 1988 年,21 世纪之后变为以正距平为主,距平值有上升趋势。

盐池与同心该生育阶段温度适宜度较高。同心适宜度波动平缓,为最高 0.992,且以 $0.008 \cdot 10a^{-1}$ ($R = 0.609, P < 0.01$) 速率呈显著上升。盐池较好,平均为 0.988,波动幅度最小,以 $0.004 \cdot 10a^{-1}$ 速率上升。海原最低,为 0.910,波动较剧烈,以 $0.031 \cdot 10a^{-1}$ ($R = 0.549, P < 0.01$) 速率显著上升。三地距平变化趋势与中部干旱带整体变化一致(图 7)。

2.4.3 拔节~抽雄阶段温度适宜度时空分布 宁夏中部干旱带玉米拔节~抽雄阶段温度适宜度为 0.880,以 $0.03 \cdot 10a^{-1}$ 速率剧烈波动上升。1994 年适宜度最低,2008 年适宜度最高,距平变化与出苗~拔节阶段变化相同。

该阶段同心温度适宜度最高,为 0.961,近 26 年以 $0.012 \cdot 10a^{-1}$ 速率平缓波动上升,2004—2010 年连续正距平,1994 年气温偏低,故温度适宜度最低,出现较强负距平。盐池次之,为 0.957,以 $0.008 \cdot 10a^{-1}$ 速率平缓波动上升,其中 2003 年最低,出现较强负距平。海原最低,为 0.720,以 $0.072 \cdot 10a^{-1}$ 速率快速波动上升趋势,且波动幅度较大;温度适宜度波动情况与整体波动情况保持一致(图 8)。

2.4.4 抽雄~开花吐丝阶段温度适宜度时空分布 中部干旱带温度适宜度在玉米抽雄~开花吐丝阶段较低,适宜度为 0.780,近 26 年来呈波动下降趋势,波动幅度较大,但 $0.007 \cdot 10a^{-1}$ 的下降速率缓慢。距平波动幅度较大,变化趋势与出苗~拔节阶段相似,1992—1995 年与 2008 年出现较强负距平,其中 1995 年温度适宜度最低;2000—2003 年及 2005—2006 年出现较强正距平。

该阶段同心温度适宜度最高,为 0.861,以 $0.008 \cdot 10a^{-1}$ 速率缓慢波动下降。盐池次之,为 0.840,以 $0.014 \cdot 10a^{-1}$ 速率波动下降。海原最低,为 0.600,整体呈波动持平状态,波动激烈。三地适宜度波动情况与中部干旱带整体波动情况一致(图 9)。

2.4.5 开花吐丝~成熟阶段温度适宜度时空分布 中部干旱带玉米抽雄~开花吐丝阶段温度适宜度最低,为 0.897,以 $0.012 \cdot 10a^{-1}$ 速率波动上升,波动幅度较小。其距平变化与出苗~拔节,抽雄~开花吐丝阶段变化趋势相同;在 1993—1995 年及 1999 年出现较强负距平。

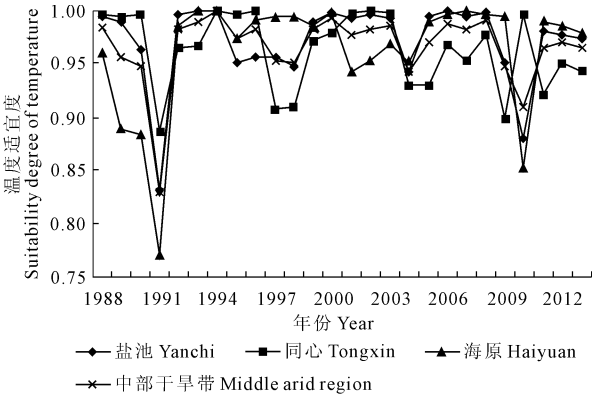


图 6 播种~出苗阶段温度适宜度变化
Fig.6 Variations of temperature suitability degrees in the sowing to emergence period

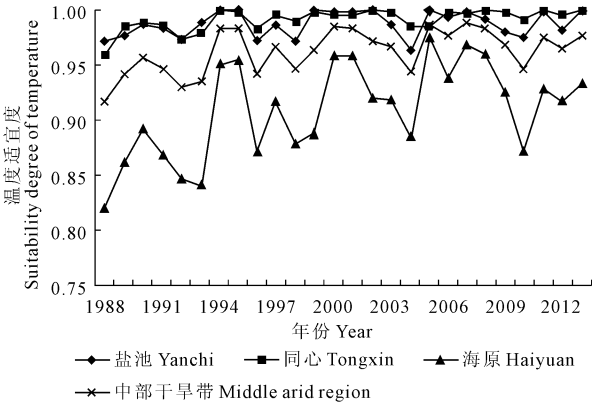


图 7 出苗~拔节阶段温度适宜度变化
Fig.7 Variations of temperature suitability degrees in the emergence to jointing period

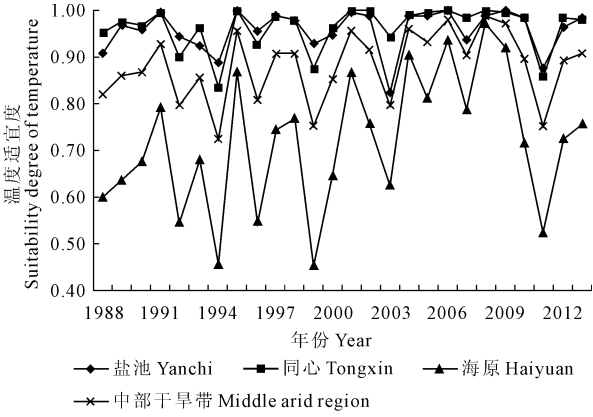


图 8 拔节~抽雄阶段温度适宜度变化
Fig.8 Variations of temperature suitability degrees of jointing to tasseling period

该生育阶段同心温度适宜度最高,平均 0.978,以 $0.007 \cdot 10a^{-1}$ 速率平缓波动上升。次高为盐池,平均 0.953,以 $0.003 \cdot 10a^{-1}$ 速率平缓波动上升。海原较低,为 0.762,以 $0.012 \cdot 10a^{-1}$ 速率剧烈波动上升。三地温度适宜度时间波动情况与中部干旱带整体波

动情况一致(图 10)。

2.5 热量指标与玉米产量的关系

玉米生长不仅受气象因子影响,还受土壤类型、作物品种、病虫害、农业管理等其它因素影响。本文以气象产量作为对象,讨论宁夏中部干旱带玉米生育期温度适宜度及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温对玉米气象产量的影响。

表 5 为不同生育期温度适宜度与气象产量之间的相关系数,结果表明,在盐池地区玉米抽雄~开花吐丝阶段为玉米生长的关键时期,温度的高低直接影响当地玉米生长发育,通过计算可知:该阶段平均

气温每升高 1°C ,玉米气象产量增加 $10.165\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。盐池在该生育阶段玉米产量与温度适宜度呈显著正相关,温度适宜度每上升 0.01,气象产量将增加 $1.731\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($R = 0.530, P < 0.01$);并且全生育期温度适宜度与气象产量呈显著正相关。同心播种~出苗阶段为玉米热量的关键时期,温度适宜度每增加 0.01,气象产量将增加 $4.389\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($R = 0.442, P < 0.05$)。海原玉米热量条件关键期为拔节~抽雄阶段,温度适宜度每上升 0.01,气象产量将增加 $1.698\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($R = 0.326, P < 0.1$)。

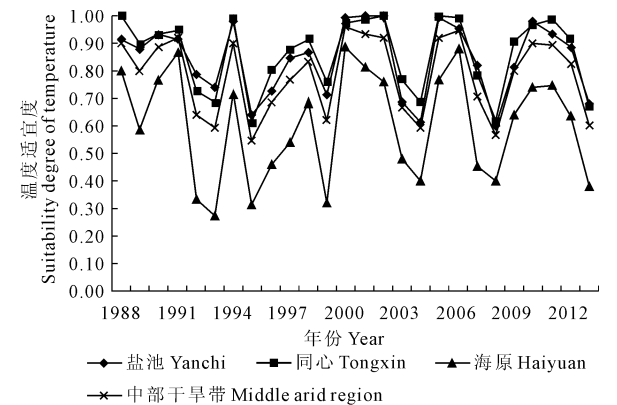


图 9 抽雄~开花吐丝阶段温度适宜度变化
Fig.9 Variations of temperature suitability degrees of tasseling to flowering silking period

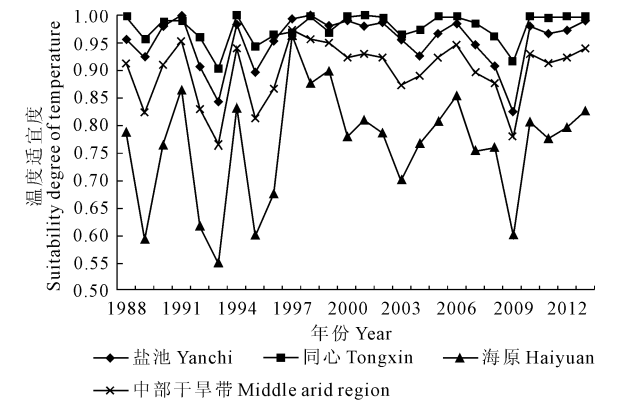


图 10 开花吐丝~成熟阶段温度适宜度变化
Fig.10 Variations of temperature suitability degrees of flowering silking to mature period

表 5 玉米温度适宜度与气象产量的相关系数
Table 5 Correlative coefficient between temperature suitability and meteorological yield of maize

地区 Region	播种~出苗 Sowing to emergence	出苗~拔节 Emergence to jointing	拔节~抽雄 Jointing to tasseling	抽雄~开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝~成熟 Silking to maturity	全生育期 Whole growth period
盐池 Yanchi	0.186	0.204	-0.090	0.530***	0.198	0.551**
同心 Tongxin	0.442**	-0.153	0.114	0.072	0.052	0.123
海原 Haiyuan	0.034	-0.034	0.326*	-0.206	-0.180	0.047
中部干旱带 Middle arid region	0.185	0.064	0.115	0.059	-0.147	0.092

温度对玉米的影响表现在两方面:一是直接影响玉米的生长发育及产量;二是影响玉米的生育进程及发育时间,从而影响产量。玉米拔节~抽雄阶段温度过高,会缩短幼穗各分化期,减少分化小穗和小花数,果穗变小。该阶段温度适宜度对海原玉米产量起明显正作用,这段时间海原气温呈由低温向最适温度 T_0 显著增加趋势,所以该阶段海原温度适宜度上升,有利于提高玉米产量。抽雄到开花吐丝阶段要求平均气温 $25^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$,温度适宜,授粉良好;如果温度达到 $32^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$,而相对湿度低于 30%,则花粉将迅速失去生命力,花丝也将枯萎导致受精不良,造成秃尖。但宁夏中部干旱带在该阶段气温偏低,且低于最适温度,故造成玉米秃尖率增大的主要原因是干旱。该阶段盐池温度适宜度对玉米

产量起显著正作用,而盐池气温呈降低趋势,故该阶段盐池温度适宜度呈下降趋势,玉米产量降低。籽粒形成和灌浆期,要求气温 $20^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 为宜,若气温过高或过低,将影响酶的活动,玉米将延期成熟,造成籽粒不饱满,产量下降;如再遇上干旱,易受高温逼熟,使千粒重下降^[7]。

计算不同生育阶段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温与气象产量之间的相关系数(表 6),得到结果与温度适宜度与气象产量之间相关关系类似。即,盐池在抽雄~开花吐丝阶段,积温与玉米气象产量呈显著正相关,积温每升高 1°C ,气象产量将增加 $1.017\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($R = 0.453, P < 0.05$);海原在拔节~抽雄阶段积温每升高 1°C ,气象产量将增加 $1.154\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($R = 0.372, P < 0.1$)。

海原玉米气象产量对热量条件的相关性并不高,原因可能为:海原大部分地区覆膜种植玉米,由

于覆膜影响,在没有考虑覆膜的增温保墒作用对玉米生长造成的影响情况下,导致出现如此结果。

表 6 玉米不同生育阶段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温与气象产量的相关系数

Table 6 Correlative coefficient between active accumulated temperature and meteorological yield of maize

地区 Region	播种 ~ 出苗 Sowing to emergence	出苗 ~ 拔节 Emergence to jointing	拔节 ~ 抽雄 Jointing to tasseling	抽雄 ~ 开花吐丝 Tasseling to silking	开花吐丝 ~ 成熟 Silking to maturity	全生育期 Whole growth period
盐池 Yanchi	- 0.172	0.217	0.011	0.453 * * *	0.123	0.099
同心 Tongxin	0.011	0.027	0.043	- 0.043	- 0.234	- 0.075
海原 Haiyuan	- 0.014	- 0.097	0.372 * *	- 0.216	- 0.192	- 0.075
中部干旱带 Middle arid region	- 0.178	- 0.008	0.146	- 0.025	- 0.194	- 0.176

表 6 为玉米不同生育阶段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温与气象产量的相关系数计算结果,通过与表 5 的对比可以看出:虽然温度适宜度与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温均为描述热量条件的指标,但 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温只考虑了玉米的生物学下限温度,而忽略了上限温度;并且对于不同生育阶段及全生育期,考虑的下限温度都相同,从而导致了在与气象产量的相关性上出现差异。而根据已有研究,玉米不同生育阶段下限温度都不相同,所以与温度适宜度比较, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温的涵盖范围太大。从与气象产量的关系上看,温度适宜度能够更好地描述热量条件与气象产量之间的关系。

3 结 论

- 1) 宁夏中部干旱带玉米全生育期近 26 年以 $0.35^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率明显增温,其中增温速率海原 > 同心 > 盐池。不同生育阶段平均气温变化趋势不同,播种 ~ 出苗阶段增温明显且速率最快,其次是出苗 ~ 拔节阶段。抽雄 ~ 开花吐丝阶段平均气温呈减少趋势,其它生育阶段有增温趋势,但趋势均不明显。
- 2) 宁夏中部干旱带玉米全生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温近 26 年以 $69.3^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 明显上升,增温速率同心 > 海原,盐池增温不明显。不同生育阶段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温变化趋势不同,播种 ~ 出苗阶段增温速率大于出苗 ~ 拔节阶段,而抽雄 ~ 开花吐丝及开花吐丝 ~ 成熟阶段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈下降趋势。
- 3) 宁夏中部干旱带玉米全生育期温度适宜度多年呈波动上升趋势,上升速率拔节 ~ 抽雄 > 出苗 ~ 拔节 > 开花吐丝 ~ 成熟 > 播种 ~ 出苗,在抽雄 ~ 开花吐丝阶段温度适宜度呈下降趋势。从适宜度上,播种 ~ 出苗 > 出苗 ~ 拔节 > 开花吐丝 ~ 成熟 > 拔节 ~ 抽雄 > 抽雄 ~ 开花吐丝。
- 4) 盐池玉米热量关键期为抽雄 ~ 开花吐丝阶段,同心为播种 ~ 出苗阶段,海原为拔节 ~ 抽雄阶段。与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温相比,温度适宜度考虑了玉米生

物学上限温度,并对每个生育阶段的上、下限温度作了细化,能够更好地描述热量条件与气象产量之间的关系。

4 讨 论

宁夏中部干旱带温度适宜度总体呈上升趋势,且播种 ~ 出苗,出苗 ~ 拔节阶段温度适宜度较高,影响玉米的关键期为播种 ~ 出苗阶段,抽雄 ~ 开花吐丝阶段,这与已有对西北地区环境适宜度对旱作玉米的影响研究得到的温度适宜度关键期相符^[15]。从全生育期热量条件的变化趋势上可以看出,宁夏中部干旱带热量条件在增加,更加有利于玉米生长,但从各个生育阶段来看,抽雄 ~ 成熟阶段热量条件有下降趋势,这也与目前分析气候变化特征的主要结论即夏季增温不明显相符^[21],故在该区域的玉米播期调整、品种选择及玉米生产管理中应充分考虑到该区域玉米生育期内热量条件的变化与不同,以合理利用气候资源,适应气候变化。而温度适宜度较低的海原,其适宜度上升速率较快,在不考虑降水的前提下,未来气候变化将使海原更适合种植玉米,并提高其单产。由于玉米生育期内热量条件的增加,宁夏中部干旱带玉米种植范围将扩大,而根据姚小英等人^[15]对西北地区的研究,结合西北地区暖干化趋势,预计玉米生育期水分适宜度将下降,所需灌溉量将增大,所以玉米种植风险将有所增加,由热量增加带来的有利条件可能将无法抵消缺水所造成的影响。

本文只讨论了宁夏中部干旱带的热量条件,而并未涉及降水及日照。在宁夏中部干旱带,光照充沛,但干旱少雨,故玉米种植需依赖补充灌溉,补充灌溉可能出现灌溉不及时或未达到理想灌溉量而影响玉米产量的结果,同时没有涉及温度、水、日照和水汽等变量的综合作用对玉米的影响以及不同玉米品种对气候条件的不同要求。同时,由于对中部干

旱带玉米种植观测资料的不足,本文对玉米生育期的划分主要是根据引黄灌区玉米观测资料以旬为单位进行了生育期的划分,使得生育期表达不够精确。此外,覆膜作为重要的农业技术在玉米生产中得到应用,今后应在量化单一气象要素和覆膜技术的增温效应对产量的影响方面以及更为适用的适宜度计算公式方面加强研究,以进一步提高适宜度的表达准确度。

参 考 文 献:

[1] 王馥棠,赵宗慈,王石立,等.气候变化对农业生态的影响[M].北京:气象出版社,2003:96-126.

[2] 张 强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,(3):1210-1219.

[3] 郭庆海.中国玉米主产区的演变与发展[J].玉米科学,2010,18(1):139-145.

[4] 李玮君,王春乙.气候变化对我国农作物种植结构的影响[J].气候变化研究进展,2010,6(2):123-130.

[5] Watson R T, Albritton D L, Barker T. Climate Change 2001—Synthesis Report. United States of America: Cambridge University Press, 2001:46.

[6] 赖荣生,余海龙,黄菊莹.宁夏中部干旱带气候变化及其对春玉米气候生产潜力的影响[J].中国农业大学学报,2014,19(3):108-114.

[7] 马树庆.吉林省农业气候研究[M].北京:气象出版社,1994:33.

[8] 白永平.西北地区(甘宁青)农业生态气候资源量化与评价[J].自然资源学报,2000,15(3):218-224.

[9] 赵 峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度模型研究——以河

南省冬小麦为例[J].资源科学,2003,25(6):77-82.

[10] 赵 峰,千怀遂.全球变暖影响下农作物气候适宜性研究进展[J].中国生态农业学报,2004,12(2):134-137.

[11] 郝君明,赵 军,刘红兵,等.基于 FIS 与 GIS 方法的山西省玉米气候适宜性评价[J].安徽农业科学,2008,36(23):10129-10130.

[12] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究[J].气象与环境科学,2008,(31):21-24.

[13] 贾建英,郭建平.东北地区近 46 年玉米气候资源变化研究[J].中国农业气象,2009,30(3):302-307.

[14] 宫丽娟,王晨轶,朱海霞,等.玉米气候适宜度变化分析[J].玉米科学,2013,21(5):140-146.

[15] 姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等.气候暖干化背景下甘肃旱作区玉米气候适宜性变化[J].地理学报,2011,66(1):59-67.

[16] 何永平,徐秀梅.宁夏中部干旱带气候变化对玉米产量的影响——以盐池县、同心县为例[J].宁夏农林科技,2012,53(4):1-3,17.

[17] 魏瑞江,宋迎波,王 鑫.基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J].应用气象学报,2009,20(5):622-627.

[18] 范 磊,郑国清,赵全志,等.河南省水稻气象灾害因子分析及主要灾害发生区划研究[J].中国农业资源与区划,2013,34(6):162-168.

[19] 千怀遂,焦士兴,赵 峰.全球气候变化对作物气候适宜性的影响——以河南省冬小麦为例[J].农业现代化研究,2004,25(2):106-110.

[20] 魏瑞江,张文宗,康西言,等.河北省冬小麦气候适宜度动态模型的建立及应用[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):5-15.

[21] 陈晓光,苏占胜,郑广芬,等.宁夏气候变化的事实分析[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):43-47.

(上接第 208 页)

参 考 文 献:

[1] 王汉中.中国油菜生产抗灾减灾技术手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2009.

[2] 朱宗河,郑文寅,张学昆.甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价[J].中国农业科学,2011,44(9):1775-1787.

[3] Eyob H T, John G, Joachim M S. Water stress effects on winter canola growth and yield[J]. Agronomy Journal, 2010,102(2):658-666.

[4] Muller T, Luttschwager D, Lentzsch P. Recovery from drought stress at the shooting stage in oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. J Agronomy & Crop Science, 2010,196:81-89.

[5] Hamzei J, Soltani J. Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: effects on biomass accumulation light interception and radiation use efficiency under different N rates[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012,155(28):153-160.

[6] Jean-Nicolas E, Zheng S S, Jerry J J, et al. Brassicaceae germplasm diversity for agronomic and seed quality traits under drought stress[J]. Industrial Crops and Products, 2013,47:176-185.

[7] Hamid J, Gholam A A, Nayer A, et al. Relationships between seedling establishment and soil moisture content for winter and spring rapeseed genotypes[J]. Industrial Crops and Products, 2013,49:177-187.

[8] 蒙祖庆,宋丰萍,刘振兴,等.干旱及复水对油菜苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2012,(1):40-47.

[9] 李 震,杨春杰,张学昆,等.PEG 胁迫下甘蓝型油菜品种(系)种子发芽耐旱性鉴定[J].中国油料作物学报,2008,30(4):438-442.

[10] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992.

[11] 朱维琴,吴良欢,陶勤南.氮营养对干旱逆境下水稻体内可溶性渗透调节物质的影响[J].浙江大学学报,2003,29(5):479-484.

[12] 宋 娜,郭世伟,沈其荣.不同氮素形态及水分胁迫对水稻苗期水分吸收、光合作用及生长的影响[J].植物学通报,2007,24(4):477-483.

[13] 张 蕊,张富平,郝艳丽.水分胁迫条件下磷素营养对小麦抗旱影响的研究进展[J].安徽农业科学,2007,35(11):3313-3314.

[14] 张立新,李生秀.水分胁迫下氮、钾对不同基因型夏玉米氮代谢的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):554-560.

[15] 李银水,鲁剑巍,邹 娟,等.湖北省油菜氮肥效应及推荐用量研究[J].中国油料作物学报,2008,30(2):218-223.

[16] 刘后利.实用油菜栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,1987:251-256.