

近 40 年甘肃河东地区夏秋作物气候适宜性变化

蒲金涌^{1,2}, 姚小英³, 姚茹莘⁴

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 中国气象局干旱气候变化与减灾开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省天水农业气象试验站, 甘肃 天水 741020; 3. 天水市气象局, 甘肃 天水 741000; 4. 天水市石马坪中学, 甘肃 天水 741000)

摘 要: 根据甘肃省河东地区天水、西峰农业气象试验站及平凉、礼县、成县农业气象观测站 1981~2008 年主要夏、秋作物物候期观测资料及当地气象站 1971~2008 年气象资料, 建立了作物气候适宜度模型。分析了近 40 a 该地区冬小麦、玉米气候适宜度变化, 对夏、秋作物种植的气候适宜度进行了比较。结果表明, 全生育期内冬小麦光照适宜度较高, 其次为温度; 玉米温度适宜度较高, 其次为光照; 夏、秋作物的水分适宜度都较低。水分对粮食作物的正常生长影响较大。近年来, 冬小麦、玉米光照适宜度呈上升趋势, 冬小麦温度适宜度呈上升趋势, 玉米温度适宜度呈下降趋势。冬小麦、玉米的水分适宜度分别以 0.013/10a 及 0.069/10a 的线性趋势下降。夏、秋粮生产受到的水分胁迫逐年增大。玉米综合气候适宜度一般大于冬小麦。夏、秋粮综合气候适宜度的较大差值出现在 20 世纪 80 年代末, 1971~1987 年玉米与冬小麦综合气候适宜度差值以 0.068/10a 线性趋势上升, 1987~2008 年差值以 0.047/10a 的趋势下降。近年来, 秋粮生产的气候优势逐渐降低。调整作物种植结构中应予以重视。

关键词: 甘肃河东; 40 年; 夏、秋作物; 气候适宜度; 变化

中图分类号: S162.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)05-0253-06

全球范围的气候变化较大地改变了作物的生态环境, 受区域气候变化的影响, 粮食作物种植结构渐变、作物生长发育节奏加快、作物种植界限北移、可种植海拔高度上限抬升等已成为事实^[1~3]。探索粮食作物适应气候变化的机理、机制及过程, 主动适应气候变化是适应维持粮食作物稳产、高产的重要措施。根据 IPCC 历次评估报告, 许多学者针对气候变化对单一及综合粮食作物生产的影响作了比较系统的评估^[4~6]。部分结论在近年的实际生产中得到验证^[7,8]。由于区域气候变化的复杂性, 作物适应气候变化的过程规律及其机制不易诠释, 尤其是在气候变化的敏感地区, 作物适应气候变化过程的规律还需大量深入的研究。

甘肃省是传统的农业大省, 位于西北区域气候变化的敏感地带^[9,10]。粮食作物的生产及丰歉受气候变化的影响比较大。本文根据甘肃省农业气象试验站、观测站多年试验、观测的主要夏、秋粮作物的平均物候期及当地较长序列的气候资料, 分析主要夏、秋粮气候适宜度变化及夏、秋粮种植气候优势变化情况, 揭示作物适应气候变化过程的规律, 为当地当前及今后作物的种植决策提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

甘肃省河东地区是指除河西走廊以外黄河以东的甘肃绝大部分地区。冬小麦、玉米是该区域主要种植的夏、秋粮食作物, 播种面积及产量占该区域粮食总量的 95% 及 92%。以冬小麦及玉米代表该区域主要种植的夏、秋粮作物。根据当地区域性气候特点, 选取西峰、天水农业气象试验站及平凉、成县、礼县农业气象观测站 1981~2008 年作物试验田平均物候观测资料(表 1)作为本研究的主要物候依据。气象资料选取上述 5 地气象站 1971~2008 年的作物生长期光照、温度及降水的逐日测量值。取 5 点的逐年气候适宜度平均值, 作为研究区域气候适宜度时间序列值。

1.2 气候适宜度计算方法

气候因子对作物生长的“适宜”和“不适宜”界限应该允许一定程度的模糊。根据有关文献^[11~13], 分别以(1)、(2)、(3)式表示作物的光照、温度及水分的适宜程度。在(1)式中, $S_{(si)}$ 为光照适宜度, 以日照百分率达到 70% 为临界点。日照时数 > 日照百分率 70% 时适宜度为 1, 小于 70% 适宜度小于

收稿日期: 2010-10-11

基金项目: 甘肃省气象局“十人计划”, 国家科技部公益行业专项(GYHY200806021)

作者简介: 蒲金涌(1960—), 男, 高级工程师, 主要从事应用气象业务及试验研究工作。E-mail: pujinyong6@163.com。

1; S_0 为当日日照百分率为 70% 的时数(h); S_i 为当日日照时数(h); b 为常数, 根据文献在不同的生育阶段其取值是不相同的^[11~13](表 2,3)。(2)式中, $S_{(T_i)}$ 为温度适宜度, 与作物不同生长发育期的不同的三基点温度关系密切^[14](表 2,3)。 T_i 为生育阶段或生育期逐日平均温度(℃); T_1 为某一发育期下限温度(℃); T_2 为上限温度(℃); T_0 为最适温度(℃)。(3)中, $S_{(R)}$ 为水分适宜度; R 为水分量(mm); R_0 为生理需水量(mm), 根据 FAO 给出作物系数, 利用实时气象资料及 Penman(98 版)公式计算而得^[15~17]。当降水量大于作物生理需水量时, 假定可以全部被作物吸收利用, 适宜度为 1, 当降水量小于作物生理需水量时, 适宜度定义为降水量与需水量的比值。植物对水分的利用比较复杂^[18], 考虑

到土壤对水分量的调节及作物对水分的利用特性, 降水量和生理需水量用某一生育阶段的总量。某一生育阶段或全生育期的温度及光照适宜度可用(4)式计算, 式中 m 为生育阶段或生育期的总天数; $S_{(c)}$ 为光照($S_{(S)}$)或温度($S_{(T)}$)适宜度。

$$S_{(ii)} = \begin{cases} e^{-[(S-S_0)/b]^2} \\ 1 \end{cases} \tag{1}$$

$$S_{(T_i)} = \frac{[(T_i - T_1)(T_2 - T_i)^B]}{[(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B]} \quad \left(B = \frac{(T_2 - T_0)}{(T_0 - T_1)} \right) \tag{2}$$

$$S_{(R)} = \begin{cases} 1 & R_i \geq R_0 \\ R/R_0 & R_i < R_0 \end{cases} \tag{3}$$

$$S_{(c)} = \frac{1}{m} \sum_i S_{(ci)} \tag{4}$$

表 1 甘肃作物种植区代表点平均发育期(月-日)(1981~2008 年)

Table 1 Average date of crop growth periods in representative points in Gansu (month - date) (1981 ~ 2008)

发育期 Growth stage	西峰 Xifeng		平凉 Pingliang		天水 Tianshui		成县 Chengxian		礼县 Lixian	
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
播种期 Sowing	09 - 17	04 - 22	10 - 02	04 - 17	10 - 10	04 - 18	10 - 19	04 - 11	10 - 13	04 - 18
出苗期 Seedling		05 - 04		05 - 06		05 - 03		04 - 27	10 - 24	05 - 04
三叶期 Three leaves	10 - 10		10 - 30		10 - 20		11 - 18		11 - 04	
停止生长 Stopping growing	11 - 23		12 - 01		12 - 12		12 - 27		12 - 07	
返青期 Reviving	03 - 08		03 - 05		02 - 20		02 - 10		03 - 05	
拔节期 Jointing	04 - 26	06 - 21	04 - 25	07 - 03	04 - 06	06 - 24	04 - 04	06 - 12	04 - 18	06 - 24
抽穗(雄)期 Heading or Tasseling	05 - 17	07 - 15	05 - 13	07 - 25	05 - 07	07 - 15	05 - 02	07 - 08	05 - 12	07 - 19
乳熟期 Milky	06 - 14	08 - 13	06 - 09	08 - 23	06 - 04	08 - 17	05 - 26	08 - 04	06 - 13	08 - 29
成熟期 Maturity	07 - 07	09 - 14	06 - 28	09 - 20	06 - 23	09 - 11	06 - 17	08 - 28	06 - 28	09 - 16

表 2 冬小麦不同生育期的上限、下限、最适温度及光照适宜度计算式的 b 值

Table 2 Maximum, minimum and optimum temperature of wheat and b value in different growth stages

项目 Item	播种期 ~ 三叶期 Bowling ~ Three leaves	三叶期 ~ 停止生长 Three leaves ~ Stopping growing	停止生长 ~ 返青期 Stopping growing ~ Reviving	返青期 ~ 拔节期 Reviving ~ Jointing	拔节期 ~ 抽穗期 Jointing ~ Heading	抽穗期 ~ 乳熟期 Heading ~ Milky maturity	乳熟期 ~ 成熟期 Milky maturity ~ Maturity
T_1	5	3	- 15	1	10	13	13
T_0	17	13	- 5	7	19	20	20
T_2	20	18	5	16	32	27	25
b	4.15	4.14	4.38	4.50	4.61	4.93	4.99

表 3 玉米不同生育期的上限、下限、最适温度及光照适宜度计算式的 b 值

Table 3 Maximum, minimum and optimum temperature of wheat and b value in different growth stages

项目 Item	播种期 ~ 出苗期 Bowling ~ Seedling	出苗期 ~ 拔节期 Seedling ~ Jointing	拔节期 ~ 抽雄期 Jointing ~ Tasseling	抽雄期 ~ 乳熟期 Tasseling ~ Milky maturity	乳熟期 ~ 成熟期 Milky maturity ~ Maturity
T_1	6	8	18	16	15
T_0	11	19	25	23	22
T_2	32	30	30	24	25
b	4.15	4.14	4.61	4.93	4.99

单因子气候适宜性虽然能够表述作物生长发育受该因子的影响,但却不能反映各因子的综合效应。参考以往研究,用(5)式来表示光、温、水对作物的组合作用^[19]。式中, C_r 为综合气候适宜度,参考以往的研究结论及当地作物的生产特点,光、温、水的权重系数分别取 0.20、0.32、0.48^[1,20]。 j 为生育期, n 为计算生育阶段所包括生育期数。

$$C_r = \sum_{j=1}^n (0.20S_{(s)j} + 0.32S_{(T)j} + 0.48S_{(R)j}) \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 冬小麦、玉米各生育期气候适宜度

2.1.1 冬小麦 冬小麦全生育期各气候因子适宜度差别较大。光照、温度适宜度分别为 0.72 和 0.70

达到较高水平,水分适宜度为 0.49。从播种到成熟光照适宜度及温度适宜度基本呈逐渐增高趋势(图 1)。光照适宜度较高阶段出现在返青期~拔节期及抽穗期~成熟期,除播种期~三叶期外,各个生育阶段均维持较高水平。抽穗期~乳熟期及乳熟期~成熟期温度适宜度较高,三叶期~越冬期较低。全生育期水分适宜度呈抛物线分布,三叶期~返青期及抽穗期~成熟期适宜度较低,水分对冬小麦生长胁迫较大。返青期~拔节期适宜度较高,水分利用程度较好。综合气候适宜度和水分适宜度变化趋势基本一致,返青期~拔节期较高,三叶期~拔节期及抽穗期~成熟期较低。由于抽穗期~成熟期光照、温度适宜度较高,此阶段综合适宜度高于水分适宜度。

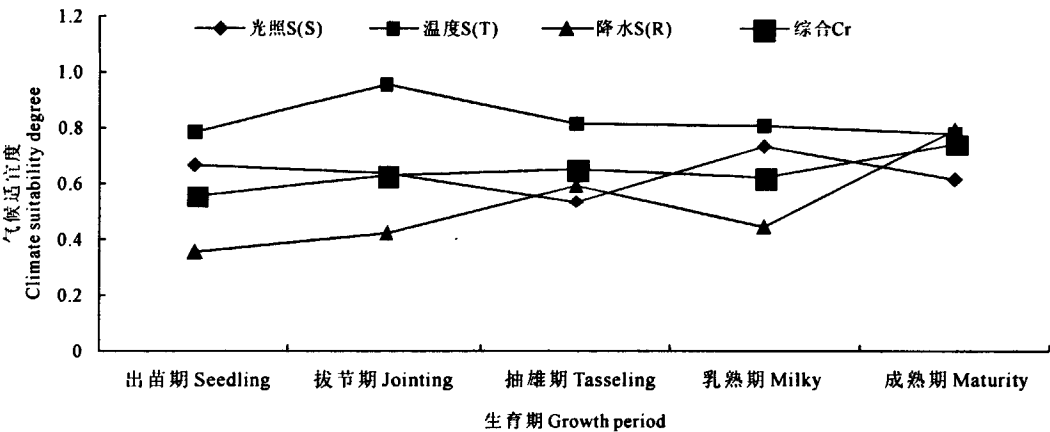


图 1 冬小麦各生育期气候适宜度

Fig.1 The climatic suitability degree in every growth periods of winter wheat

2.1.2 玉米 玉米全生育期各气候因子适宜度较高,光照、温度、水分适宜度分别为 0.64、0.83、0.52。光照适宜度抽穗期较低(图 2),出苗期~拔节期及乳熟期~成熟期较高。温度适宜度明显高于水分及光照适宜度。拔节期温度适宜度较高达 0.95,出苗、抽穗、乳熟及成熟期适宜度都在 0.78 以上,适宜

性较好。成熟期水分适宜度较高,抽穗期水分适宜度在 0.5 以上,受水分胁迫相对较小。出苗期、拔节期及乳熟期均在 0.5 以下,是水分供需矛盾较大的时段。综合气候适宜度从播种期到成熟期呈上升趋势,生长后期平均气象条件好于前期。

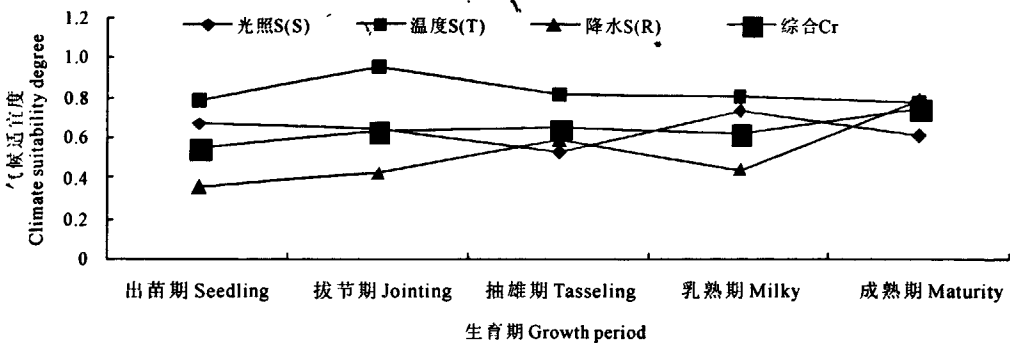


图 2 玉米各生育期气候适宜度

Fig.2 The climatic suitability degree in every growth periods of maize

2.2 冬小麦、玉米光照、温度、水分气候适宜度的年际变化

2.2.1 冬小麦 温度及光照基本能够满足冬小麦的正常生长需求,水分适宜性较差,与冬小麦生产的实际情况相符^[21]。1971~2008年,温度、光照适宜度分别为以 $0.01/10a$ ($R^2 = 0.1015$ $P > 0.01$) 及

$0.014/10a$ ($R^2 = 0.1562$ $P > 0.01$) 线性趋势上升,水分适宜度以 $0.013/10a$ ($R^2 = 0.1096$ $P > 0.01$) 线性趋势下降(图 3)。20 世纪 70 年代与 21 世纪初相比,气温及光照适宜度分别上升了 0.0175 和 0.0167,水分适宜度下降了 0.0306。水分适宜度的持续下降,使冬小麦种植的风险程度加大^[22]。

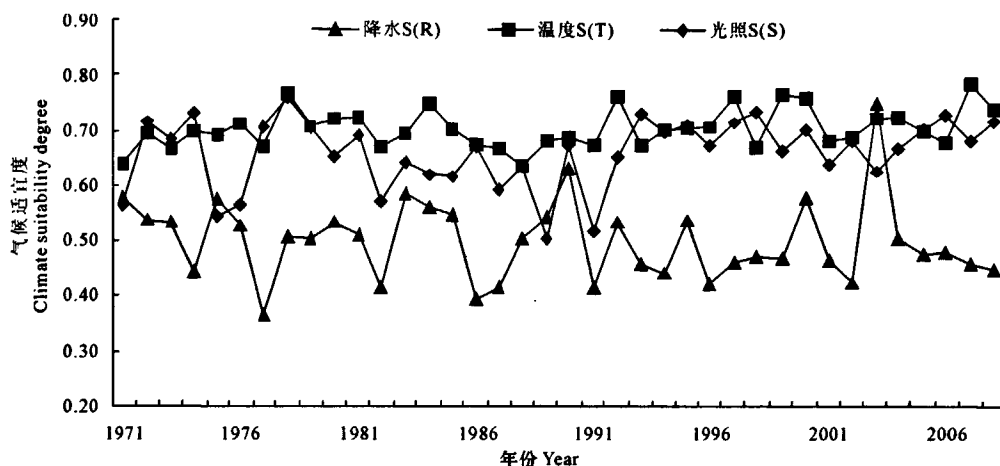


图 3 冬小麦全生育期气候适宜度的年际变化(1971~2008 年)

Fig.3 Annual variation of climatic suitability in whole growth period of wheat in 1971~2008

2.2.2 玉米 玉米全生育期温度、光照适宜度较高,水分是玉米生长发育的主要胁迫因子。1989 年是光照适宜度的转折年份(图 4),1971~1989 年适宜度以 $0.077/10a$ ($R = 0.3594$ $P < 0.1$) 的线性趋势下降,1989~2008 年以 $0.034/10a$ ($R = 0.065$ $P > 0.1$) 的线性趋势上升。温度适宜度的转折年份出现在 1991 年,1971~1991 年适宜度以 $0.054/10a$ (R

$= 0.2756$ $P < 0.1$) 的线性趋势上升,1991~2008 年以 $0.025/10a$ ($R = 0.0653$ $P > 0.1$) 的线性趋势下降。水分适宜度负距平出现在 20 世纪 70 年代及 90 年代后期,1984~2008 年以 $0.069/10a$ ($R = 0.3612$ $P < 0.1$) 的线性趋势逐年降低。水分对玉米正常生产的胁迫逐年增大。

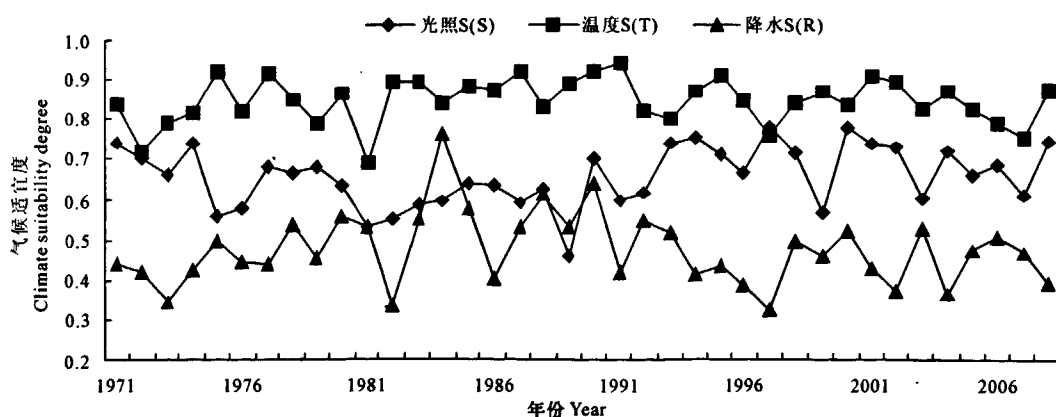


图 4 玉米全生育期气候适宜度的年际变化(1971~2008 年)

Fig.4 Annual variation of climatic suitability degree of maize in whole growth period in 1971~2008

2.3 各年代综合适宜度变化

各年度冬小麦综合气候适宜度线性变化趋势不明显。玉米综合气候适宜度变化转折年份出现在 1984 年(图 5),1971~1984 年适宜度以 $0.063/10a$ (R

$= 0.2774$ $P < 0.1$) 的线性趋势升高,1984~2008 年适宜度以 $0.032/10a$ ($R = 0.2763$ $P < 0.1$) 的线性趋势降低。大多数年份玉米的气候适宜度都高于冬小麦。20 世纪 70 年代到 80 年代,玉米生产的综合

气候适宜性持续好于冬小麦,20世纪80年代以来,玉米生长期气候条件优于冬小麦的趋势有所降低。玉米适宜度与冬小麦气候适宜度的差值1971~1987年以0.068/10a($R=0.3727$ $P<0.05$)的线性趋势

上升,1987~2008年以0.047/10a($R=0.3531$ $P<0.05$)的线性趋势下降。部分年份冬小麦综合气候适宜度大于玉米。

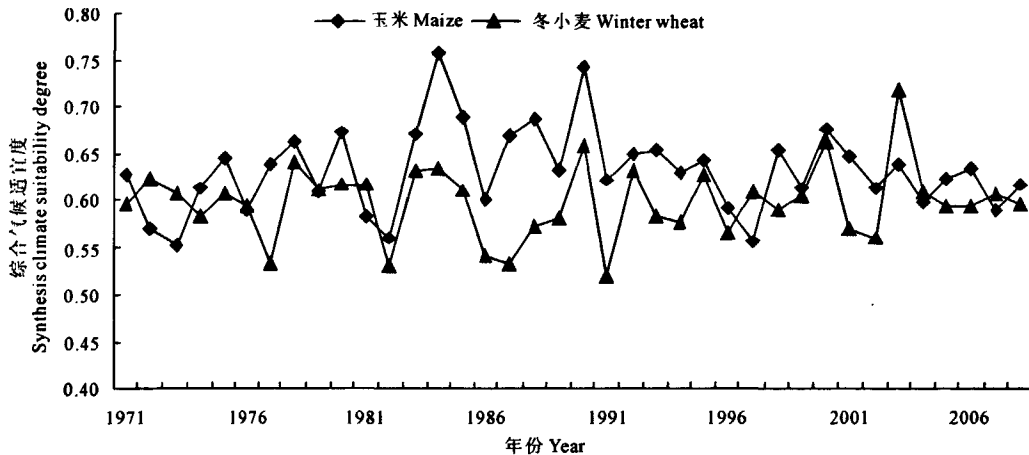


图5 冬小麦、玉米全生育期综合气候适宜度的年际变化(1971~2008年)

Fig.5 Annual variation of synthesis climate suitability degree of maize and winter wheat in whole growth period in 1971~2008

3 结论

运用建立的作物气候适宜度模型计算甘肃省作物种植区气候适宜性变化表明,冬小麦全生育期各气候因子的适宜度从高到低依次为光照、温度、水分,玉米为温度、光照、水分。表明水分是甘肃河东地区作物种植区主要限制因子。从播种到成熟,冬小麦的光照、温度适宜度基本呈逐渐升高趋势,后期生长光、温适宜条件好于初期,水分适宜性在拔节期较好,拔节期以前及乳熟期之后水分适宜性比较差。综合气候适宜度与水分适宜度分布基本一致。除出苗期~拔节期及乳熟期水分适宜度较低以外,玉米单因子及综合气候适宜度都比较高。全生育期生长发育气象条件比较优越。

自1971年以来,作物各气候因子适宜度变化不一。近年来,冬小麦温度、光照适宜度呈上升趋势,水分适宜度呈下降趋势。玉米温度、水分适宜度呈线性下降趋势,光照适宜度呈上升趋势。从20世纪70年代到80年代,玉米、冬小麦综合气候适宜度差呈线性上升趋势,20世纪80年代以后,玉米种植高于冬小麦的气候优势逐渐降低,2003年以来,玉米、冬小麦综合气候适宜几乎持平。在调整夏、秋粮食作物种植结构中应充分考虑这种变化趋势。

参考文献:

[1] 邓振镛,张强,蒲金涌,等.气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响[J].生态学报,2008,28(8):3760—3768.

[2] 王媛,方修琦,徐钺,等.气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为[J].资源科学,2005,27(1):121—127.
 [3] 王建元,薛德强,邹树峰,等.气候变暖对山东农业的影响[J].资源科学,2006,28(1):163—168.
 [4] 王石立,马玉平,庄立伟.东北地区玉米冷害预测评估模型改进研究[J].自然灾害学报,2008,17(4):12—18.
 [5] 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.
 [6] 熊伟,杨捷,林而达,等.未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J].地球科学进展,2008,24(10):167—171.
 [7] 赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度研究[J].资源科学,2003,25(6):78—82.
 [8] 千怀遂,魏东风.气候对河南小麦产量的影响及其变化研究[J].自然资源学报,2000,15(2):149—154.
 [9] 陶健红,王遂疆,王宝鉴.中国西北地区气温异常的特征分[J].干旱区研究,2007,24(4):510—515.
 [10] 李爽,王羊,李双成.近30年气候要素时空变化特征[J].地理研究,2009,28(6):1593—1605.
 [11] 千怀遂,焦士兴,赵峰.河南省冬小麦气候适宜性变化研究[J].生态学报,2005,24(5):503—507.
 [12] 刘青春,千怀遂,任玉兰,等.河南省棉花的温度适宜性及其变化趋势分析[J].资源科学,2004,26(4):52—56.
 [13] 徐选学,高鹏,蒋定生.延安降水对作物生长适宜性的模糊分析[J].水土保持研究,2000,7(2):73—76.
 [14] 龚绍先.粮食作物与气象[M].北京:北京农业大学出版社,1987:15—87.
 [15] 刘钰, Pereira L.S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报,2000,16(5):26—30.
 [16] 刘尧东,刘作新,张运福.参考作物蒸散计算方法及其评价[J].河南农业大学学报,2001,35(1):57—61.
 [17] 杨小利,蒲金涌,马鹏里,等.陇东地区苹果水分适宜性评估[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(9):71—

- 76.
- [18] 罗亚勇,赵学勇,黄迎新,等.植物水分利用效率及其测定方法研究进展[J].中国沙漠,2009,29(4):648—655.
- [19] 王丽霞,任志远.山西大同市农业生态气候适宜度评价[J].地理研究,2007,26(1):53—59.
- [20] 蒲金涌,张存杰,姚小英,等.干旱气候对陇东南主要粮食作物影响的评估[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):36—40.
- [21] 蒲金涌,邓振镛,姚小英,等.甘肃省冬小麦生态气候分析及适生种植区划[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):179—185.
- [22] 蒲金涌,张存杰.甘肃省冬小麦水分适应性动态变化研究[J].资源科学,2008,30(9):1397—1402.

Variations of summer and autumn grain crops' climatic suitability in the areas east of Yellow River in Gansu in recent 40 years

PU Jin-yong^{1,2}, YAO Xiao-ying³, YAO Ru-xin⁴

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key and Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Agrometeorological Experimental Station of Tianshui, Tianshui, Gansu 741020, China; 3. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China; 4. Tianshui Shimaping Middle School, Tianshui, Gansu 741020, China)

Abstract: Based on the phenological data of main summer and autumn grain crops in Tianshui and Xifeng Agrometeorological Experimental Stations and Pingling, Lixian and Chengxian Agrometeorological Observation Stations located in the areas east of the Yellow River in Gansu, the model for assessing climate suitability was set up. The variations of climatic suitability degrees in recent 40 years were analyzed with the model and climate suitability degrees of summer and autumn grain crops were compared and demonstrated. The result showed that the suitability degree of sunshine was relatively higher and that of temperature was the next in the whole growth period of winter wheat; but for maize the suitability degree of temperature was higher, and that of sunshine was the next in the whole growth period. The suitability degree of water was low for both winter wheat and maize that means the water was the restricting factor for production of both summer and autumn crops. The trends of the suitability degree of sunshine for both winter wheat and maize turned rising and the trends of that of temperature for winter wheat turned rising but for maize turned falling in recent years. The suitability degree of water for winter wheat and maize decreased by 0.013 and 0.069 every ten years respectively and water stress for both summer and autumn crops increased year by year. The synthetic climate suitability degree for maize was greater than that for wheat in most years. The most remarkable difference of synthetic climate suitability degree for summer and autumn crops appeared in late 1980s in which the value of synthesis climate suitability degree of maize minus that of wheat increased by 0.068 from 1971 ~ 1987 and decreased by 0.047 from 1987 ~ 2008 every ten years. It indicated that the superiority of autumn grain crops' production was dropping off compared with that of summer grain crops. We suppose that this trend should be paid more attention in adjusting the planting design.

Keywords: east of the Yellow River in Gansu; 40a; summer and autumn grain crops; climate suitability degree; variation