

甘肃省春油菜生育及产量形成对气候变化的响应

刘明春^{1,2}, 孙占峰², 蒋菊芳², 任丽雯²

(1. 甘肃省气象局 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室
中国气象局干旱气候变化与减灾开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000)

摘要: 利用甘肃省春油菜种植区甘肃民乐县 1987—2006 年、合作市 1987—1999 年油菜生育期、产量资料及光温水气象资料, 分析了气候变化特征及与油菜生长发育、产量形成之间的相互关系。结果表明: 气候变暖背景下, 甘肃油菜产区气温呈升高趋势, 气温倾向率在 $0.28 \sim 0.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 河西民乐产区气温增幅大于甘南合作产区。降水基本稳定, 两地增(民乐)、减(合作)幅较小。关键生育期——苔花期降水民乐呈减少趋势, 合作呈增加趋势; 气候变暖使油菜生育进程加快, 民乐现蕾—开花、开花—绿熟间隔日数减少趋势明显, 1997—2006 年平均日数较 1986—1996 年分别减少 13 d 和 4 d; 单位气候要素变化导致气候产量敏感程度不一, 民乐产区降水影响以正效应为主, 水分不足是产量提高的主要限制因子, 最大影响时段出现在苔花期。合作产区光温影响以正效应为主, 光温条件不足是主要限制因子, 其次是现蕾—开花期降水呈正效应。总体而言, 气候变化对高寒阴湿区油菜产量增加和品质形成更为有利, 不利于温带草原气候区油菜生产, 温带草原气候区应积极采取抗旱保墒、播种期提前等应对措施。

关键词: 气候变化; 气温; 降水; 春油菜; 生育进程; 产量

中图分类号: S162.5 **文献标志码:** A

The ecological climatic characteristics of spring rape and its response to climate change in Gansu province

LIU Ming-chun^{1,2}, SUN Zhan-feng², JIANG Ju-fang², REN Li-wen²

(1. The Gansu Province Meteorological Bureau, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. Agrometeorological Experiment Station of Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: Using information on the growth and yield of rape and meteorological data from the rape planting area in Gansu, Minle (1987—2006) and Hezuo (1987—1999), we analyzed the correlation between characteristics of climate change and rape growth and yield in Gansu province. The results showed that the temperature rises in the spring rape planting area of Gansu due to global warming, with a tendency rate at $0.28 \sim 0.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$. And the temperature increased more in Hexi Minle region than Gannan cooperation areas. The precipitation was basically stable with minor increase (Minle region) and subtle reduction (Gannan cooperation areas). The rape growth rate went up because of climate warming. The interval days shortened significantly from bud/blossom to blossom/green mature in Minle region, resulting in average decreases of 13D and 4D from 1997 to 2006 than 1986—1996, respectively. Changes in unit climate elements led to the climatic yield with inconsistently sensitive degree. Effect of precipitation was positively correlated in Minle region. Water shortage was the main limiting factor for yield increase, influencing mostly at moss flowering stage. The effects of light and temperature were positive in Gannan cooperation areas. Insufficiencies in light and temperature were the primary limiting factors. The precipitation in budding and blossom period showed positive effect. Overall, the climate changes were more favorable for rape yield increase and quality formation in cold and damp area, whereas these were preferred in the temperate steppe climate zones. Rape growth in the latter would be actively adopted by storing water, early sowing, and the introduction of drought resistant measures.

Keywords: climate change; temperature; precipitation; spring rape; growing process; yield

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 国家重大科学研究计划“全球典型干旱半干旱地区气候变化及其影响”(2012CB955304); 科技部公益研究项目“西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究”(GYHY200806021-01)

作者简介: 刘明春(1966—), 男, 青海互助人, 高级工程师, 主要从事于旱区应用气象研究。E-mail: Liumcwqxj@163.com。

根据《第二次气候变化国家评估报告》^[1], 1951—2009 年, 中国陆地表面平均温度上升了 1.38℃, 变暖速率为每 10 a 升温 0.23℃。中国气候变暖最明显的地区在西北、华北和东北地区, 特别是西北地区变暖的强度高于全国平均值。农作物对全球气候变化响应的研究可以揭示全球变化的生物学响应机制, 是全球变化生态系统响应的基础研究^[2-4]。有关中国北方及西北地区的气候变暖对农业生产及生态环境影响方面已开展了大量的研究^[5-19]。据已有研究认为, 气候变化将引起中国未来农业生产的不稳定性增加, 产量波动增大, 农业生产布局 and 结构出现变动, 农业生产条件改变, 农业成本和投资大幅度增加等^[9-10]。

油菜是甘肃省第二大经济作物和油料作物, 种植面积由 20 世纪 80 年代初 1981 年的 4.08 万 hm^2 , 增加到本世纪初 2000 年的 13.75 万 hm^2 , 产量由 3 147 万 kg 增加到 22 050 万 kg, 已成为山区农民增收致富的支柱产业和区域经济增长亮点。分析研究气候变化对油菜生产的影响, 对有效应对气候变化、科学指导区域作物布局和农业结构调整、转变生产方式、提高种植效益及促进农业可持续发展具有重要的意义。

1 资料来源与数据处理

1.1 资料来源

选择甘肃省春油菜主产区甘肃河东南部的合作市(北纬 35°00', 东经 102°54', 海拔 2 910 m)和河西走廊中部的民乐县(北纬 38°27', 东经 100°49', 海拔 2 281 m)作为研究区域, 分别代表高寒阴湿气候区和走廊温带草原气候。油菜发育期和产量资料采用民乐县、合作市气象局农业气象观测站历年田间定位观测资料, 资料年代分别为 1987—2006 年和 1987—1999 年, 观测方法和标准采用国家气象局制定的“农业气象观测规范”。气象资料采用当地气象局的观测数据。

1.2 数据处理

1.2.1 气候倾向率 气候要素的趋势变化采用气候倾向率来表示^[20]。用 X_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, 用 t_i 表示 X_i 所对应的时间, 建立 X_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程: $X_i = a + bt_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。式中: a 为回归常数, b 为回归系数。 a 和 b 可用最小二乘法进行估计。以 b 的 10 倍作为气候要素的气候倾向率。

1.2.2 积分回归分析 气温、降水、日照等单位气象要素变化对油菜气候产量(实际产量和趋势产量的差值)的影响, 通过求算积分回归方程中的偏回归

敏感系数 $A(t)$, 来鉴别油菜各个生长期不同气象条件对作物生育及产量的贡献^[21]。

$$Y_w = C + \sum_{i=1}^m A(t) \times X_{ti}$$

式中, Y_w 为气候产量计算值($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为常数项; t 为生育时段(旬)。

1.2.3 气候产量求算 用民乐、合作历年油菜单产资料, 采用正交多项式拟合, 对产量资料进行处理, 提取气候产量:

$$y_w = y - y_t - y_e$$

其中, y_w 为气象因素变化引起的气候产量; y 为实际产量; y_t 为栽培技术、品种更替、农业投入等因素决定的趋势产量; y_e 为随机变化项(可忽略不计)。用气候产量比较客观地反映产量在不同气象条件下波动情况。

2 结果与分析

2.1 气候生态适应性

河西沿山冷凉区以种植甘蓝型油菜为主, 品种有 79C30、杂交种 4017、951 等, 多为中熟、中晚熟品种。一般在 4 月中下旬播种, 8 月下旬—9 月上旬成熟, 全生育期 119 ~ 152 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 1 700℃ ~ 2 000℃, 降水量 243 mm。日照时数 1 147.4 h(表 1)。中晚熟品种生育天数较中熟品种推后 6 ~ 10 d 左右。 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温中熟品种需 1 686℃ ~ 2 046℃, 平均 1 872℃, 中晚熟品种需 2 048℃, 后者较前者多 176℃; 甘南东南部高寒山区以种植白菜型油菜为主, 兼种少量芥菜型油菜。白菜型品种有甘南 1 号、7905-1-5 等, 为中早熟品种。芥菜型品种有甘芥二号、甘南三号等, 为中熟品种。一般在 4 月下旬至 5 月上旬播种, 8 月下旬—9 月上旬初成熟, 全生育期 109 ~ 150 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 1 200℃ ~ 1 500℃, 降水量 323 mm, 日照时数 897.5 h。其中白菜型中熟品种需 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温 1 215℃ ~ 1 483℃, 平均 1 394℃。芥菜型中熟、中晚熟品种分别需 1 432℃ 和 1 490℃。

2.2 油菜主产区气候变化特征

2.2.1 气温变化 甘肃春油菜主产区油菜生育期间(4 月下旬—8 月下旬)气温均呈逐年代增加趋势, 气温倾向率河西民乐为 $0.31^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 甘南合作为 $0.28^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。关键生育期苔花期(现蕾—开花期)气温亦呈逐年代增加趋势(图 1), 气温倾向率民乐、合作分别为 0.38 、 $0.33^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。民乐苔花期平均气温上世纪 60 年代维持在较高水平, 70 年代处于谷底, 最小值出现在 1977 年(为 13.5°C)。之后气温逐步回升, 2001—2010 年平均为 16.8°C , 较 20 世纪 70 年代平均升高 1.8°C , 最大值出现在 2001 年(为

18.3℃)。合作苔花期平均气温 20 世纪 60 年代除 1961 年较高(为 12.7℃)外,总体气温较低,之后呈波动式逐年代上升趋势,80 年代气温最高,极大值出

现在 2002 年,为 13.6℃。可见,不论是全生育期还是苔花期,河西民乐产地气温增幅均大于甘南合作产地。

表 1 春油菜生育阶段气象要素

Table 1 The meteorological elements during spring rape growth

地区 Area	年份 Year	项目 Items	出苗—现蕾 Emergence - bud	现蕾—开花 Bud - flowering	角果成熟期 Pod maturity stage	播种—成熟 Sowing - maturity
民乐 Minle	1987—2006	生育期(旬/月) The growth stage (ten days/month)	中/5 ~ 中/6 Mid. May ~ mid. June	下/6 ~ 上/7 Late June ~ early July	中/7 ~ 上/9 Mid. July ~ early September	下/4 ~ 上/9 Late April ~ early September
		间隔日数/d The interval days	33	20	57	131
		平均气温/℃ The average temperature	13.7	15.9	16.1	14.4
		≥0℃ 积温/℃ ≥0℃ accumulated temperature	444.2	325.2	910.0	1885.3
		降水量/mm Precipitation	50.1	44.8	126.9	243.4
		日照时数/h Sunshine hours	296.7	178.5	477.1	1147.4
		合作 Hezuo	1987—1999	生育期(旬/月) The growth stage (ten days/month)	中/5 ~ 中/6 Mid. May ~ mid. June	中/6 ~ 上/7 Late June ~ early July
间隔日数/d The interval days	33			24	50	128
平均气温/℃ The average temperature	9.8			12.5	13.1	10.9
≥0℃ 积温/℃ ≥0℃ accumulated temperature	320.0			297.9	651.3	1396.8
降水量/mm Precipitation	75.4			64.0	146.3	323.2
日照时数/h Sunshine hours	238.1			158.8	351.1	897.5

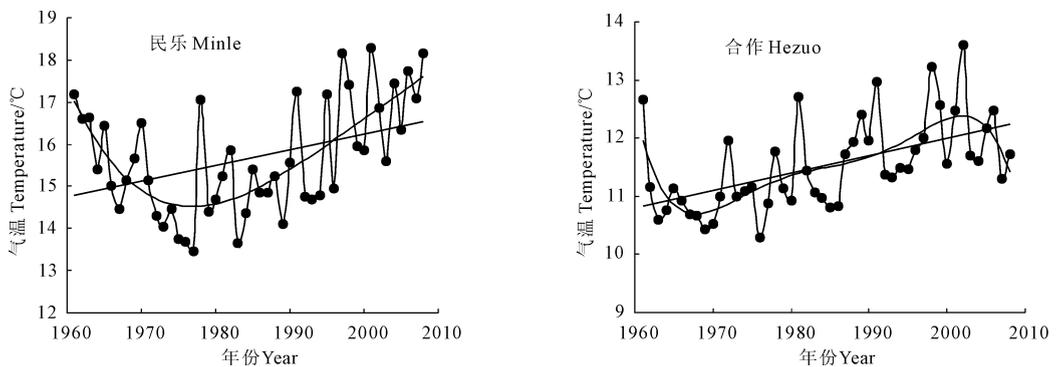


图 1 油菜苔花期平均气温历年变化

Fig.1 The average temperature changes over the years in rape moss flowering

2.2.2 降水变化 油菜生育期间降水河西民乐呈增加趋势,降水倾向率 $5.0 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。苔花期历年降水量呈减少趋势,降水倾向率 $-2.3 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。其中,60~70年代降水量呈增加趋势,降水量在 46~62 mm。80年代开始呈减少趋势,本世纪 2001—

2010 年平均只有 36 mm,较最多的 20 世纪 70 年代减少 42%。降水量最大值为 120.7 mm,出现在 1969 年,较历年平均值偏多 1.6 倍;甘南合作油菜历年生育期间降水呈减少趋势,降水倾向率 $-8.7 \text{ mm} \cdot$

$10a^{-1}$ 。苔花期历年降水量呈增加趋势,降水倾向率 $5.4 \text{ mm} \cdot 10a^{-1}$ 。其中,20 世纪 60—80 年代呈线性增加,降水量在 67 ~ 104 mm 之间,90 年代至本世纪

2001—2010 年呈波动式回落,降水量有所减少,降水量在 88.6 ~ 93.3 mm。降水量最大值为 178.5 mm,出现在 1984 年,较历年平均值偏多 1 倍(图 2)。

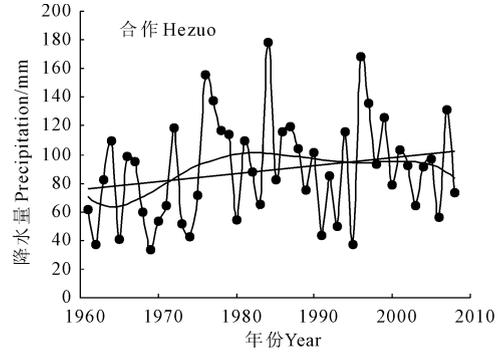
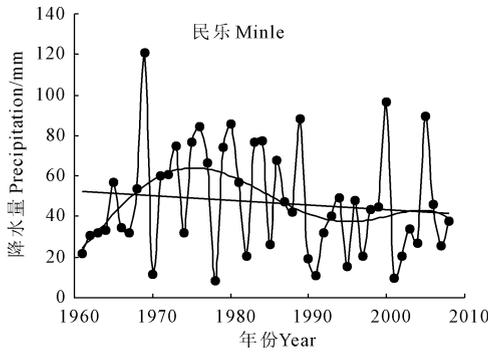


图 2 油菜苔花期降水历年变化

Fig.2 The precipitation changes over the years in rape moss flowering

2.3 气候变化对油菜生育的影响

2.3.1 气象因子与油菜产量的相关分析 相关分析表明,民乐油菜气候产量与各生育期降水量均为正相关,说明降水增加有利于产量的提高,特别是与开花一角果成熟期降水量呈显著正相关(图 3),相关系数为 0.464,通过显著性水平检验 ($P > 0.05$)。气候产量与各生育阶段平均气温均为负相关关系,说明民乐产区气温偏高不利于产量的增加,特别是与现蕾—开花期气温呈显著负相关,相关系数为 -0.623,通过极显著水平检验 ($P > 0.01$),高温对气候产量抑制作用明显。气候产量 (Y_w) 与现蕾开花期平均气温 (T) 的拟合方程为: $Y_w = 146.07 - 8.856T$,据此求出气候产量为零时的气温上限为 16.5°C ,气温再升高,气候产量呈现负值。如民乐 1991、2001 年这一时期气温分别达 18.9°C 、 18.3°C ,气候产量均为负值,分别为 -240.0 、 $-917.0 \text{ kg} \cdot$

hm^{-2} ,为历年最低值。

合作市油菜气候产量与各阶段平均气温均为正相关关系,但相关均不显著,播种出苗期相关系数为 0.497,接近显著性水平 ($P > 0.05$),说明出苗期气温偏低影响种子正常发芽出土,影响出苗率。气候产量与现蕾开花期降水量呈显著正相关,相关系数为 0.570,通过显著性水平检验 ($P > 0.05$),说明合作市这一时期降水不足,是气候产量提高的主要限制因子。现蕾开花期是需水临界期,此期水分充足,花序延长,落花落角减少,可显著提高产量。如 1989 年现蕾开花期干旱严重,降水量只有 40 mm,这一时期气候产量达历年最低值,为 $-334.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

通过以上分析看出,民乐产区油菜产量主要受到高温影响,特别是现蕾开花期高温对产量制约较大。合作产区主要受到现蕾开花期降水不足影响,其次是出苗期气温偏低。

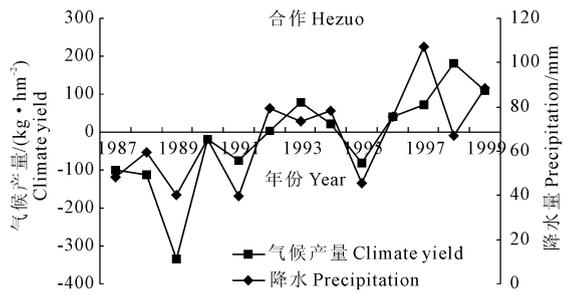
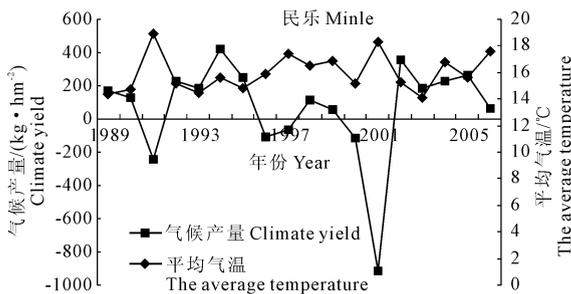


图 3 油菜气候产量与现蕾—开花期主要气象因子历年变化

Fig.3 Rape climate yield and changes of main meteorological factors during squaring blossom period over the years

2.3.2 对生育进程的影响 分析民乐产区 20 世纪 80 年代中期以来历年各生育阶段变化(图 4),全生育期中以生殖生长阶段各发育期缩短最为明显。其中,开花一角果绿熟期历年(1997—2006 年)平均气温 (16.8°C) 较前 10 a (1987—1996 年) 平均气温

(15.1°C) 平均高 1.7°C ,间隔日数平均缩短 13 d。其次为现蕾—开花期,1997—2006 年平均气温 (16.4°C) 较前 10 a (1987—1996 年) 平均气温 (15.5°C) 平均高 0.9°C ,间隔日数平均缩短 4 d。

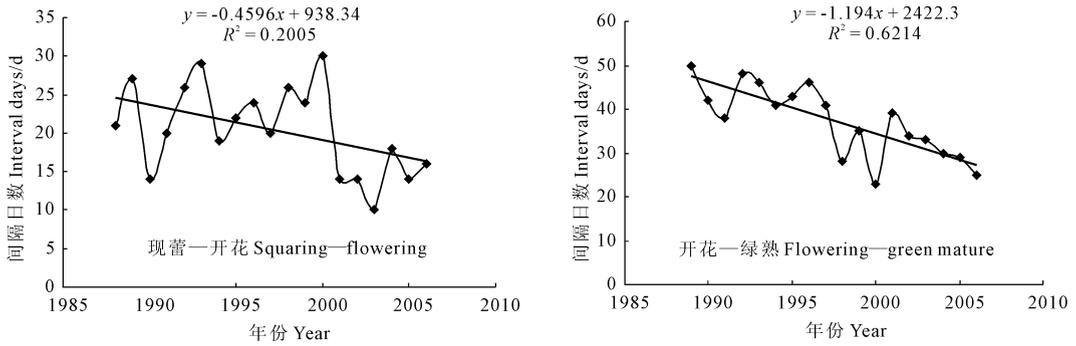


图 4 油菜主要生育期间隔日数历年变化

Fig.4 Changes of interval days during rape main growth over the years

2.3.3 对油菜产量的影响 利用油菜气候产量与全生育期气象因素求算积分回归 $\alpha(t)$ 值(图 5),民乐油菜气候产量与生育期降水大多数时间呈正效应,与气温、日照大多呈负效应。分阶段看,苗期降水每增加 1 mm,气候产量平均增加 $49.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,气温(日照)每升高(增加) 1°C (1 h),气候产量平均减少 $34.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($35.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);现蕾—开花期降水正效应明显,说明旺盛生长期因蒸发蒸腾强烈对水分需求较大但实际水分供给不足,降水多寡对产量较为敏感,降水每增加 1 mm,气候产量平均增加 $120.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此期也是气温负效应最大的时期,气温每升高 1°C ,气候产量减少 $81.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;角果成熟期气温、日照呈正效应,光温条件好促进灌浆成熟,增加粒重,且品质好,气温每升高 1°C ,气候产量增加 $171.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。降水呈负效应,因降雨和低温易造成贪青晚熟,影响产量和品质形成。

合作油菜各生育时段气象要素对产量的影响趋势同民乐基本相反,光温因子多数时段呈正效应,降水多数时段呈负效应。播种至苗期光温条件好有利于正常播种和种子快速发芽,保证基本苗数,气温(日照)每升高(增加) 1°C (1 h),气候产量平均增加 $35.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($21.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。降水呈负效应,降水过多易造成土壤温度下降或土壤板结,使出苗缓慢或形成粉籽,影响出苗率;现蕾—开花期日照与产量呈正相关,这一时期正值营养和生殖生长并进阶段,对日照和水分条件要求较高。日照每增加 1 h,气候产量平均增加 $47.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。降水每增加 1 mm,气候产量平均增加 $31.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;角果成熟期气温、日照呈正效应,降水呈负效应,气温高、日照充足有利于促进植株成熟,防止霉变,同时也有利于角果发育和油分积累,产量和品质显著提高。其中,气温每升高 1°C ,气候产量平均增加 $37.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

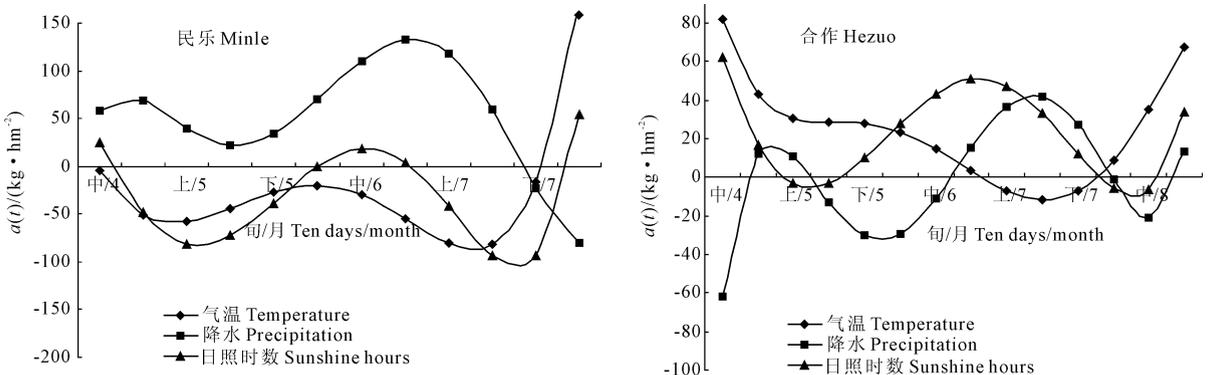


图 5 油菜气候产量与气象因子积分回归曲线

Fig.5 Rape climate yield and meteorological factor score regression curves

3 结论与讨论

1) 河西温带草原区种植甘蓝型油菜全生育期 119~152 d,中晚熟品种生育期较中熟品种多 6~10 d。 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温中熟品种平均需 1872°C ,中晚熟品种需 2048°C ;甘南东南部高寒山区白菜型油菜全

生育期 109~150 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温需 $1200^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ 。其中白菜型中熟品种 $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温平均需 1394°C ,芥菜型中熟、中晚熟品种分别需 1432°C 和 1490°C 。

2) 甘肃春油菜主产区气温呈现逐年代升温趋势,全生育期气温倾向率 $0.28 \sim 0.31^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,苔花

期在 $0.033 \sim 0.038^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 增温幅度河西产区大于甘南产区; 降水变化不一, 但总体稳定, 河西民乐呈略增加趋势, 线性倾向率为 $0.50 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。合作呈略减少趋势, 倾向率为 $-0.87 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。苔花期降水量民乐呈减少趋势, 倾向率为 $-2.3 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 合作呈增加趋势, 倾向率为 $5.4 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

3) 民乐产区油菜气候产量与气温呈负相关, 特别与现蕾—开花期气温呈极显著负相关 ($P > 0.01$)。气候产量与各生育期降水呈正相关, 特别与开花—角果成熟期降水呈显著正相关 ($P > 0.05$); 合作油菜气候产量与气温呈正相关, 播种—出苗期气温接近显著水平 ($P > 0.05$)。与现蕾—开花期降水量呈显著正相关 ($P > 0.05$)。

4) 气候变暖使民乐县油菜生殖生长阶段明显缩短, 现蕾—开花期、开花—角果绿熟期间隔日数呈减少趋势, 1997—2006 年较 1986—1996 年分别减少 13 d 和 4 d。

5) 民乐产区油菜气候产量降水正效应主要表现在苔花期, 降水每增加 1 mm, 气候产量平均增加 $120.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此期气温每升高 1°C , 气候产量减少 $81.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。日照对气候产量的影响趋势和气温同步; 合作产区气温正效应主要表现在播种—出苗期, 气温每升高 1°C , 气候产量平均增加 $35.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。降水正效应主要在苔花期, 降水每增加 1 mm, 气候产量平均增加 $31.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。降水负效应主要在播种—出苗期, 降水每增加 1 mm, 气候产量平均减少 $61.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。日照对气候产量的影响趋势中后期和降水趋势一致。

气候变暖背景下, 民乐产区虽然全生育期降水呈增加趋势, 由于增幅不大, 降水总量小, 而气温升幅较大, 特别是现蕾—开花期高温超过耐受上限温度, 籽粒不孕率将上升。加之关键生育期——苔花期降水呈减少趋势, 在长光照作用下, 油菜植株蒸散耗水将会增加, 缺水矛盾将进一步加剧, 对形成高产不利。合作产区气温升幅略小于河西民乐产区, 虽然降水略有减少, 但苔花期降水量呈增加趋势, 有利于结实和产量的提高。另外随着播种—出苗期光温条件的改善, 有利于种子快速萌发, 减少烂种, 提高出苗率, 稳定基本苗数, 为高产奠定基础。成熟期光温条件改善有助于叶片、茎秆中营养物质向籽粒转运, 有利于角果发育和油分积累, 籽粒饱满, 促进植株成熟, 防止霉变, 产量和品质将得到显著提高。因此, 气候变暖对甘肃春油菜产区来说, 高寒阴湿区油菜生态气候环境将逐渐趋好和改善, 朝有利于春油菜产业方向发展。相反, 温带草原气候区油菜生态气候环境将趋于变劣, 高温干旱影响加重, 应积极采

取抗旱保墒、播种期提前、引进晚熟品种、种植界限向高海拔转移等应对措施。

参考文献:

- [1] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[R]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 张新时, 周广胜, 高琼, 等. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究[J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2): 137-144.
- [3] Wang Runyuan, Zhang Qiang, Wang Yaolin. Response of corn to climate warming in arid areas in northwest China[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(12): 1387-1392.
- [4] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981—1991[J]. Nature, 1997, 386: 698-702.
- [5] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(1): 主要研究成果[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 57-67.
- [6] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学进展与未来趋势[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 467-469.
- [7] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 61-74.
- [8] 林而达, 杨修. 气候变化对农业的影响评价及适应对策[C]//全国政协人口资源环境委员会, 中国气象局. 气候变化与生态环境研讨会文集. 北京: 气象出版社, 2003: 72-77.
- [9] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 448-454.
- [10] 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 200-205.
- [11] 李红军, 汪志红, 魏文寿. 近 40 年来塔里木河流旱涝的气候变化[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 801-807.
- [12] 刘明春, 张强, 邓振镛, 等. 气候变化对石羊河流域农业生产的影响[J]. 地理科学, 2009, 29(5): 727-732.
- [13] 张强, 邓振镛, 赵英东, 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, 20(3): 1210-1218.
- [14] 王润元, 张强, 王耀林, 等. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应[J]. 植物学报, 2004, 46(12): 1387-1392.
- [15] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业生产的影响[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.
- [16] 袁玉江, 魏文寿, 穆桂金. 天山山区近 40 年秋季气候变化特征与南、北疆比较[J]. 地理科学, 2004, 24(6): 674-679.
- [17] 秦大河. 气候变化对农业生态的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [18] 刘明春. 石羊河流域气候干湿状况分析及评价[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 880-884.
- [19] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135-142.
- [20] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [21] 魏淑秋. 农业气象统计[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1985.
- [22] 张惠玲, 邓振镛, 尹宪志, 等. 甘肃省油菜生态气候适应性分析与适生种植区划[J]. 中国农业气象, 2004, 25(4): 51-55.
- [23] 姚玉璧, 邓振镛, 王润元, 等. 气候暖干化对甘肃马铃薯生产的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 196-202.
- [24] 邓振镛. 干旱地区农业气象研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999.