

西北温凉半湿润区气候变化对马铃薯生长发育的影响 ——以甘肃岷县为例

姚玉璧^{1,2,*}, 张秀云², 王润元¹, 邓振镛¹, 卢汉威³

(1. 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重点开放实验室, 兰州 730020;

2. 甘肃省定西市气象局, 甘肃 定西 743000; 3. 甘肃省岷县气象局, 甘肃 岷县 743000)

摘要:利用西北温凉半湿润区马铃薯生长发育定位观测资料、加密观测和对应平行气象观测资料,分析气候变化对马铃薯生长发育的影响,以及马铃薯块茎生长与气象条件的关系。结果表明,研究区域降水量年际变化呈下降趋势,降水量变化曲线线性拟合倾向率为 $-8.329\text{ mm}/10\text{a}$ 。降水量存在3a的年际周期变化。气温年际变化呈上升趋势,气温变化曲线线性拟合倾向率为 $0.144\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。作物生长季干燥指数呈显著上升趋势,干燥指数变化曲线线性拟合倾向率为 $0.042/10\text{a}$,20世纪90年代初至2007年明显趋于干旱化。马铃薯播种到采收约需150—168d,需 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温2000—2300 $^{\circ}\text{C}$,降水量400—500mm,日照时数900—1100h。马铃薯在播种后105d开始,块茎由缓慢生长转为迅速生长阶段;在播种后127d,块茎生长速度最大;播种后149d开始,块茎生长从迅速生长又转为缓慢生长。对马铃薯生长发育全生育期而言,受气候变暖的影响,马铃薯花序形成期每10a提前8—9d,开花期每10a提前4—5d。气温对马铃薯产量形成除采收期外,其余为负效应,块茎膨大期对气温变化十分敏感;而降水量的影响函数同热量的影响函数呈反相位分布,除出苗期和采收期降水量为负效应外,其余时段降水量对马铃薯产量形成均为正效应,马铃薯分枝期到开花期对降水量变化十分敏感。

关键词:西北地区;气候变化;马铃薯;生育;块茎形成

Impacts of climatic change on potato growth in the semi-humid region over extra-tropical and cool Northwest of China: a case study in Minxian County of Gansu Province

YAO Yubi^{1,2,*}, ZHANG Xiuyun², WANG Runyuan¹, DENG Zhenyong¹, LU Hanwei³

1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, China Meteorological Administration, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

2 Meteorological Bureau of Dingxi of Gansu Province, Dingxi 743000, China

3 Meteorological Bureau of Minxian County of Gansu Province, Minxian County 743000, China

Abstract: Using potato growth and meteorological condition observational data in the cool and semi-humid region over northwest China to analyze the effects on potato growth of climatic change and the relationship between potato growth and meteorological condition. The results show that precipitation displays a descending trend, and it changes in a velocity of $-8.329\text{ mm}/10\text{a}$ change and an annual period change of 3a. It is proved that the temperature displays a marked ascending trend and changes in a velocity of $0.144\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. It is also proved that the aridity index displays an ascending trend during the crop growth period, it changes in a velocity of $0.042/10\text{a}$, and the tendency is significant from the beginning of 1990 to 2007 year. It is showed that potato needs 150—168d, about 2000—2300 $^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature above 0°C , about 400—500mm precipitation and about 900—1100h sunshine duration from sowing to reaping. It is also showed that potato tuber growing velocity turns to higher at the 105d after sowing and becomes lower at the 149d after sowing. The time of the

基金项目:2008年度国家公益性行业(气象)科研专项资助项目(CYHY200806021); 国家科技部科研院所社会公益研究专项资助项目(2005DIB3J100); 干旱气象科学研究基金资助项目(IAM200904, IAM200811)

收稿日期:2008-09-13; **修订日期:**2009-02-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaoyubi@163.com

highest velocity is the 127d after sowing. The inflorescence forming period is ahead for (8—9)d/10a and the florescence period is ahead for (4—5)d/10a because of the warming climate. Except for that in the reaping period, the temperature is negative to the yield, and it is sensitive to the temperature during the tuber expansion period. The influences of precipitation and temperature are distributed in an in-phase opposition. Except for that in the seedling and reap periods, precipitation is positive to the yield, and it is sensitive to precipitation from the bifurcation period to the florescence period.

Key Words: Northwest China; climate change; potato; growth; tuber forming

气候系统的变暖是不争的事实,人为增暖可能已对许多自然和生物系统产生了可辨别的影响^[1]。在中高纬度地区,如果局地温度增高 1—3℃,粮食产量预计会有少量增加;若升温超过这一范围,某些地区农作物产量则会降低^[2]。气候变暖已经成为全球变化的主要特征,有关气候变暖影响的研究已成为目前国内外关注的热点科学问题。我国西北地区对气候变暖的响应更敏感,对气候变化的适应能力更脆弱,受气候变暖的影响程度会更加严重,所造成的各方面损失也会更加巨大。气候变暖通过对农业气候条件的改变能够影响到包括农作物生长、病虫害、种植面积、气候生产力、产量和品质等在内的各个方面,是目前西北地区发展现代农业所需要考虑的重要科学问题之一^[3-7]。

马铃薯是我国最有发展前景的高产经济作物之一,同时也是十大热门营养健康食品之一。全世界有 2/3 以上的国家种植马铃薯,产量约达 3.2 亿 t,仅次于小麦、玉米、水稻,居第 4 位。马铃薯营养丰富,素有“地下苹果”、“第二面包”之称,是世界粮食市场的主要食品。中国马铃薯种植面积达 533 万 hm^2 ,年产量 8000 万 t,均居世界前列。马铃薯生产对保证国家粮食安全有重要作用。西北温凉半湿润区是我国马铃薯主产区之一,该区域属雨养农业区,作物对气候变化的响应既敏感又脆弱,马铃薯生长发育对气象条件的依赖性极强,气象条件对其生长发育影响大^[8-10]。但是,就该区域气候变化对马铃薯影响的研究尚不多见,对这一问题还没有形成比较系统而完整的科学认识,本文研究西北温凉半湿润区气候变化及其对马铃薯生长发育、块茎形成和产量的影响,为发展马铃薯产业提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

试验在甘肃省岷县农业气象观测站进行,该站位于甘肃省南部,属温凉半湿润气候区。该站海拔高度 2315.0m。年平均气温 5.8℃;年降水量 560.8mm;降水集中于夏季 6—8 月份,降水量 292.8mm,占年降水量的 52%;春季降水略多于秋季,分别为 133.9 mm、125.2 mm;冬季最少,为 8.9 mm;雨热同季。年太阳总辐射为 5270.4MJ/ m^2 ,整个农事季节(日平均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 期间)总辐射为 3767.0MJ/ m^2 ,作物生长旺盛期(日平均气温稳定 $\geq 10^\circ\text{C}$ 期间)为 2092.8MJ/ m^2 ;年平均日照时数 2184.0h,最多 2422.4h,最少 1865.0h。无霜期平均为 109d,最长 155d,最短 81d。

1.2 研究方法

1989—2007 年连续 19a 进行了马铃薯生长发育及产量形成定位观测试验;试验取样地段与大田相连,未灌溉,品种及耕作管理措施与大田相同。观测方法按照中国气象局农业气象观测规范,在马铃薯生长发育期取 4 个重复,观测发育期、生长高度、密度、叶面积,叶、叶柄、茎和块茎的生长量、干物质和产量等要素。2007 年增加观测次数,逢 3、逢 5、逢 8、逢 10 日加密观测。同期对比观测气象资料为该站地面气象观测资料。

气候分析资料为该站 1951—2007 年地面气象观测资料。

1.3 统计计算方法

气候要素的趋势系数变化采用一次线性方程表示,其斜率的 10 a 变化称为气候倾向率,可以从气候趋势系数求出气候倾向率^[11],单位为每 10 a 某要素单位。

小波分析是一种时、频多分辨率分析方法,是一个时间和频率的区域变换,因而能有效的从信号中提取信

息,通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化。小波基(母波)的种类较多,本文采用 Morlet 小波能量谱。在实际应用时常将连续小波变换离散化^[12]。

作物生长季干燥指数将陈明荣干燥度公式修正而得到:

$$G = \frac{C \sum T_{5-10}}{R}$$

式中, G 为作物生长季 5—10 月份干燥指数, G 越大说明越干燥,反之 G 越小说明越湿润; $\sum T_{5-10}$ 为作物生长季(5—10 月份) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温; C 为海拔高度订正系数,海拔高度在 2000m 以下, C 为 0.28;海拔高度在 2000m 以上, C 为 0.32。 $C \sum T_{5-10}$ 表示蒸发力。 R 为同期降水量^[13]。另外,还采用积分回归、Logistic 生长曲线等统计分析方法。

2 气候变化特征

2.1 降水量变化

研究区域降水量年际变化呈下降趋势,降水量变化曲线线性拟合倾向率为 $-8.329 \text{ mm}/10\text{a}$ (图 1a),降水量 Cubic 函数呈一谷一峰型波动变化,方程为 $y = 0.0057x^3 - 0.541x^2 + 13.459x + 514.16$ (y 为降水量 Cubic 拟合值, x 为年代序列,起始值为 1,下同),其线性化后的复相关系数 $R = 0.298$,通过 $\alpha = 0.05$ 检验。

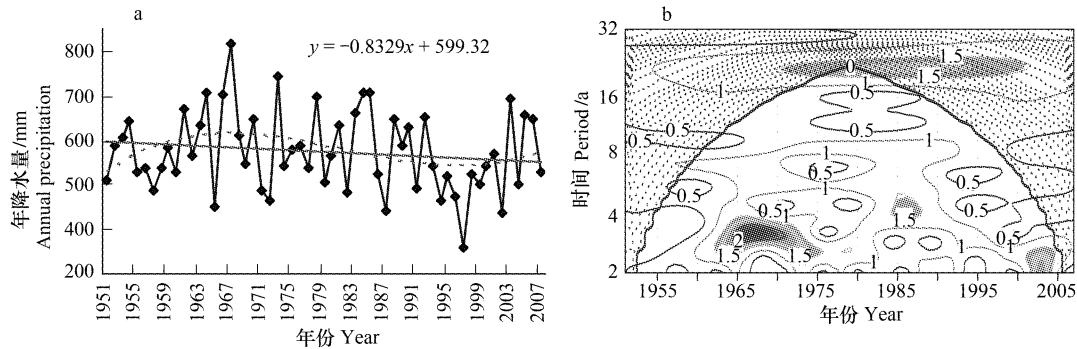


图 1 研究区降水量变化曲线

Fig. 1 Annual Precipitation change Curve in the study area

(a) 年际变化;(b) 小波分析

降水量距平百分率的年际变化除个别年份外在 $-25\% \sim -30\%$ 之间,其中 1955—1960 年、1993—2002 年为少雨时期,1961—1970 年、1981—1985 年以偏多为主,若定义年降水距平百分率 $R^* \geq 60\%$ 为特多, $60\% > R^* \geq 20\%$ 为偏多, $20\% > R^* > -20\%$ 为正常, $-20\% \geq R^* > -60\%$ 为偏少, $R^* \leq -60\%$ 为特少。则年降水量偏多的是 1964、1966、1967、1973、1978、1984、1985、2003 年,偏少的是 1987、1997、2002 年。其余年份 $20\% > R^* > -20\%$,均在正常范围内变化。

就年代际降水距平百分率而言,20 世纪 60 年代偏多最大,70 年代次之,其余年代略偏多,90 年代偏少(表 1)。

表 1 研究区各年代降水距平百分率、气温距平

Table 1 Every decadal anomaly percent of precipitation and temperature departure in the study area

要素 Factor	20 世纪 50 年代 1950s	20 世纪 60 年代 1960s	20 世纪 70 年代 1970s	20 世纪 80 年代 1980s	20 世纪 90 年代 1990s	2001—2007
降水距平率 Anomaly percent of precipitation/%	0.9	13.4	2.0	7.5	-9.5	2.9
气温距平 Temperature departure/ $^{\circ}\text{C}$	0.1	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.8

用有边界小波能量谱分析方法对降水量的年际周期振荡特征进行分析,由图 1b 可见,研究区域降水量存

在 3a 的年际周期变化,3a 周期振荡在 1964—1970 年为中心的局部时段内周期振荡最强,其余时段周期振荡较弱。

按气象通常的季节划分(3、4、5 月份为春季,6、7、8 月份为夏季,9、10、11 月份为秋季,12、1、2 月份为冬季),由表 2 研究区各季节降水量倾向率可见,降水在马铃薯生长季 5—10 月份递减率最大,递减率为 $-6.378 \text{ mm}/10\text{a}$ 。春季、秋季次之,为 $-4.643 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-3.894 \text{ mm}/10\text{a}$,冬季降水量略减,而夏季呈略增趋势。

可见,研究区域降水量在作物生长季 5—10 月份明显减少。

表 2 研究区各季节降水量、气温倾向率

Table 2 The ration of trend precipitation and temperature in seasons in the study area

要素 Factor	年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	作物生长季(5—10 月份) Growth period
降水 recipitation/(mm/10a)	-8.329	-4.643	0.577	-3.894	-0.378	-6.378
气温 temperature/(℃/10a)	0.144	0.081	0.114	0.114	0.268	0.118

2.2 气温变化

气温年际变化呈显著上升趋势,气温变化曲线线性拟合倾向率为 $0.144^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图 2a)。气温 Cubic 函数呈先降后升型,方程为 $y = -0.00004x^3 + 0.0043x^2 - 0.1285x + 0.6722$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.544$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。对 Cubic 函数求一阶导数,令 $dy/dx = 0$,求得 1972 年为气温 Cubic 函数最小值即转折点,1972 年后气温 Cubic 函数上升。

年平均气温距平 20 世纪 50 年代、60 年代、70 年代、80 年、90 年代分别为 0.1 、 -0.3°C 、 -0.2°C 、 -0.2°C 、 0.3°C 。从 60 年代开始呈明显上升趋势,2001—2007 年气温距平最大,为 0.8°C 。

根据世界气象组织(WMO)规定:距平大于或等于两个标准差为异常暖;小于或等于两个标准差为异常冷。距平大于或等于一个标准差划分为暖年;小于或等于一个标准差划分为冷年。研究区域异常暖年为 1998、1999、2006 年;暖年为 1952、1953、2001—2005、2007 年,其中 1998—2007 年中 3a 为异常暖,其余均为暖年;冷年为 1957、1962、1967、1970、1976、1977、1983、1984 年,无异常冷年。

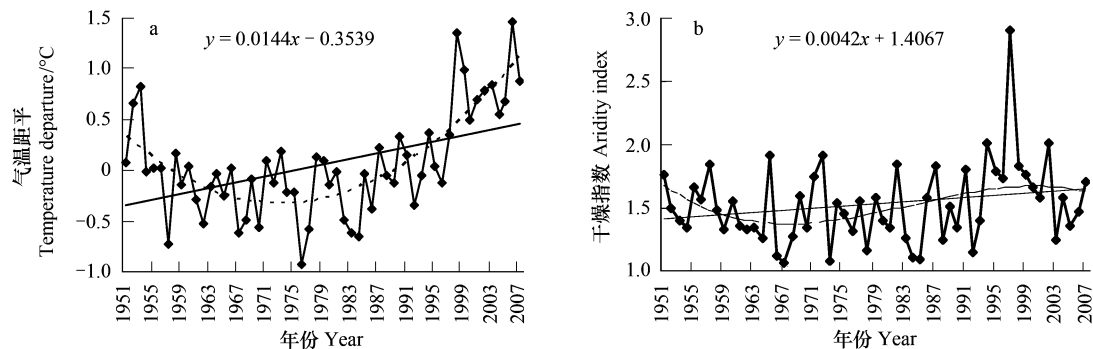


图 2 研究区气温距平、干燥指数年际变化曲线

Fig.2 Interannual change curve of temperature departure and aridity index in the study area

(a) 气温; (b) 干燥指数

由表 2 研究区各季节气温倾向率可见,冬季气温增加倾向率最大,达 $0.268^\circ\text{C}/10\text{a}$,夏秋季次之,为 $0.114^\circ\text{C}/10\text{a}$;春季倾向率较小,为 $0.081^\circ\text{C}/10\text{a}$;马铃薯生长季 5—10 月份气温明显增暖,倾向率为 $0.118^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。

2.3 作物生长季干燥指数变化

研究区域作物生长季干燥指数变化呈显著上升趋势(图 2b),干燥指数变化曲线线性拟合倾向率为

0.042/10a。干燥指数 Cubic 函数呈波动增加,方程为 $y = -0.00002x^3 + 0.0017x^2 - 0.045x + 1.7242$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.35$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初为相对干燥期,80 年代初至 90 年代初经历了相对湿润期之后,90 年代初至 2007 年明显趋于暖干化,干燥指数明显上升。

2.4 无霜期变化特征

无霜期历年变化曲线呈先降后升型,无明显的线性趋势变化。其 2 阶主值函数为 $y = 0.0493x^2 - 2.8747x + 141.47$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.545$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。20 世纪 50 年代至 70 年代无霜期减少,1980 年后无霜期逐年增加。

3 马铃薯生长发育状况变化及其与气候变化的关系

3.1 马铃薯生长发育期变化

3.1.1 马铃薯生长发育期生态气候条件

研究区域马铃薯一般在 4 月中下旬播种,出苗期在 5 月中下旬,分枝期在 6 月上旬,花序形成期在 6 月中下旬,开花期在 7 月上旬,可收期在 9 月中下旬。播种到可收约需 150—168d,需 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 2000—2300 $^\circ\text{C}$,需降水量 400—500mm,需日照时数 900—1100h(表 3)。

表 3 研究区马铃薯生长发育期生态气候条件
Table 3 Ecoclimate conditions in all growth period of potato in the study area

发育期 Growth stage	间隔天数/d Interval days	$\geq 0^\circ\text{C}$ 积温/ $^\circ\text{C}$ Accumulated temperature	降水量/mm Precipitation	日照时数/h Sunshine hours
播种-出苗 Sowing-emergence of seedling	30—35	300—350	60—70	200—210
出苗-分枝 Emergence of seedling-bifurcation	13—15	170—200	40—50	90—100
分枝-花序形成 Bifurcation-inflorescence forming	10—13	150—180	30—40	60—80
花序形成-开花 Inflorescence forming-flowering	15—20	250—300	50—70	100—130
开花-可收 Flowering-reaping	75—85	1100—1250	230—250	450—500
播种-可收 Sowing-reaping	150—168	2000—2300	400—500	900—1100

3.1.2 马铃薯生长发育期年际变化

由图 3 马铃薯生长发育期年际变化曲线可见,马铃薯花序形成期逐年显著提前,花序形成期变化曲线线性拟合倾向率为 $-8.035\text{d}/10\text{a}$,相关系数 $r = 0.443$,通过 $\alpha = 0.05$ 检验。即花序形成期每 10a 提前 8—9d;花序形成期变化曲线 Cubic 函数呈波动下降,方程为 $y = 0.0285x^3 - 0.8689x^2 + 6.5026x + 39610$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.576$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。花序形成期与 4—6 月份平均气温呈负相关, $r = -0.317$,通过 $\alpha = 0.10$ 检验。即 4—6 月份气温增高,花序形成期提前。

开花期也逐年显著提前(图 3),开花期变化曲线线性拟合倾向率为 $-4.246\text{d}/10\text{a}$,相关系数 $r = 0.41$,通过 $\alpha = 0.10$ 检验。即开花期每 10a 提前 4—5d;开花期变化曲线 Cubic 函数呈波动下降趋势,方程为 $y = 0.0041x^3 - 0.1227x^2 + 0.5671x + 39637$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.422$,通过 $\alpha = 0.10$ 检验。开花期与 4—7 月份平均气温也呈负相关, $r = -0.421$,也通过 $\alpha = 0.10$ 检验。即 4—7 月份气温增高,开花期提前。

马铃薯出苗期、分支期、可收期呈波动提前趋势,但年际变化曲线线性拟合趋势未通过信度检验(图 3)。

由此可见,由于影响马铃薯花序形成、开花期的主导气象因子是气温,气候变暖,气温增高,导致马铃薯花序形成期每 10a 提前 8—9d、开花期每 10a 提前 4—5d,开花期延长。而在马铃薯生长发育前期的出苗期、分枝期受气温和降水的共同影响发育期呈波动变化。

3.2 马铃薯块茎生长发育特征

马铃薯生物量在每一个生育期内的动态生长呈“缓慢生长—积极生长—缓慢生长”的生长过程。它的特点是开始生长较为缓慢,以后随着时间的推移,在某一段时间内增长速度很快,当达到某一阶段后,增长速度

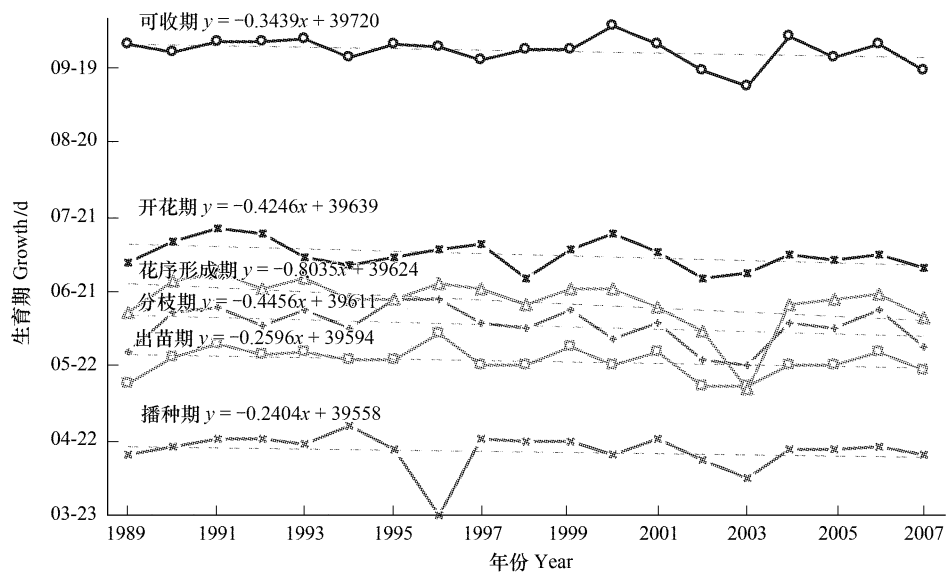


图3 马铃薯发育期的年际变化曲线

Fig.3 Curve of growth date of potato

又趋于缓慢,直至最后停止生长。图4是马铃薯块茎生长发育曲线,其变化符合 Logistic 生长曲线^[14],可用 Logistic 生长曲线方程拟合,拟合方程为:

$$y = \frac{7840.32}{1 + e^{(7.628 - 0.06x)}}$$

其线性化后复相关系数为 $R = 0.898$, 方差分析 $F = 125.412$, 通过 $\alpha = 0.01$ 信度检验。

对块茎生长拟合函数求一阶导数,可得块茎生长速度函数为:

$$v = \frac{dy}{dx} = \frac{kbe^{a-bx}}{(1 + e^{a-bx})^2} = \frac{470.42e^{(7.628 - 0.06x)}}{(1 + e^{(7.628 - 0.06x)})^2}$$

对生长速度函数求一阶导数,令 $\frac{dv}{dx} = 0$, 可求得 $x =$

$127.2 \approx 127$ (d) 时,块茎生长速度最大为: $v_{\max} = 117.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ 。即在播种后的第 127 天,块茎生长速度最大可达 $117.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ 。

对块茎生长速度函数求二阶导数得:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{d^3y}{dx^3} = kb^3a^{a-bx} \frac{1 - 4e^{a-bx} + e^{2a-2bx}}{(1 + e^{a-bx})^4}$$

令 $\frac{d^2v}{dx^2} = 0$, 即 $1 - 4e^{a-bx} + e^{2a-2bx} = 0$, 求函数的两个特征点,解得:

$$x_1 = \frac{a - \ln(2 + \sqrt{3})}{b} = 105.2 \approx 105 \text{ (d)},$$

$$x_2 = \frac{a - \ln(2 - \sqrt{3})}{b} = 149.1 \approx 149 \text{ (d)}$$

式中, x_1 表示块茎由缓慢生长转为积极生长的转折时间, x_2 表示由积极生长转为缓慢生长的转折时间。即块茎生长从播种后 105d 开始,由缓慢生长转为迅速生长阶段,从播种后 149d 开始,其生长从迅速生长又转

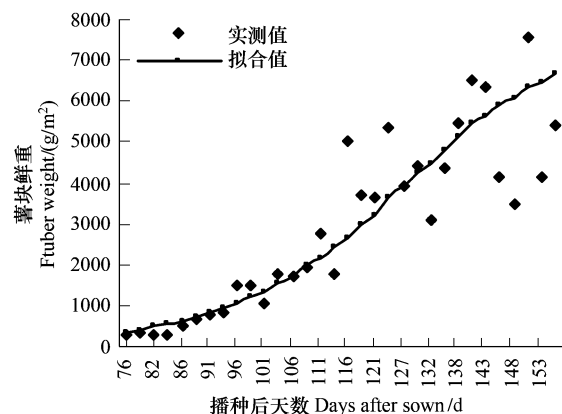


图4 马铃薯块茎生长发育曲线

Fig.4 Curve of growth of potato tuber

为缓慢生长。块茎迅速生长期为 44d。事实上,播种后 149d 后马铃薯已进入可收期。

3.4 马铃薯产量和无霜期的关系

研究区域无霜期的变化影响马铃薯生长发育及产量形成。将研究区域马铃薯产量资料和无霜期资料进行均一化处理(图 5),以便消除量纲,互相比较。可见,马铃薯产量和无霜期变化趋势呈同相位分布,即无霜期长产量高,反之亦然。但两者的相关系数未通过信度检验。

3.5 气象要素对马铃薯产量形成的影响及敏感性

3.5.1 热量的影响及敏感性

从图 6 马铃薯产量与旬气温积分回归影响函数 $a(t)$ 值曲线可以看出,由于气候变暖,除采收期外,其余时段热量充足,气温对马铃薯产量形成成为负效应,气温升高 1°C ,产量降低 $200\text{--}500\text{kg}/\text{hm}^2$ 。块茎膨大期产量形成对气温变化十分敏感,旬平均气温每升高 1°C ,马铃薯产量降低 $1000\text{--}1400\text{kg}/\text{hm}^2$,敏感期约 $30\text{--}35\text{d}$ 。采收期热量不足,气温对马铃薯产量形成成为正效应,且影响量较大,旬平均气温每升高 1°C ,马铃薯产量可增加 $1997\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

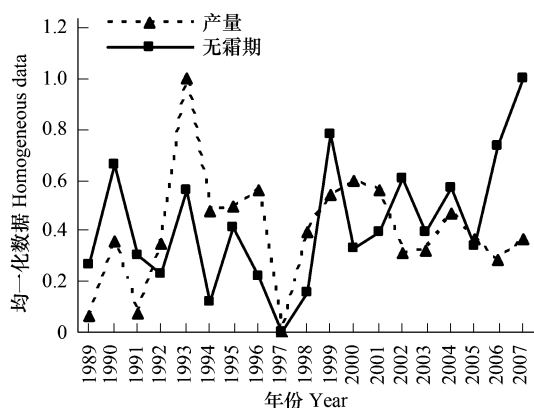


图 5 马铃薯产量和无霜期均一化数据曲线

Fig. 5 Curve homogeneous data of annual potato yields and nonfrost period

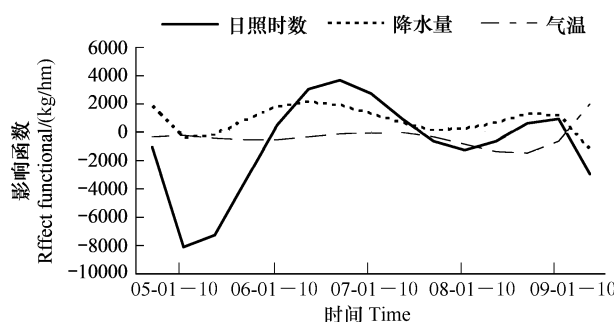


图 6 马铃薯产量与旬气象要素积分回归曲线

Fig. 6 Curve of integral regression between potato yields and ten_days period average meteorological factor

3.5.2 降水量的影响及敏感性

从图 6 马铃薯产量与旬降水量积分回归曲线可以看出,除出苗期和采收期降水量对马铃薯产量形成成为负效应外,其余时段降水量对马铃薯产量形成均为正效应,在马铃薯分枝-开花期产量形成对降水量变化十分敏感,旬降水量每增加 1mm ,马铃薯产量可增加 $1500\text{--}2100\text{kg}/\text{hm}^2$,敏感期约 $30\text{--}40\text{d}$ 。之后影响减弱,在马铃薯块茎膨大后期降水量的影响进入第 2 个敏感时段,旬降水量每增加 1mm ,马铃薯产量可增加 $500\text{--}1000\text{kg}/\text{hm}^2$,此阶段约 $20\text{--}30\text{d}$ 。采收期降水量对马铃薯产量形成又转为负效应,此时段降水过多,不利马铃薯增产。

3.5.3 光照的影响及敏感性

从图 6 马铃薯产量与旬日照时数积分回归曲线可以看出,花序形成期到块茎膨大前期、块茎膨大后期日照时数对马铃薯产量形成成为正效应;旬日照时数每增加 1h ,马铃薯产量增加 $2500\text{--}3500\text{kg}/\text{hm}^2$,敏感期约 $20\text{--}30\text{d}$ 。一般而言,在其它生态气候条件适宜时,光照增加光合作用加快,对植物发育应为正效应。但当某一时段日照时数增多时,相应时段常常出现降水减少的状况,由于水分不足影响产量形成,故出现在部分时段日照时数对马铃薯产量形成成为负效应的现象。

3.6 马铃薯产量气候模型

分析马铃薯生长关键时段、关键气象因子对其产量的影响,依据积分回归及相关分析结果,建立马铃薯产量气候模型:

$$Y = 111749.7 - 49.605 \sum T + 71.889R$$

式中, Y 为马铃薯产量; $\sum T$ 为马铃薯生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温; R 为马铃薯生育期降水量。

方程线性化后复相关系数为 $R=0.515$, 方差分析 $F=2.885$, 通过 $\alpha=0.10$ 信度检验。

4 结论

(1) 研究区域降水量年际变化呈下降趋势, 降水量变化曲线线性拟合倾向率为 $-8.329 \text{ mm}/10\text{a}$ 。降水量存在 3a 的年际周期变化, 3a 周期振荡在 1964—1970 年为中心的局部时段内周期振荡最强, 其余时段周期振荡较弱。降水在马铃薯生长季 5—10 月份递减率最大, 递减率为 $-6.378 \text{ mm}/10\text{a}$ 。气温年际变化趋势呈显著上升趋势, 气温变化曲线线性拟合倾向为 $0.144^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1972 年之后持续上升。作物生长季干燥指数变化呈显著上升趋势, 干燥指数变化曲线线性拟合倾向率为 $0.042/10\text{a}$, 20 世纪 60 年代末至 70 年代初为相对干燥期, 80 年代初至 90 年代初经历了相对湿润期之后, 90 年代初至 2007 年明显趋于暖干化, 干燥指数明显上升。历年无霜期 80 年代前呈减少趋势, 之后呈增加趋势。

(2) 马铃薯生长发育受气候变暖, 气温增高的影响, 马铃薯花序形成期每 10a 提前 8—9d, 开花期每 10a 提前 4—5d。而在马铃薯生长发育前期的出苗期、分枝期, 受气温和降水的共同影响呈波动变化。马铃薯块茎生长分析表明, 马铃薯在播种后 105d 开始, 块茎由缓慢生长转为迅速生长阶段, 在播种后的第 127 天, 块茎生长速度最大可达 $117.6\text{g}/(\text{m}^2\text{d})$ 。播种后 149d 开始, 块茎生长从迅速生长又转为缓慢生长。迅速生长期为 44d。

(3) 由于气候变暖, 除采收期外, 其余时段热量充足, 气温对马铃薯产量形成成为负效应, 块茎膨大期产量形成对气温变化十分敏感; 而降水量对马铃薯产量形成的影响函数曲线同热量的影响函数曲线呈反相位分布, 除出苗期和采收期降水量对马铃薯产量形成成为负效应外, 其余时段降水量对马铃薯产量形成均为正效应, 在马铃薯分枝-开花期产量形成对降水量变化十分敏感。花序形成期到块茎膨大前期日照时数对马铃薯产量形成成为正效应。

(4) 在气候变暖的背景下, 气象条件对马铃薯生长发育和产量形成影响的不确定性因素增加, 影响增大。如 1997 年因生育期降水量显著下降、无霜期显著缩短, 导致马铃薯产量明显下降。

References:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D, Qiao J. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3):1210-1218.
- [4] Deng Z Y, Zhang Q, Pu J Y, Liu D X, Guo H, Wang Q F, Zhao H, Wang H L. The impacts of climatic warming on crop planting and production in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3760-3768.
- [5] Wang R Y, Zhang Q, Wang Y L. Response of corn to climate warming in arid areas in Northwest China. *Acta Bot Sin*, 2004, 46(12):1387-1392.
- [6] Liu D X, Dong A X, Deng Z Y. Impact of climate warming on agriculture in Northwest China. *J Nat Resour*, 2005, 20(1):119-125.
- [7] Pu J Y, Yao X Y, Deng Z Y, Yao Y B, Wang W T, Zhang M C. Impact of climate warming on winter rape planting in Gansu province. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(9):1397-1401.
- [8] Yao Y B, Deng Z Y, Wang R Y, Wang Y R, Pu J Y, Zang X Y. The influence of climate changes on potato growth in Gansu province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3):16-20.
- [9] Yao Y B, Dong A X, Wang R Y, Pu J Y, Zang X Y. Affected the frangibility of potato growing of Semi-arid region over the Northwest China under climate change. *Advance in Earth Sciences*, 2007, 22(Suppl.):48-54.
- [10] Yao Y B, Li Y H, Wang Y R, Zang X Y, Liang Y B, Wei F. Loess plateau of china on global climate change. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1):202-208.
- [11] Wei F Y. Statistic diagnose and foreshadow technology in present climate. Beijing: Meteorological Press, 2007:175-181.

- [12] Wu H B, Wu L. Methods for diagnosing and forecasting climate variability. Beijing: Meteorological Press, 2005: 208-244.
- [13] Deng Z Y, Qiu H M, Li H D. Development of Climate and Agriculture in the East of Gansu. Beijing: China Meteorology Press, 2000: 32-34.
- [14] Deng Z Y. The Study of Agriculture Meteorology in the arid area. Beijing: China Meteorology Press, 1999: 287-293.

参考文献:

- [3] 张强, 邓振镛, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [4] 邓振镛, 张强, 蒲金涌, 刘德祥, 郭慧, 王全福, 赵鸿, 王鹤龄. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响. 生态学报, 2008, 28(8): 3760-3768.
- [5] 王润元, 张强, 王耀林. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应. 植物学报, 2004, 46(12): 1387-1392.
- [6] 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. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.
- [7] 蒲金涌, 姚小英, 邓振镛, 姚玉璧, 王位泰, 张谋草. 气候变暖对甘肃冬油菜 (*Brassica campestris* L.) 种植的影响. 作物学报, 2006, 32(9): 1397-1401.
- [8] 姚玉璧, 邓振镛, 王润元, 王毅荣, 蒲金涌, 张秀云. 气候暖干化对甘肃马铃薯生产的影响. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 16-20.
- [9] 姚玉璧, 董安祥, 王润元, 蒲金涌, 张秀云. 西北半干旱区气候变化对马铃薯生长脆弱性的影响. 地球科学进展, 2007, 22(Suppl.): 48-54.
- [10] 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣, 张秀云, 李耀邦, 魏锋. 中国黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 202-208.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 175-181.
- [12] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社, 2005: 208-244.
- [13] 邓振镛, 仇化民, 李怀德. 陇东气候与农业开发. 北京: 气象出版社, 2000: 32-34.
- [14] 邓振镛. 干旱地区农业气象研究. 北京: 气象出版社, 1999: 287-293.