

气候变暖对晋北黄土高原半干旱区 马铃薯适播期的影响

马雅丽¹, 栾青¹, 李效珍², 刘文平¹, 李芬³,
班胜林¹, 李海涛¹, 张娜¹, 张玮玮¹

(1.山西省气候中心,山西太原 030006;2.大同市气象局,山西大同 037010;

3.山西省气象灾害防御技术中心,山西太原 030032)

摘要:以气候变暖为主要特征的气候变化对马铃薯物候期、生长发育及产量都产生很大影响,研究马铃薯生长季热量资源和适播期变化特征,对调整品种布局 and 合理利用气候资源具有重要意义。利用1981—2016年晋北地区地面气象观测站和农业气象观测站资料,通过趋势分析和相关分析,研究晋北马铃薯气候资源变化特征及对马铃薯产量的影响;基于积温稳定性原理,建立气象产量预测模型,得出最高气象产量对应的适播期,并分析适播期的年代变化特征。结果表明,晋北马铃薯生长季气温以 $0.32^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率呈升温趋势, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温以 $47.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率呈增加趋势。气候变暖背景下对晋北马铃薯产量影响显著的气候因子主要是出苗~分枝期的平均气温,全生育期的积温、日照时数、需水量,出苗~分枝期、花序形成~可收期及全生育期的最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 的日数。气温和日照基本为负效应,降水在营养生长期为负效应,生殖生长期为正效应。晋北马铃薯适播期随着气候变暖有提前的趋势,20世纪80年代适播期在5月上旬末至5月中旬,90年代适播期在5月上旬,21世纪最初10a适播期在4月下旬至5月上旬初,2010年以后马铃薯适播期提前到4月中旬末至4月下旬。建议晋北黄土高原半干旱区盆地地区种植中晚熟品种,尽量选择早播,可以选择4月中旬末至4月下旬,高海拔地区建议种植中熟品种或采取地膜覆盖提早播期来种植中晚熟品种,可以在4月下旬末至5月上旬播种。

关键词:气候变暖;马铃薯;适播期;产量;晋北黄土高原半干旱区

中图分类号:S532;S35;S16 **文献标志码:**A

Effects of climate warming on potato sowing time in the semi-arid area of Loess Plateau in North Shanxi Province

MA Yali¹, LUAN Qing¹, LI Xiaozhen², LIU Wenping¹, LI Fen³,
BAN Shenglin¹, LI Haitao¹, ZHANG Na¹, ZHANG Yiwei¹

(1. Shanxi Climate Center, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. Datong Meteorological Bureau, Datong, Shanxi 037010, China;

3. Shanxi Meteorological Disaster Prevention Technological Center, Taiyuan, Shanxi 030032, China)

Abstract: Climate change mainly characterized by climate warming has a great impact on potato phenology, growth and yield. It is of great significance to study the change characteristics of potato heat resources and suitable sowing date in growing season for adjusting variety layout and rational utilization of climate resources. Based on the data of ground meteorological observation stations and agrometeorological observation stations from 1981 to 2016, the variation characteristics of potato climatic resources in North Shanxi Province and their impact on potato yield were studied by trend analysis and correlation analysis methods. Based on the principle of accumulated temperature stability, a meteorological yield prediction model was established to calculate the suitable sowing date of maximum meteorological yield, and the effect of climate change on potato trial sowing date was analyzed. The temperature of pota-

收稿日期:2022-03-08

修回日期:2022-12-08

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF201838;CCSF201945);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J067);山西省重点研发计划项目(201903D321006);山西省气象局面上项目(SXKMSNY20185115)

作者简介:马雅丽(1981-),女,山西太原人,硕士,高级工程师,主要从事农业气象研究。E-mail:mayali9096@163.com

通信作者:栾青(1979-),男,山西平定人,正高级工程师,主要从事农业气候资源和卫星遥感应用研究。E-mail:luanqing2003@163.com

to growing season in North Shanxi showed an increasing trend of $0.32^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, and the accumulated temperature $\geq 5^{\circ}\text{C}$ had an increasing trend of $47.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$. The climatic factors that had a significant impact on potato yield in North Shanxi under the background of climate warming were mainly the average temperature in the emergence~branching period, the accumulated temperature, sunshine hours and water demand in the whole growth period, the emergence~branching period, the inflorescence formation period~availability, and the number of days with the highest temperature $\geq 30^{\circ}\text{C}$ in the whole growth period. Temperature and sunshine had basically negative effects, precipitation was a negative effect in the vegetative growth period, and a positive effect in the reproductive growth period. In North Shanxi Province, the optimum sowing period of potatoes tended to advance with climate warming. In 1980s, the optimum sowing period was from the end of early May to mid-May. In 1990s, the optimum sowing period was in early May. In the first decade of the 21st century, the optimum sowing period was from late April to early May. After 2010, the optimum sowing period of potato advanced to mid-late April to late April. It is suggested that mid-late maturing varieties should be planted in the semi-arid basin area of Loess Plateau in North Shanxi Province, and the sowing period should be as early as possible, mid-late April to late April should be selected. Mid-late maturing varieties should be planted at high altitude areas or early sowing date should be covered with plastic film, which can be sown from mid-late April to early May.

Keywords: climate warming; potato; optimum sowing period; yield; semi-arid area of Loess Plateau in North Shanxi Province

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告第一工作组(WGI)报告指出:1880—2012年,全球平均地表温度升高了 0.85°C ^[1]。根据《气候变化国家评估报告》,在过去100a中,我国平均气温上升了 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ^[2],其中西北、华北、东北变暖趋势最明显^[3]。世界范围的气候异常给许多国家的粮食生产带来了严重影响^[4]。

马铃薯是我国第四大粮食作物,在中国种植面积达到 $533\times 10^4\text{hm}^2$,年产量达到 $8\,000\times 10^4\text{t}$,是潜力最大的高产经济作物之一。晋北一季薯作区地处黄土高原东部,海拔较高,气候冷凉,光照充足,昼夜温差大,具有发展马铃薯产业最为理想的生态气候条件,有利于马铃薯块茎膨大和淀粉积累,是全国最适宜马铃薯种植的黄金产区之一。国内外很多学者研究表明,气候变化对马铃薯的物候期、生长发育以及产量和品质都产生了很大影响。姚玉璧等^[5-6]研究表明,气候变暖导致马铃薯营养生长阶段缩短,生殖生长阶段和全生育期延长,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成为负效应(采收期外),块茎膨大期对气温变化十分敏感;降水量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。肖国举等^[7]发现增温使马铃薯全生长期有所延长,特别是花期至成熟期延长明显,这将有利于防止茎叶早衰和促进淀粉的积累;增温显著减少了单株结薯数,提高了单薯重,马

铃薯单产总体呈现增加趋势,但差异不显著。侯琮等^[8]分析了气候变化对内蒙古主要作物物候期和种植面积的影响,结果表明秋季变暖使得马铃薯的收获期普遍推迟,但因播种期的推后,全生育期的长度变化不大,东部较湿润地区马铃薯生育期有所延长,而阴山北麓旱作区马铃薯生育期表现为缩短。

作物播种时间关系到作物生长状况和利用气候资源程度。研究表明,播期对马铃薯生物量、生长发育性状、产量形成以及生产潜力等方面都有明显影响。赵沛义等^[9]试验研究发现播期推迟会导致马铃薯生育期缩短,生殖生长在总生育期中的比例增加,播种偏晚会严重影响马铃薯产量,导致各种病害,叶片死亡程度较重,播种过晚水分亏缺较大,薯块含水量高,淀粉含量较低,适口性差,不利于贮运。刘晓东等^[10]在内蒙古的分期播种试验发现,适时早播不仅提高旱作马铃薯产量和降水利用效率,而且块茎淀粉含量提高 $3.0\%\sim 3.4\%$ 。张文解等^[11]得出临夏州春旱较频繁的干旱山地和山二阴地区应适当推迟播期至5月上旬左右;在早春土壤墒情较好或灌溉便利的川塬水浇地应配合覆膜栽培适当提前播期至3月中下旬为宜。张凯等^[12]试验结果表明,随着播期的推迟,马铃薯全生育期缩短,株高出现明显变化,单株干物质最大积累速率提前,块茎鲜重最大积累速率随播期的推迟而提前。由此可见,在全球气候变暖背景下,如果还按照传统的马铃薯适宜播种时期进行栽种,必将影响马铃薯的生长发育,进而影响马铃薯的产量和品

质。适期播种对马铃薯培育壮苗、形成高产、减少或避免气候变暖对马铃薯生长发育的影响都非常有利,选择适宜播期是晋北地区马铃薯生产中最主要的适应气候变化的技术措施之一。因此,研究气候变暖背景下晋北地区气候资源及对马铃薯适播期变化的影响,对应气候变化、充分利用气候资源、调整种植业结构、保障马铃薯优质高产有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域晋北地区位于黄土高原东北,包括大同市、朔州市、忻州市 3 个地级市,研究区域内地形复杂,西北部为黄土丘陵区,东部为盆地区,平均海拔高度 1 000~1 800 m。晋北属于温带半干旱气候,年平均气温 4.2~11.4℃,年日照时数 2 400~2 960 h,年平均降水量 360~460 mm,降水主要集中在夏秋季的 6—9 月,占全年降水量的 70%~80%。晋北地区马铃薯种植面积 $9.4\times10^4\text{ hm}^2$ [13]。

1.2 资料来源

1981—2016 年晋北 27 个气象站逐日地面气象观测资料,来源于山西省气象信息中心,包括平均气温、最高气温、最低气温、降水、日照时数、风速、水汽压等;马铃薯生育期和产量资料来源于晋北 8 个农业气象观测站(图 1)。

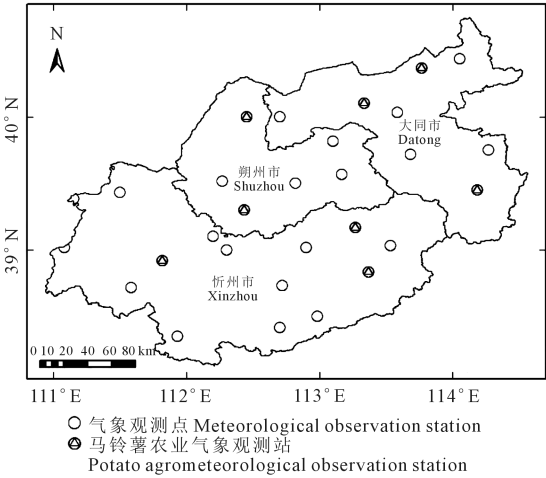


图 1 研究区域气象站点和农业气象观测站点分布图
Fig.1 Distribution map of meteorological stations and agricultural meteorological observation stations in the study area

1.3 研究方法

1.3.1 相对气象产量 通常把影响作物产量形成的各种自然和非自然因素按影响的性质划分为农业技术措施、气象条件和“噪声”三大类。可以对马铃薯单产数据进行如下分解 [14-15]：

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

式中, Y 为马铃薯单产; Y_t 为由农业措施、土壤结构、地理环境、水肥、品种等自然或人为因素引起的变化,它对产量具有决定性的影响,而且其变化不大的情况下,对产量的影响在时间序列上是一个相对稳定的过程,不会产生大的变化,是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量,称为趋势产量; Y_w 是受以气象要素为主的短周期变化因子影响的产量分量,称为气象产量或波动产量; E 是受其他随机因素影响的产量分量,量级较小,可忽略不计。所以上述公式简化为:

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

由于趋势产量是随着时间 t 的延长、生产力水平的提高等因素使产量不断上升的部分,反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量,所以趋势产量为时间函数,研究中采用三次多项式回归拟合求得各年的趋势产量(以大同为例):

$$Y = 1741.2 + 98.322t - 6.602t^2 + 0.1349t^3 \tag{3}$$
$$R = 0.1992$$

式中, Y 是马铃薯实际单产, t 为时间序列。

从实际产量中扣除趋势产量 Y_t , 得到气象产量 Y_w :

$$Y_w = Y - Y_t \tag{4}$$

为消除量纲的影响,采用气象产量除以趋势产量,得到相对气象产量 Y_r :

$$Y_r = \frac{Y_w}{Y_t} \tag{5}$$

1.3.2 需水量 作物需水量是作物全生育期消耗于自身蒸腾和棵间土壤蒸发的水量总和 [16]。作物需水量,可由式(6) 计算:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \tag{6}$$

式中, K_c 为作物系数 [17]; ET_0 为参考作物蒸散量,可采用联合国粮农组织 (FAO 1998) 推荐的 Penman - Monteith 公式计算 [18]。

1.3.3 相关分析和回归分析 气候要素对作物产量的关系研究,主要是基于气象产量和相应的气候资料来进行统计计算,从而找出客观定量的气象因子对作物产量的影响评定。研究中选取了研究区域内马铃薯代表站 1981—2016 年产量和发育期资料,分析晋北区域马铃薯不同生育阶段的平均气温、积温、最高气温、降水量、需水量、日照时数等气象因子与马铃薯相对气象产量的相关关系。

采用 Pearson 相关分析计算马铃薯气象产量与气候因子之间的关系。采用多重线性回归量化马铃薯气象产量与多个气候因子之间的综合关系。

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 晋北马铃薯热量资源变化特征分析

晋北地区 1981—2016 年马铃薯生长季平均气温变化特征是呈波动式上升趋势(图 1),趋势倾向率为 $0.32^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,最高值出现在 1999 年(18.3°C),最低值出现在 1995 年(16.0°C),相差 2.3°C 。从平均气温年代际变化来看,马铃薯生长季内多年平均气温为 16.9°C ,气温在 20 世纪 80 年代最低,为 16.4°C ;20 世纪 90 年代开始升高,之后各年代气温高于平均值,呈现出气温快速升高趋势,21 世纪最初 10 a 最高,为 17.3°C ;2010 年以后有所下降。

通常我们用 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温作为衡量喜凉作物马铃薯生长季热量资源的指标之一。研究区域 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温历年趋势总体为增加趋势(图 2),倾向率为

$86.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。历年平均为 $3\,279.7^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,最多为 $3\,552.2^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ (1998 年),最少为 $3\,094.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ (1995 年)。20 世纪 90 年代中期之前大部分年份低于平均值且年际间波动不大,1997 年以后为明显增加趋势且大部分年份明显高于平均值。

2.2 影响晋北马铃薯产量的关键气象因子

气象条件及其变化对马铃薯产量影响较大。马铃薯生育阶段分为播种~出苗、出苗~分枝、分枝~花序形成、花序形成~开花、开花~可收期 5 个阶段,根据晋北气候特点和前人研究结果,选择对马铃薯生长影响较大的气象因子,即全生育期平均气温、降水量、需水量、日照时数、积温和最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 日数等,与马铃薯气象产量进行相关分析,找出影响马铃薯产量的关键气象因子和敏感生育阶段。

马铃薯气象产量与不同生育阶段各气象要素的相关系数见表 1。

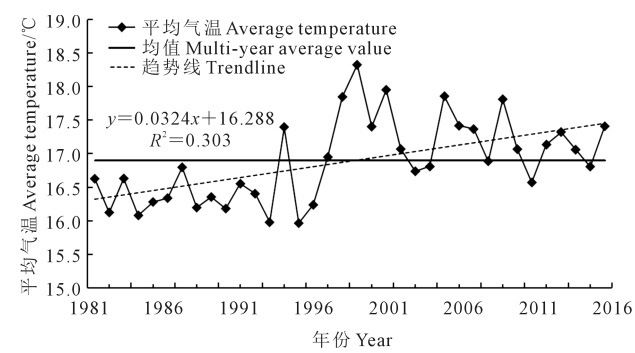


图 2 1981—2016 年晋北马铃薯生长季内平均气温变化曲线图

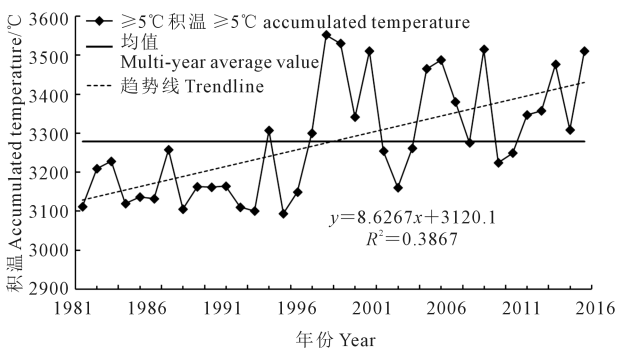


图 3 1981—2016 年 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温曲线变化图

Fig.2 Curve of average temperature change during potato growing season in North Shanxi from 1981 to 2016

Fig.3 Variation diagram of accumulated temperature $\geq 5^{\circ}\text{C}$ from 1981 to 2016

表 1 晋北马铃薯相对气象产量与生育期气象因子相关性

发育阶段 Development stage	平均气温 Average temperature/ $^{\circ}\text{C}$	降水量 Precipitation /mm	需水量 Water requirement/mm	日照时数 Sunshine hours/h	积温 Accumulated temperature/ $^{\circ}\text{C}$	最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 日数 Days with maximum temperature $\geq 30^{\circ}\text{C}$
播种~出苗 Sowing~seedling	-0.301	0.040	-0.324	-0.325	-0.314	-0.122
出苗~分枝 Emergence~branching	-0.347 *	-0.111	-0.133	-0.265	-0.168	-0.371 *
分枝~花序形成 Branching~inflorescence forming	-0.304	-0.124	-0.387 *	-0.109	0.180	-0.270
花序形成~开花 Inflorescence formation~flowering	-0.116	0.271	-0.484 *	-0.093	-0.104	-0.444 * *
开花~可收 Blossom~harvest	-0.031	0.278	-0.036	0.058	0.018	-0.355 *
全生育期 All growth period	-0.217	0.271	-0.493 * *	-0.413 *	-0.557 * *	-0.614 * *

注: * 表示显著相关($P<0.05$), * * 表示极显著相关($P<0.01$)。
Notes: * indicates significant correlation ($P<0.05$), * * indicates significant correlation ($P<0.01$).

温度对产量的影响:马铃薯全生育期及各发育阶段的平均气温对气象产量为负效应,出苗~分枝期平均气温与气象产量呈显著负相关,说明气温升高对马铃薯苗期生长发育不利,气温偏高会导致茎叶徒长,叶片较薄,茎间伸长细弱,容易倒伏,影响产量。全生育期积温与气象产量呈显著负相关,与平均气温的影响一致。在各生育阶段以及全生育期,最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 日数对气象产量都表现为明显负效应,其中花序形成~开花期表现为极显著负相关,此阶段日最高温度 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 会使马铃薯生殖生长受到抑制,降低花粉活性,对马铃薯结薯量和初期膨大造成较大影响,从而影响产量。

水分对产量的影响:出苗~分枝期和分枝~花序形成期降水量对产量影响为负效应,其余发育阶段为正效应,但相关性都不显著。可以看出,马铃薯苗期对水分的需求较少,降水基本可以满足马铃薯苗期生长需求,苗期如果降水过多反而会阻碍根系发育,不利于蹲苗。花序形成~开花期(7月上中旬)和开花~可收期(7月中下旬—9月中旬),降水量对产量的影响由负效应逐步转为正效应,这是因为马铃薯植株生长进入开花前后和薯块膨大期对水分需求量很大,水分不足时会使小薯分化数量减少,导致单株结薯数量减少、薯块膨大缓慢、单薯重下降,从而造成产量降低。需水量在全生育期和各生育阶段都是负效应,与温度影响规律一致,即说明温度越高,作物蒸散越大,需水量越大,营养生长期(分枝~花序形成期)和水分敏感期(花序形成~开花期)为显著负相关,此阶段也最容易出现水分亏缺现象。

光照对产量的影响:马铃薯全生育期总日照时数与产量呈显著负相关,说明晋北光照资源丰富,充分满足马铃薯生长需求。其中出苗到开花前的日照时数与马铃薯气象产量呈负相关,说明在马铃薯营养生长期光照资源完全可以满足其生长需要。在开花~可收期(7月中下旬—9月中旬)的日照时数略显正效应,说明光照基本可以满足其生殖生长需求,较多的日照时数有利于叶片光合作用,促进养分积累和向地下部转移,提高结薯数和单薯质量,有利于马铃薯的生长和产量的提高。

2.3 晋北马铃薯气象产量预测模型

根据马铃薯生育期内各气象要素对马铃薯产量影响的分析结果(表 1),选择与马铃薯气象产量相关极显著的气象因子,通过分析各个气象因子对马铃薯产量形成的影响结果,组成综合气象影响指标因子,构建气象产量估测模型。

$$Y_r = B + a \sum T \sum S + bWD_{\text{FZ-KH}} + cN_{\geq 30^{\circ}\text{C}} \quad (7)$$

式中, Y_r 是马铃薯相对气象产量; $\sum T \sum S$ 为马铃薯全生育期的光温积,即全生育期的积温与日照时数的乘积; $WD_{\text{FZ-KH}}$ 为分枝到开花期内的水分盈亏,即降水量与需水量的差值; $N_{\geq 30^{\circ}\text{C}}$ 是最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 天数; B 为多元回归方程的截距, a 、 b 、 c 为回归系数。

作物全生育期的积温与日照时数的乘积称为光积温。一般来说,在一定的温度下,作物发育速度适宜时,积温取值最小^[19],这是作物发育的积温理论基础,同时在此发育期间的累积日照时数也最少。当马铃薯生长发育过程中遇到干旱、高温等不利气象条件影响时,作物发育迟滞,会使发育期推后,期间累积的热量和日照时数增加,光积温增大。马铃薯分枝~开花期间作物水分盈亏量,即降水量与需水量的差值,可反映降水对马铃薯生长的满足程度。该阶段是马铃薯发棵、地下匍匐茎生长及小薯形成的关键时期,降水量如果大于马铃薯需水量,则营养生长期不缺水,对马铃薯早发棵、早分化、早结薯、结大薯有利,不限制该品种的结薯数量;如果降水量明显小于需水量,降水不能满足马铃薯生长需求,水分不足则使马铃薯发棵推迟,地下匍匐茎分化数量少,结薯少且小薯形成推迟,会使单株结薯量下降,最终影响马铃薯产量。

马铃薯喜冷凉,最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 对马铃薯产量形成不利。其中出苗~分枝期高温不利于马铃薯植株形成壮秆,可能造成茎叶徒长,后期容易倒伏;马铃薯花序形成至开花后这个阶段高温会使马铃薯生殖生长、开花授粉受到抑制,影响马铃薯结薯量和初期膨大而造成减产;反之气温低一些有利于块茎膨大,可促进大中薯生长,提高平均单薯重。

2.4 马铃薯产量的气象模拟

1735 年 A.E.德列奥莱尔提出积温理论,指出在一定的温度范围内,当其他环境条件基本满足的情况下,作物发育速度主要受温度的影响,作物完成某一发育阶段所需的积温基本上是一定的^[20]。晋北光照充足,满足马铃薯生长需要,而降水在有些年份较常年明显偏少会降低马铃薯产量。马铃薯生长季降水量大于 350 mm 且分布较均匀基本可以满足其生长,因此计算 1981—2016 年马铃薯生育期内积温时,先将生长季降水量小于 350 mm 的年份(1984、1986、1993、1997 和 2001 年)去掉,计算所得马铃薯发育阶段内的多年平均积温可以作为分析马铃薯发育进程的积温指标。根据历年逐日气象

资料的平均值,代表当地气候背景,假设播种期分别为 4 月 1 日、4 月 11 日、4 月 21 日、5 月 1 日、5 月 11 日、5 月 21 日,按照该地的马铃薯平均发育期对应的积温,推算上述播种期下对应的出苗、分枝、花序形成、开花和可收期,统计各个虚拟播种期下各个发育期内的相关气象要素值,用马铃薯气象产量估测模型(公式 7),计算各个播种期对应的相对气象产量(图 3)。

2.5 晋北马铃薯适播期的年代变化

根据不同虚拟播种期下的相对气象产量模拟值,对相对气象产量进行拟合,得到不同年代气象产量出现的日期拟合曲线(图 5)可以看出,随着年代的变化,马铃薯相对气象产量呈上升的趋势,尤其是 2010 年之后上升趋势更为明显。从最高气象产量对应的时间,可以得出 20 世纪 80 年代马铃薯适宜播期为 5 月 10 日左右,20 世纪 90 年代为 5 月 4 日左右,21 世纪最初 10 a 为 4 月 29 日左右,2010 年以后为 4 月 22 日左右。将相对气象产量最高值对应的播种期日期向前后延伸 3 d,得到不同年代的适宜播种期范围,即依次为 5 月上旬末到 5 月中旬

初、5 月上旬、4 月下旬到 5 月上旬初和 4 月中旬末到 4 月下旬。可以看到,马铃薯适播期随着气候变暖趋势有逐步提前的趋势,产量也有逐年代提高的趋势。2010 年以后晋北马铃薯适播期比 20 世纪 80 年代提早了 27 d,比 20 世纪 90 年代提早了 18 d,比 21 世纪最初 10 a 提早了 7 d。

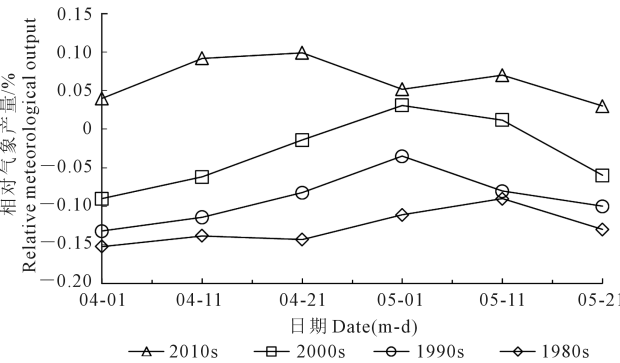


图 4 不同年代模拟播期下相对气象产量的变化图
Fig.4 Variation of relative meteorological yield under different simulated sowing dates in different ages

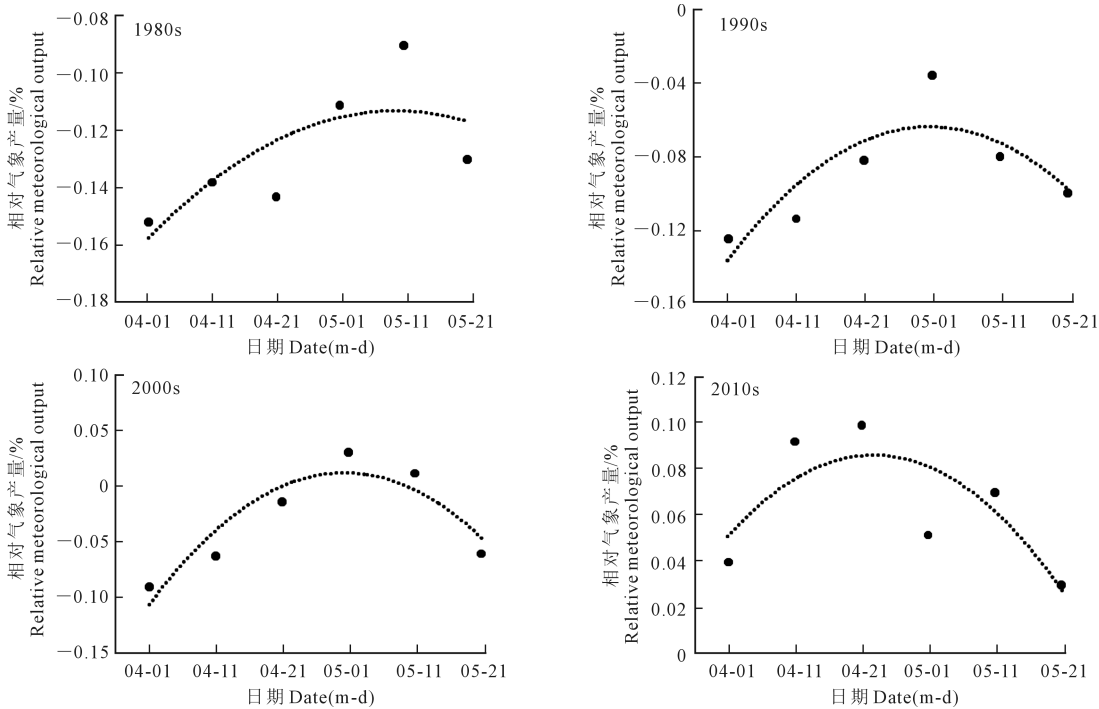


图 5 马铃薯拟合相对气象产量的年代际变化图
Fig.5 Interdecadal variation of potato fitting relative meteorological yield

3 讨论与结论

分析 1981—2016 年近 36 a 来晋北马铃薯热量资源变化特征得出,平均气温和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温都呈明显增加趋势,气候趋势倾向率分别为 $0.44^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和

$86.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。分析得出影响马铃薯产量的关键气象因子主要有:出苗~分枝期的平均气温,全生育期的积温、日照时数和需水量,出苗~分枝期、花序形成~可收期及全生育期的最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 的日数。热量资源变化对马铃薯产量的影响较显著,高

温日数增多对马铃薯生长不利,研究结果表明最高气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 日数在各生育阶段以及全生育期对气象产量都表现为明显负效应,其中花序形成~开花期和全生育期积温与产量呈极显著负相关,开花~可收积温与产量呈显著负相关。本文与很多前人研究结果基本一致,如,姚玉璧等^[21-22]和赵年武等^[23]得出夏季气温增高导致马铃薯生育脆弱性加剧,生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温与产量呈显著负相关;赵鸿等^[24]研究表明马铃薯产量与 6 月气温呈负相关,6 月高温导致幼苗发育受阻、成活率降低;Fleisher 等^[25]得出,8 月高温使块茎膨大停滞,薯块形状出现变异,产量下降。晋北降水变化对马铃薯产量的影响不明显,在出苗~分枝(6 月上中旬)和分枝~花序形成期(6 月下旬到 7 月上旬)降水量与产量呈负相关,而姚玉璧等^[22]研究得出,6 月上中旬降水量与产量呈正相关,主要因为晋北降水量在出苗~花序形成期基本可以满足马铃薯生长需要。

本文以马铃薯气象产量相关达到极显著的气象因子构成综合气象影响指标因子,建立气象产量估测模型,基于积温稳定性原理计算马铃薯各发育阶段多年平均积温,设定 6 个播期进行其余发育期的推算模拟,代入当年实际气象资料进行相对气象产量估算模拟,将每年最高产量的对应播期定为适播期。研究结果表明,随着气候变暖,马铃薯适播期有逐步提前的趋势,20 世纪 80 年代在 5 月上旬末至中旬,20 世纪 90 年代在 5 月上旬,21 世纪最初 10 a 在 4 月下旬到 5 月上旬初,2010 年以后马铃薯适播期为 4 月中旬末到 4 月下旬。以此结果为依据,建议晋北黄土高原半干旱区盆地地区种植中晚熟品种,在播期选择上尽量早播,可以选择 4 月中旬末到 4 月下旬,高海拔地区建议种植中熟品种或采取地膜覆盖提早播期来种植中晚熟品种,可以在 4 月下旬末到 5 月上旬播种。

本文分析适播期变化时主要基于积温稳定性原理,选择受干旱制约小的年份进行估算马铃薯各发育阶段的积温。但是积温稳定性还受很多因素影响,如光照、黑夜温度、日较差等也都可能影响积温的稳定^[26-27],同时,品种不同也可能导致作物发育期所需积温不同^[28],因此需要进一步综合考虑多因素以完善适播期计算模型。

参 考 文 献:

[1] IPCC.Climate change 2014 - impacts, adaptation and vulnerability: part a: global and sectoral aspects[R]. Cambridge: Cambridge Uni-

versity Press, 2014: 1-670.

[2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会.第三次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2015: 1-901.

Preparation Committee of the Third National Assessment Report on Climate Change.The third national assessment report on climate change [M].Beijing:Science Press,2015: 1-901.

[3] 丁一汇,任国玉,赵宗慈,等. 中国气候变化的检测及预估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(1): 1-10.

DING Y H, REN G Y, ZHAO Z C, et al. Detection, attribution and projection of climate change over China[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(1): 1-10.

[4] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467 (7311): 43-51.

[5] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 16-20.

YAO Y B, DENG Z Y, WANG R Y, et al. The influence of climate changes on potato growth in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 16-20.

[6] 姚玉璧,王润元,邓振镛,等. 黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 379-385.

YAO Y B, WANG R Y, DENG Z Y, et al. Effects of climate change on potato growth in semi-arid region of Loess Plateau,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 379-385.

[7] 肖国举,仇正跻,张峰举,等. 增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 830-836.

XIAO G J, QIU Z J, ZHANG F J, et al. Influence of increased temperature on the potato yield and quality in a semiarid district of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 830-836.

[8] 侯琼,郭瑞清,杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 560-564.

HOU Q, GUO R Q, YANG L T. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 560-564.

[9] 赵沛义,妥德宝,段玉,等. 内蒙古后山旱农区马铃薯适宜播种密度和播期研究[J]. 华北农学报, 2005, 20(增刊 1): 10-14.

ZHAO P Y, TUO D B, DUAN Y, et al. Studies on suitable planting density and time of sowing of potato on dry land inHoushan Area, Inner Monglia[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2005, 20(S1): 10-14.

[10] 刘晓东,张润喜,张小平,等.早作覆膜马铃薯适宜种植密度和播种期的研究[J]. 华北农学报, 2001, 16(专辑): 123-126.

LIU X D, ZHANG R X, ZHANG X P, et al. Studies on suitable planting density and time of sowing of potato covered with film on dry land [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2001, 16 (album): 123-126.

[11] 张文解,邹亚暄,杨海玲,等. 临夏州不同种植区马铃薯播种适期研究[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(4): 209-212.

ZHANG WJ, ZOU Y X, YANG H L, et al. Optimal potato planting time for different planting regions in Linxia Prefecture[J]. Chinese Potato Journal, 2011, 25(4): 209-212.

[12] 张凯,王润元,李巧珍,等. 播期对陇中黄土高原半干旱区马铃薯生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9):

- 2261-2268.
- ZHANG K, WANG R Y, LI Q Z, et al. Effects of sowing date on the growth and tuber yield of potato in semi-arid area of loess plateau in central Gansu Province of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(9): 2261-2268.
- [13] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012-2020.
- Shanxi Provincial Bureau of Statistics, Shanxi Investigation Team. National Bureau of Statistics. Shanxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012-2016.
- [14] 魏淑秋. 农业气象统计[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1985: 12-13.
- WEI S Q. Agrometeorological statistics[M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1985: 12-13.
- [15] 孙芳, 林而达, 武艳娟. 宁夏气候变化及其对马铃薯生产的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(4): 465-471.
- SUN F, LIN E D, WU Y J. Climate change and its impacts on potato production in Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(4): 465-471.
- [16] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 155-159.
- LIU X Y, LI Y Z, HAO W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 155-159.
- [17] 中国农业百科全书总编辑委员会农业气象卷编辑委员会, 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书(农业气象卷)[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 401-402.
- Editorial board of China Agricultural Encyclopedia, Agrometeorological volume Editorial Committee, Editorial Department of China Agricultural Encyclopedia. Encyclopedia of Chinese agriculture (agrometeorology volume)[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 401-402.
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 1-15.
- [19] 沈国权. 当量积温及其应用[J]. 气象, 1981, (7): 23-25.
- SHEN G Q. Equivalent accumulated temperature and its application[J]. Meteorological Monthly, 1981, (7): 23-25.
- [20] 肖静, 李楠, 姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. 气象研究与应用, 2010, 32(2): 64-67.
- XIAO J, LI N, JIANG H F. Calculation and stability of accumulated temperatures in the growing season of winter wheat[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2010, 32(2): 64-67.
- [21] 姚玉璧, 王润元, 赵鸿, 等. 甘肃黄土高原不同海拔气候变化对马铃薯生育脆弱性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 52-58.
- YAO Y B, WANG R Y, ZHAO H, et al. Impacts of climatic change on potato growth vulnerability at different elevation in the Loess Plateau of Gansu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2): 52-58.
- [22] 姚玉璧, 雷俊, 牛海洋, 等. 气候变暖对半干旱区马铃薯产量的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1264-1270.
- YAO Y B, LEI J, NIU H Y, et al. Influence of climate warming on potato yields in semi-arid region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(8): 1264-1270.
- [23] 赵年武, 郭连云, 赵恒和. 高寒半干旱地区马铃薯生育期气候因子变化规律及其影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 1024-1030.
- ZHAO N W, GUO L Y, ZHAO H H. Variation characteristics of climate factors during potato growth period and their effect on yield in the alpine semiarid zone[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 1024-1030.
- [24] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 1-12.
- ZHAO H, WANG R Y, SHANG Y, et al. Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high temperature and drought stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 1-12.
- [25] FLEISHER D H, TIMLIN D J, REDDY V R. Temperature influence on potato leaf and branch distribution and on canopy photosynthetic rate[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(6): 1442-1452.
- [26] 李蕊, 郭建平. 东北春玉米积温模型的改进与比较[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6): 678-689.
- LI R, GUO J P. Improvement and comparison of the accumulated temperature model of northeast spring maize[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(6): 678-689.
- [27] 李蕊, 郭建平. 东北春玉米非线性积温模型参数改进[J]. 应用气象学报, 2018, 29(2): 154-164.
- LI R, GUO J P. Improving parameters of nonlinear accumulated temperature model for spring maize in Northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(2): 154-164.
- [28] 王婧瑄, 郭建平, 李蕊. 春玉米积温稳定性及在发育期预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2019, 30(5): 577-585.
- WANG J X, GUO J P, LI R. Accumulated temperature stability of spring maize and its application to growth period forecast[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(5): 577-585.