

河北坝上地区马铃薯产量变异的气候决定因子分析

唐建昭¹,肖登攀¹,王靖²,郭馨泽³

(1.河北省科学院地理科学研究所,河北省地理信息开发应用工程技术研究中心,河北 石家庄 050011;
2. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;3. 张北县气象局,河北 张北 076450)

摘 要:河北坝上地区马铃薯主要在雨养条件下种植,年际间产量具有很大的变异。基于 2010—2017 年连续 8 a 的马铃薯生育期数据、产量数据和生育期内的气象数据,探讨了坝上地区马铃薯产量变异的气候决定因子,并分析了 1961—2017 年马铃薯生长季气候因子的变化。结果表明:1961—2017 年坝上地区马铃薯生长季内总辐射平均每 10 a 下降 66 MJ · m⁻²;最低温度和最高温度平均每 10 a 分别升高 0.5℃ 和 0.4℃;生长季内总降水无显著变化趋势,但年际间具有很大的波动性。试验年份马铃薯产量在 8 250~24 500 kg · hm² 之间,变异系数为 27.8%。生长季内总辐射对马铃薯产量具有一定的促进作用,但不显著 ($P>0.05$);出苗~薯块形成期 ($R^2=0.31, P<0.05$) 和薯块形成~薯块膨大期 ($R^2=0.52, P<0.01$) 两个阶段的最高温度对马铃薯产量产生了显著的负影响;薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数决定了马铃薯产量变异的 68%。薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数和有效降水、薯块形成~薯块膨大期的最高温度和总辐射共同可以决定坝上地区马铃薯产量变异的 82%。马铃薯生育期内降水总量不是坝上地区马铃薯产量变异的决定因子,有效降水及分配情况与马铃薯产量相关性更大,未来持续升温的气候情境下坝上地区雨养马铃薯产量提升应从提高降水有效性和培育耐高温品种两方面制定措施。

关键词:马铃薯;气候因子;有效降水;产量;坝上地区

中图分类号:S532;S162.5 **文献标志码:**A

Identifying the determination climatic factors of potato yield variation in Bashang area of Hebei Province

TANG Jianzhao¹, XIAO Dengpan¹, WANG Jing², GUO Xinze³

(1. *Engineering Technology Research Center, Geographic Information Development and Application of Hebei, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050011, China;*
2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*
3. *Zhangbei Meteorological Bureau, Zhangbei, Hebei 076450, China*)

Abstract: Potato production in Bashang area was under rainfed condition and potato yield varied greatly in this region. The determination factors of the variation of potato yields were analyzed based on the experiment and climate data during the potato growing season of 2010–2017. Also, the variation of meteorological factors in potato growing season from 1961 to 2017 was analyzed. The results indicated that total solar radiation in growing season showed decrease trend from 1961 to 2017 in Bashang with a decrease rate of 66 MJ · m⁻² per decade. The minimum and maximum temperatures increased by 0.5℃ and 0.4℃ per decade, respectively. The precipitation change during growing season was not significant, however, its variation was great inter-annually. Potato yield was generally increased from 8 250 to 24 500 kg · hm⁻², across the experimental years of 2010–2017 with a variation coefficient of 27.8%. Total solar radiation during growing period had positive effects on potato yield, however, not significant ($P>0.05$). Maximum temperature during the periods of emergence to tuberization ($R^2=0.31, P<0.05$) and tuberization to tuber

收稿日期:2018-12-04 修回日期:2019-10-09

基金项目:河北省科学院科技计划项目(2018G18;2019G03);中央高校基本科研业务费专项资金(2018TC042);河北省青年拔尖人才项目(20180106)

作者简介:唐建昭(1990–),男,河北邯郸人,博士,副研究员,主要从事作物系统模拟研究。E-mail: tjzcai@163.com

通信作者:肖登攀(1982–),男,河北张家口人,博士,副研究员,主要从事气候变化与适应研究。E-mail: xiaodengpan168@163.com

bulking ($R^2 = 0.52$, $P < 0.01$) had significant negative effects on potato yield. The maximum continuous days without effective precipitation during tuber bulking to maturity determined 68% of the variation of potato yields under experimental years. The variation of potato yields could be determined 82% by the variations of maximum continuous days without effective precipitation and the total effective precipitation during tuber bulking to maturity, maximum temperature and total solar radiation during tuberization to tuber bulking. Total precipitation in growing period was not the determination factor for potato yields in Bashang, and the yield was more correlated with effective precipitation. Enhancing the effectiveness of precipitation and cultivating more heat tolerance cultivars would be the effective measures to enhance potato yield in Bashang in the future.

Keywords: potato; growth period; yield; climatic factors; effective precipitation; Bashang area

马铃薯是继玉米、小麦和水稻之后的第四大作物^[1],我国每年的马铃薯生产面积和产量均占世界首位^[2]。坝上地区是我国马铃薯的主要产区之一^[3],然而该地区马铃薯产量年际间变异很大^[4],解析马铃薯产量变异的决定因子,对提高马铃薯产量和保障该地区粮食安全具有重要意义。马铃薯为喜凉作物,生长的最适温度在 16~21℃ 之间^[5]。通常情况下,温度升高降低了薯块的形成个数和薯块膨大速率并缩短马铃薯生育期进而降低马铃薯产量^[6]。马铃薯根系较浅,对干旱敏感,即使短时间的干旱胁迫也会造成马铃薯的减产^[7]。气象条件是决定雨养马铃薯产量变异的主要因子,且不同地区马铃薯产量变异的决定因子差别很大。有研究表明,块茎形成期如遇高温危害,会造成甘肃地区马铃薯的严重减产,温度是决定该地区马铃薯产量变异的主要因子,且主要为负影响^[8]。青海地区热量和日照时数是影响马铃薯生长发育的主要气象因子,并且在苗期和现蕾期表现为正效应,而在成熟期表现为负效应^[9]。内蒙古阴山地区,降水总量是决定马铃薯产量变异的主要因子,其次是温度^[10-11]。而农牧交错带地区马铃薯产量是由降水的有效性和分配性决定的^[12]。坝上地区旱作的马铃薯产量在不同的年份具有很大的变异性,且产量变异的决定因子还未解析。本研究通过分析试验年份马铃薯不同生育期气象条件和马铃薯产量的关系,揭示坝上地区马铃薯产量变异的气候决定因子,为该地区提高马铃薯产量和资源利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

试验于 2010 年 4 月至 2017 年 9 月在张北县张北镇龙王庙村(41°09'N,114°42'E)进行,试验地区海拔 1 393.3 m。马铃薯生长季降水量在 226~512 mm 之间,占全年降水量的 80%,生长季平均气温在

12~15℃ 之间,生长季总辐射在 3 300~3 900 MJ·m⁻² 之间,无霜期 105 d 左右。土壤类型为沙壤土,0~50 cm 土壤容重、凋萎含水量、田间持水量和饱和含水量分别在 1.41~1.55 g·cm⁻³、3.1%~4.6%、20.6%~25.9%和 35.0%~36.0%之间,具体的土壤性质见表 1。1961—2017 年气象数据来自中国气象局数据共享网(<http://www.cma.gov.cn>),主要包括日尺度的日照时数、最高温度、平均温度、最低温度和降水量。太阳辐射根据 Ångström 方程计算获得^[12]。

表 1 试验地区土壤物理性质

Table 1 The physical properties of soil in the experimental site

土层深度 Depth /cm	土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	凋萎含水量 Wilting water content/%	田间持水量 Field capacity/%	饱和含水量 Saturated water content/%
0~10	1.55	3.8	20.6	35
10~20	1.52	3.1	23.6	35
20~30	1.50	3.7	25.9	36
30~40	1.43	4.6	25.0	36
40~50	1.41	3.5	24.7	36

1.2 试验设计

2010—2017 年供试马铃薯均在旱作条件下种植。马铃薯品种大白花为中熟品种,生育期 130 d 左右。总试验小区面积为 1 000 m²,马铃薯播种密度为 40 000 株·hm⁻²,播种深度为 15 cm。播前在试验小区内一次性施入农家肥 2 500 kg,其他时期不再进行追肥。记录的马铃薯生育期包括播种、出苗、薯块形成、薯块膨大和成熟。生育期内采用烘干法测定 0~50 cm 的土壤水分。马铃薯成熟时对小区内所有的植株进行测产,测定项目包括总产、单株薯块重以及收获指数。生育期内对试验田进行多次中耕以保证无杂草和病虫害影响。

1.3 坝上地区马铃薯生长季内气象条件分析

利用线性倾向估计的方法分析 1961—2017 年马铃薯生长季内不同气象因子(辐射、最高温度、最低温度和降水)的变化趋势,通过计算相关系数 r_{xt} 并对相关系数进行检验,分析不同气象因子年际变化趋势的显著性。线性倾向估计和相关系数的计

算公式如(1)和(2)所示:

$$\hat{x} = b + at_i \tag{1}$$

其中, b 为回归常数, a 为回归系数,表示气象因子 x_i 的倾向趋势,一般把回归系数 a 的 10 倍称为该要素的气候倾向率。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \tag{2}$$

式中, r_{xt} 为相关系数, n 为年份, x_i 为第 i 年的要素值, $\bar{x}$ 为样本平均值, $\bar{t} = (n + 1)/2$ 。

1.4 马铃薯产量变异的决定因子分析

利用一元回归和多元回归的方法,分析马铃薯生育期内及不同生育阶段内气象因子与马铃薯产量的关系。马铃薯生育期主要划分为播种~出苗、出苗~薯块形成、薯块形成~膨大、薯块膨大~成熟4个阶段,不同生育阶段和整个生育期内的气象因子包括总辐射、最高温度、最低温度、总降水、总有效降水(单次降水超过 10 mm 的降水量的总和^[12])以及不同生育阶段内最大连续无有效降水日数。连续无有效降水日数指生育期内或不同生育阶段内连续无超过 10 mm 降水事件发生的天数。首先,利

用不同阶段内的单个气象因子和马铃薯产量分别建立一元回归模型(式 3),找出显著影响($P < 0.05$)马铃薯产量的气象因子。进一步利用对马铃薯产量影响显著的气象因子和马铃薯产量建立多元回归模型(式 4),即坝上地区马铃薯产量变异的决定方程。

$$Y_p = aX + b \tag{3}$$

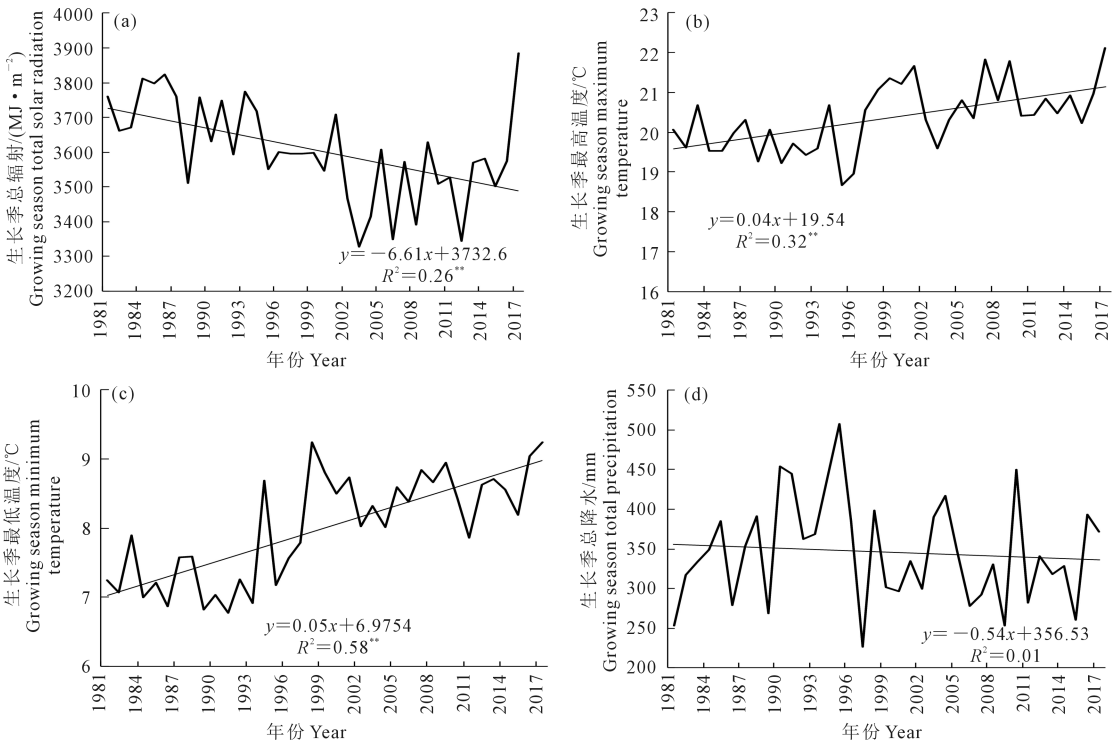
$$Y_p = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \cdots + b \tag{4}$$

式中, Y_p 为不同年份马铃薯产量, X 为马铃薯生育阶段内的不同气象因子(包括辐射、最高温度、最低温度、降水等), a 为马铃薯产量对各气象因子的敏感系数, b 为回归常数。

2 结果与分析

2.1 1961—2017 年马铃薯生长季内气象条件变化

1961—2017 年马铃薯生长季内总辐射在 3 300 ~ 3 900 MJ · m⁻² 之间,年际间具有较大的波动性,整体上呈显著下降的趋势($P < 0.01$),平均每 10 a 下降 66 MJ · m⁻²(图 1a)。马铃薯生长季内最高温度和最低温度分别在 18.05 ~ 22.1℃ 和 5.98 ~ 9.23℃ 之间(图 1b 和图 1c),且最低温度在年际间的变异程度要高于最高温度。马铃薯生长季内增温明显($P <$



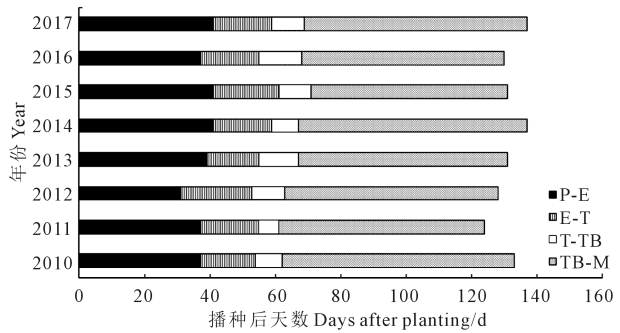
注:“—”代表回归线,“*”和“**”分别代表达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著差异。下同。
Note: “—” represents the linear trend for each variable; “*” and “**” indicate statistical significance at $P<0.05$ level and 0.01 level, respectively, the same below.

图 1 1961—2010 年坝上地区马铃薯生长季内总辐射(a)、最高温度(b)、最低温度(c)和总降水量(d)的变化
Fig.1 The change of growing season total solar radiation (a), maximum temperature (b), minimum temperature (c) and total precipitation (d)

0.01),最高温度和最低温度平均每 10 a 分别升高 0.4℃和 0.5℃,且最低温度的增温幅度要高于最高温度的增温幅度(图 1b 和图 1c)。马铃薯生长季内总降水量在 226~512 mm 之间(图 1d),年际间存在较大波动性,但变化趋势不显著($P>0.05$)。

2.2 2010—2017 年马铃薯生育期和产量

2010—2017 年马铃薯生育期日数(图 2)在 124~137 d 之间,且不同生育阶段差别较大。试验年份播种~出苗的日数在 31~41 d 之间,其中 2012 年最短。出苗~薯块形成和薯块形成~膨大两个生长阶段分别在 16~22 d 和 6~13 d 之间,其中薯块形成~膨大阶段年际间变异较大,最短年份(2011 年)仅 6 d,而最长年份(2016)为 13 d。不同年份薯块膨大~成熟阶段的日数在 61~71 d 之间,该阶段长度无显著的变化趋势。2010—2017 年马铃薯产量(图 3)在 8 250~24 500 kg·hm⁻²之间,不同年份马铃薯产量无显著的变化趋势,但年际间存在很高的变异,变异系数为 27.8%。2011 年马铃薯产量最高,相比于其他年份高出 0.8%~196%。



注:P-E、E-T、T-TB 和 TB-M 分别代表播种~出苗、出苗~薯块形成、薯块形成~膨大和薯块膨大~成熟。
Note: P-E, E-T, T-TB and TB-M represent the growing periods of planting to emergence, emergence to tuberization, tuberization to tuber bulking, and tuber bulking to maturity, respectively.

图 2 2010—2017 年马铃薯生育期内不同生育阶段日数
Fig.2 The length of different growing stages during potato growing period under experiment years from 2010 to 2017

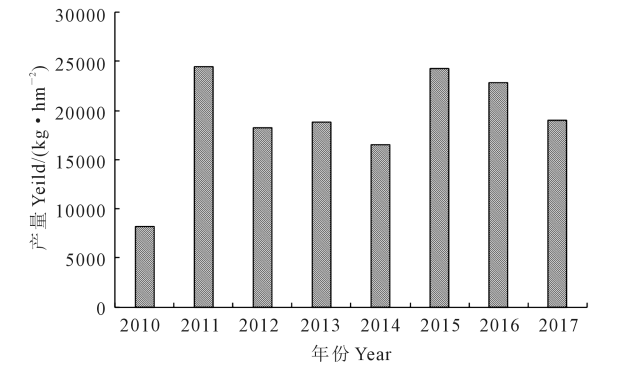


图 3 2010—2017 年不同年份马铃薯产量
Fig.3 The yields of potato in experiment years from 2010 to 2017

2.3 坝上地区马铃薯产量变异的决定因子

图 4 显示了马铃薯生育期内不同气象因子和马铃薯产量的关系。马铃薯生育期内辐射(图 4a)对马铃薯产量具有一定促进作用,但未达到显著水平($P>0.05$);生育期内最高温度和马铃薯产量呈负相关关系(图 4b),出苗~薯块形成和薯块形成~膨大两个阶段达到显著($R^2=0.31, P<0.05$)和极显著水平($R^2=0.52, P<0.01$)。生育期内最低温度对马铃薯产量主要为负影响(图 4c),但只有播种~出苗阶段的最低温度达到了显著水平($R^2=0.23, P<0.05$)。整个生育期总降水量以及不同生育阶段的总降水量(图 4d)均与产量无显著相关关系,说明降水总量的变异不是坝上地区马铃薯产量变异的决定因子。而马铃薯薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数(图 4e)对马铃薯产量产生了显著的负影响($R^2=0.68, P<0.01$)。薯块膨大~成熟期的有效降水总量和马铃薯产量具有显著的正相关关系($R^2=0.22, P<0.05$)(图 4f)。将薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数(NEP_{TB-M})和有效降水(EP_{TB-M})、薯块形成~膨大期的最高温度($T_{maxT-TB}$)和总辐射(S_{T-TB})与马铃薯产量建立了产量-气象决定因子回归方程(公式 5),该方程可以解释坝上地区马铃薯产量变异的 82%。

$$Y_p = 45440 - 1119 \times NEP_{TB-M} - 312 \times T_{maxT-TB} + 28 \times S_{T-TB} + 11EP_{TB-M} \quad (5)$$

式中, NEP_{TB-M} 、 $T_{maxT-TB}$ 、 S_{T-TB} 和 EP_{TB-M} 分别为薯块膨大~成熟期最大连续无有效降水日数、薯块形成~膨大期最高温度、薯块形成~膨大期总辐射和薯块膨大~成熟期的总有效降水。

3 讨论

坝上地区马铃薯生产以雨养为主,大量研究表明生长季总降水量是雨养农业地区作物产量的重要决定因子,作物产量随着降水量的增加而增加^[13-15]。然而一些研究指出作物产量主要由降水的有效性 and 分配性决定^[16-17]。本研究表明生长季内降水总量和马铃薯产量之间相关关系不显著,在我国北方农牧交错带也得出同样的结论^[12],并且降水总量增加,尤其是无效降水的增加会导致辐射下降(图 5),不利于马铃薯增产。北方农牧交错带马铃薯产量和薯块形成期的降水与潜在蒸散量的比值以及薯块膨大期以后的有效降水更相关,本研究指出坝上地区马铃薯产量和薯块膨大期~成熟阶段的有效降水($R^2=0.22, P<0.05$)以及最大连续无有效降水日数($R^2=0.68, P<0.01$)更相关,这主要是因

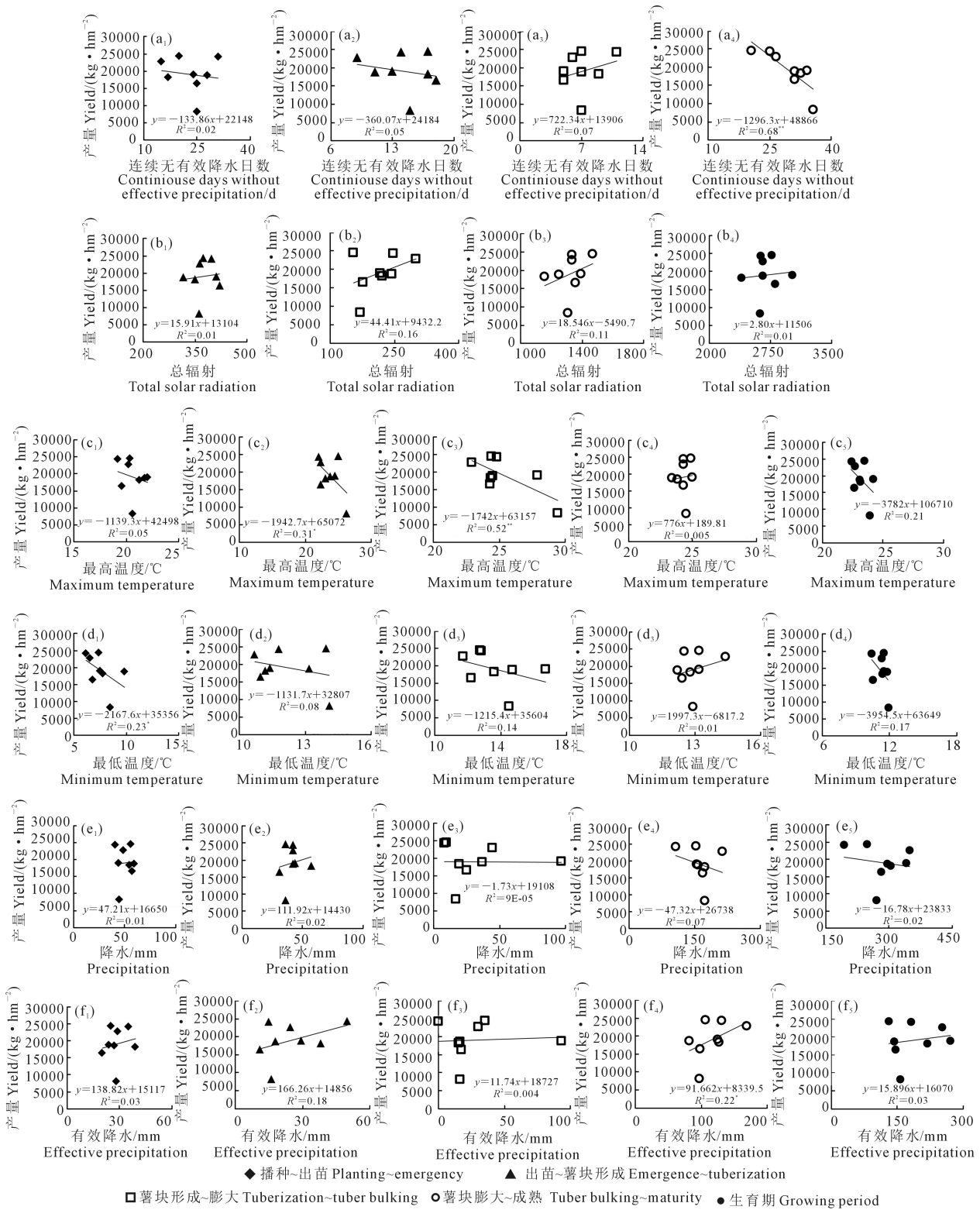


图 4 马铃薯产量和生育期不同气象因子的关系

Fig.4 Relationships between potato yield and meteorological factors during potato growing period

为薯块膨大期是马铃薯产量形成的关键期,该阶段对水分胁迫十分敏感^[18-19]。并且由于坝上地区太阳辐射较高且风速大,单次降水量较小时会从地表或作物叶片快速蒸发^[20]。本研究表明单次降水量超过 10 mm 的有效降水和马铃薯产量存在很好的

相关关系,与前人研究结果一致^[12,21]。通常作物产量会随着生长季蒸散量的增加而增加^[22-23],然而当水分通过土壤蒸发散失的量占总蒸散量的比例高时,作物产量并不随着蒸散量的增加而增加^[24]。因此,通过薄膜或者秸秆覆盖降低土壤蒸发而提高坝上

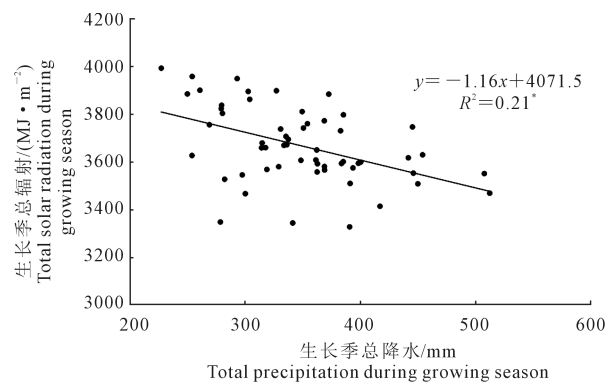


图 5 1961—2017 年坝上地区马铃薯生长季总降水和总辐射的关系

Fig.5 The relationship between total precipitation and solar radiation of growing season in Bashang area from 1961 to 2017

地区马铃薯生长季内降水的有效性对提升该地区马铃薯产量具有重要意义。连续最大无有效降水日数表征了作物受干旱胁迫的时间长度^[25]。马铃薯根系较浅^[12],土壤中 50 cm 以下的水分很难利用并且薯块膨大~成熟期是马铃薯生育期中需水最多的阶段^[18],该时期长期连续无有效降水会造成连续的干旱胁迫,因此对马铃薯产量产生极为不利的影响,通过建造集雨窖和集雨场将作物无法利用的雨水进行收集,在遭遇长期连续无有效降水时利用前期收集的雨水对马铃薯进行补灌,可以有效缓解干旱对马铃薯产生的危害^[2]。

马铃薯为喜凉作物,其生长的最适温度在 16~21℃ 之间^[5],本研究表明马铃薯生育期内最高温度和最低温度与产量呈现负相关关系,尤其是出苗~薯块形成期 ($R^2 = 0.31, P < 0.05$) 和薯块形成~膨大期 ($R^2 = 0.52, P < 0.01$) 两个生育阶段的最高温度。主要是在出苗~薯块形成期温度过高,会降低马铃薯薯块的形成个数^[26],因此该时期温度过高会显著降低马铃薯的产量。薯块膨大期~成熟期温度过高,会降低马铃薯薯块的膨大速率^[26],同时降低马铃薯的生育期长度(图 6),减少干物质的总积累量。因此,薯块膨大~成熟阶段温度过高也会显著降低马铃薯的产量。此外,马铃薯生育期内辐射较高会对产量形成产生一定的促进作用,然而在研究区生育期总辐射与马铃薯产量的相关关系并不显著,主要原因是该地区海拔较高(达 1 393 m),辐射资源充足,满足了马铃薯的生长需求,所以一定程度上生育期总辐射降低不会对产量产生大的影响。薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数 (NEP_{TB-M}) 和有效降水 (EP_{TB-M})、薯块形成~膨大期

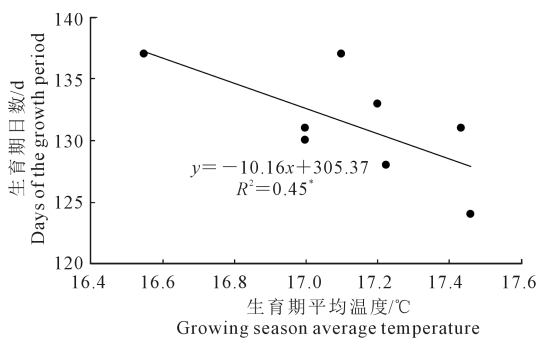


图 6 马铃薯生长季内平均温度和生育期长度的关系

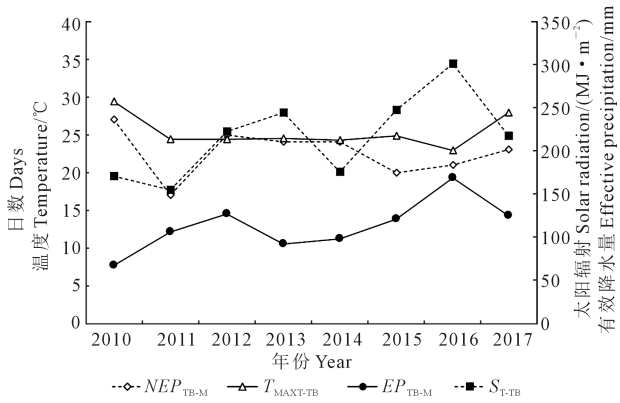
Fig.6 The relationship between average temperature of growing season and the length growing period of potato

的最高温度 ($T_{\max T-TB}$) 和总辐射 (S_{T-TB}) 共同决定了河北坝上地区马铃薯产量变异的 82%,试验年份内这 4 个因子的变化如图 7 所示,其中 2010 年薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数 (NEP_{TB-M}) 和薯块形成~膨大期的最高温度 ($T_{\max T-TB}$) 显著高于其他年份,而薯块膨大~成熟期的有效降水 (EP_{TB-M}) 和薯块形成~膨大期的总辐射 (S_{T-TB}) 显著低于其他年份,因此该年份马铃薯产量显著低于其他年份。

不同地区马铃薯产量变异的气候决定因子差别较大,甘肃地区马铃薯产量变异的决定因子主要是块茎形成期的最高温度,该时期遇高温会造成马铃薯严重减产^[8],坝上地区薯块形成~膨大期的最高温度 ($T_{\max T-TB}$) 对马铃薯产量产生了显著的负影响,但该时期的高温危害较少,主要是因为甘肃地区马铃薯块茎形成期集中在 7 月中旬,而坝上地区马铃薯块茎形成期集中在 6 月底至 7 月初,并且由于种植品种的不同,坝上地区该时期的生长日数也少于甘肃地区,因此坝上地区马铃薯块茎形成期遭遇高温危害的可能性更小。青海地区热量和日照时数是影响马铃薯产量变异的主要决定因子,并且在薯块形成期温度为正效应^[9],主要是因为青海地区该时期温度在马铃薯最适温度以下,温度升高促进马铃薯的生长。降水总量是内蒙古阴山地区马铃薯产量变异的决定因子^[10-11],而降水总量对坝上地区马铃薯产量变异影响不显著,主要是因为坝上地区土壤蒸发较高,且降水分配不均匀,因此降水总量不是决定坝上地区马铃薯产量变异的主要因子,最大连续无有效降水日数对马铃薯产量影响更大。

大量研究表明温度升高对马铃薯产生不利影响^[26-28],本研究表明坝上地区马铃薯生长季内增温

显著($P<0.05$) (图 1), 生长季内最低温度和最高温度平均每 10 a 分别增加 0.5°C 和 0.4°C 。另外, 进一步分析了 1981—2000 年与 2001—2017 年两个时期马铃薯生长季内温度与马铃薯的温度三基点(马铃薯生长上限温度($P_{T_{\max}}$)、最适温度($P_{T_{\text{opt}}}$)和下限温度($P_{T_{\min}}$))的关系(图 8)。2001—2017 年的平均最高温度、最低温度和平均温度均显著高于 1981—2000 年, 同时两个阶段的平均温度均超过了马铃薯生长的最适温度($P_{T_{\text{opt}}}$) (图 7), 因此, 未来气候条件下, 温度持续升高会加剧高温对马铃薯生长和产量的负面影响, 通过垄膜沟草和膜下滴灌的方式可以降低马铃薯生育期内土壤温度, 降低升温给马铃薯带来的危害^[29-30]。未来选育耐高温品种是应对增温并且提高该地区马铃薯产量的主要方向。本文只分析了马铃薯产量变异的气象决定因子, 非气象因子如土壤肥力、灌溉和病虫害均会对马铃薯产生重要影响, 未来研究需考虑多因子(包括气象因子和非气象因子)对马铃薯产量的交互影响。

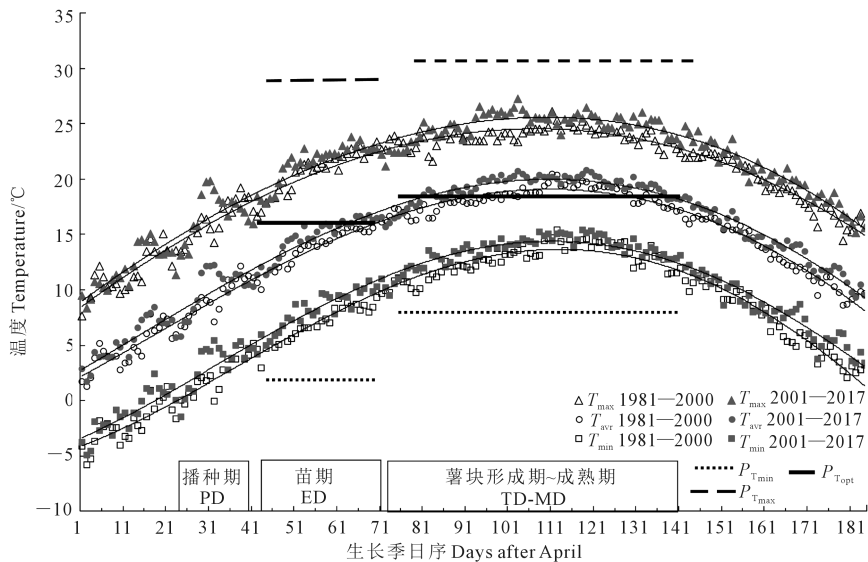


注: NEP_{TB-M} 、 $T_{\max T-TB}$ 、 EP_{TB-M} 和 S_{T-TB} 分别代表薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数、薯块形成~膨大期的最高温度、薯块膨大~成熟期的有效降水和薯块形成~膨大期的总辐射。

Note: NEP_{TB-M} , $T_{\max T-TB}$, EP_{TB-M} and S_{T-TB} represent continuous days without effective precipitation from tuber bulking to maturity, maximum temperature from tuber bulking to maturity, total effective precipitation from tuberization to tuber bulking, and total solar radiation from tuberization to tuber bulking.

图 7 2010—2017 年马铃薯生育期内影响其产量变异的主要气象因子的变化

Fig.7 The variation of determination factors of the variation potato yield from 2010 to 2017



注: $T_{\max}$ 、 T_{avr} 和 $T_{\min}$ 分别代表两个阶段内马铃薯生长季内的最低温度、平均温度和最高温度; $P_{T_{\min}}$ 、 $P_{T_{\text{opt}}}$ 和 $P_{T_{\max}}$ 分别为马铃薯生长的下限温度、最适温度和上限温度。

Note: $T_{\max}$, T_{avr} and $T_{\min}$ represent the growing season minimum temperature, average temperature and maximum temperature, respectively. $P_{T_{\min}}$, $P_{T_{\text{opt}}}$ and $P_{T_{\max}}$ represent the minimum, optimal and maximum temperature for potato growth, respectively.

图 8 1981—2000 年和 2001—2017 年马铃薯生长季内最低温度、平均温度、最高温度和马铃薯三基点温度

Fig.8 The comparison of growing season minimum temperature, average temperature and maximum temperature during the periods of 1981—2000 and 2001—2017 with the cardinal temperatures of potato

4 结 论

坝上地区马铃薯生长季内总辐射呈显著下降的趋势, 且年际间具有一定的波动性; 马铃薯生长季内增温趋势明显, 且最低温度增加幅度要高于最高温度的增加幅度; 生长季内总降水无显著变化趋

势, 但年际间波动很大。试验年份马铃薯生育期长度无显著差异, 但不同生育阶段差别较大。马铃薯产量年际间具有很大的变异性。坝上地区马铃薯生育期总辐射对产量具有促进作用, 但关系不显著; 生育期温度尤其是薯块形成~膨大阶段的最高温度和马铃薯产量呈显著的负相关关系; 马铃薯生

育期内总降水量和马铃薯产量关系不显著,而薯块形成~膨大期的有效降水和马铃薯产量呈现显著的正相关关系;马铃薯产量和薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数最为相关。薯块膨大~成熟期的最大连续无有效降水日数和有效降水、薯块形成~膨大期的最高温度和总辐射决定了坝上地区马铃薯产量变异的 82%。

参 考 文 献:

[1] Haverkort A J, Struik P C. Yield levels of potato crops:Recent achievements and future prospects[J]. Field Crops Research, 2015, 182: 76-85.

[2] Tang J Z, Wang J, Fang Q X, et al. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 98: 82-94.

[3] 魏静,郑小刚,马忠社.坝上地区马铃薯种植地球化学区划—以尚义县为例[J].农学报,2013, 3(11): 10-13.

[4] 乔海明,侯志臣,陶国峰,等.河北坝上马铃薯产业优势分析及产业发展方向[J].中国马铃薯, 2001, 15(2): 116-118.

[5] Haverkort A J, Verhagen, A. Climate change and its repercussions for the potato supply chain[J]. Potato Research, 2008, 51: 223-237.

[6] Hijmans R J. The effect of climate change on global potato production [J]. American Journal of Potato Research, 2003, 80: 271-280.

[7] Haverkort A J, VandeWaart M, Bodlaender K B A. The effects of early drought stress on numbers of tuber and stolons of potato in controlled and filed conditions[J]. Potato Research, 1990, 33: 89-96.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 侯琼,苗百岭,张晓雯.基于气象因子驱动的阴山地区马铃薯产量预测模型[J].干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 247-253.

[11] 宋学锋,侯琼.气象条件对马铃薯产量的影响[J].中国农业气象, 2003, 24(2): 35-38.

[12] Tang J Z, Wang J, Wang E L, et al. Identifying key meteorological factors to yield variation of potato and optimal planting date in the agro-pastoral ecotone in North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256-257: 283-291.

[13] Condon A G, Richards R A, Rebetzke G J. Breeding for high water-use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55: 2447-2460.

[14] Harms T E, Konscheuh M N. Water savings in irrigated potato production by varying hill-furrow or bed-furrow configuration[J]. Agri-

cultural Water Management, 2010, 97: 1399-1404.

[15] Megowan S, Ryves D B, Anderson N J. Holocene records of effective precipitation in West Greenland [J]. Holocene, 2003, 13 (2): 239-249.

[16] Rockstrom J, Karlberg L, Wani S P. Managing water in rainfed agriculture: The need for a paradigm shift[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 543-550.

[17] Yu Q, Li L H, Luo Q Y. Year patterns of climate impact on wheat yields[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34: 518-528.

[18] Jefferies R A. Use of a simulation-model to assess possible strategies of drought tolerance in potato[J]. Agricultural Systems, 1993, 41: 93-104.

[19] Lynch D R, Foroud N, Kozub G C. The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties[J].American Potato Journal, 1995, 72: 375-386.

[20] Ebrahimpour M, Rahini J, Nikkhah A. Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(1): 1-9.

[21] 黄伟,张俊花,朱贵鹏,等.保水剂不同施用方式对马铃薯生长和产量的影响[J].生态学杂志, 2015, 34 (1): 1-8.

[22] Onder S, Caliskan M E, Oonder D. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components[J]. Agricultural Water Management, 2005, 73: 73-86.

[23] 李晶,张恒嘉,周宏.土壤水分调亏处理膜下滴灌马铃薯耗水特征及生长动态[J].干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 80-87.

[24] Paredes P, D’Agostino D, Assif M, et al. Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach [J]. Agricultural Water Management, 2018, 195: 11-24.

[25] 王娜,王琦,方锋,等.陕西省极端无雨日数的时空分布特征[J].干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 261-267.

[26] Delden A V, Pecio A, Haverkort A J. Temperature response of early expansion of potato and wheat[J].Annals of Botany, 2000, 86(2): 355-369.

[27] Pressey R, Shaw, R. Effect of temperature on invertase inhibitor and sugars in potato tubers[J]. Plant Physiology, 1996, 41: 1657-1661.

[28] Marinus J, Bodlaender K B A. Response of some potato varieties to temperature[J]. Potato Research, 1975, 18(2): 189-204.

[29] 夏芳琴,姜小凤,董博,等.不同覆盖时期和方式对旱地马铃薯土壤水热条件和产量的影响[J].核农学报,2014, 28(7): 1327-1333.

[30] 薛道信,张恒嘉,巴玉春,等.绿洲膜下滴灌调亏对马铃薯土壤环境及产量的影响[J].华北农学报, 2017, 32(3): 229-238.