

黄土高原半干旱区马铃薯产量 对气候变化的响应

齐月, 赵鸿, 雷俊, 王丽娟, 芦亚玲, 赵福年, 杨阳, 陈斐

(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, 甘肃兰州730020)

摘要:为探讨气候变化背景下,黄土高原半干旱区马铃薯生育期气象要素的变化规律及其对马铃薯生长发育的影响,本研究基于黄土高原半干旱区定位观测试验,结合气象要素观测资料,研究了半干旱区马铃薯产量对气候变化的响应。结果表明,1960—2020年61 a间,马铃薯生育期气温和积温显著升高,气候倾向率分别为 $0.32^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $48.14^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$);降水量波动减少,气候倾向率为 $3.97 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$);日照时数显著减少,气候倾向率为 $10.92 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。但2005—2020年16 a间,马铃薯生育期气温显著下降,气候倾向率为 $-0.54^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),各生育时期气温均呈下降趋势,其中块茎膨大~成熟期气温下降最明显,气候倾向率为 $-1.18^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,通过0.01水平显著性检验;马铃薯生育期降水量增加显著,气候倾向率为 $13.89 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),各生育时期降水量变化不同,播种~出苗和块茎形成期降水量呈显著减少趋势,气候倾向率为 $12.32 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$,出苗~分枝期和块茎膨大~成熟期降水量呈显著减少趋势,气候倾向率为 $11.22 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $35.26 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。近16 a来,马铃薯生长期日数延长、产量下降,产量与全生育期气温、块茎膨大~成熟期气温和积温呈显著负相关 ($P < 0.05$),产量与降水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),马铃薯生育期适宜降水量阈值为315.7 mm。马铃薯生育期气温及降水量、块茎形成期降水量和播种~出苗降水量是影响马铃薯产量的关键因子。该研究可为黄土高原半干旱区马铃薯种植应对气候变化及产业健康发展提供重要参考。

关键词:气候变化;马铃薯;产量;气温;降水量;黄土高原

中图分类号:S162.5;S532 **文献标志码:**A

Response of potato yield to climate change in semi-arid region of the Loess Plateau

QI Yue, ZHAO Hong, LEI Jun, WANG Lijuan, LU Yaling, ZHAO Funian, YANG Yang, CHEN Fei

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

Abstract: This study investigated the response of potato yields to climate change in semi-arid areas of the Loess Plateau based on observing potato positioning experiments and data of climate factors. The results showed that the temperature and cumulus temperature increased significantly, with climatic tendencies of $0.32^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ and $48.14^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$), respectively. Precipitation fluctuated less with a climatic tendency of $3.97 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$). The sunshine hours decreased significantly with a climatic tendency of $10.92 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$) in potato growth period during 1960—2020 (61 a). However, the temperatures decreased significantly, with a climatic tendency rate of $-0.54^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$). The trend of decreasing temperature was observed in all reproductive periods with the most obvious decrease in temperature from tuber expansion to maturity at a climatic tendency rate of $-1.18^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, passing the significance test at 0.01 level in potato growth period during 2005—2020 (16 a). Precipitation increased during the potato growth period at a climatic tendency rate of $13.89 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$).

收稿日期:2022-02-11

修回日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42175192, 642230611, 52105131, 41975151);甘肃省青年基金项目(20JR10RA451)

作者简介:齐月(1988-),女,山东章丘人,副研究员,主要从事气候变化对农作物影响研究。E-mail:goodqiyue@163.com

通信作者:芦亚玲(1989-),女,甘肃会宁人,助理研究员,主要从事气候变化影响分析。E-mail:luyaling1015@gmail.com

Different growth periods had a significant decrease in precipitation during sowing to seedling and tuber formation periods with a climatic tendency rate of $12.32 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$. For almost 16 a, the potato growth days were extended and yield decreased. Yield was significantly negatively correlated ($P < 0.05$) with temperature of potato growth period, temperature from tuber expansion to maturity, and cumulative temperature. Yield was highly significantly positively correlated ($P < 0.01$) with precipitation and precipitation threshold of 315.7 mm during the potato growth period. Temperature and precipitation during potato growth period, precipitation during tuber formation, and precipitation from sowing to seedling emergence were key factors affecting potato yield. The study could provide an important reference for potatoes in the semi-arid zone of the Loess Plateau to cope with climate change and promote healthy development of the industry.

Keywords: climate change; potato; production; temperature; precipitation; Loess Plateau

近年来,由于全球经济化进程加快、工业化发展以及人类活动的影响,温室气体大量排放,导致全球气候变暖^[1]。中国是全球气候变化的敏感区,受影响最为显著的区域,升温速率明显高于同期平均水平。1951—2020年,中国年平均气温呈显著上升趋势,升温速率为 $0.26^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。中国年降水量呈增加趋势,降水变化区域间差异显著。1961—2020年,中国年平均降水量呈增加趋势,平均每10 a增加5.1 mm。1961—2020年,东北中北部、江淮至江南大部、青藏高原中北部、西北中部和西部年降水量呈明显的增加趋势,其中,江南东部、青藏高原中北部、新疆北部和西部降水增加趋势尤为显著^[2]。

气候变化对作物生长发育影响的研究较多,主要集中在气候变化对玉米、小麦以及水稻等作物生育期、产量、气候生产潜力等方面^[3-7]。马铃薯是继水稻、小麦、玉米后的全球第四大粮食作物,是我国最具发展前景的高产经济作物之一^[8]。马铃薯营养丰富,是粮、饲、菜兼用型作物,中国是世界最大的马铃薯生产国,种植面积约466.67万 hm^2 ,年产量达0.9亿 t ^[9],马铃薯生产对保障国家粮食安全有重要作用。

气候变化对马铃薯生长和产量的影响及其种植制度变化等方面已开展了大量研究^[10-15]。池再香等^[16]研究气候变化对贵州西部马铃薯的影响发现,气温对马铃薯产量形成表现为负效应,降水量为正效应(开花期除外);日照时数对马铃薯产量形成表现为正效应(苗期除外)。朱赟赟等^[17]对宁夏不同区域马铃薯产量与气象因子的关系进行了研究,发现结薯期气温对马铃薯产量的影响呈显著负效应,降水呈显著正效应。王萍等^[18]研究发现,气候变化对松嫩平原地区马铃薯的生长发育影响较大,以正效应为主导。赵年武等^[19]发现,热量和日照时数是影响马铃薯生长发育的主要气象因子,苗

期和现蕾期表现为正效应,成熟期表现为负效应。赵鸿等^[20]研究发现,春秋季节气温升高对马铃薯生长发育和产量形成有利。唐建昭等^[21]研究发现,未来气候情景下气候变化对马铃薯产量和水分利用效率具有积极影响,以正效应为主。肖国举等^[22]通过试验研究发现,增温显著减少了单株薯块量、提高了薯重,马铃薯产量呈递增趋势。

近年来,中国气候整体呈暖湿化,黄土高原半干旱区是我国马铃薯主产区,该地区属于雨养农业区,马铃薯生育期内气候要素变化如何影响其生长发育有待进一步深入研究。本研究利用黄土高原半干旱区甘肃省定西市16 a的定点观测试验资料,研究马铃薯不同生育时期气候要素变化对产量的影响,为马铃薯生产应对气候变化提供参考,为推动马铃薯产业发展提供科学依据。

1 试验设计与方法

1.1 研究区域气候及马铃薯生长发育概况

研究区甘肃省定西市位于黄土高原半干旱雨养农业区,年平均气温 $5.3 \sim 8.9^\circ\text{C}$,最热月7月平均气温 $16.3 \sim 22.6^\circ\text{C}$,最冷月1月平均气温 $-10.4 \sim -3.3^\circ\text{C}$ 。年降水量 $245.7 \sim 721.8 \text{ mm}$,5—10月降水量 $192.7 \sim 595.6 \text{ mm}$,占全年降水量的 $78.4\% \sim 82.5\%$ 。年平均日照时数 $2\ 031.8 \sim 2\ 797.1 \text{ h}$ 。

马铃薯在5月上旬—5月中旬播种,出苗期在6月上旬—6月中旬,分枝期在6月下旬,花序形成期在7月上旬—7月中旬,开花期在7月中旬—7月下旬,可收期在10月上旬—10月中旬。播种~可收期的全生育期为 $123 \sim 175 \text{ d}$ 。全生育期 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温为 $2\ 349.2 \sim 2\ 896.1^\circ\text{C}$,降水量为 $183.0 \sim 389.1 \text{ mm}$,日照时数为 $868.3 \sim 1\ 319.6 \text{ h}$ 。

1.2 试验设计

2005—2020年在甘肃省定西市气象局农业气象观测站开展了马铃薯生长发育状况观测试验,试

验地面积 667 m²;每个样地面积 60 m²(5 m×12 m), 4 个重复。按照《农业气象观测规范》^[23] 观测方法测定马铃薯的生长发育期、产量构成要素等指标。供试作物品种、耕作制度和栽培管理与大田一致, 马铃薯品种选用了‘新大坪’, 属于中熟品种, 抗旱、稳产、抗病性较强, 是定西地区旱地主要推广品种。样地栽培品种与大田相同, 没有发生重大调整, 土壤肥力水平未发生重大变化。

气象数据为定西市气象局气象站建站以来 1960—2020 年地面气象观测资料, 根据马铃薯生育时期计算生育期内气温、降水、日照时数等指标。

1.3 统计分析方法

1.3.1 气象要素倾向率

$$Y_i = a + bt_i$$

式中, Y_i 为气象要素变量, t_i 表示 Y_i 所对应的时间, a 为回归常数, b 为回归系数。

$$b = \frac{dy(t)}{dt}$$

式中, b 为气候变化倾向率, 一般以 $10b$ 表示某要素气候变化倾向率。

1.3.2 统计分析 采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)、多重比较 (LSD)、单样本 T 检验和相关性分析, 使用通径系数正规方程组算法进行通径分析^[17]。使用 Excel 2013 和 Origin 9.0 进行数据分析与制图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯生育期内气候变化特征

2.1.1 气温年际变化趋势 1960—2020 年马铃薯全生育期气温呈显著上升趋势 (图 1a), 气候倾向率为 $0.32^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。近 61 a 来, 马铃薯生育期气温最高年份在 2016 年 (18.14°C), 最低年份

在 1984 年 (14.70°C), 年平均气温为 16.10°C 。20 世纪 90 年代前马铃薯生育期内气温表现为负距平, 20 世纪 90 年代后为正距平, 且逐渐增加。但 2005—2020 年近 16 a 马铃薯生育期内气温呈显著下降趋势, 气候倾向率为 $-0.54^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。

马铃薯不同生育时期气温变化趋势如图 2 所示, 2005—2020 年马铃薯不同生育时期气温均呈下降趋势。播种~出苗、出苗~分枝期、块茎形成期和块茎膨大~成熟期气温的气候倾向率分别为 -0.81 、 -1.16 、 $-0.84^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $-1.18^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 其中块茎膨大~成熟期气温下降趋势显著, 通过 0.01 水平显著性检验。

2.1.2 降水量年际变化趋势 1960—2020 年马铃薯全生育期降水量变化如图 1b 所示, 近 61 a 来降水量呈波动减少趋势, 气候倾向率为 $-3.97 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$); 马铃薯全生育期年降水量在 150~552.5 mm 振荡, 平均为 310.42 mm, 最高年份是 1967 年 (721.8 mm), 最低年份是 1982 年 (245.7 mm)。20 世纪 80 年代之前马铃薯生育期年降水量呈减少趋势, 80 年代之后增加。2005—2020 年近 16 a 马铃薯生育期降水呈显著增加趋势, 倾向率为 $13.89 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。

2005—2020 年马铃薯不同生育时期降水量变化如图 3 所示, 马铃薯播种~出苗期降水量呈显著减少趋势, 气候倾向率为 $-12.32 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$); 出苗~分枝期降水量呈显著增加趋势, 气候倾向率为 $11.22 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$); 块茎膨大~成熟期降水量呈显著增加趋势, 气候倾向率为 $35.26 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$); 块茎形成期降水量呈减少趋势, 气候倾向率为 $-0.61 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。播种~出苗期降水减少导致马铃薯出苗率降低, 对其生长产生不利影响。

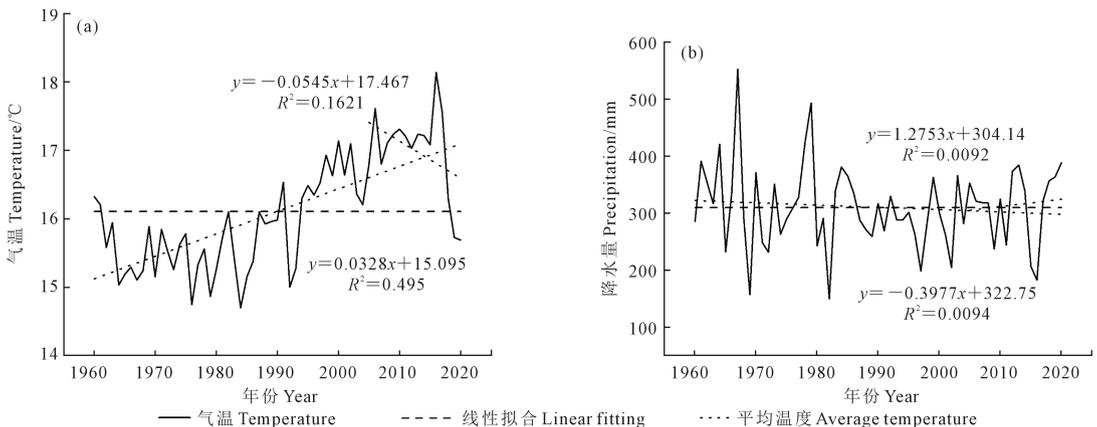


图 1 马铃薯生育期内气温及降水量变化趋势

Fig.1 Variation trend of temperature and precipitation during potato growing period

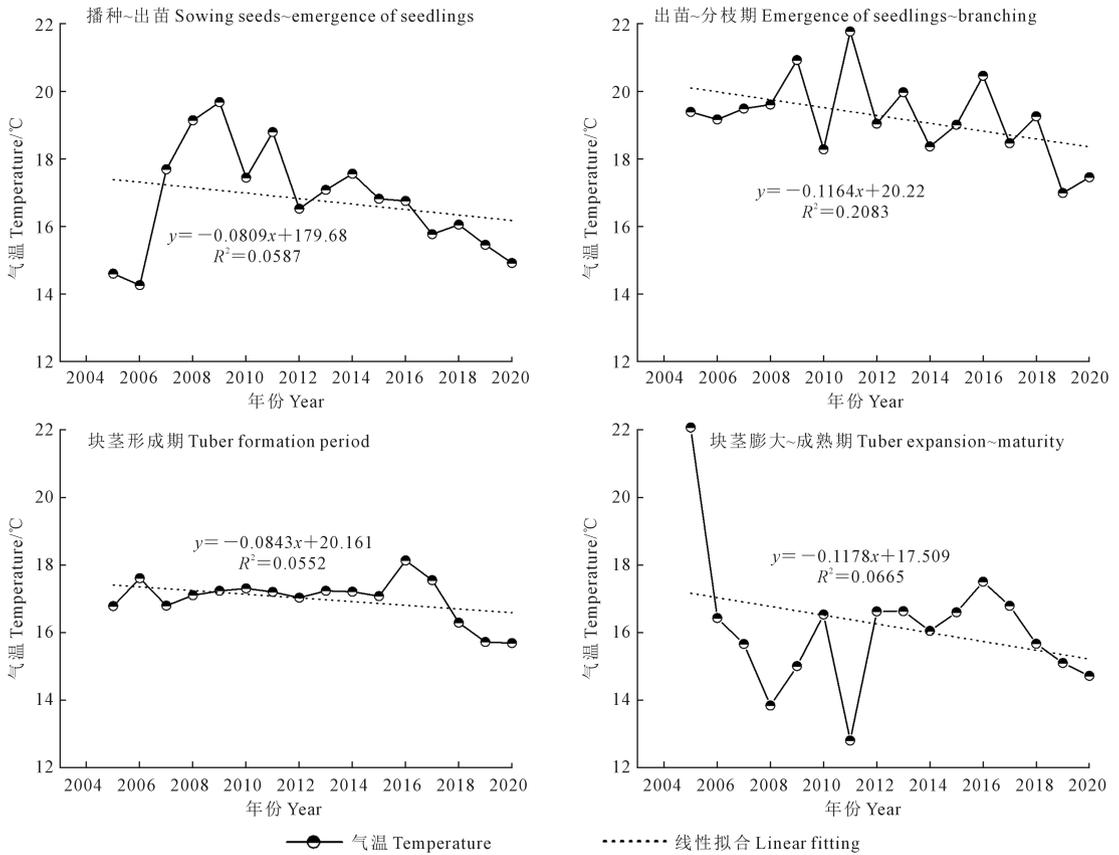


图 2 马铃薯不同生育时期气温变化趋势

Fig.2 Temperature variation trend of potato at different growth stages

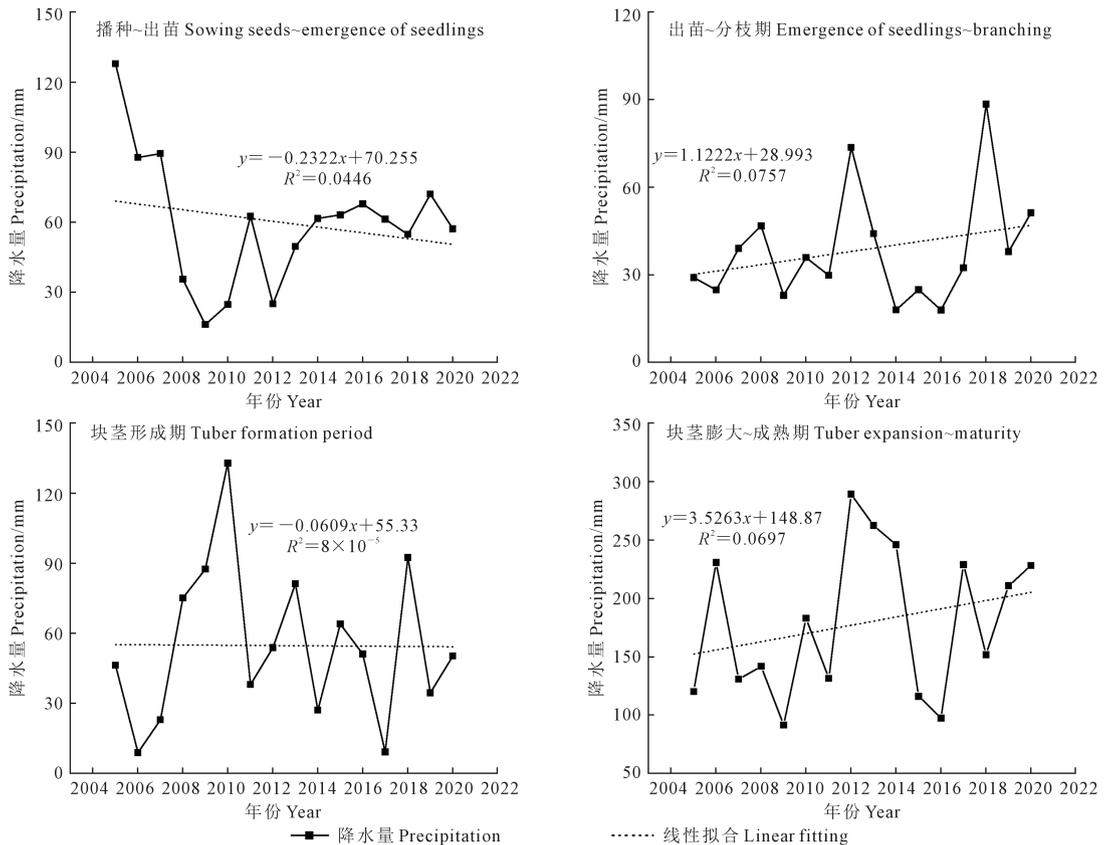


图 3 马铃薯不同生育时期降水量变化趋势

Fig.3 Precipitation variation trend of potato at different growth stages

2.1.3 日照时数和有效积温的年际变化趋势

1960—2020 年马铃薯生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著增加趋势(图 4),气候倾向率为 $48.14^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),近 61 a 来马铃薯生育期平均积温为 $2\,573.34^{\circ}\text{C}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温最高在 2016 年,为 $2\,896.1^{\circ}\text{C}$;最低在 1976 年,为 $2\,349.20^{\circ}\text{C}$ 。2005—2020 年马铃薯生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著下降趋势,气候倾向率为 $-131.02^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。1960—2020 年马铃薯生育期平均日照时数为 $1\,117.48\text{ h}$,日照时数最高在 1965 年($1\,319.60\text{ h}$),最低在 2019 年(868.30 h),61 a 来马铃薯生育期日照时数呈显著减少趋势,气候倾向率为 $-10.92\text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。

2.2 气候变化对马铃薯生长发育的影响

2.2.1 气候变化对马铃薯生长日数和产量的影响 2005—2020 年黄土高原半干旱区马铃薯生长日数呈增加趋势,平均增幅为 $7.6\text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,尤其是 2008 年之后,增加显著,气候倾向率为 $13.9\text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。2005—2020 年 16 a 增加约 11 d (图 5)。近 16 a 来,马铃薯年产量呈波动下降趋势,气候倾向率

为 $-160.10\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$,平均产量为 $1\,967.74\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;产量最高年份在 2013 年($3\,612.50\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),产量最低年份在 2016 年($405.20\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.2.2 气温和降水量变化对马铃薯产量的影响 对马铃薯产量与生育期内气温、降水量的关系进行分析(图 6),由图 6a 可知,2005—2020 年马铃薯产量与生育期内气温呈显著负相关($P < 0.05$)。块茎膨大~成熟期气温与产量呈显著负相关。生育期内气温降低使得马铃薯生长发育受阻,幼苗期气温降低导致植株成活率低;块茎形成期气温降低使得薯块膨大受阻,薯块变形,屑薯率增加,造成减产。

马铃薯产量与生育期降水量呈极显著正相关,两者拟合的一元二次函数拟合方程为 $y = -2 \times 10^{-5}x^2 + 0.1263x + 158.53$ ($P < 0.01$)(图 6b);对二次函数求导,令 $dy/dx = 0$,可知当降水量为 315.7 mm 时,马铃薯产量最高,即马铃薯生育期内适宜降水量阈值为 315.7 mm 。气候变化导致降水分布不均匀,生育期降水量呈减少趋势,降水减少影响马铃薯生长发育及产量形成,使得薯块形成受阻,导致减产。

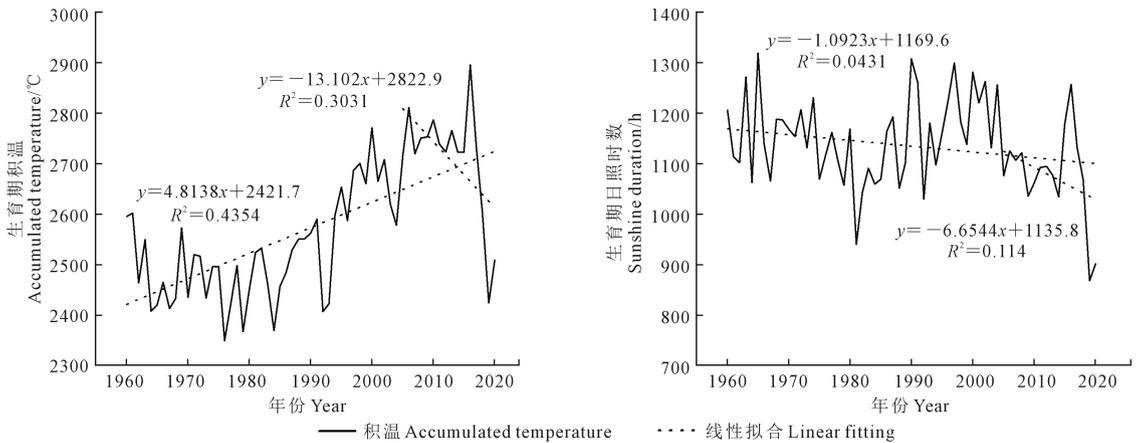


图 4 马铃薯生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和日照时数的变化趋势

Fig.4 Variation trend of $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature and sunshine duration in potato growth period

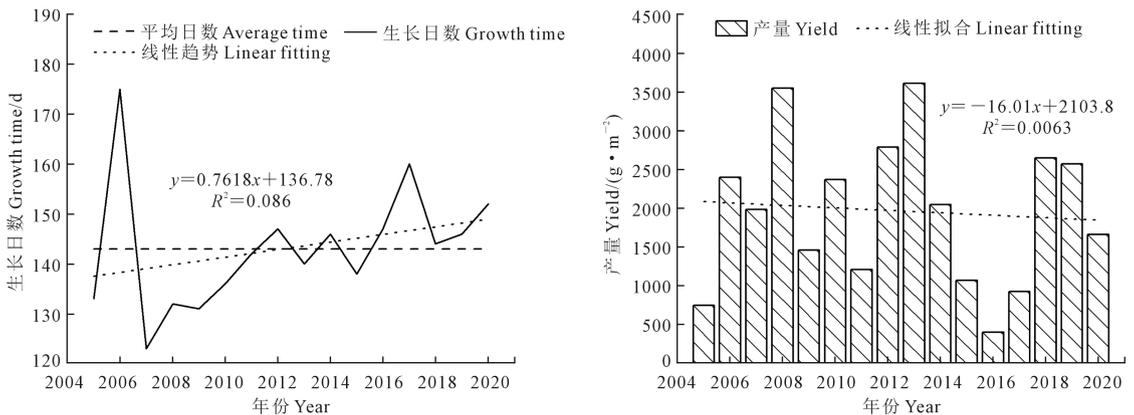


图 5 马铃薯生长日数和产量变化趋势

Fig.5 Trends of potato growing days and yield

2.2.3 积温和日照时数变化对马铃薯产量的影响

马铃薯产量与生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和日照时数的关系如图 7,从图 7a 可以看出,2005—2020 年马铃薯产量与生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈负相关。马铃薯属喜凉爽作物,生育期内积温增加,使其生长受阻,产量降低。

马铃薯产量与生育期内日照时数呈显著负相关,两者拟合的一元二次函数拟合方程为 $y = -0.0247x^2 + 48.761x - 21698$ ($P < 0.05$) (图 7b);对二次函数求导,令 $dy/dx = 0$,即当马铃薯生育期内日照时数为 987.07 h 时,马铃薯产量最高。当生育期内日照时数 < 987.07 h 时,随着日照时数的增加,马铃薯产量提高;当日照时数 ≥ 987.07 h 时,随着日照时数的增加,马铃薯减产。生育期内降水、气温等

条件适宜,充足的光照有利于提升马铃薯的光合生理作用,促进块茎膨大和干物质积累,使得马铃薯产量增加。

马铃薯产量与生育期内气候因子作途径分析,得到各气候因子与马铃薯产量的直接途径系数,确定贡献大小和关键气候因子。由表 1 可知,气候因子的作用表现为:全生育期气温 $>$ 全生育期降水量 $>$ 块茎形成期降水量 $>$ 播种~出苗降水量 $>$ 出苗~分枝期降水量 $>$ 全生育期积温 $>$ 块茎膨大~成熟期降水量 $>$ 播种~出苗气温 $>$ 全生育期日照时数 $>$ 块茎形成期气温 $>$ 出苗~分枝期气温 $>$ 块茎膨大~成熟期气温。因此,马铃薯全生育期气温、全生育期降水量、块茎形成期降水量和播种~出苗降水量是影响马铃薯产量的关键因子。

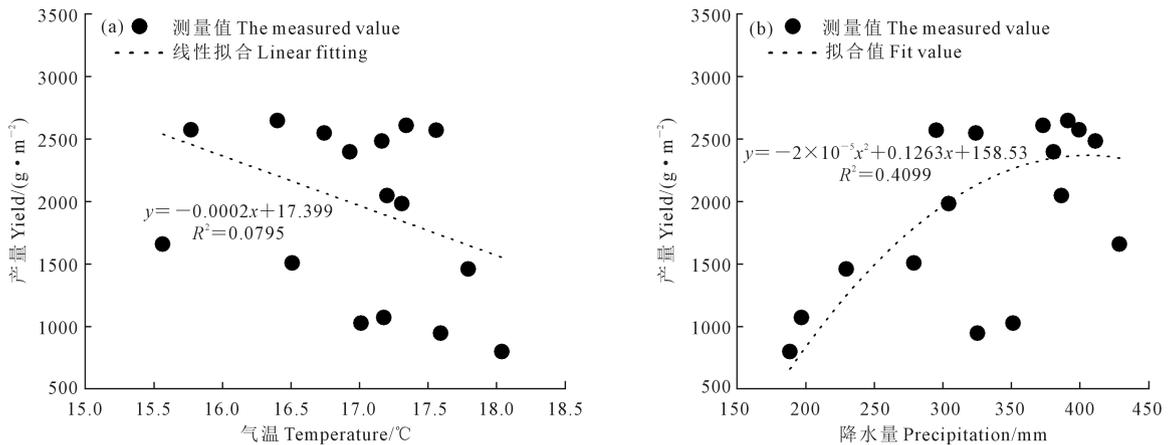


图 6 马铃薯生育期内气温、降水量与产量的相关关系

Fig.6 Correlation between temperature, precipitation and potato yield in growing period

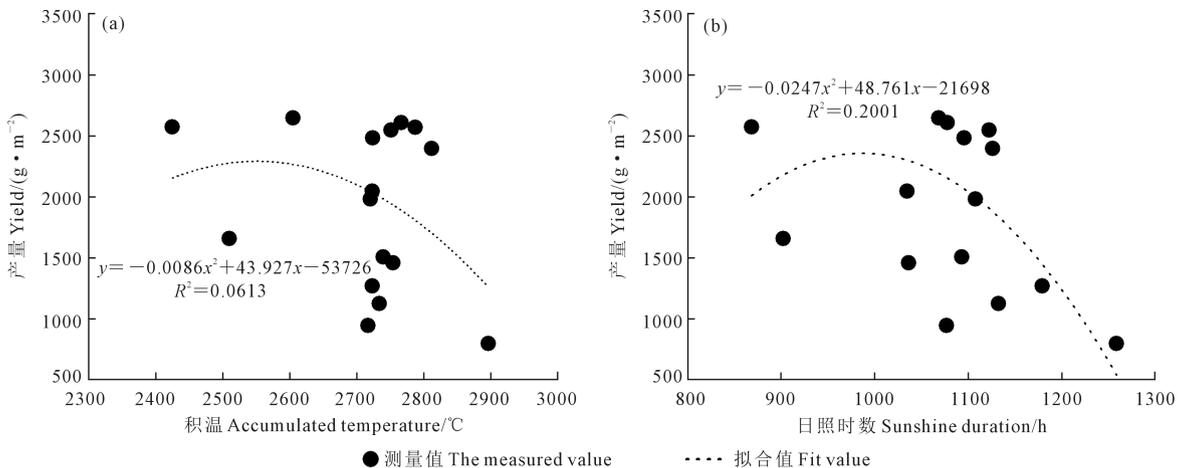


图 7 马铃薯生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、日照时数和产量的相关关系

Fig.7 Correlation between $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature, sunshine duration and potato yield during growth period

2.3 马铃薯产量气候模式

基于试验资料和气象资料,通过回归分析,建立了马铃薯产量气候模型:

$$Y = -4011.108 + 9.217R - 200.564T + 2.779\Delta T - 0.912S$$

式中, Y 为马铃薯产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); R 为马铃薯生育期总降水量(mm); T 为马铃薯生育期平均气温($^{\circ}\text{C}$); ΔT 为马铃薯生育期积温($^{\circ}\text{C}$); S 为马铃薯生育期内日照时数(h)。线性化后,其复相关系数 $R = 0.600$,方差分析 $F = 1.404$,通过 0.05 显著性检验。

表 1 马铃薯产量与生育期内气候因子相关系数和通径系数

Table 1 Correlation coefficient and path coefficient between potato yield and climatic factors in growth period

生育时期 Growth period	要素 Element	相关系数 Correlation coefficient	通径系数 Path coefficient
播种~出苗 Sowing seeds~ emergence of seeds	气温 Temperature	0.143	0.027
	降水量 Precipitation	-0.401**	0.599
出苗~分枝期 Emergence of seeds~ branching	气温 Temperature	-0.201	-0.477
	降水量 Precipitation	0.533**	0.236
块茎形成期 Tuber formation period	气温 Temperature	-0.279	-0.367
	降水量 Precipitation	0.314*	0.652
块茎膨大~成熟期 Tuber expansion~maturity	气温 Temperature	-0.349*	-0.867
	降水量 Precipitation	0.511**	0.088
	气温 Temperature	-0.282*	1.258
	降水量 Precipitation	0.606**	0.742
全生育期 Growth period	积温 Accumulated temperature	-0.195	0.223
	日照时数 Sunshine duration	-0.297*	-0.219

注: * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示在 0.01 水平下显著相关。

Note: * means significant correlation at 0.05 level; ** means significant correlation at 0.05 level.

3 讨论与结论

3.1 讨论

全球气候变化已成为不争的事实,气候变化使农业生产不稳定性增加,作物产量波动加剧^[24-25]。1960—2020 年研究区马铃薯生育期内气温呈显著上升趋势,气候倾向率为 $0.31^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),高于全国同期平均值^[26]。近 61 a 来,马铃薯生育期内降水量呈波动减少趋势,气候倾向率为 $-3.97 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),与全国气候变化趋势一致。但 2005—2020 年马铃薯生育期内气温呈显著下降趋势,气候倾向率为 $-0.54^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$);马铃薯生育期内降水量呈增加趋势。马铃薯生长季出现明显的冷湿化现象,降水增加,气温降低,马铃薯生长日数延长,对其生长造成不利影响。

马铃薯产量主要受气温、日照时数和降水量等因素影响,产量与生育期内气温呈显著负相关,与

降水量呈显著正相关。气温升高,作物叶片光合酶活性降低,叶绿体结构破坏,气孔关闭,光合作用受到影响,净光合积累减少^[22];马铃薯植株生长发育受阻,对块茎形成和干物质积累造成较大影响。黄土高原半干旱区降雨量不稳定,马铃薯作为喜湿作物,根系较浅,对水分亏缺响应敏感,其生长与生产力非常容易受到水分胁迫影响^[27]。本研究表明,降水对黄土高原半干旱区马铃薯产量影响表现为正效应,生育期内降水增加,产量提高。姚玉璧等^[9]研究发现,马铃薯对降水量变化十分敏感,旬降水量每增加 1 mm,马铃薯产量可增加 $100 \sim 200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,这与本文的研究结果一致。但是,不同生育期降水增多对马铃薯产量的影响效应存在差异,收获期降水增多会导致马铃薯采挖期推迟和引起湿腐病,造成块茎腐烂,影响其产量和贮存。

马铃薯产量形成不仅受气候要素影响,还受品种、土壤环境、种植制度及病虫害等因素的影响。马铃薯耕作方式不同会影响土壤微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布^[28],影响土壤结构的稳定性^[29],改变了耕层土壤结构^[30],进而影响马铃薯产量。黄土高原半干旱区大多采用覆膜形式种植马铃薯,覆膜后土壤含水量较不覆膜提高,有效减少水分蒸发,有助于土壤蓄水。因此,还需要对马铃薯产量的影响因素作进一步研究。

3.2 结论

近 61 a 来研究区马铃薯生育期内气温呈显著上升趋势,平均每 10 a 上升 0.32°C ($P < 0.01$);降水量和日照时数年际变化呈减少趋势,平均每 10 a 分别减少 3.97 mm 和 10.92 h。近 16 a 来马铃薯生育期内气温呈显著下降趋势,平均每 10 a 下降 0.54°C ($P < 0.01$);降水量年际变化呈显著增加趋势,平均每 10 a 增加 13.89 mm,呈现冷湿化趋势;马铃薯生长日数呈增加趋势,平均每 10 a 增加 7.6 d;产量以 $160.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率减少。马铃薯产量与生育期内降水量呈显著正相关,与气温呈显著负相关。块茎膨大期降水量减少、气温升高对马铃薯产量形成造成不利影响。播种~出苗和块茎膨大期降水量是影响马铃薯产量的主要因素,气候变化对西北半干旱地区马铃薯的生产造成了负面影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Working Group's I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Climate change 2013: the physical science basis. Final draft underlying scientific-technical assessment [R/OL]. [2013-10-30].
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书: 2021[M]. 北京:

- 科学出版社, 2021.
- Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China: 2021 [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [3] 马树庆. 气候变化对东北区粮食产量的影响及其适应性对策 [J]. 气象学报, 1996, (4): 484-492.
- MA S Q. A simulating study on the influences of climate change on grain yield and the countermeasures in the Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, (4): 484-492.
- [4] 王柳, 熊伟, 温小乐, 等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 138-146.
- WANG L, XIONG W, WEN X L, et al. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (21): 138-146.
- [5] 李秀芬, 赵慧颖, 朱海霞, 等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2561-2570.
- LI X F, ZHAO H Y, ZHU H X, et al. Evolution of maize climate productivity and its response to climate change in Heilongjiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (8): 2561-2570.
- [6] 孙彦坤, 田宝星, 高见, 等. 气候变化对黑龙江省黑土区玉米气候生产潜力的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11): 44-49.
- SUN Y K, TIAN B X, GAO J, et al. Effect of climate change on potential productivity of climate of corn in black soil region of Heilongjiang [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44 (11): 44-49.
- [7] 纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响 [J]. 地理研究, 2012, 31(2): 290-298.
- JI R P, ZHANG Y S, JIANG L X, et al. Effect of climate change on maize production in Northeast China [J]. Geographical Research, 2012, 31(2): 290-298.
- [8] 赵鸿, 任丽雯, 赵福年, 等. 马铃薯对土壤水分胁迫响应的研究进展 [J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 537-543.
- ZHAO H, REN L W, ZHAO F N, et al. The progress on response of potato to soil water stress [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36 (4): 537-543.
- [9] 姚玉璧, 张秀云, 王润元, 等. 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 [J]. 生态学报, 2010, 30 (1): 100-108.
- YAO Y B, ZHANG X Y, WANG R Y, et al. 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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(1): 100-108.
- [10] 王秀丽, 刘润雅, 马云倩, 等. 2001-2016 年马铃薯生产成本结构及其变化趋势研究 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(20): 20-28.
- WANG X L, LIU R Y, MA Y Q, et al. Research on potato production cost structure and its variation tendency from 2001 to 2016 [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(20): 20-28.
- [11] 李焕春, 严昌荣, 赵沛义, 等. 种植制度对阴山北麓马铃薯种植区土壤温度的影响 [J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 534-539.
- LI H C, YAN C R, ZHAO P Y, et al. Effect of cropping system on soil temperature of potato in northern Yinshan mountain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 534-539.
- [12] 王慧, 王文秀, 罗冬, 等. 毕节地区净作种植制度下马铃薯合理群体结构试验研究初报 [J]. 内蒙古农业科技, 2007, (4): 62, 71.
- WANG H, WANG W X, LUO D, et al. Preliminary study on optimal potato population structure in cropping system in Bijie [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2007, (4): 62, 71.
- [13] 王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等. 基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化 [J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2099-2109.
- WANG M T, QU H H, YANG X G, et al. Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (7): 2099-2109.
- [14] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 中国马铃薯主产区生产特点、限制因子和对策分析 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 374-382.
- LI Y, WANG J, TANG J Z, et al. Analysis of production characteristics, restrictive factors, and strategies for main potato production areas in China [J]. Chinese Potato Journal, 2020, 34(6): 374-382.
- [15] 宋学锋, 侯琼. 气候条件对马铃薯产量的影响 [J]. 中国农业气象, 2003, 24(2): 35-38.
- SONG X F, HOU Q. Influence of climate conditions on potato yield [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(2): 35-38.
- [16] 池再香, 杜正静, 杨再禹, 等. 贵州西部马铃薯生育期气候因子变化规律及其影响分析 [J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 417-423.
- CHI Z X, DU Z J, YANG Z Y, et al. Climate factors variation during potato growth period and its effect in western Guizhou province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(3): 417-423.
- [17] 朱赞赞, 王连喜, 李琪, 等. 气候因子对宁夏不同区域马铃薯气象产量的影响效应分析 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2011, 39(6): 89-95.
- ZHU Y Y, WANG L X, LI Q, et al. Influence of climatic factors on meteorological yield of potato in different regions of Ningxia [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 89-95.
- [18] 王萍, 李秀芬, 杨晓强, 等. 气候变化对松嫩平原马铃薯生长发育及产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(16): 100-105.
- WANG P, LI X F, YANG X Q, et al. Effects of climate change on growth and yield of potato in the Songnen plain [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(16): 100-105.
- [19] 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.
- [20] 赵鸿, 王润元, 王鹤龄, 等. 半干旱雨养区苗期土壤温湿度增加对马铃薯生物量积累的影响 [J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 290-297.
- ZHAO H, WANG R Y, WANG H L, et al. Effect of soil temperature and moisture increase during seedling period on biomass accumulation of potato in semi-arid region [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 290-297.