

中图分类号: S162.5; S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)04-0313-09

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.04.004

西北雨养农业区马铃薯产量对气候变化的响应 ——以定西市为例

周小东^{1,2}, 陈 富^{1,2*}, 张彤彤^{1,2}, 孙小花¹, 张 荣¹, 黄 伟¹, 张 勇^{1,2}, 王芳芳¹

(1. 甘肃省农业科学院马铃薯研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃一航薯业科技发展有限责任公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探究气候变化背景下西北雨养农业区马铃薯全生育期气候因子的变化规律及其对马铃薯产量的影响, 利用 Pearson 相关、滑动相关和多元线性逐步回归方法对定西市 2005—2022 年马铃薯全生育期逐月气候因子与马铃薯产量间的关系展开研究。2005—2022 年研究区在马铃薯全生育期表现出“暖湿化”趋势; 马铃薯气象产量与气温相关性最高, 其次是降水, 最后是云量与自校准帕默尔干旱指数(Self-calibrating palmer drought index, scPDSI); 马铃薯全生育期及 7 月气温对气象产量抑制作用较大, 其中全生育期平均气温可解释气象产量 50.6% 的变化; 5 月降水对马铃薯生长表现为负效应, 6 月降水表现为正效应; 气象产量与气候因子的响应关系不稳定, 随研究区降水量增加和气温升高, 2010 年以后气象产量与全生育期平均最高气温由不显著负相关增强至显著负相关。若未来气候持续变暖, 定西市马铃薯产量将受到严峻挑战。

关键词: 马铃薯产量; 气候变化; 响应关系; 定西市

Response of Potato Yield to Climate Change in Rainfed Agricultural Region of Northwest China ——A Case Study of Dingxi City

ZHOU Xiaodong^{1,2}, CHEN Fu^{1,2*}, ZHANG Tongtong^{1,2}, SUN Xiaohua¹, ZHANG Rong¹,HUANG Wei¹, ZHANG Yong^{1,2}, WANG Fangfang¹

(1. Potato Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Yihang Potato Industry Technology Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Pearson correlation, sliding correlation and multiple linear stepwise regression were used to study the relationship between monthly climatic factors and potato yield in the whole growth period of potato in Dingxi City from 2005 to 2022 under the background of climate change in order to clarify the change pattern of climatic factors in the whole growth period of potato and its influence on potato yield in the rain-fed agricultural area of northwest China. From 2005 to 2022, the study area showed a trend of "warm and humid" in the whole growth period of potato, and the correlation between potato meteorological yield and temperature was the highest, followed by precipitation, and finally cloud cover and self-calibrating palmer drought index (scPDSI). The temperature in the entire growth period and July of potato had a great inhibitory effect on meteorological yield. In fact, the mean temperature during this growth period accounted for

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 甘肃省农业科学院院列重点研发计划(2024GAAS16; 2023GAAS20)。

作者简介: 周小东(1996-), 男, 硕士, 主要从事马铃薯生态种植与气象服务方面研究。

*通信作者(Corresponding author): 陈富, 副研究员, 主要从事作物栽培与种薯繁育方面研究, E-mail: 51886474@qq.com。

50.6% of the variation in meteorological yield. In May, precipitation negatively impacted potato growth, while precipitation in June had a positive effect. The relationship between meteorological yield and climatic factors is inconsistent. Following 2010, as precipitation and temperature increased in the study area, the correlation between meteorological yield and the mean maximum temperature in the whole growth period shifted from a non-significant negative correlation to a significant negative correlation. If climate warming continues, potato production in Dingxi City will face serious challenges.

Key Words: potato yield; climate change; response relationship; Dingxi City

全球气候变暖使许多地区气温升高和降水格局改变, 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告显示, 未来20年全球升温预计将超过1.5℃^[1,2]。中国西北干旱和半干旱区将成为近期升温较快的地区之一^[3]。气候变化对西北地区作物生长造成较大程度干扰, 其通过影响农作物的生长发育周期、气候生产潜力、病虫害发生频率及适宜种植面积等因素导致产量波动, 严重制约当地农业生产的稳定性和可持续性^[4,5]。目前, 关于国际气候变化影响农作物产量的研究主要集中在玉米、小麦等大宗作物上, 对马铃薯的研究相对较少^[5-7]。

马铃薯为世界第四大粮食作物, 2022年中国马铃薯种植面积为467.13万hm², 总产量达9 639万t, 均居世界首位。马铃薯在中国粮食安全保障、农业结构改革和产业扶贫方面发挥重要作用。该作物喜冷凉, 根系浅, 对高温和干旱敏感, 高温通常会降低块茎个数和膨大速率并缩短生育期, 造成减产^[8]。此外, 马铃薯产量对气候变化的响应受地域影响也较大, 不同区域会得出截然相反的结论。有学者在河北坝上、宁夏南部、山西北部等地区研究发现马铃薯生育期气温与产量呈负相关关系^[8-10], 在松嫩平原马铃薯生育期气温与产量则呈显著正相关关系^[11]。在青海省共和县, 温度对马铃薯产量的影响表现为出苗至开花期为正效应, 降水对产量的影响为现蕾后期至成熟期8月中旬为最大负效应^[12]。在贵州西部, 降水量对马铃薯产量表现为正效应(开花期除外), 马铃薯块茎膨大期旬降水量每增加1 mm, 产量可增加1 200~1 800 kg/hm²^[13]。为准确掌握各地区马铃薯产量与气候变化关系, 促使农业气象更精细高效服务于马铃薯生产, 从局域尺度深入分析马铃薯产量对气候变化的响应尤为重要。

位于西北内陆的定西市被誉为“中国马铃薯之都”, 2022年该市马铃薯种植面积为18万hm², 产量为68.21万t, 占全年粮食作物总产量的42%, 马铃薯全产业链年度产值达225亿元, 产业收入占农民人均纯收入的23%^[14]。种植马铃薯对提升当地人民生活水平, 保障地区粮食安全作用显著。定西市属半干旱雨养农业区, 唐建昭等^[8]研究表明气候条件是决定雨养农业区马铃薯产量变异的主要因子, 因此, 亟须理清气候变化如何影响定西市马铃薯产量。本研究通过分析2005—2022年定西市马铃薯全生育期气候因子和马铃薯产量变化规律, 探究气候因子与马铃薯产量的响应关系, 可为降低气候变化带来的马铃薯减产风险, 推动定西市马铃薯产业高质量发展提供数据支撑和理论依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区域及马铃薯生育期概况

定西市(N 34°26′~35°35′、E 103°52′~105°13′)位于甘肃省中部, 地处黄土高原、青藏高原和西秦岭交汇地带, 海拔1 420~3 941 m, 年降水量350~600 mm, 年平均气温7℃。定西市马铃薯一般在5月上旬至中旬播种, 6月上旬至中旬为出苗期, 6月下旬为分枝期, 7月上旬至中旬为花序形成期, 7月中旬至下旬为开花期, 10月上旬至中旬为可收期, 全生育期为123~150 d^[15]。

1.2 数据来源

本研究所用马铃薯种植面积与总产量数据来自《2023年定西市统计年鉴》, 气象数据来自荷兰皇家气象研究所数据共享网站(<http://climexp.knmi.nl>)。参考马铃薯全生育期, 选择研究区5—10月逐月平均最高气温、平均气温、平均最低气温、降水量、云量以及自校准帕默尔干旱指数(self-calibrating

Palmer Drought Severity Index, scPDSI), 时间跨度为2005—2022年。利用上述气候资料表征研究区的气候变化, 其中, scPDSI是改进指数, 其正值表示气候湿润, 负值表示气候干旱。根据scPDSI干旱等级评定标准^[16]: $-2 < \text{scPDSI} \leq -1$ 表示轻旱; $-3 < \text{scPDSI} \leq -2$ 表示中旱; $-4 < \text{scPDSI} \leq -3$ 表示重旱; $\text{scPDSI} \leq -4$ 表示极旱。该指数考虑了大气输入和土壤蒸发的影响, 根据降水和温度的时间序列, 利用彭曼公式计算蒸散发量, 表示土壤水分变化及对马铃薯生长可供水量的大小, 适用于表征干旱半干旱地区的自然干旱程度^[16,17]。

1.3 研究方法

1.3.1 气候变化变化倾向率

气候变化变化倾向率用来表述某气象要素在长时间序列上的变化趋势, 通常采用一元线性方程进行拟合:

$$Y_i = at_i + b \quad (1)$$

式中: Y_i 为气象要素变量, a 为回归系数, 表示气象要素 Y_i 的倾向趋势, 一般以 $10a$ 表征某一气象要素气候变化倾向率, t_i 为 Y_i 所对应时间, b 为回归常数。

1.3.2 滑动平均法

滑动平均法是指在1个长序列的逐年数据中通过顺序逐期增减求算移动平均值, 相当于低通滤波器, 可以用确定时间序列的平滑值反映产量序列的变化趋势, 此方法通常是为了避免原数据中的异常值对研究成果造成的过大干扰。其表示公式为:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_{i+j-1}, (j=1, 2, \dots, n-k+1) \quad (2)$$

式中: $\bar{X}$ 为平滑后的时间序列; X 为原始时间序列; n 为样本总量; k 为滑动长度, 本研究中取3。

1.3.3 马铃薯产量分解

粮食产量受自然和经济社会因素的综合影响, 通常将技术进步、地理环境改善、经济社会发展等自然或人为因素所决定的粮食单产定义为趋势产量; 将气候因素影响的粮食单产定义为气象产量; 将随机误差影响的粮食产量定义为随机波动产量^[18]。将定西市马铃薯产量分解为3部分:

$$Y = X_t + X_w + X_e \quad (3)$$

式中: Y 为马铃薯单产(kg/hm^2), 用统计年鉴中单位面积产量的实际数据表示; X_t 为马铃薯趋势产量(kg/hm^2), 用3a滑动平均方法计算获得; X_w 为气象产量(kg/hm^2), X_e 为随机波动产量(kg/hm^2), 因影响相对较小, 一般忽略不计。

为明确气象因子作用, 定量分析各气候变化对定西市马铃薯产量的影响, 由公式(3)分离气象产量以滤除趋势产量^[18]:

$$X_w = Y - X_t \quad (4)$$

此外, 为消除量纲的影响, 引入相对气象产量, 可更直观地表征气候变化对马铃薯产量的影响程度^[18]:

$$X_r = \frac{X_w}{X_t} \quad (5)$$

式中: X_r 为相对气候产量, 当实际产量大于趋势产量时, 表示气候因子变化有利于作物生长发育即产量增加, 称为增产率; 当实际产量小于趋势产量时, 表示产量减少, 称为减产率。一般认为, 5%的减产率为成灾的临界值, 当减产率大于5%时即为成灾年份, 当增产率大于5%时为丰产年份^[19]。

1.3.4 Pearson相关分析与多元逐步回归分析

就气候因子对作物产量关系的研究, 主要基于气象产量和相应气候资料进行统计计算, 找出客观定量的气候因子评定作物产量的影响。本研究将时间尺度划分为马铃薯全生育期(5—10月)以及5、6、7、8、9、10月7个时段, 采用Pearson相关分析马铃薯气象产量与气候因子之间的相关性, 再筛选与马铃薯气象产量达到极显著相关的气候因子, 通过多元逐步回归分析建立马铃薯气象产量估测模型。

1.3.5 滑动相关分析

滑动相关分析法是一种常用的统计方法, 在研究粮食产量与气候因子间的动态关系时, 滑动相关系数可反映粮食产量与气候因子间关联度随时间的变化, 若两组序列间的相关系数由显著变为不显著, 或者由不显著变为显著, 则认为两者之间的关系不稳定^[20]。为进一步分析马铃薯气象产量与气候因子相关性随时间的变化关系, 以研究气候变化广泛采用的11年长度为滑动窗口, 1年为

滑动步长, 开展马铃薯与气候要素的滑动相关分析, 观察2005—2022年定西市马铃薯产量与气候因子响应关系的动态变化。

2 结果与分析

2.1 研究区马铃薯全生育期气候变化特征

2005—2022年研究区马铃薯全生育期平均气温、平均最低气温呈上升趋势, 气候变化倾向率分

别为0.02、0.079 °C/10 a, 全生育期多年气温均值分别为13.01 °C和8.21 °C。马铃薯全生育期平均最高气温呈下降趋势, 气候变化倾向率为0.038 °C/10 a, 多年气温均值为17.86 °C。降水量呈上升趋势, 气候变化倾向率为43.357 mm/10 a, 多年降水量均值为454.9 mm。云量呈上升趋势, 多年云量均值为67.90%。scPDSI呈显著上升趋势($P < 0.01$), 多年均值为-0.10, 整体处于轻度干旱等级(图1)。

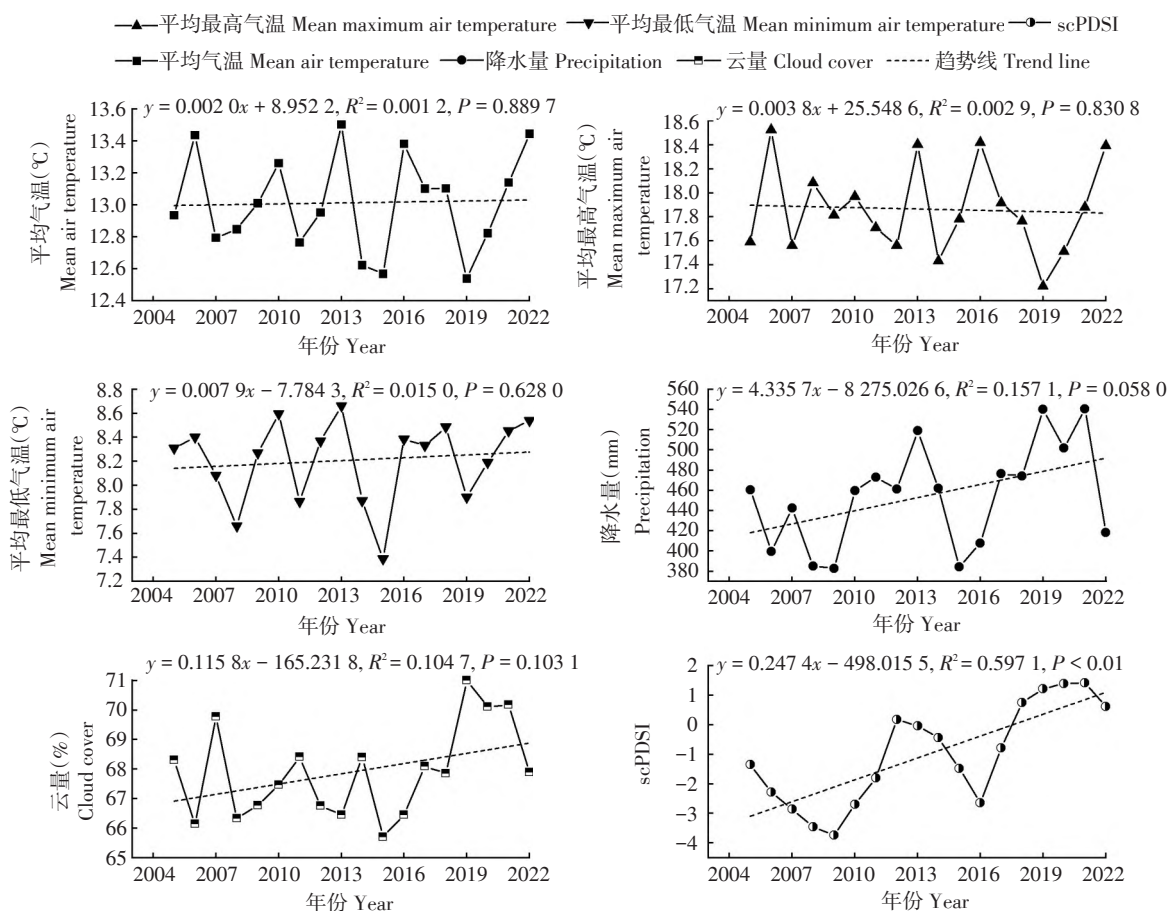


图1 2005—2022年研究区气候变化趋势

Figure 1 Climate trends in the study area from 2005 to 2022

2.2 马铃薯种植面积及产量变化特征

2005—2022年研究区马铃薯种植面积在15.22万~21.22万 hm^2 , 总体呈先降后增趋势, 多年平均种植面积为19.95万 hm^2 (图2)。马铃薯总产量在46.88万~68.21万 t, 除2009年和2010年明显下降外, 总体与种植面积的变化趋势基本一致, 多年

平均总产量为55.91万 t。

2005—2022年研究区马铃薯实际单产和趋势产量总体均呈极显著上升趋势($P < 0.01$) (图3), 分别由2 842.39、2 747.49 kg/hm^2 增加至3 814.43、3 776.21 kg/hm^2 , 增产幅度分别为746.64和793.21 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$ 。马铃薯气象产量在-159.14~150.96 kg/hm^2

波动, 波动幅度较大, 说明气候因素对马铃薯产量影响较重。相对气象产量与气象产量变化趋势基本一致(图4)。2006年和2010年相对产量在-5%以下, 为气候歉年, 即成灾年份。2008年相对产量在5%以上, 为气候丰年。

2.3 马铃薯产量与气候因子的相关性及回归分析

整体上, 全生育期各气候因子与马铃薯气象产量相关性最高, 气象产量与全生育期平均最高气温呈显著负相关($P<0.05$), 与全生育期平均气温和平均最低气温达到极显著负相关($P<0.01$), 与云量的相关系数也较高, 仅次于9月份; 5月降水量

与气象产量呈显著负相关($P<0.05$); 6月降水量与气象产量转为显著正相关($P<0.05$); 7月平均气温、平均最低气温与气象产量呈显著负相关($P<0.05$); 8、9、10月各气候因子与气象产量相关性不显著(表1)。筛选与马铃薯气象产量显著相关的7个气候因子, 采用逐步回归方法建立马铃薯产量气候模型:

$$Y=2\,819.151-217.565T \quad (6)$$

式中: Y 为马铃薯气象产量, T 为全生育期平均气温。方程线性化后 $R^2=0.506$, $F=14.336$, 通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验。

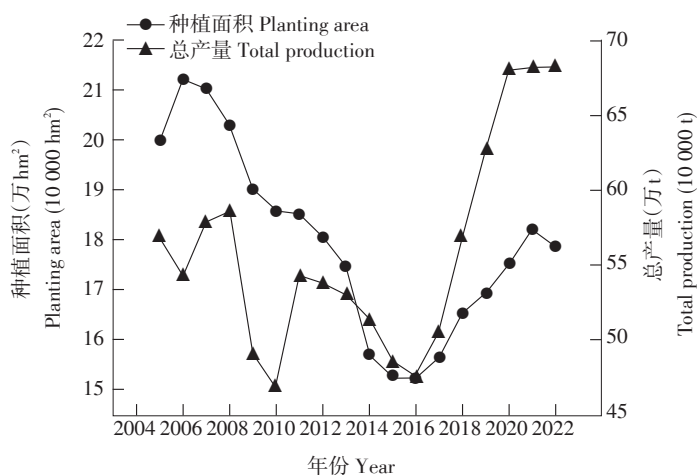


图2 2005—2022年定西市马铃薯种植面积与总产量变化特征

Figure 2 Change characteristics of potato planting area and total production in Dingxi City from 2005 to 2022

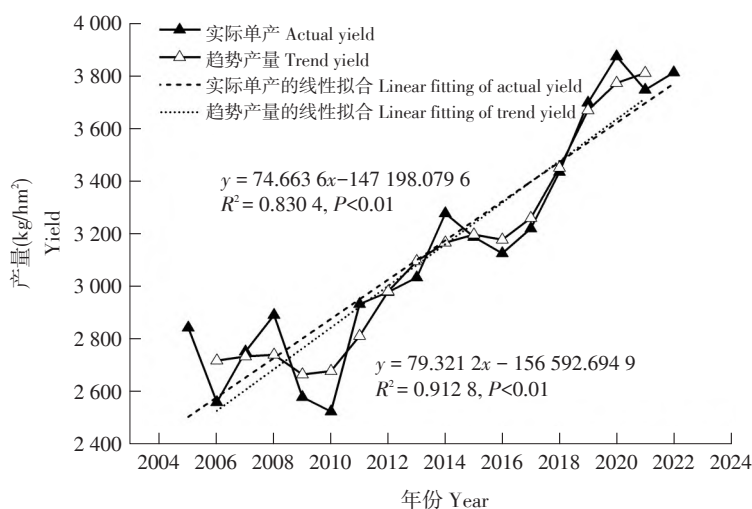
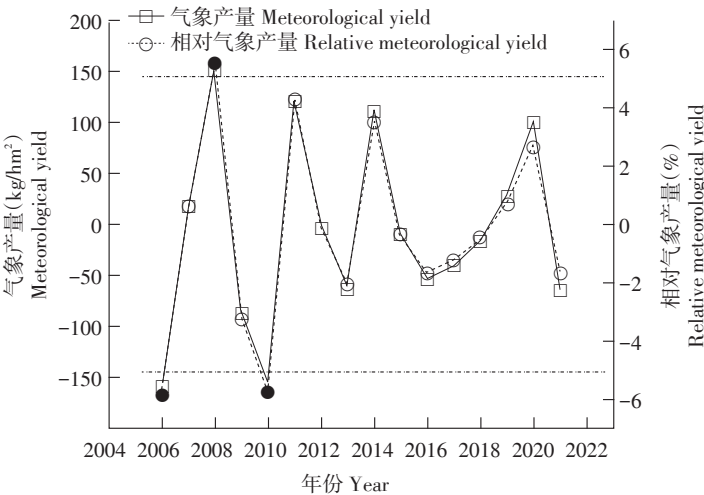


图3 2005—2022年定西市马铃薯产量变化特征

Figure 3 Variation characteristics of potato yield in Dingxi City from 2005 to 2022



●为气候歉年与气候丰年的相对气象产量。
● denotes the relative meteorological yield in climate-poor versus climate-abundant years.

图4 定西市马铃薯相对气象产量变化特征
Figure 4 Variation characteristics of potato relative meteorological yield in Dingxi City

表1 马铃薯产量与各时段气候因子的相关系数
Table 1 Correlation coefficient between potato yield and climatic factors in various periods

时段 Time	平均气温 Mean air temperature	平均最高气温 Mean maximum air temperature	平均最低气温 Mean minimum air temperature	降水量 Precipitation	云量 Cloud cover	scPDSI
全生育期 Whole growth period	-0.711**	-0.534*	-0.662**	0.085	0.305	0.160
5月 May	0.062	0.203	-0.210	-0.523*	-0.068	-0.093
6月 June	-0.381	-0.222	-0.454	0.519*	0.269	0.093
7月 July	-0.519*	-0.391	-0.519*	-0.086	-0.153	0.082
8月 August	-0.428	-0.344	-0.455	-0.057	0.010	0.066
9月 September	-0.323	-0.382	-0.151	0.428	0.410	0.325
10月 October	-0.243	-0.302	-0.009	0.011	0.233	0.331

注：*表示在0.05水平上差异显著，**表示在0.01水平上差异显著。
Note: * indicates significant differences at 0.05 level, ** indicates significant differences at 0.01 level.

研究区马铃薯气象产量与各气候因子的相关关系不稳定(图5)。就平均气温而言，马铃薯气象产量与全生育期平均气温始终保持显著负相关($P<0.05$)，而与7、9月平均气温分别在2006—2016、2009—2019年表现出显著负相关($P<0.05$)，与其他时间段相关性不显著。2010年后，全生育期平均最高气温与气象产量由不显著负相关转为显著负相关($P<0.05$)；2007—2020年9月的平均最高气

温与马铃薯气象产量也呈显著负相关($P<0.05$)；其中，5月平均最高气温在2006—2018年与气象产量表现出较明显的正相关。2019年之后的全生育期以及2006年之后的7月平均最低气温与马铃薯气象产量由显著负相关($P<0.05$)转为不显著。2007—2018年5月降水量与气象产量呈显著负相关($P<0.05$)，6月虽紧邻5月，但降水量与气象产量已转为正相关；2009年之后，9月降水量与气象产量的

正相关关系明显减弱。云量与马铃薯气象产量整体上以正相关为主, 但2006—2018年5月和7月云量与气象产量表现为较强负相关。9月和10月scP-

DSI与马铃薯气象产量正相关系数较高, 其中在2009—2020年9、10月scPDSI与马铃薯气象产量呈显著正相关($P < 0.05$)。

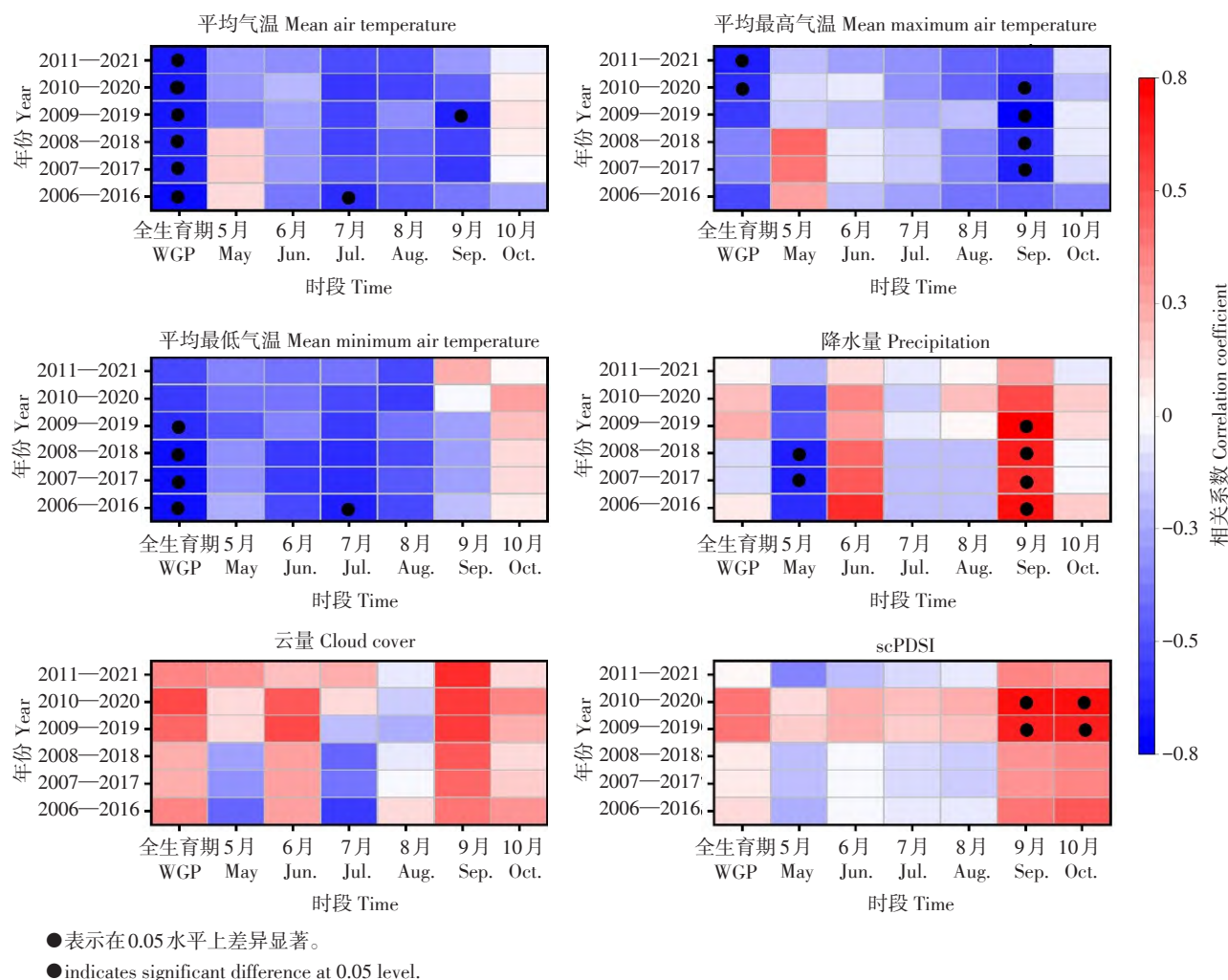


图5 定西市马铃薯气象产量与气候因子的滑动相关分析

Figure 5 Sliding correlation analysis between potato meteorological yield and climatic factors in Dingxi City

3 讨论

2005—2022年研究区马铃薯全生育期平均气温、平均最低气温、降水量以及scPDSI均呈上升趋势, 说明该雨养农业区整体向“暖湿化”方向发展, 这与姚玉壁等^[21]相关研究结果一致。马铃薯总产量与种植面积的变化趋势基本一致, 表明种植面积是决定马铃薯总产量的决定性因素, 但2009、

2010年马铃薯总产量异常下降, 2009年马铃薯相对气象产量仅为-3%, 2010年马铃薯相对气象产量低于-5%的临界值, 为成灾年份。分析这两年气候因素, 2009年马铃薯全生育期降水量仅为382 mm, 远低于全生育期多年平均值455 mm, 同时scPDSI也仅为-3.7, 已达到重旱水平, 降水量和scPDSI均为2005—2022年以来最低值, 马铃薯生长受到干旱胁迫影响较大。马铃薯作为喜湿作物, 根系较浅,

对水分亏缺响应敏感,降水不足会造成植株萎蔫,导致植株难以吸收土壤中的营养物质,影响块茎发育^[15,21]。同时,重度干旱还会导致蓟马、块茎蛾等马铃薯常见害虫大量繁殖,这些害虫会咬断薯芽、取食薯肉、使马铃薯感染土中病菌,导致马铃薯产量和品质严重下降。2009年不利的气候和虫害带来的滞后效应导致2010年马铃薯持续减产。2006年相对气象产量低于-5%,也为成灾年份,2006年各气温均较高、降水量少、云量低,scPDSI为-2.3,整体处于中旱水平。

研究区马铃薯气象产量与气温相关性最高,其次分别为降水、云量与scPDSI。马铃薯气象产量与生长季各气温呈显著负相关($P<0.05$),滑动相关结果显示,2010年以后,气象产量与全生育期平均最高气温由不显著负相关增强至显著负相关关系($P<0.05$)。高温一般促进茎伸长,抑制茎叶和块茎的发育,气温升高超过最高温度阈值,会降低马铃薯叶片光合酶活性,破坏叶绿体结构,使气孔大量关闭,加快呼吸强度和蒸散发等进程,减少净光合积累影响块茎形成和干物质积累^[7,22,23],另外高温还可增加畸形薯和屑薯率^[21,24]。值得注意的是,Pearson相关结果显示5月平均气温与气象产量相关系数为0.062,为各时段相关系数中唯一正值,同时滑动相关结果显示5月平均最高气温在2006—2018年与气象产量表现出较明显的正相关关系。5月处于马铃薯播种期至出苗期,此时研究区平均气温仅为11.7℃,低于种薯萌芽13℃的最适温度^[25],在温度阈值范围内,随着环境温度上升,植物叶片气孔导度增大,净光合速率的增幅大于蒸腾速率的增幅,气温对产量表现为正效应。马铃薯气象产量与7月平均最高气温、平均最低气温呈显著负相关($P<0.05$),7月处于马铃薯花序形成至开花期,抗逆性差,此时高温常与干旱共同作用,使马铃薯植株叶片萎蔫、茎秆干燥,加剧膜脂过氧化,影响光合作用速率,降低花粉育性,削减花蕾数量,导致产量降低^[8,24]。未来研究区升温过高会造成马铃薯产量下降,这与前人得出的陇中黄土高原马铃薯受气候变暖影响,单产将降低且适宜种植区范围将显著缩小的研究结果基本一致^[15,26]。

本研究表明马铃薯气象产量与全生育期降水总量之间相关关系不显著,这与唐建昭等^[8]在河北省坝上地区研究结果一致,雨养区作物产量主要由降水的有效性和分配性决定,无效降水的增加会导致云量上升、辐射下降,不利于马铃薯增产。马铃薯气象产量与5月降水显著负相关($P<0.05$),5月为马铃薯播种至出苗期,理论上幼苗期需水量仅占全生育期需水量的10%~15%,当降水量超过适宜阈值时,随着降水量的增加,产量下降^[24]。研究区马铃薯苗期延续到6月中旬,2005—2022年,5月平均降水量达到63 mm,占全生育期降水量的14%,该时期降水过多会推迟播种时间,使田间积水,导致烂种、不出苗、妨碍根系发育、降低植株对干旱等气象灾害的抵抗力、加大早疫病发生率等,进而降低马铃薯产量^[8]。马铃薯气象产量与6月降水呈显著正相关,6月马铃薯处于出苗至分枝期,此时马铃薯需水量增加,随着降水量的增加,马铃薯产量提高,这与姚玉璧等^[27]在定西市通渭县研究结果一致。2009年以后马铃薯气象产量与9月降水的正相关关系明显减弱,9月马铃薯处于块茎成熟至可收期,此时马铃薯需水量少。研究区2006—2008年间9月降水量为75 mm,而2009年之后增至88 mm,占全生育期降水的19%,此时较高强度的降水易导致土壤透气不良,引发晚疫病、湿腐病等各种病害进而干扰马铃薯块茎膨大,造成烂薯^[28]。

2009—2020年间9、10月的scPDSI与马铃薯气象产量增强至显著正相关关系($P<0.05$),表明马铃薯块茎成熟至可收期的干旱程度对产量影响较大,干旱易导致马铃薯块茎老化或使块茎畸形变小,部分品种还会出现块茎发芽后长出地面变成枝条的现象^[28]。

综上所述,研究区高温和干旱制约马铃薯气象产量,尤其是全生育期和7月花序形成至开花期的高温产生的抑制作用最大。在全球气候变暖形势下,研究区马铃薯气象产量可能会逐渐下降。因此,需尽快构建精准高效的马铃薯全生育期气象预警体系,同时进一步扩大当地主栽的‘陇薯10号’等抗旱、耐高温品种的种植规模,并持续推进此类品种的改良选育工作,以保障当地马铃薯产业可持续发展。本研究采用逐月气象数据,尚未对马铃薯关键

生育期划分精确到日, 建立马铃薯气象产量模型略粗糙, 模型对气象产量方差的解释程度较低。后续研究需引入逐时气象数据, 增加气象因子种类, 细化马铃薯生育分期, 利用细胞生物学技术从宏观和微观双尺度深入探究气候因子对马铃薯生长发育的影响程度, 进一步阐明马铃薯产量与气候变化间的深层关系。

[参 考 文 献]

- [1] 宋文婷, 杨海杰, 邵昕煜, 等. 蓝碳对气候变化的响应、减缓与适应——IPCC第六次气候变化评估报告解读与启示[J/OL]. 自然资源情报, 2024, 1-6[2024-06-18]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xju.edu.cn:8040/kcms/detail/10.1798.N.20240722.1532.016.html>.
- [2] Huang M, Wang J, Wang B, *et al.* Optimizing sowing window and cultivar choice can boost China's maize yield under 1.5 °C and 2 °C global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2): 24-25.
- [3] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004(2): 228-236.
- [4] 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.
- [5] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. CO₂浓度增加对半干旱区马铃薯生长动态及产量、品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 238-246.
- [6] 唐建昭, 柏会子, 郑艳东, 等. 未来升温情景下中国马铃薯产量和水分利用效率变化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 157-166.
- [7] Raymundo R, Asseng S, Robertson R, *et al.* Climate change impact on global potato production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 100: 87-98.
- [8] 唐建昭, 肖登攀, 王靖, 等. 河北坝上地区马铃薯产量变异的气候决定因子分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 248-255.
- [9] 亢艳莉, 申双和, 张学艺, 等. 气候变化对宁夏南部山区马铃薯产量的影响及马铃薯水分供需特征分析[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(5): 1056-1061.
- [10] 马雅丽, 栾青, 李效珍, 等. 气候变暖对晋北黄土高原半干旱区马铃薯适播期的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 274-281.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 定西市统计局. 定西统计年鉴—2023[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 2023.
- [15] 齐月, 赵鸿, 雷俊, 等. 黄土高原半干旱区马铃薯产量对气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1): 193-200.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] 周小东, 常顺利, 王冠正, 等. 天山北坡中段雪岭云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(8): 1215-1228.
- [18] 高雁鹏, 陈文俊. 1984—2020年辽宁省极端气温时空变化及粮食产量响应研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(11): 2052-2062.
- [19] 越昆, 金林雪, 李云鹏, 等. 内蒙古中部区干旱指数演变及其对马铃薯产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(10): 161-170.
- [20] 周小东, 常顺利, 王冠正, 等. 天山雪岭云杉径向生长响应气候变化的海拔分异[J]. *林业科学*, 2024, 60(3): 45-56.
- [21] 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2170-2179.
- [22] 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.
- [23] 郑子凡, 于佳乐, 聂虎帅, 等. 干旱胁迫对18个马铃薯品种生理特性的影响[J]. *中国马铃薯*, 2023, 37(4): 306-319.
- [24] 雷俊, 蔡迪花, 齐月, 等. 水分胁迫对半干旱区马铃薯产量形成的影响研究[J]. *干旱气象*, 2023, 41(2): 233-240.
- [25] 周平, 唐天向, 何霞红, 等. 云南马铃薯冬作区气候条件分析[J]. *中国马铃薯*, 2018, 32(1): 6-12.
- [26] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 6099-6110.
- [27] 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 气候变暖对马铃薯生长发育及产量影响研究进展与展望[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 538-546.
- [28] 侯晓琦, 郝瑛, 刘星燕, 等. 张家口坝上地区气候特征对马铃薯种植的影响[J]. *园艺与种苗*, 2021, 41(10): 58-65.