

内蒙古乌兰察布地区马铃薯全生育期气候适宜度变化特征

郭晓丽¹, 卢佳玥¹, 李 敏¹, 林 敏¹, 杨丽桃^{2*}

(1. 内蒙古自治区乌兰察布市气象局, 内蒙古 集宁 012000; 2. 内蒙古自治区气候中心, 呼和浩特 010051)

摘 要:为高效利用乌兰察布地区气候资源, 优化马铃薯种植区域布局, 利用该区域 1991–2022 年 11 个气象站的逐日气象数据, 基于模糊数学原理构建温度、降水和日照适宜度计算模型, 以地理信息技术为依托, 分析马铃薯气候适宜度时空变化特征, 并探究气候因子对马铃薯气候适宜度变化的贡献率。结果表明, 乌兰察布地区马铃薯全生育期温度适宜度和日照适宜度都高于降水适宜度。从各生育阶段来看, 降水适宜度在各生育阶段最低且变异系数最大, 说明水分条件是乌兰察布地区马铃薯生长发育的主要限制因子; 综合气候适宜度最高为出苗期–分枝期, 其次是播种期–出苗期和分枝期–花序期, 花序期–开花期和开花期–成熟期最低。空间分布上, 温度适宜度呈北高南低分布趋势, 且都达到 0.75 以上; 水分适宜度自西北向东南增加; 日照适宜度与水分适宜度分布规律相反, 由西北向东南减少; 综合适宜度在 0.60 ~ 0.67 之间平缓波动, 高值区在中南部区域, 低值区在四子王旗西南部及商都县部分区域。生长季降水对马铃薯气候适宜度的变化为正贡献, 积温为负贡献, 日照的贡献率不明显。

关键词: 乌兰察布地区; 气候适宜度; 马铃薯; 时空变化; 气候贡献率

中图分类号: S532

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)01-0031-07

Characteristics of Climatic Suitability in Whole Growth Stages of Potato in Ulanqab, Inner Mongolia

GUO Xiaoli¹, LU Jiayue¹, LI Min¹, LIN Min¹, YANG Litao^{2*}

(1. Ulanqab Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Jining 012000; 2. Inner Mongolia Climate Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to efficiently make use of climate resources and optimize the regional layout of potato planting in Ulanqab, daily meteorological data from 11 weather stations during 1991–2022 were used to build temperature suitability, precipitation suitability and light suitability model based on the fuzzy mathematical principle. Using geographic information technology, analysis the spatial and temporal characteristics of potato climatic suitability, and explore the contribution rate of climate factors for potato climatic suitability change. The results show that the temperature suitability index and the light suitability index are higher than precipitation suitability index during the whole growth period of potato in Ulanqab. Precipitation suitability index is the lowest with the largest coefficient of variation in each growth stages, showing that precipitation condition is the main limiting factor for potato growth and development in Ulanqab. The highest comprehensive climatic suitability index of potato is found in the emergence–branching period, followed by sowing–emergence period, branching–inflorescence period, while the lowest is in inflorescence–flowering period and flowering–harvesting period. For the spatial distribution, the temperature suitability index shows a distribution trend of high in the north and low in the south and all reaching above 0.75. The value of precipitation suitability increases from northwest to southeast. The value of light suitability reduces from northwest to southeast. The value of comprehensive suitability fluctuated gently between 0.60 and 0.67, which high-value zones in the central and southern regions, while the low value area is in the southwest of Siziwangqi and parts of Shangdu County. The precipitation in growing season contributes positively to the climatic suitability of potato,

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS04018); 内蒙古自治区气象局引导性创新基金项目(nmqxydcx202218)

作者简介: 郭晓丽(1981–), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事生态与农业气象预报及气候评价等方面的研究。

通信作者: 杨丽桃, 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: ylt9618@126.com

the accumulated temperature contributes negatively, and the light contributes insignificantly.

Key words: Ulanqab; Climatic suitability; Potato; Spatio-temporal change; Contribution rate of climate

气候要素对农作物产量的影响主要体现在温度、光照、水分等方面^[1],不同农作物对气候资源有不同的需求,适宜的气候因子是保障农作物生长发育和高产稳产的重要因素^[2]。气候适宜度是评估气候资源与作物品种布局的关键,其只考虑气候条件而不考虑生产管理等其他因素^[3]。应用模糊数学方法构建气候适宜度评价模型精度较高,参数获取便利,能够较好地应用于农业气候资源适宜性评估和气候变化背景下高效利用气候资源等,且研究成果日趋成熟^[4-8]。在农业气候资源适宜性评估方面,国内很多学者对当地特色作物包括小麦、玉米、水稻、棉花等进行气候适宜性分析。代立芹等^[9]应用数理统计方法建立逐日气候适宜度评价模型,定量分析河北省冬小麦气候适宜性,并探究其时空变化规律。邱美娟等^[10]建立了适合吉林省春玉米的气候适宜度模型,得出春玉米全生育期单因子适宜度和综合适宜度的时间变化和空间分布特征。在全球气候变化背景下,农业已然成为气候变化最敏感的行业之一^[11-12],各地农作物适播期和种植结构也在不断调整变化。何亮等^[13]通过对东北地区近40年农业气候资源和农业气象灾害进行分析,得出该地区大豆种植气候适宜性变化趋势。冶明珠等^[14]划分5个时段分析东北地区热量资源变化特征和玉米温度适宜度变化规律,得出随着热量资源显著增加,可以适当调整玉米播期及品种结构布局。

马铃薯是我国主要粮食作物之一^[15],研究马铃薯气候适宜性变化特征对于保障我国粮食安全生产具有重要意义。金林雪等^[16]分析气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性,揭示了马铃薯开花期~成熟期各气象要素适宜度变化规律;王萍等^[17]分析得出1971-2017年松嫩平原马铃薯各生育期温度、降水、日照适宜度时空分布特征;李阳等^[18]研究发现宁夏中南部山区光热资源满足马铃薯生长,水分是主要限制因子;王春玲等^[19]模拟气候变化背景下甘肃省定西市马铃薯气候适宜度并探究其时空变化特征。乌兰察布地区是中国马铃薯三大集中产区之一,种植面积和产量均居地市级前列,由于该区位于农牧过渡带,生态环境敏感脆弱,水热资源利用率低,如何解决马铃薯种植结构矛盾及高效利用水热资源是该区马铃薯生产的关键。以往研究大多缺乏温、

光、水协同作用对作物气候适宜度的影响及相对贡献,本文以乌兰察布地区作为研究区域,构建温度、水分、光照气候适宜度计算模型,综合分析马铃薯全生育期温、光、水气候适宜度变化特征,并研究各气候因子对马铃薯气候适宜度的相对贡献,以期为合理开发和高效利用气候资源、优化马铃薯种植布局、指导马铃薯生产提供一定的理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

气象资料来源于内蒙古自治区气象信息中心,包括乌兰察布市11个气象观测站1991-2022年马铃薯生育期(5月中旬-9月中旬)平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、日照时数、平均风速、水汽压等逐日资料;考虑资料的完整性和连续性,马铃薯生育期资料以察右中旗农业气象观测站观测数据为代表,产量和种植面积来源于内蒙古统计年鉴。

1.2 研究方法

1.2.1 温度适宜度模型

基于模糊数学原理,结合马铃薯不同生长发育阶段最高温度、最适温度、最低温度,建立温度适宜度模型^[20],计算公式如下:

$$F(t) = \frac{(t - t_l)(t_h - t)^B}{(t_0 - t_l)(t_h - t_0)^B} \dots\dots\dots (1)$$

$$B = \frac{(t_h - t_0)}{(t_0 - t_l)} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)、式(2)中, $F(t)$ 为温度适宜度, t 为马铃薯某生育期日平均气温($^{\circ}\text{C}$), t_l 、 t_h 和 t_0 分别为马铃薯某生育期的下限气温、上限气温和适宜气温($^{\circ}\text{C}$)。乌兰察布地区马铃薯全生育期的三基点温度,主要参考相关文献指标^[21],并结合当地马铃薯多年农业气象观测资料综合确定,见表1。

1.2.2 降水适宜度模型

以马铃薯生育期内降水量/需水量 $<70\%$ 为轻旱,当降水量/需水量 $\geq 70\%$,适宜马铃薯生长发育^[22]。降水适宜度模型为:

$$F(r) = \begin{cases} \frac{r}{ET_c} & r < 0.7ET_c \\ 1 & r \geq 0.7ET_c \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)中, $F(r)$ 为降水适宜度, r 为马铃薯某生育

表1 马铃薯各生育期三基点温度指标

°C

指标	播种期-出苗期	出苗期-分枝期	分枝期-花序期	花序期-开花期	开花期-成熟期
最低温度	2	4	7	7	5
最适温度	12	16	18	17	15
最高温度	22	28	29	30	28

阶段降水量(mm), ET_c 为作物需水量(mm)。作物需水量根据彭曼公式计算得到, 先计算参考作物蒸散量 ET_0 再与作物系数 K_c 相乘, 得到理论

需水量。马铃薯各旬作物系数参数值经过参考文献[17]中的数据修正而得, 各旬作物系数及需水量见表2。

表2 马铃薯全生育期逐旬作物系数及需水量

时间	5月			6月			7月			8月			9月	
	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	上旬
作物系数	0.35	0.53	0.38	0.71	0.97	1.13	1.63	1.42	1.93	1.56	1.51	0.70	0.78	
需水量/mm	17.0	34.9	23.9	40.1	43.2	57.6	82.5	83.1	96.9	73.7	60.7	29.2	28.0	

1.2.3 日照适宜度模型

以实际日照时数达到可照时数的70%作为临界点, 当实际日照时数在临界点以上, 马铃薯对光照条件的反应达到适宜状态^[20, 23], 计算公式如下:

$$F(s) = \begin{cases} \frac{s}{s_0} & s < s_0 \\ 1 & s \geq s_0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $F(s)$ 为日照适宜度, s 为马铃薯某生育期实际日照时数(h), s_0 为临界点以上日照时数(h)。

1.2.4 综合气候适宜度模型

运用相关分析法确定温度、水分、光照适宜度的权重系数^[24]。将气候要素适宜度与其对应的权重系数相乘再求和, 得到乌兰察布市马铃薯全生育期的综合适宜度, 计算公式如下:

$$F = W_t \times F(t) + W_r \times F(r) + W_s \times F(s) \quad (5)$$

式(5)中, F 为综合气候适宜度, W_t 、 W_r 、 W_s 分别为温度、降水和日照适宜度的权重系数。

1.2.5 气象因子对马铃薯气候适宜度变化贡献率

首先计算每个站点马铃薯气候适宜度、生育期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温(下文中积温均为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温)、降水和日照随时间的变化趋势^[25]:

$$O = T \times t + \beta \quad (6)$$

式(6)中, O 为马铃薯气候适宜度、生育期积温、降水和日照, t 为时间, T 为马铃薯气候适宜度、生育期积温、降水和日照的时间变化趋势, β 为截距。各气象因子的敏感性为:

$$\Delta U = S_t \Delta T + S_r \Delta R + S_s \Delta S + \text{intercept} \quad (7)$$

式(7)中, ΔU 、 ΔT 、 ΔR 和 ΔS 分别为马铃薯气候适宜度、生育期内积温、降水和日照的一阶差分, S_t 、 S_r 、 S_s 分别为生育期积温、降水和日照对马铃薯气候适宜度的敏感性系数, intercept 为截距。各气象因子的贡献率为:

$$C_t = \frac{S_t T_t}{|S_t T_t| + |S_r T_r| + |S_s T_s|} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中, C_t 为生长季积温对马铃薯气候适宜度变化的贡献率, T_t 、 T_r 和 T_s 分别为马铃薯生长季积温、降水和日照的时间变化趋势, 由式(6)得出。同样根据式(8)计算得出降水和日照对马铃薯气候适宜度变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 全生育期气候适宜度年际变化特征

以乌兰察布市各旗县的温度、降水、日照和综合适宜度的平均值代表研究区气候适宜度, 分析1991-2022年乌兰察布地区马铃薯全生育期气候适宜度年际变化特征, 如图1所示。温度适宜度为0.72(2000年)~0.89(1993年), 降水适宜度为0.25(2009年)~0.71(2013年), 日照适宜度为0.71(2020年)~0.86(1991年), 综合气候适宜度为0.54(2009年)~0.77(2013年)。温度、降水、日照和综合气候适宜度的变化分别以倾向率为0.001 1/a、0.000 5/a、0.000 8/a和0.000 7/a的趋势弱减少, 其中, 温度适宜度和日照适宜度总体较高, 且波动幅度较小, 光热资源适宜马铃薯生长发育。降水适宜度曲线波动幅度最大, 且较温度和日照适宜度明显偏低, 尤其干旱年份, 适宜度在0.4以下, 是导致马铃薯产量不稳定的最主要因

素。综合适宜度高峰期出现在1998年、2003年、2013年和2019年,是光、热、水资源匹配最好的年份^[26],非常有利于马铃薯生长;而2001年、2007年、2009年和2022年为综合适宜度低谷期,表明这些年份可能出现了气象灾害,不利于马铃薯生长发育。从年代际变化可以看出,相较于20世纪90年代、21世纪00年代各气候适宜度明显下降,尤其降水适宜度和综合适宜度,主要由于21世纪00年代

作物生长季降水量明显偏低,干旱较严重,从21世纪10年代后各气候适宜度又恢复到20世纪90年代水平,说明近十年乌兰察布地区气候适宜度转好,适宜马铃薯生长。总体而言,1991–2022年马铃薯综合气候适宜度呈现“高–低–高”的趋势,这与该时段内蒙古地区经历了从轻旱到重旱再到轻旱的气候特征^[27]相吻合。

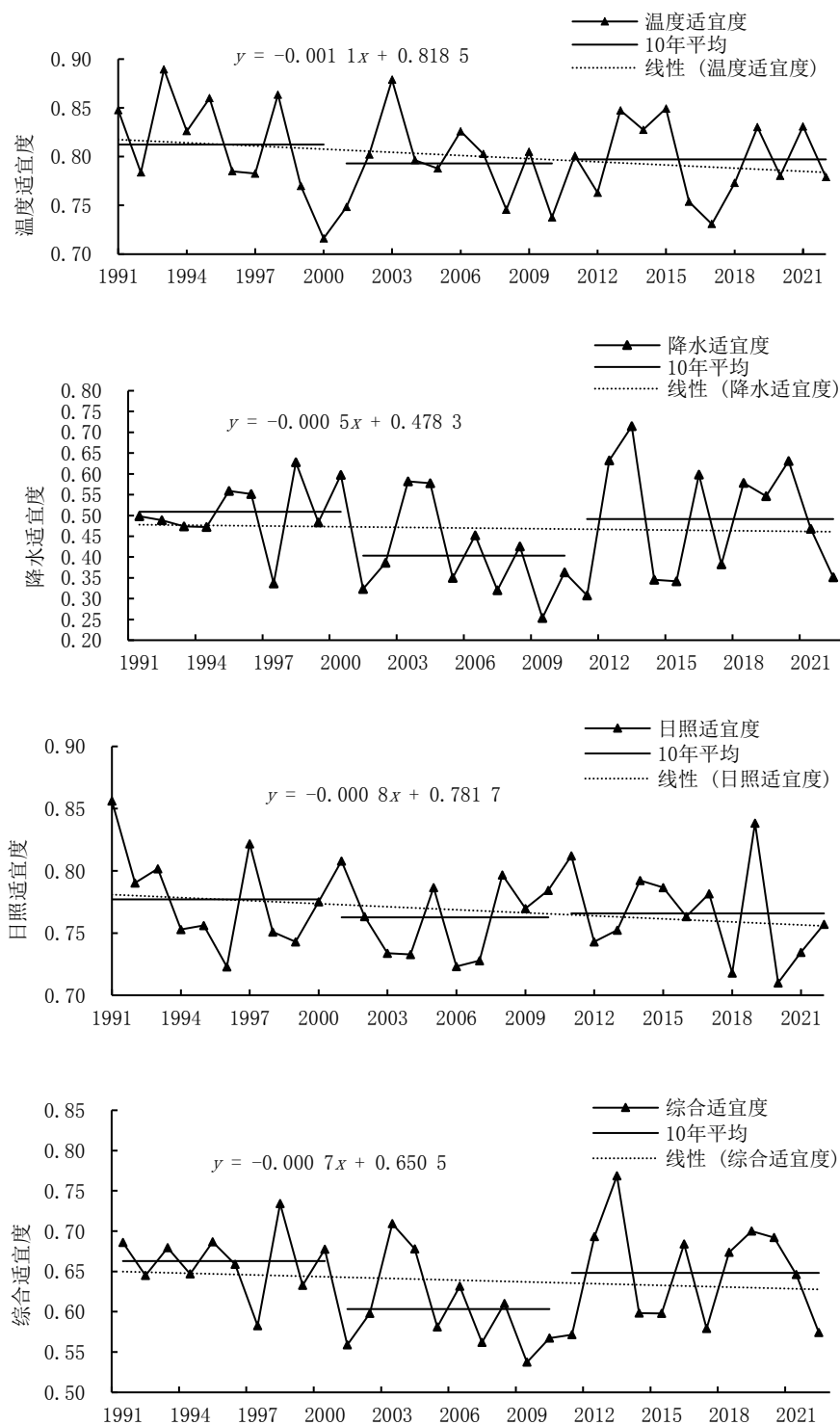


图1 乌兰察布地区马铃薯全生育期气候适宜度年际变化

2.2 不同生育阶段气候适宜度变化

根据乌兰察布地区马铃薯多年生育期观测资料,用各生育阶段长度的多年平均值作为一般生育阶段,划分马铃薯各生育期:播种期-出苗期在5月中旬至6月中旬、出苗期-分枝期在6月下旬、分枝期-花序期在7月上旬、花序期-开花期在7月中旬至7月下旬、开花期-成熟期在8月上旬-9月中旬。马铃薯各生育期气候适宜度的平均值及变异系数见表3。温度适宜度平均值播种期-出苗期明显低于其他生育阶段,主要由于马铃薯出苗后容易遭受低温冻害,对生长发育有一定影响,花序期-开花期变异系数最大,表明这一阶段温度条件不稳定。降水适宜度平均值播种期-出苗期和出苗期-分枝期较高,是由于这两个阶段马铃薯需水量较小,自然降水基本能够满足生长发育需求;分枝期-花序期、花序期-开花期和开花

期-成熟期平均值较低,表明水分条件有所亏缺,该时段正值雨季,马铃薯也进入旺盛生长期,需水量不断加大,在无灌溉条件下,自然降水仍无法满足马铃薯生长所需水分,尤其开花期-成熟期是马铃薯需水量最大的时期,此时期也是水分供需矛盾最突出的时期。日照适宜度平均值在各生育阶段都较高,适宜马铃薯生长发育,在分枝期-花序期变异系数最大,主要由于此阶段受降水影响,日照条件不稳定。从各生育期来看,播种期-出苗期气温偏低,但水热条件基本满足马铃薯生长,综合适宜度较高;出苗期-分枝期水热条件匹配良好,综合适宜度最高;分枝期-花序期温光适宜,降水略有不足,综合适宜度较高;花序期-开花期和开花期-成熟期温光适宜,但水分亏缺大,综合适宜度最低,是导致马铃薯产量不稳定的关键^[28]。

表3 1991-2022年乌兰察布地区马铃薯各生育期气候适宜度及变异系数

生育阶段	温度适宜度		降水适宜度		日照适宜度		综合适宜度	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
播种期-出苗期	0.69	0.10	0.56	0.43	0.80	0.06	0.65	0.19
出苗期-分枝期	0.85	0.09	0.51	0.47	0.76	0.10	0.67	0.18
分枝期-花序期	0.89	0.07	0.44	0.67	0.76	0.16	0.65	0.21
花序期-开花期	0.78	0.14	0.45	0.58	0.75	0.12	0.61	0.22
开花期-成熟期	0.79	0.11	0.38	0.35	0.78	0.07	0.61	0.09

2.3 气候适宜度空间变化特征

1991-2022年乌兰察布地区马铃薯全生育期各气候适宜度空间分布见表4。温度适宜度高值区分布在察右中旗和卓资县一带及化德县部分地区,整体呈北高南低趋势,全市温度适宜度均在0.75以上,马铃薯生育期内热量资源充足。降水适宜度在东南部偏高,丰镇市、卓资县、凉城县、

兴和县以及察右前旗降水适宜度达到0.50以上,北部地区尤其四子王旗仅为0.38,该区大部属于荒漠化草原区,只有南部地区可以种植马铃薯。日照适宜度在0.74~0.82之间,光照资源总体较好,分布规律由西北向东南递减,主要原因是东南部雨天相对较多,降水量也偏多,影响日照时数。综合适宜度高值区分布在卓资县及周边区

表4 1991-2022年乌兰察布地区马铃薯全生育期气候适宜度空间分布

地区	温度适宜度	降水适宜度	日照适宜度	综合适宜度
四子王旗	0.80	0.38	0.82	0.60
察右中旗	0.87	0.44	0.80	0.65
察右后旗	0.79	0.46	0.74	0.62
商都县	0.81	0.43	0.76	0.62
化德县	0.83	0.46	0.77	0.64
卓资县	0.85	0.51	0.78	0.67
集宁区	0.81	0.50	0.74	0.65
察右前旗	0.77	0.52	0.76	0.64
兴和县	0.78	0.51	0.75	0.64
丰镇市	0.75	0.51	0.76	0.63
凉城县	0.76	0.52	0.77	0.63

域,表明该区域光、温、水匹配良好;最低值出现在四子王旗西南部。全市综合适宜度在 0.60 ~ 0.67 之间平缓波动,表明乌兰察布大部地区气候条件能满足马铃薯生长发育,且气候适宜度较稳定,但近年来随着全球气候变暖,各种极端气候事件频繁发生^[29-30],应采取适当有利措施保证马铃薯增产增收。

2.4 气候因子对马铃薯气候适宜度变化的相对贡献

马铃薯生长季积温、降水、日照对气候适宜度变化的相对贡献如表 5 所示。贡献率为正值是正贡献,表示气候因子的增加可以促使马铃薯气候适宜度增加;负值则表示负贡献;接近 0 值表示贡献率不明显。从表 5 可以看出,生长季积温对马铃薯气候适宜度贡献率是以负值为主,说明积温的增加对马铃薯气候适宜度为负贡献,积温的增加不利于马铃薯气候适宜度的增加。生长季降水对马铃薯气候适宜度的变化大部分以正贡献为主,说明生长季降水的增加有利于提高马铃薯气候适宜度。生长季日照的贡献率大部地区接近 0 值,说明日照的增加对马铃薯气候适宜度贡献不明显。

表 5 生长季积温、降水、日照对马铃薯气候适宜度变化贡献率

地区	积温贡献率	降水贡献率	日照贡献率
四子王旗	0.53	0.51	-0.04
察右中旗	-0.24	0.99	0.25
察右后旗	-1.43	1.91	0.52
商都县	-1.38	3.15	-0.77
化德县	-0.64	1.47	0.17
卓资县	1.51	-0.67	0.16
集宁区	-0.13	0.87	0.26
察右前旗	0.18	0.22	0.60
丰镇市	-0.65	1.67	-0.02
兴和县	0.46	0.45	0.09
凉城县	-0.20	1.35	-0.15

3 结论与讨论

内蒙古乌兰察布地区作为全国马铃薯的主产区,地形地貌、气候条件复杂多样,本研究基于模糊数学原理构建的气候适宜度模型可靠性较高,能够很好地反映气候变化对马铃薯生长发育的影响。通过定性与定量相结合分析马铃薯全生育期气候适宜度变化规律,得到以下主要结论:

(1) 1991-2022 年乌兰察布地区温度、水分、

光照和综合适宜度都呈现弱下降趋势,温度适宜度和光照适宜度高于水分适宜度,而波动幅度小于水分适宜度,从年代际变化来看,马铃薯各气候适宜度呈现“高-低-高”的趋势。

(2) 在各生育阶段气候适宜度变化中,综合气候适宜度最高为出苗期-分枝期,其次是播种期-出苗期和分枝期-花序期,花序期-开花期和开花期-成熟期最低,此阶段是马铃薯产量形成的关键期,应采取适当措施提高产量。

(3) 从空间分布上看,温度适宜度整体上呈北高南低分布趋势,且都达到 0.75 以上;水分适宜度自西北向东南增加,最低值出现在四子王旗南部;日照适宜度与水分适宜度分布规律相反,由西北向东南减少;综合适宜度高值区分布在卓资县及周边区域,最低值出现在四子王旗西南部,总体在 0.60 ~ 0.67 之间平缓波动,表明乌兰察布大部分地区气候适宜马铃薯生长发育。

(4) 气候因子对马铃薯气候适宜度变化的相对贡献为:生长季降水对马铃薯气候适宜度的变化为正贡献,积温为负贡献,日照的贡献率不明显。

乌兰察布地区马铃薯综合气候适宜度总体较好,达到 0.60 以上,且光热条件好于水分条件,这与金林雪等^[16]的研究结果相一致。在分析马铃薯全生育期气候适宜度年际变化时发现综合气候适宜度呈现弱下降趋势,究其原因是该地区受长期气候变化影响,整体上存在水分亏缺的问题,尤其在马铃薯需水临界期,水分亏缺影响结薯数量和块茎重量,从而影响最终产量。但未来该区域仍是马铃薯种植气候高适宜区,因此在马铃薯需水关键期,应当予以适当的田间管理和灌溉措施。

从空间尺度上看,乌兰察布地区气候适宜度高值区主要分布在中部、南部等区域,由于此区域不仅光温资源充足,降水也较多,属于气候适宜度优势区,而在四子王旗南部及商都县等地,虽然光温较好,但降水有所欠缺,气候适宜度低于其他区域。从不同气候因子对马铃薯气候适宜度变化的相对贡献来看,乌兰察布地区降水因子对马铃薯气候适宜度贡献率最大。

马铃薯的生长受多方面因素的影响,本研究未考虑马铃薯其他生产要素的影响,同时基于文献和多年农业气象观测资料确定的马铃薯三基点温度,缺乏更精确的生长理化试验数据的验证;日照适宜度和降水适宜度指数还需在各种试验的

基础上进一步修正完善。另外,本研究仅从温、水、光三种气候因子适宜度进行研究,因此未来还需要对其他气候要素进行更深入、细致的探索研究,以期为马铃薯调整种植结构、选择更优品种、提高产量等方面提供更为精准的理论指导。

参考文献:

- [1] 曹永强,齐静威,王菲,等.辽宁省春玉米全育期的气候适宜度及年景评估[J].地理科学,2020,40(7):1210-1219.
- [2] 帅艳民,武梦瑾,吴昊,等.东北春玉米全生育期气候适宜度评价[J].干旱地区农业研究,2022,40(3):238-247.
- [3] 张志良,和志豪,茹晓雅,等.未来气候变化对中国马铃薯种植气候适宜性的影响[J].中国农业科学,2023,56(18):3530-3542.
- [4] 王连喜,顾嘉熠,李棋,等.江苏省冬小麦适宜度时空变化研究[J].环境生态学报,2016,25(1):67-75.
- [5] 邱美娟,王冬妮,王美玉,等.近35年吉林省玉米气候适宜度及其变化[J].东北农业科学,2019,44(1):70-78.
- [6] 宫丽娟,李宇光,王萍,等.黑龙江省玉米气候适宜度变化分析[J].吉林农业科学,2012,37(5):75-80.
- [7] 邱美娟,宋迎波,王建林,等.农业气象产量预报方法中权重系数的确定[J].气象与环境学报,2016,32(2):106-111.
- [8] 赵彦茜,肖登攀,柏会子,等.华北平原冬小麦和夏玉米气候适宜性[J].生态学杂志,2020,39(7):2251-2262.
- [9] 代立芹,李春强,魏瑞江,等.河北省冬小麦气候适宜度及其时空变化特征分析[J].中国农业气象,2011,32(3):399-406.
- [10] 邱美娟,郭巧,郭春明,等.吉林省春玉米农业气候资源适宜度时空分布特征[J].气象与环境学报,2018,34(2):82-91.
- [11] 曲建升,肖仙桃,曾静静.国际气候变化科学百年研究态势分析[J].地球科学进展,2018,33(11):93-102.
- [12] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.
- [13] 何亮,毛留喜.气候变化背景下东北地区大豆种植区气候适宜性变化[J].中国生态农业学报,2023,31(5):690-698.
- [14] 冶明珠,郭建平,袁彬,等.气候变化背景下东北地区热量资源及玉米温度适宜度[J].应用生态学报,2012,23(10):2786-2794.
- [15] 侯璐,咸文荣,马永强,等.青藏高原冬季温室马铃薯品种筛选试验[J].东北农业科学,2023,48(6):111-116.
- [16] 金林雪,李云鹏,李丹,等.气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析[J].中国生态农业学报,2018,28(1):38-48.
- [17] 王萍,宫丽娟,曲辉辉,等.黑龙江省松嫩平原马铃薯气候适宜性分析[J].东北农业科学,2021,46(3):95-99.
- [18] 李阳,刘静,马力文,等.宁夏中南部山区马铃薯气候适宜度时空变化特征[J].干旱气象,2020,38(6):1001-1008.
- [19] 王春玲,李宏宇,曾剑,等.黄土高原半干旱区马铃薯气候适宜度模拟及其时空变化特征[J].干旱气象,2017,35(5):751-760.
- [20] 马树庆.吉林省农业气候研究[M].北京:气象出版社,1994:33-34.
- [21] 门福义,刘梦云.马铃薯栽培生理[M].北京:中国农业出版社,1995:43-53.
- [22] 陈玉明,郭国兴,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利水电出版社,1995:59-60.
- [23] 黄璜.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究[J].自然资源学报,1996,11(4):340-346.
- [24] 李树岩,彭记永,刘荣花.基于气候适宜度的河南夏玉米发育期预报模型[J].中国农业气象,2013,34(5):576-581.
- [25] He L, Jin N, Yu Q. Impacts of climate change and crop management practices on soybean phenology changes in China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 707: 135638.
- [26] 申露婷,张方敏,黄进,等.1981-2018年内蒙古不同等级降水时空变化特征[J].气象科学,2022,42(2):162-170.
- [27] 高晓瑜,汤鹏程,张莎,等.内蒙古各气候区主要作物生长季干旱特征及其与响应因子回归模型[J].干旱区研究,2022,39(5):1410-1427.
- [28] 杨丽桃,王胜,江像评.内蒙古马铃薯生育期气候生产潜力时空模拟分析[J].干旱气象,2021,39(5):816-823.
- [29] 王亚萍,王帅,丁婧祎,等.气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述[J].生态学报,2023,43(2):475-486.
- [30] 王滨玥,钱琪,孙根紧.中国马铃薯种植区域比较优势及其影响因素分析[J].东北农业科学,2023,48(1):140-144.

(责任编辑:范杰英)