

马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析

王全九^{1,2} 蔺树栋¹ 苏李君¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究马铃薯生长指标与有效积温间关系,以叶面积指数、全株干物质积累量和块茎干物质积累量为生长指标,系统研究了不同地区马铃薯生长特征,建立了以有效积温为自变量的普适生长模型。研究表明:当有效积温达到600℃(块茎形成期)、900℃(块茎膨大前期)、1100℃(块茎膨大后期)左右时,相应的叶面积指数、全株干物质积累量以及块茎干物质积累量的增长速率分别达到最大值。在马铃薯苗期和块茎形成期(有效积温小于900℃)叶面积指数的增长率大于块茎干物质积累量的增长率,在块茎膨大期(有效积温大于等于900℃)块茎干物质积累量的增长率则大于叶面积指数的增长率。叶面积指数、全株干物质积累量和块茎干物质积累量的增长过程均为S形变化曲线,即马铃薯各指标生长曲线呈现慢-快-慢的特征,符合Logistic生长模型。运用Logistic生长模型对马铃薯叶面积指数、全株干物质积累量和块茎干物质积累量过程进行定量分析,结果表明,该模型可较好描述马铃薯主要生长指标的变化过程。研究结果可为合理选择马铃薯适宜的播期和生长期管理提供科学依据,也为有效利用当地的自然气候条件、实现增产高效提供参考。

关键词: 马铃薯;有效积温;拟合;Logistic生长模型

中图分类号: S532

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0306-11

OSID:



Quantitative Analysis of Response of Potato Main Growth Index to Growing Degree Days

WANG Quanjiu^{1,2} LIN Shudong¹ SU Lijun¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northeast Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The growing degree days can reflect the comprehensive influence of climatic conditions on crop growth and analyze the thermal conditions of crops. It is used to determine the suitable sowing time, growth period and corresponding physiological growth characteristics of crops under a certain climatic conditions. Usually, growing degree days are defined as the sum of the growing degree days by a crop during its growth period. The growth characteristics of potatoes in different regions were systematically researched, and the universal growth models of the growth indexed with growing degree days as independent variable growing degree days were established, the leaf area index (LAI), dry matter accumulation of whole plant and dry matter accumulation of tuber were chosen as the main growth indexes. The results showed that the corresponding growth rate of the leaf area index, the dry matter's accumulation capacity in the whole plant and the dry matter's accumulation capacity in tubers were respectively increased to a maximum value when growing degree days reached 600℃ (tuber formation stage), 900℃ (early stage of tuber expansion) and 1100℃ (late stage of tuber expansion). In addition, the growth rate of LAI in potato seedling stage and tuber formation stage (growing degree days was less than 900℃) was higher than that of tuber dry matter accumulation, while the growth rate of tuber dry matter accumulation in tuber expansion period (growing degree days was greater than or equal to 900℃) was higher than that of LAI. The growth process of LAI, dry matter accumulation of the whole

收稿日期: 2019-06-17 修回日期: 2019-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830754)、国家自然科学基金面上项目(51679190)和新疆维吾尔自治区重大科技专项(2016A03008)

作者简介: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究, E-mail: wquanjiu@163.com

plant and tuber dry matter accumulation all had “S-shaped” changing curve with “slower-faster-slower” characteristics, which meant that the index growth curve conformed to the Logistic growth model. The Logistic growth model was used to quantitatively analyze the process of potato LAI, dry matter accumulation of the whole plant and tuber dry matter accumulation, it indicated that the model can be used to describe the changing process of potato main growth indexes. The results can not only provide a scientific basis for the rational selection of suitable sowing dates and long-term management of potatoes, but also provide a reference for the effective utilization of local natural climate conditions to achieve high yield and efficiency.

Key words: potato; growing degree days; fitting; Logistic growth model

0 引言

马铃薯是世界第四大粮食作物^[1],中国则是世界马铃薯生产第一大国^[2],但是中国的马铃薯产量和品质远不及荷兰、英国、美国等欧美发达国家的生产水平^[3-4]。我国马铃薯种植几乎遍及所有省(区),主产区集中在西部干旱半干旱地区^[1]。地处西北的甘肃、陕西、宁夏、青海等黄土高原半干旱区的气候、生态、土壤环境与马铃薯原产地南美安第斯山区有相近之处,非常适宜马铃薯的生长发育,是我国马铃薯主产区之一^[5]。许多区域的作物研究表明,气候变化对粮食产量的不利影响比有利影响更为显著^[6]。充分合理利用本地有利的气候资源,有效发挥本地的气象潜力,避害就利,实现马铃薯产业的高效、高产和稳产,是当今及今后一段时间研究的重点和热点^[7]。

有效积温可反映气候条件对作物生长的综合影响,并且能分析作物的热量条件,可用于确定一定气候条件下作物的适宜播期、生育期以及相应的生理生长特征^[8-12]。通常定义为某一作物在其生育期内所积累的有效温度之和。由于作物完成某一生长阶段需要的热量是固定的,单纯通过生长天数和积温会产生较大偏差,但有效积温却是比较固定的,因此可用其表征作物生长发育的过程^[13]。钱蕊等^[14]对不同播期马铃薯干物质实验与模拟的比较研究发现,马铃薯株茎干物质的积累过程为S形曲线。周东亮等^[15]对黑色地膜双垄覆盖下的马铃薯干物质和水分利用效率的影响研究发现,随着马铃薯生育进程的推进,块茎干物质积累量亦呈现出S形变化趋势。何万春等^[16]研究不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响,发现在马铃薯的全生育期内,全株和块茎干物质积累量出现相似的S形曲线变化。如今有许多数学方程可用来描述S形曲线,如 Gompertz、Logistic、Richards(1975)模型等。谢从华^[17]利用 Logistic 曲线建立了马铃薯块茎生长模型,发现块茎的生长率各不相同,其

生长的时间变化状态呈S形曲线。RATKOWSKY对上述各模型的适合性进行了检验,发现 Logistic 模型在适合性检验中剩余项变量较小,内在曲率较低,此模型适用于模拟植物的营养生长^[17]。因此,可以采用 Logistic 模型对马铃薯的生长过程进行模拟研究,为进一步的生长特征分析提供理论依据。

上述研究表明,同一地区不同处理下马铃薯的生长特征可用 Logistic 模型进行研究,但对马铃薯生长指标与 Logistic 模型参数广义上关系缺乏深入分析,未给出对不同地区、不同环境下较为普适的数学模型。本研究采用 Logistic 生长模型对马铃薯的叶面积指数(Leaf area index, LAI)、全株干物质积累量和块茎干物质积累量进行模拟分析,建立不同地区马铃薯各生长指标与有效积温间的关系,为确定马铃薯适宜的播期、提高生产效率和区域马铃薯生长特征分析提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究中的马铃薯生长特征数据资料来自文献^[15, 18-48],遍及全国24个地区,气象数据来自中国气象数据网。作物生长数据的收集遵循以下原则:①直接获取原文献中提供的原始数据,利用 GetData Graph Digitizer 软件从文献的曲线图中获取数据。②优先选择使用广泛的灌溉条件、施肥和栽培技术下的马铃薯生长数据,不选择未广泛采用的新技术管理下的数据。③每个地区尽量获取3组以上数据样本,但由于部分地区因种植和研究较少仅取得1~2组数据样本。

图1为本研究中所采用的马铃薯种植地区分布区域,其主要分布在西北地区。各地区不同品种马铃薯的播种时间均集中在3月下旬至5月下旬,收获时间集中在9月下旬至10月上旬。试验地多以 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (氮肥)、 P_2O_5 (磷肥)、 K_2O (钾肥)作为基肥。表1~3为本研究中马铃薯各生长指标所采用的样本数量以及数据来源。

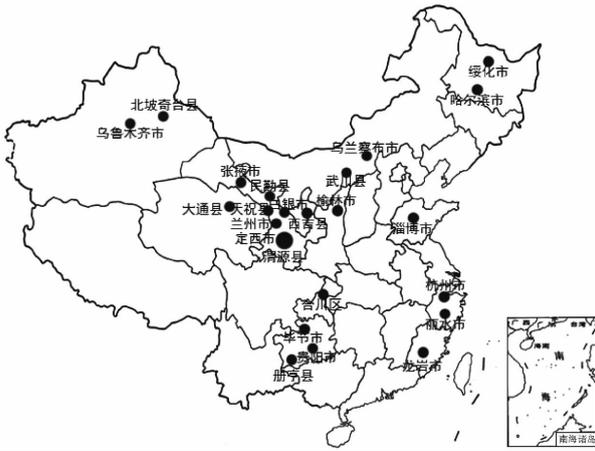


图1 马铃薯种植地域分布图

Fig.1 Distribution map of potato planting area

表1 叶面积指数样本数量与数据来源

Tab.1 Sample size and data sources of leaf area index

省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号
陕西	榆林	9	[18] ^a
甘肃	民勤	4	[19] ^a
甘肃	张掖	6	[20] ^a
贵州	毕节	20	[21-22] ^a
内蒙古	武川	8	[23] ^a
内蒙古	乌兰察布	3	[24] ^b
福建	龙岩	5	[25] ^a
宁夏	西吉	3	[26] ^a
重庆	合川	6	[27] ^a
浙江	丽水	1	[28] ^b
浙江	杭州	2	[29] ^b
新疆	北坡奇台	6	[30] ^b
新疆	乌鲁木齐	1	[31] ^b

注:a表示本次研究采用建模数据的地区,b表示本次研究采用验证数据的地区,下同。

表2 全株干物质积累量样本数量与数据来源

Tab.2 Sample size and data sources of dry matter accumulation of whole plant

省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号
内蒙古	武川	8	[23] ^a
内蒙古	乌兰察布	3	[25] ^a
黑龙江	哈尔滨	7	[32-33] ^a
甘肃	张掖	15	[34-35] ^a
甘肃	白银	6	[36] ^a
甘肃	定西	6	[37] ^a
甘肃	天祝	3	[38] ^b
甘肃	兰州	2	[39] ^a
贵州	毕节	20	[21-22] ^a
贵州	贵阳	1	[40] ^a
贵州	册亨	2	[41] ^b
福建	龙岩	5	[25] ^a
浙江	杭州	3	[29] ^b

表3 块茎干物质积累量样本数量与数据来源

Tab.3 Sample size and data sources of dry matter accumulation of tuber

省/自治区	市/区/县	样本数	文献序号
黑龙江	哈尔滨	7	[32,40,42] ^a
黑龙江	绥化	4	[43] ^b
内蒙古	武川	6	[44] ^a
甘肃	定西	3	[15] ^b
甘肃	白银	2	[36] ^a
甘肃	天祝	9	[38] ^b
甘肃	兰州	2	[39] ^a
甘肃	渭源	11	[45-46] ^a
贵州	贵阳	1	[40] ^a
青海	大通	1	[47] ^a
山东	淄博	4	[48] ^a

1.2 研究方法

通过查阅国内大量有关马铃薯生长特征的文献,收集其叶面积指数、全株干物质积累量和块茎干物质积累量变化过程的相关数据。由于后期各指标衰减数据较少,本文只选取了其增长过程进行分析。同时在中国气象数据网下载计算各地区不同年份马铃薯生育期内的有效积温,进而利用所选地区的试验数据来绘制马铃薯各生长指标与有效积温间的关系曲线,由于数据量大,绘图时数据较多的地区选取具有代表性的3~4组数据,数据较少的地区则选取1~2组,分析马铃薯各生长指标随有效积温的变化特征。本研究选择相关数据建立适用于不同地区的马铃薯普遍适用生长模型,研究其统一变化规律。同时采用内蒙古自治区乌兰察布市^[24]、浙江省丽水市^[28]、浙江省杭州市^[29]、新疆维吾尔自治区北坡奇台县^[30]、新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市^[31]5个地区的相关文献数据对所建叶面积指数生长模型进行验证;但由于马铃薯干物质积累量相关文献较少,利用浙江省杭州市^[29]、甘肃省天祝县^[38]、贵州省册亨县^[41]3个地区的相关文献数据验证全株干物质积累量的生长模型;采用甘肃省定西市^[15]、甘肃省天祝县^[38]、黑龙江省绥化市^[43]3个地区的相关文献数据验证块茎干物质积累量的增长模型。

1.3 有效积温计算式和 Logistic 模型

每一种作物都有其生物学上、下限温度,即超过这个温度范围,作物便停止生长。查阅资料可知马铃薯的生物学上限温度为35℃,下限温度4℃^[49]。有效积温(Growing degree days,GDD)是指日平均气温与作物活动所需要的最低温度之差,计算式为

$$P_{GDD} = \sum (T_{avg} - T_{base}) \quad (1)$$

其中

$$T_{avg} = \begin{cases} \frac{T_x + T_n}{2} & (T_{base} < T_{avg} < T_{upper}) \\ T_{base} & (T_{avg} \leq T_{base}) \\ T_{upper} & (T_{avg} \geq T_{upper}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_{GDD} ——有效积温, $^{\circ}C$

T_{avg} ——日平均气温, $^{\circ}C$

T_{base} ——作物活动所需要的最低温度, $^{\circ}C$

T_{upper} ——作物活动所需要的最高温度, $^{\circ}C$

T_x ——最高气温, $^{\circ}C$

T_n ——最低气温, $^{\circ}C$

采用以 P_{GDD} 作为自变量的 Logistic 模型分析不同地区马铃薯叶面积指数、全株干物质积累量以及块茎干物质积累量的变化过程, 公式为

$$LAI = \frac{LAI_{max}}{1 + e^{a_0 + a_1 P_{GDD}}} \quad (3)$$

$$D_{mw} = \frac{D_{mwmax}}{1 + e^{b_0 + b_1 P_{GDD}}} \quad (4)$$

$$D_{mt} = \frac{D_{mtmax}}{1 + e^{c_0 + c_1 P_{GDD}}} \quad (5)$$

式中 LAI_{max} ——叶面积指数理论最大值

D_{mw} ——全株干物质积累量, kg/hm^2

D_{mwmax} ——全株干物质积累量理论最大值, kg/hm^2

D_{mt} ——块茎干物质积累量, kg/hm^2

D_{mtmax} ——块茎干物质积累量理论最大值, kg/hm^2

$a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ ——模型拟合参数

由于在测量过程中存在一定的观测误差, 且各指标的实测最大值不等于理论最大值, 因此赋予各实测最大值一定的增量, 便于采用实测最大值来拟合模型参数。

1.4 数据处理及误差分析

收集的数据运用 Excel 进行处理, 并用 Matlab 进行模型参数推求, 同时采用决定系数 R^2 、均方根误差 (RMSE) 和相对误差 (RE) 评价指标进行误差分析, 检验相关性。

2 结果与分析

2.1 马铃薯叶面积指数变化特征

叶面积指数 (LAI) 是反映植物群体生长状况的一个重要指标。采用 61 组数据来描述马铃薯叶面积指数随有效积温的变化曲线, 如图 2 所示。各地区马铃薯生长前期叶面积指数整体均随有效积温的增大而增大, 且生长前期曲线的变化率较大, 说明适宜的温度对马铃薯生长前期的叶面积生长具有显著促进作用。当有效积温在 $500 \sim 800^{\circ}C$ 之间时, 马铃

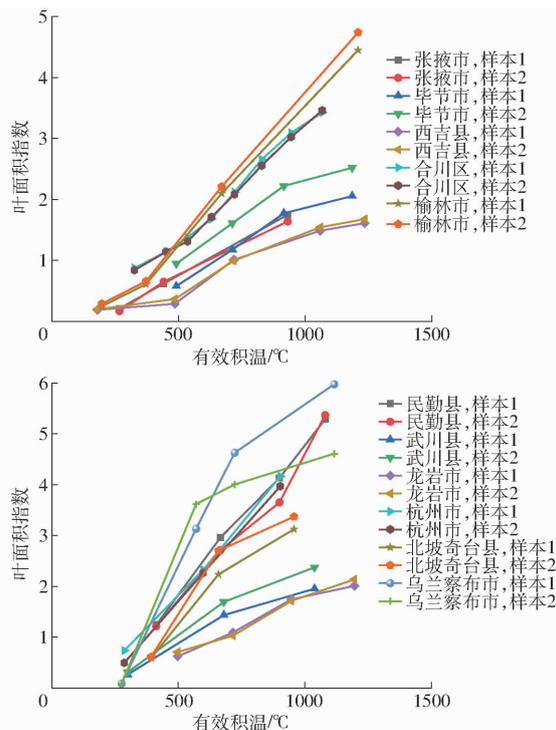


图2 不同地区马铃薯叶面积指数随有效积温的变化曲线
Fig.2 Variation curves of potato leaf area index with growing degree days in different regions

薯处于块茎形成期, 此时叶面积指数增长速率较快; 当有效积温在 $800 \sim 1000^{\circ}C$ 之间时, 马铃薯处于块茎膨大期, 此阶段植株主要为块茎成长提供所需能量物质, 叶片生长所需能量物质较少, 因此叶面积指数增长速率变缓。从图 2 可以看出, 由于不同地区的气候、灌溉施肥制度等条件不同, 虽然各地区同一时期的叶面积指数存在显著差异, 但整个生育期的叶面积指数变化趋势基本一致。

为了对比分析各地区叶面积指数变化特征, 采用相对叶面积指数分析其共有的变化特征。图 3 为 61 组叶面积指数数据归一化后的相对叶面积指数与有效积温之间关系。由图可以看出, 采用相对叶面积指数可以有效地描述不同地区叶面积变化特征。为了定量分析相对叶面积指数变化特征, 以有效积温为自变量, 采用 Logistic 模型对马铃薯相对叶面积指数的变化过程进行拟合, 具体拟合结果为

$$R_{LAI} = \frac{LAI}{LAI_{max}} = \frac{1}{1 + e^{3.9298 - 0.0064 P_{GDD}}} \quad (6)$$

式中 R_{LAI} ——相对叶面积指数

图 3 为不同地区马铃薯相对叶面积指数的拟合结果, $R^2 = 0.92$, RMSE 为 0.09, RE 为 1.57%。为了进一步评价运用相对叶面积指数分析不同地区马铃薯叶面积变化特征的适宜性, 采用内蒙古自治区乌兰察布市^[24]、浙江省丽水市^[28]、浙江省杭州市^[29]、新疆维吾尔自治区北坡奇台县^[30]、新疆维吾

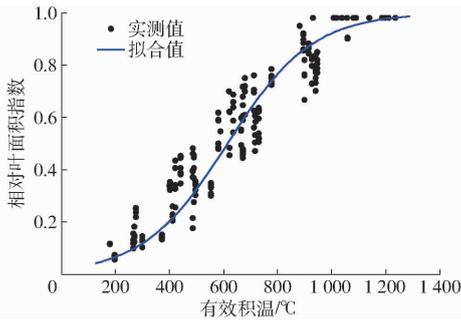


图3 不同地区马铃薯相对叶面积指数拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of potato relative leaf area index in different regions

尔自治区乌鲁木齐市^[31] 5个地区的试验数据对所得模型(式(6))进行验证,验证结果如图4所示。由图4可以看出,相对叶面积指数的实测值与模拟值之间有较好地吻合度, $R^2 = 0.96$, RMSE为0.07, RE为0.86%。因此,式(6)可以用来描述马铃薯相对叶面积指数的变化过程。

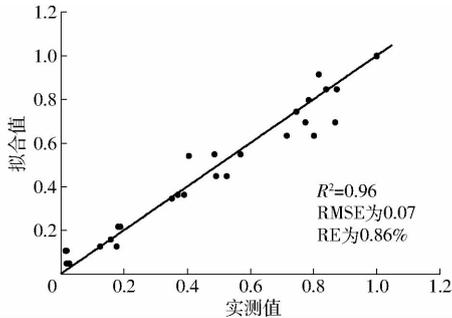


图4 马铃薯相对叶面积指数曲线模型验证结果

Fig. 4 Model verification result of potato relative leaf area index

对式(6)求二阶导数,并求其拐点,即令

$$\frac{d^2 R_{LAI}}{dP_{GDD}^2} = 0 \quad (7)$$

可以得到当 $P_{GDD} = -a_0/a_1 \approx 600^\circ\text{C}$ (块茎形成期)时,为叶面积指数增长曲线的拐点,即当 $P_{GDD} \leq 600^\circ\text{C}$ 时,叶面积指数增长速率逐渐增大;当 $P_{GDD} > 600^\circ\text{C}$ 时,叶面积指数增长速率逐渐减小。再求其一阶导数,并令有效积温分别等于 300、600、800、1 000、1 200 $^\circ\text{C}$,求得不同有效积温所对应的曲线斜率,分别为 0.000 7、0.001 6、0.001 1、0.000 5、0.000 1。当有效积温为 600 $^\circ\text{C}$ 左右时,叶面积指数增长速率达到最大值,此时马铃薯处于块茎形成期,水肥促进茎叶生长;当有效积温为 1 200 $^\circ\text{C}$ 左右时,叶面积指数达到最大值,叶面积指数增长速率达到最小值,此时马铃薯处于块茎膨大期,水肥主要促进块茎生长,叶面积指数停止增长。

2.2 马铃薯全株干物质积累量变化特征

采用 70 组数据分析马铃薯全株干物质积累量随有效积温的变化特征,结果如图 5 所示。由图可

以看出,马铃薯全株干物质积累量随有效积温变化的规律较显著,其增减趋势基本保持一致。同时,当有效积温在 800 ~ 1 000 $^\circ\text{C}$ 之间时,其变化率达到最大值,此时马铃薯处于块茎膨大期,属于马铃薯块茎干物质主要积累期,块茎生长需要马铃薯各器官共同作用,说明此时温度对马铃薯全株生长有很大影响,促进了马铃薯的生长,光照或温度不足可能导致马铃薯成长受到抑制,从而造成减产。当有效积温在 1 200 $^\circ\text{C}$ 左右时,对应的叶面积指数达到最大值,叶面积指数增长速率达到最小值,而全株干物质积累量在有效积温 1 800 $^\circ\text{C}$ 左右时达到最大值,进而说明有效积温超过 1 200 $^\circ\text{C}$ 后,叶片不在生长,温度主要促进水肥为马铃薯植株茎和其他器官生长提供能量物质。

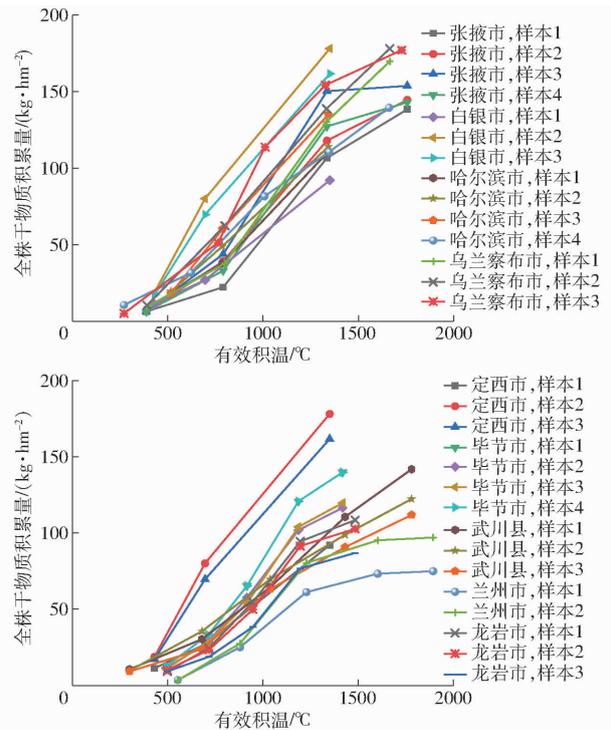


图5 不同地区马铃薯全株干物质积累量随有效积温的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of potato dry matter accumulation of whole plant with growing degree days in different regions

为了获得马铃薯全株干物质积累量的普适变化特征,将全株干物质积累量进行归一化,图6给出了相对全株干物质积累量随有效积温变化过程。采用 Logistic 模型对马铃薯相对全株干物质积累量随有效积温变化过程进行拟合,拟合结果为

$$R_{D_{mw}} = \frac{D_{mw}}{D_{mw\max}} = \frac{1}{1 + e^{4.91 - 0.0053P_{GDD}}} \quad (8)$$

式中 $R_{D_{mw}}$ ——相对全株干物质积累量

如图 6 所示, $R^2 = 0.95$, RMSE 为 0.08, RE 为 1.60%,表明曲线拟合度很好,拟合精度较高。采用

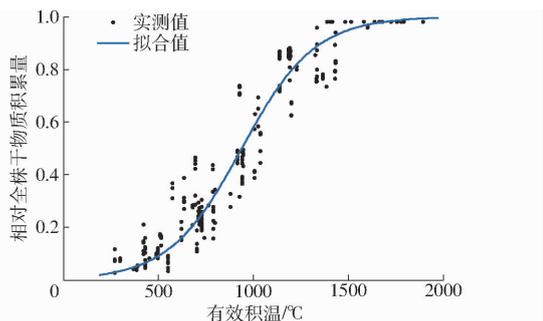


图6 不同地区马铃薯相对全株干物质积累量模拟曲线
Fig.6 Fitting curve of potato relative dry matter accumulation of whole plant

浙江省杭州市^[29]、甘肃省天祝县^[38]、贵州省册亨县^[41]3个地区的试验数据对所得模型(式(8))进行验证,验证结果如图7所示。由图7可以看出,相对全株干物质积累量的实测值与拟合值之间有较好地吻合度, $R^2 = 0.97$, RMSE为0.06, RE为0.88%。说明式(8)可以用于模拟马铃薯相对全株干物质积累量变化过程。

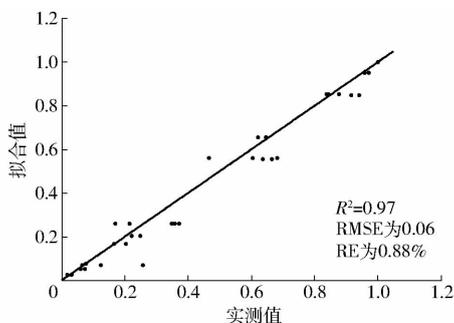


图7 马铃薯相对全株干物质积累量曲线模型验证结果
Fig.7 Model verification result of potato relative dry matter accumulation of whole plant

对式(8)求其二阶导数,并求其拐点,即令

$$\frac{d^2 R_{D_{mw}}}{dP_{GDD}^2} = 0 \quad (9)$$

可以得到当 $P_{GDD} = -b_0/b_1 \approx 900^\circ\text{C}$ (块茎膨大期)时,为全株干物质积累量增长曲线的拐点,即当 $P_{GDD} \leq 900^\circ\text{C}$ 时,全株干物质积累量增长速率逐渐增大;当 $P_{GDD} > 900^\circ\text{C}$ 时,全株干物质积累量增长速率逐渐减小。再求其一阶导数,并令有效积温分别等于 600、900、1 200、1 500、1 800 $^\circ\text{C}$,求得不同有效积温所对应的曲线斜率,分别为 0.000 6、0.001 3、0.000 8、0.000 2、0.000 05。可知当有效积温处于 900 $^\circ\text{C}$ 左右时,全株干物质积累量增长速率达到最大值,此时马铃薯处于块茎膨大期,是决定块茎大小和需水肥最多的时期;当有效积温为 1 800 $^\circ\text{C}$ 左右时,全株干物质积累量达到最大值,全株干物质积累量增长速率达到最小值,全株干物质积累量停止增长。

2.3 马铃薯块茎干物质积累量变化特征

对于马铃薯而言,块茎就是其最终产量,采用

34组数据分析马铃薯块茎干物质积累量随有效积温的变化过程,结果如图8所示。由图8可以看出,各地区块茎干物质积累过程整体均随有效积温的增大呈上升趋势,且生长曲线的变化呈S形增长曲线,说明适宜的温度对马铃薯块茎干物质积累具有明显促进作用。同时,当有效积温在 1 000 ~ 1 200 $^\circ\text{C}$ 之间时,其变化率达到最大值,此阶段对应马铃薯的块茎膨大期,说明此时温度对马铃薯块茎生长有很大影响,适宜的温度促进马铃薯块茎生长,光照或温度会直接影响马铃薯的最终产量。当有效积温在 1 200 $^\circ\text{C}$ 左右时,对应的叶面积指数达到最大值,而块茎干物质积累量基本在有效积温 1 600 $^\circ\text{C}$ 左右时达到最大值,更加说明有效积温超过 1 200 $^\circ\text{C}$ 后,植株所吸收的能量主要供给于马铃薯块茎成长。

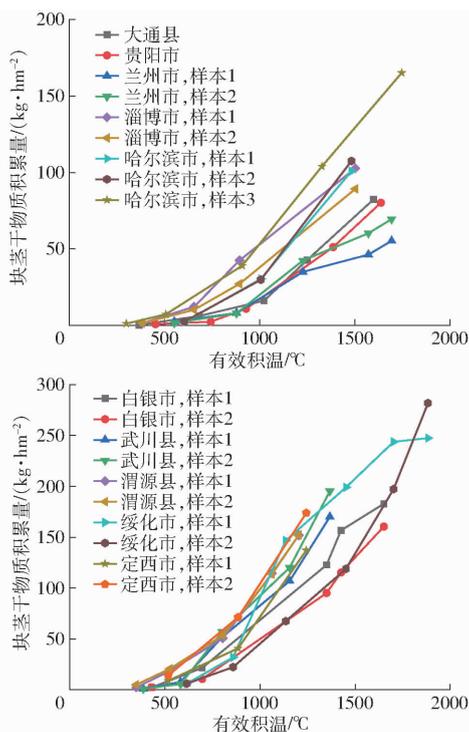


图8 不同地区马铃薯块茎干物质积累量随有效积温的变化曲线

Fig.8 Variation curves of potato dry matter accumulation of tuber with growing degree days in different regions

为了获得马铃薯块茎干物质积累量的普适变化特征,计算获得了相对块茎干物质积累量与有效积温间关系,如图9所示。采用 Logistic 模型对马铃薯相对块茎干物质积累量随有效积温的变化过程进行拟合,拟合结果为

$$R_{D_{mt}} = \frac{D_{mt}}{D_{mtmax}} = \frac{1}{1 + e^{7.9183 - 0.0072P_{GDD}}} \quad (10)$$

式中 $R_{D_{mt}}$ ——相对块茎干物质积累量

马铃薯相对块茎干物质积累量的拟合结果如图9所示, $R^2 = 0.93$, RMSE为0.10, RE为4.75%,

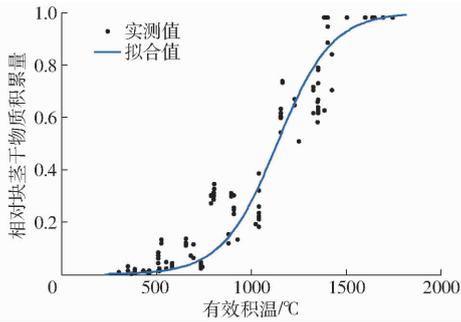


图9 不同地区马铃薯相对块茎干物质积累量模拟曲线

Fig.9 Fitting curve of potato relative dry matter accumulation of tuber

表明曲线拟合度很好,模拟精度高。采用甘肃省定西市^[15]、甘肃省天祝县^[38]、黑龙江省绥化市^[43]3个地区的试验数据对所得模型(式(10))进行验证,验证结果如图10所示。由图可以看出,相对块茎干物质积累量的实测值与拟合值之间有较好地吻合度, $R^2 = 0.97$,RMSE为0.06,RE为1.40%,可知式(10)可以用于模拟马铃薯相对块茎干物质积累量。

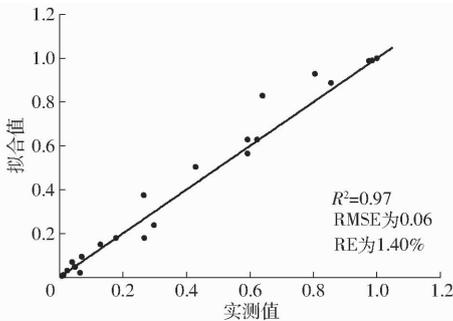


图10 马铃薯相对块茎干物质积累量曲线模型验证结果

Fig.10 Model verification result of potato relative dry matter accumulation of tuber

对式(10)求其二阶导数,并求其拐点,即令

$$\frac{d^2 R_{D_{mt}}}{dP_{GDD}^2} = 0 \quad (11)$$

可以得到当 $P_{GDD} = -c_0/c_1 \approx 1100^\circ\text{C}$ (块茎膨大期)时,为块茎干物质积累量增长曲线的拐点,即当 $P_{GDD} \leq 1100^\circ\text{C}$ 时,块茎干物质积累量增长速率逐渐增大;当 $P_{GDD} > 1100^\circ\text{C}$ 时,块茎干物质积累量增长速率逐渐减小。再求其一阶导数,并令有效积温分别等于400、700、1100、1300、1600 $^\circ\text{C}$,求得不同有效积温所对应的曲线斜率,分别为0.00005、0.0004、0.0018、0.0011、0.0002。有效积温处于1100 $^\circ\text{C}$ 左右时,马铃薯处于块茎膨大期,是马铃薯一生中增长最快、生长量最大的时期,块茎干物质积累增长速率达到最大值;当有效积温为1600 $^\circ\text{C}$ 左右时,块茎干物质积累量达到最大值,块茎干物质积累速率达到最小值,块茎干物质积累量停止增长。

由表4可知,随着时间的推移以及有效积温的

变化,苗期和块茎形成期(P_{GDD} 小于900 $^\circ\text{C}$)叶面积指数的变化率大于块茎干物质积累量的变化率,块茎膨大期(P_{GDD} 大于等于900 $^\circ\text{C}$)块茎干物质积累量的变化率大于叶面积指数的变化率,这更加表明在马铃薯生育期后期适宜的温度对块茎干物质积累量的影响较为显著,植株吸收的能量主要供给块茎的成长,这正符合马铃薯的生长规律。

表4 马铃薯生长指标变化率

Tab.4 Changing rate of potato growth index

有效积温/ $^\circ\text{C}$	叶面积指数变化率	块茎干物质积累量变化率
	$\frac{dR_{LAI}}{dP_{GDD}}/^\circ\text{C}^{-1}$	$\frac{dR_{D_{mt}}}{dP_{GDD}}/^\circ\text{C}^{-1}$
300	0.00070	0.00002
600	0.00160	0.00020
900	0.00080	0.00110
1000	0.00050	0.00160
1300	0.00008	0.00110

3 讨论

作物生育期在很大程度上可以由气候和作物生理性状决定。生育期的确定是选择粮食作物品种的一般标准。气候因素的变化影响作物生长,从而影响农业系统的生产力,对人类社会的生计构成挑战^[50]。有效积温可表示温度对作物生长的综合影响,可被用于确定一定气候条件下作物的适宜播期、生育期以及相应的生理特征。研究不同地区、不同环境下作物生育期内有效积温的变化,分析有效积温与作物生长特征间的关系,建立适宜的生长模型,确定作物适宜的播种周期,充分利用气候条件,同时亦能够准确预测产量,这对提高作物产量以及经济效益起着尤为重要的作用,本文建立的通用生长模型形式简单,便于应用,在不同地区具有很大的应用前景,可以促进农作物的发展和各地区的响应。通常来说,作物生长模型可动态模拟作物物候、叶面积指数、生物量、水分利用和粮食产量形成,以响应基因型、环境和管理的变化及其相互作用^[51-52]。现有大量的作物生长模型,如APSIM^[53]、AquaCrop^[54]、CERES^[55]、GLAM^[56-57]、STICS^[58]、SWAP^[59]、WOFOST^[60]等,在过去几十年中被用于预测作物在不同环境下的生长发育。然而,由于模型开发目标和环境的不同,模型结构和参数存在显著差异^[61-62]。此外,还需要改进作物生长模型,将作物生理过程的最新进展嵌入模型中,并对模型的不确定性进行量化,所以本文在马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析基础上所建的模型可以为后期发展作物生长模型提供一定的理论基础。作物

模型和气象驱动的基本限制都表明,要为农田提供可靠的监测能力,必须综合考虑气候、作物生理性状、灌溉、施肥、田间管理措施以及作物品种、土壤条件等所有因素。因此在后期的研究当中应该利用更多的资料,建立更多经济作物生长模型以便于更好地掌握作物生长规律。

不同地区、不同时间、不同种植方式下的同种作物生长指标随有效积温的变化趋势相似,但由于土壤条件、灌溉、施肥或其他耕作措施的不同,其最大值并不相同。本研究分析了全国24个不同地区的马铃薯叶面积指数、全株干物质积累量和块茎干物质积累量的变化特征,将马铃薯的各生长指标进行归一化处理,利用相对叶面积指数、相对全株干物质积累量和相对块茎干物质积累量来描述马铃薯的生长特征,将不同地区马铃薯的生长变化过程用一条曲线进行拟合,并分析各指标与有效积温间的定量关系,建立了适用于我国大部分地区的马铃薯生长普适模型,模型评价结果表明 R^2 均大于0.90, RMSE在0.08~0.10之间, RE在1.57%~4.75%之间,为了进一步评价模型对不同地区马铃薯生长变化特征的适宜性,对模型进行验证,验证结果表明, R^2 均大于0.95, RMSE在0.06~0.07之间, RE在0.86%~1.40%之间,表明模型拟合效果较好。但目前基于有效积温建立的模型仍需更广泛地区、更全面的作物生长资料进行检验。同一有效积温下,不同地区作物的叶面积指数及干物质积累量等生长指标不同,因此灌溉、施肥等管理措施以及作物品种、土壤条件等对生长指标的影响有待进一步研究。

为了更好地提高模型的精确性和适用性,后期应该考虑收集更广泛地区的数据资料,建立更多经济作物领域内基于有效积温的 Logistic 生长模型,以便更好地掌握作物的生长变化规律来提高其收益。本文通过研究马铃薯叶面积指数、全株干物质积累量、块茎干物质积累量的变化过程发现,马铃薯

Logistic 生长曲线慢-快-慢的特征符合其生育期阶段各指标的变化规律,可实时模拟各生长指标的变化过程,该模型可以为各作物领域应用研究提供支撑。另外,由于马铃薯相关数据较少,用来模拟和验证的数据相对较少,在后期研究中将尽可能收集更多地区相关资料进行研究和验证。

4 结论

(1) 马铃薯生长前期,叶面积指数随有效积温的增大而增大,且生长前期曲线的变化率较大,说明适宜的温度对于马铃薯生长前期的叶面积生长具有显著促进作用。运用 Logistic 生长模型可有效描述不同地区马铃薯相对叶面积指数变化特征。当有效积温为 600°C 左右时,马铃薯处于生育期的块茎形成期,叶面积指数增长速率最大。

(2) 全株干物质积累量随有效积温变化的规律较为显著,其增长趋势基本保持一致, Logistic 模型可以较好地定量分析不同地区相对全株干物质积累量变化特征。当有效积温达到 900°C 左右时,马铃薯处于块茎膨大期,全株干物质积累量增长速率最大。当有效积温在 1600°C 左右时,全株干物质积累量达到最大值。

(3) 各地区块茎干物质积累量整体变化过程基本保持一致,均随有效积温的增大呈现上升趋势,其生长变化状态随有效积温呈 S 形变化曲线。另外,在一定地域范围内,同种作物完成整个生育期所需要的有效积温是相对稳定的,在温度及其他环境因子均适宜时,作物的生育期长度即可用该积温来表示^[63-65]。当有效积温达到 1100°C 左右时,马铃薯块茎干物质积累量增长速率最大。

(4) 利用相对生物量增长过程可以较好描述不同地区马铃薯主要生长指标变化特征,可用于不同地区、不同环境下选择马铃薯适宜的播期和田间管理,为提高马铃薯生产效益提供有益参考,为发展普适性马铃薯生长模型提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] FAO. Production yearbook[M]. Rome, FAO, 1995: 243.
- [2] 刘凡,李援农,尹娟.不同水肥配合对马铃薯产量的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):108-113.
LIU Fan, LI Yuannong, YIN Juan. Effect on different water and fertilizer coupling to yield of potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 108-113. (in Chinese)
- [3] 盛万民.中国马铃薯品质现状及改良对策[J].中国农学通报,2006,22(2):166-170.
SHENG Wanmin. Progress of research on potato molecular breeding for qualities[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(2): 166-170. (in Chinese)
- [4] 苏年贵,张学良,冀秀梅.晋西南山区马铃薯氮磷钾肥肥效及合理施用[J].中国马铃薯,2005,19(3):144-147.
SU Nianguai, ZHANG Xueliang, JI Xiumei. The rational application of N-P-K fertilizers to potatoes in Southwest Shanxi mountain areas[J]. Chinese Potato Journal, 2005, 19(3): 144-147. (in Chinese)
- [5] 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 Guojia, QIU Zhengji, ZHANG Fengju, et al. Influence of increased temperature on the potato yield and quality in a semiarid

- district of Northwest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 830–836. (in Chinese)
- [6] 姜彤, 李修仓, 巢清尘, 等. 《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(3): 157–166.
JIANG Tong, LI Xiucang, CHAO Qingchen, et al. Highlights and understanding of climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[J]. *Climate Change Research*, 2014, 10(3): 157–166. (in Chinese)
- [7] 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 Yubi, ZHANG Xiuyun, WANG Runyuan, 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. (in Chinese)
- [8] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1988: 2–3.
- [9] 杨轩, 王自奎, 曹铨, 等. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 106–114.
YANG Xuan, WANG Zikui, CAO Quan, et al. Effects of precipitation and air temperature changes on yield of several crops in Eastern Gansu of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(9): 106–114. (in Chinese)
- [10] 姚建成. 气象对农作物生长的影响[J]. *农业与技术*, 2017, 37(20): 244.
- [11] 高洪蛟, 李奇. 浅谈积温[J]. *黑龙江气象*, 2017(2): 15.
- [12] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊 1): 161–170.
ZHANG Kai, WANG Runyuan, FENG Qi, et al. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Supp. 1): 161–170. (in Chinese)
- [13] 王贺垒, 韩宪忠, 范凤翠, 等. 基于有效积温的设施茄子营养生长期蒸散量模拟系统[J]. *节水灌溉*, 2019(2): 11–17.
WANG Helei, HAN Xianzhong, FAN Fengcui, et al. Dynamic simulation system of eggplant evapotranspiration at vegetative growth stage based on effective accumulated temperature[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(2): 11–17. (in Chinese)
- [14] 钱蕊, 王连喜, 李剑萍, 等. 同播期马铃薯干物质实验与模拟的比较研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(9): 127–132.
QIAN Rui, WANG Lianxi, LI Jianping, et al. Comparative study of the dry matter of potatoes in different sowing dates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(9): 127–132. (in Chinese)
- [15] 周东亮, 叶丙鑫, 王姣敏, 等. 黑色地膜双垄覆盖对马铃薯干物质和水分利用效率的影响[J]. *中国蔬菜*, 2018(2): 47–52.
ZHOU Dongliang, YE Bingxin, WANG Jiaomin, et al. Effects of black plastic film mulch on potato dry matter content and water use efficiency[J]. *China Vegetables*, 2018(2): 47–52. (in Chinese)
- [16] 何万春, 何昌福, 邱慧珍, 等. 不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 175–182.
HE Wanchun, HE Changfu, QIU Huizhen, et al. Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and distribution of potato plants under film mulching in dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 175–182. (in Chinese)
- [17] 谢从华. 马铃薯块茎的生长模型及块茎生长率与细胞分裂的关系[J]. *中国马铃薯*, 1990(3): 144–148, 189.
- [18] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 270–278.
ZHANG Fucang, GAO Yue, JIAO Wanru, et al. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin area[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 270–278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170334&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.034. (in Chinese)
- [19] 刘锦洋, 贾生海, 梁仲镏. 绿洲膜下滴灌调亏对马铃薯生长及品质的影响[J]. *人民黄河*, 2018, 40(8): 152–156.
LIU Jinyang, JIA Shenghai, LIANG Zhonghe. Effects of mulched drip irrigation under water deficit on potato growth index and quality in oasis region[J]. *Yellow River*, 2018, 40(8): 152–156. (in Chinese)
- [20] 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.
LI Jing, ZHANG Hengjia, ZHOU Hong. Water consumption characteristics and growth dynamics of potato under mulched drip irrigation with soil water deficit regulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 80–87. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 何庆才, 何昀昆. 不同种植方式下马铃薯的群体结构研究[J]. *河北农业科学*, 2007(4): 25–28.
HE Qingcai, HE Yunkun. Potato community structure on various planting conditions[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2007(4): 25–28. (in Chinese)
- [23] 胡琦, 谭英, 杨鹏宇, 等. 阴山北麓农牧交错带不同沟垄宽度集雨技术对马铃薯的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 116–121.
HU Qi, TAN Ying, YANG Pengyu, et al. Effects of different ridge and furrow widths for rainwater harvesting on the potato at ecotone region in the north foot of Yinshan Mountain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 116–121. (in Chinese)
- [24] 乌兰, 石晓华, 杨海鹰, 等. 苗期水分亏缺对马铃薯产量形成的影响[J]. *中国马铃薯*, 2015, 29(2): 80–84.
WU Lan, SHI Xiaohua, YANG Haiying, et al. Effects of water deficiency at seedling stage on potato yield formation[J].

- Chinese Potato Journal, 2015, 29(2): 80-84. (in Chinese)
- [25] 郭阿安. 马铃薯紫花851不同种植密度对群体结构的影响试验[J]. 广西农业科学, 2010, 41(8): 766-768.
GUO Aan. Effects of different plant densities on the population structure of potato variety Zihua 851[J]. Guangxi Agricultural Science, 2010, 41(8): 766-768. (in Chinese)
- [26] 李琪, 谢萍, 李剑萍, 等. 不同播期对宁夏粉用马铃薯生长和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 220-226.
LI Qi, XIE Ping, LI Jianping, et al. Effects of different sowing periods on growth and quality of starch potato in Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(12): 220-226. (in Chinese)
- [27] 何庆学, 王季春, 唐道彬, 等. 营养液对雾化栽培不同品种马铃薯生长的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2003, 25(3): 251-254.
HE Qingxue, WANG Jichun, TANG Daobin, et al. Effects of different nutrient media on the growth of potato varieties under mist spraying cultivation[J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 25(3): 251-254. (in Chinese)
- [28] 黄祖淦, 洪菊莲, 吕周林, 等. 南方春马铃薯地膜覆盖早熟高产的效果及其机理研究[J]. 中国马铃薯, 1993, 7(3): 166-168.
HUANG Zupan, HONG Julian, LÜ Zhoulin, et al. Effects and mechanism of early maturity and high yield of spring potato mulching in southern[J]. Chinese Potato Journal, 1993, 7(3): 166-168. (in Chinese)
- [29] 陈国林. 马铃薯覆膜栽培的增产机理研究[J]. 浙江农业学报, 1997, 9(2): 28-31.
CHEN Guolin. Study on the mechanism of increasing yield in potato mulch cultivation[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1997, 9(2): 28-31. (in Chinese)
- [30] 赵亮, 贾永红, 魏龙基, 等. 钾肥不同施入量对马铃薯产量及经济性状的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(8): 116-121.
- [31] 孟玉东, 赵经华. 不同颜色薄膜对滴灌马铃薯生长指标的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(3): 78-79.
MENG Yudong, ZHAO Jinghua. Effect of different color film on growth index of potato by drip irrigation[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2018, 30(3): 78-79. (in Chinese)
- [32] 魏峭嵘, 曹敏建, 石瑛, 等. 施氮水平对不同马铃薯品种生长发育及品质性状的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 152-158.
WEI Qiaorong, CAO Minjian, SHI Ying, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on growth, development and quality in potato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 152-158. (in Chinese)
- [33] 谷浏涟, 孙磊, 石瑛, 等. 氮肥施用时期对马铃薯干物质积累转运及产量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(4): 610-615.
GU Liulian, SUN Lei, SHI Ying, et al. Effects of nitrogen application time on dry matter accumulation and translocation and tuber yield of potato[J]. Soils, 2013, 45(4): 610-615. (in Chinese)
- [34] 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.
XUE Daoxin, ZHANG Hengjia, BA Yuchun, et al. Effects of regulated deficit irrigation on soil environment and yield of potato under drip irrigation in oasis region[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(3): 229-238. (in Chinese)
- [35] 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.
LI Jing, ZHANG Hengjia, ZHOU Hong. Water consumption characteristics and growth dynamics of potato under mulched drip irrigation with soil water deficit regulation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 80-87. (in Chinese)
- [36] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1274-1285.
LIU Xing, ZHANG Shule, LIU Guofeng, et al. Effects of continuous cropping on dry matter accumulation and distribution of potato plants in the Yellow River irrigation areas of middle Gansu Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(7): 1274-1285. (in Chinese)
- [37] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 423-430.
LU Jianwu, QIU Huizhen, ZHANG Wenming, et al. Characteristics of dry matter and potassium accumulation and distribution in potato plant in semi-arid rainfed areas[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 423-430. (in Chinese)
- [38] 王耀, 孙小娟. 不同种植模式下施肥对马铃薯产量和水肥利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(2): 203-212.
WANG Yao, SUN Xiaojuan. Effects of fertilization on tuber yield, water and fertilizer use efficiency under different rainfall harvesting planting modes of potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(2): 203-212. (in Chinese)
- [39] 马振勇, 杜虎林, 刘荣国, 等. 施锌肥对马铃薯干物质积累、生理特性及块茎营养品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 148-153.
MA Zhenyong, DU Hulin, LIU Rongguo, et al. Effects of zinc fertilizer on potato dry matter accumulation, physiological characteristics, and tubers nutritional quality[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(1): 148-153. (in Chinese)
- [40] 夏锦慧. 马铃薯干物质积累及氮、磷、钾营养特征研究[J]. 长江蔬菜, 2008(20): 34-37.
XIA Jinhui. Analysis of dry matter accumulation and nitrogen, phosphorus, potassium nutrition characteristics of potato cultivar hui-2[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2008(20): 34-37. (in Chinese)
- [41] 宋碧, 张军, 李斌. 稻田免耕栽培马铃薯干物质积累与分配规律研究[J]. 江苏农业科学, 2009(1): 86-88.
- [42] 孙磊, 王弘, 李明月, 等. 氮磷钾肥施用量及施用时期对马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. 作物杂志, 2014(1): 132-137.
SUN Lei, WANG Hong, LI Mingyue, et al. Effects of NPK application rate and time on dry matter accumulation and distribution of potato[J]. Crops, 2014(1): 132-137. (in Chinese)
- [43] 孙磊, 邵枫, 张亮, 等. 不同氮肥配施对马铃薯块茎形成及发育的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(6): 32-39.

- SUN Lei, TAI Feng, ZHANG Liang, et al. Effect of different nitrogen fertilizer combinations on formation and development of potato tuber[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(6): 32–39. (in Chinese)
- [44] 张婷婷, 蒙美莲, 陈有君, 等. 氮素水平对马铃薯干物质积累及库活性的影响[J]. *中国马铃薯*, 2015, 29(2): 75–79.
ZHANG Tingting, MENG Meilian, CHEN Youjun, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and sink activity of potato[J]. *Chinese Potato Journal*, 2015, 29(2): 75–79. (in Chinese)
- [45] 胡新元, 罗爱花, 陆立银, 等. 马铃薯 LK99 干物质及养分累积规律研究[J]. *长江蔬菜*, 2014(6): 36–40.
HU Xinyuan, LUO Aihua, LU Liyin, et al. Study on dry matter accumulation and nutrient uptake of mid-early maturing potato LK99[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2014(6): 36–40. (in Chinese)
- [46] 常伟, 陆立银, 罗爱花, 等. 高寒阴湿区马铃薯干物质积累与分配规律研究[J]. *农业科技通讯*, 2015(8): 84–87.
- [47] 张荣. 高寒旱区马铃薯干物质积累与分配规律研究[J]. *现代农业科技*, 2011(3): 109, 111.
ZHANG Rong. Study on dry matter accumulation and distribution of potato in alpine-cold arid region[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(3): 109, 111. (in Chinese)
- [48] 杨平, 陈昱利, 巩法江, 等. 不同栽培方式对马铃薯干物质积累、分配及转运的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(8): 13–18.
YANG Ping, CHEN Yuli, GONG Fajiang, et al. Effects of different cultivation methods on accumulation, distribution and transport of dry matter in potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(8): 13–18. (in Chinese)
- [49] 吴炫柯, 廖媛章, 梁春荣, 等. 马铃薯不同播种期的气象因子同产量的相关性分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(4): 1667–1671.
WU Xuanke, LIAO Yuanzhang, LIANG Chunrong, et al. Correlated analysis of meteorological factors and yield of potato in different sowing dates[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(4): 1667–1671. (in Chinese)
- [50] SARA M, DENNIS B E, SUSANNE R, et al. Modelling cropping periods of grain crops at the global scale[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174(1): 35–46.
- [51] DE WIT A, BOOGAARD H, VAN DIEPEN K, et al. Wofost developer's response to article by Stella et al. *Environmental Modelling and Software* 59 (2014)[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2015, 73: 57–59.
- [52] HE D, WANG E, WANG J, et al. Genotype × environment × management interactions of canola across China: a simulation study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247(1): 424–433.
- [53] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 267–288.
- [54] HSIAO T C, HENG L, STEDUTO P, et al. Aquacrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 448–459.
- [55] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3–4): 235–265.
- [56] CHALLINOR A J, WHEELER T R, CRAUFURD P Q, et al. Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124(1): 99–120.
- [57] OSBORNE T, GOMALL J, HOOKER J, et al. JULES-crop: a parametrisation of crops in the Joint UK Land Environment Simulator[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(4): 1139–1155.
- [58] BRISSON N, GARY C, JUSTES E, et al. An overview of the crop model STICS[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3–4): 309–332.
- [59] EITZINGER J, TRNKA M, HOSCH J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 171(3): 223–246.
- [60] VAN DIEPEN C V, WOLF J, VAN KEULEN H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use Manag*, 1989, 5(1): 16–24.
- [61] WANG N, WANG J, WANG E, et al. Increased uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 19–33.
- [62] RUANE A C, HUDSON N I, ASSENG S, et al. Multi-wheat-model ensemble responses to interannual climate variability[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016, 81: 86–101.
- [63] 孙金英, 曹宏鑫, 焦玉光, 等. 9 个品种(系)冬小麦籽粒灌浆特性分析[J]. *大麦与谷类科学*, 2016, 33(4): 19–22.
SUN Jinying, CAO Hongxin, JIAO Yuguang, et al. Analysis on grain filling characteristics of nine winter wheat varieties (lines)[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2016, 33(4): 19–22. (in Chinese)
- [64] 陈艳玲, 顾晓鹤, 董燕生, 等. 利用有效积温提高冬小麦估产精度的研究[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(8): 1130–1135.
CHEN Yanling, GU Xiaohu, DONG Yansheng, et al. Prediction of winter wheat yield based on remote sensing with accumulated temperature[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(8): 1130–1135. (in Chinese)
- [65] 康西言, 董航宇, 姚树然. 基于气象因子的冬小麦发育期预报模型[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 465–471.
KANG Xiyan, DONG Hangyu, YAO Shuran. Prediction model of winter wheat development stages based on meteorological factors[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 465–471. (in Chinese)