

文章编号:1000-8551(2019)08-1647-11

基于 SOLANUM 模型的甘肃中东部马铃薯潜在产量研究

王瀚^{1,2} 秦军红³ 毕真真^{1,2} 孙超^{1,2} 李鑫^{1,2}
李亚杰⁴ 张俊莲¹ 白江平^{1,2,*}

(¹甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室/甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070; ²甘肃农业大学农学院/甘肃省作物逆境种质创新与利用工程研究中心,甘肃 兰州 730070; ³中国农业科学院蔬菜花卉研究所/农业农村部薯类作物生物学与遗传育种重点实验室,北京 100081; ⁴定西市农业科学研究院,甘肃 定西 743000)

摘要:为探究马铃薯专用生长模拟模型 SOLANUM 对甘肃省中东部马铃薯产量预测的适用性,并分析该地区主要气候因子对马铃薯产能差的影响。本试验以 3 个马铃薯基因型为参试材料,利用 SOLANUM 模型计算并校准甘肃省天水市和定西市马铃薯模型参数,并对 SOLANUM 模型进行统计学的模型评价。结果表明,SOLANUM 模型在甘肃省适用性评价中,产量和冠层覆盖度模拟结果相对均方根误差(RRMSE)均在 16%~76.2%之间,模型效应系数(EF)在 0.068~0.805 之间。相关性分析表明,产能差变化与太阳辐射变化相关系数为 0.8,与年降雨量变化相关系数为 0.71;潜在产量与年降雨量相关系数为 0.92,与太阳辐射相关系数为 0.78;实际产量与年降雨量相关系数为 0.89,与太阳辐射相关系数为 0.68。综上,SOLANUM 模型对甘肃省中东部地区马铃薯潜在产量和冠层覆盖度模拟具有适用性,但还需对马铃薯生长发育和生育期长短的估算进行深入研究,从而提高模型模拟精度和适用性。为缩小产能差,甘肃省应选择晚熟抗旱马铃薯品种种植。本研究结果为补充 SOLANUM 模型模拟精度和提高甘肃省马铃薯潜在产量提供了决策依据。

关键词:马铃薯; SOLANUM 模型; 模型评价; 产能差; 气候因子

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.08.1647

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是世界第四大粮食作物,其人均消费量不断增加^[1]。2015年,我国提出马铃薯主粮化发展战略,以挖掘马铃薯生产潜力,开辟保障国家粮食安全新途径^[2]。气候及病虫害是影响我国乃至全球马铃薯产量的主要因素^[3],如何在一定气候条件下合理的综合利用基因型遗传因素与田间管理模式使马铃薯达到高产优质的目的,是当前马铃薯生产面临的主要问题。研究发现作物模型可以通过创造虚拟基因型来探索产量与基因型和环境之间的关系^[4-6]。前人利用 LINTUL(light interception and utilization)模型对马铃薯潜在产量进行模拟,预测 2070 年全球马铃薯潜在产量会因全球气候变化减少 9%~32%^[7-8]。利用作物生长模型研究气候变化对作物的影响,以辅助鉴定、

评估作物适应环境的潜在特征,制定相应的对策,用于各种农作物的管理^[9-10],从而增加作物产量,是作物种植管理决策现代化的基础。

1993年,Evans^[11]定义了作物的潜在产量,并于 1999 年对该概念进行了补充说明。作物的潜在产量是指作物生长环境中的营养和水分不受任何限制,病、虫、杂草、倒伏等不利因素得到有效控制,栽培和生产管理水平均处于最佳条件下可能达到的最大产量^[12]。由此可见,作物的潜在产量理论上仅受基因型特性及生长环境气象条件的影响,而实际产量则受多种因素的影响,二者间存在的差异较大,这种差异被定义为产能差^[13]。通过改善作物的产量限制因子来提高作物的产量,缩小产能差,尽可能提高作物的经济系数,是

收稿日期:2018-12-18 接受日期:2019-02-24

基金项目:国家自然科学基金(31660432、31460369),国家马铃薯产业技术体系(CARS-10-P18),实验室开放基金(GSCS-2016-04)

作者简介:王瀚,男,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:1148991984@qq.com

* 通讯作者:白江平,男,教授,主要从事作物遗传育种研究。E-mail: baijp@gsau.edu.cn

解决因人口增长导致资源匮乏的措施之一^[14]。

SOLANUM 模型是 Condori 等^[15]通过对 LINTUL-potato 模型进行优化而得到的,可用于模拟不同马铃薯品种块茎干物质同化作用。该模型的生长参数与辐射使用效率和生长环境的气候条件有关,可以准确模拟潜在产量、水分限制、氮素限制和霜冻条件下,马铃薯光截获产生的生物量、块茎鲜重和冠层覆盖度的动态生长。此外,其他马铃薯生长模型,如 APSIM-Potato 模型,是通过土壤条件、管理条件、气候条件等模拟预测马铃薯产量^[16];SUBSTOR-potato 模型是通过计算叶片光合作用、马铃薯根茎叶的生物量形成、植株水分利用率模拟马铃薯产量^[17]。相比较而言,SOLANUM 模型获取所需数据更为简单方便,因此被认为是具有高预测能力的单一型模型^[18]。王颖等^[19]将 SOLANUM 模型与 FAO 农业生态区域法的光温潜力模型模拟的马铃薯潜在产量进行比较,发现采用 SOLANUM 模型预测云贵高原马铃薯潜在产量是可行的。然而,甘肃

中东部环境条件下,SOLANUM 模型在马铃薯潜在产量及适用性研究中的应用尚鲜见报道。本试验结合甘肃省定西市和天水市气象因子和当地马铃薯生长参数,探讨 SOLANUM 模型模拟甘肃省马铃薯产量和冠层覆盖度的能力及其适用性,并利用验证后的模型分析潜在产量、实际产量和产能差与气候因子的关系,旨在明确影响产能差的主要因素,为马铃薯生产决策系统的开发与应用提供理论基础,同时为农业可持续发展和精准农业提供科学工具。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以生理成熟期差异较大,在甘肃省中东部地区(定西市和天水市)广泛种植的 3 个马铃薯品种为参试材料(表 1)。其中定西试验点种植新大坪品种,天水试验点种植农天 1 号和青薯 9 号品种。

表 1 供试材料信息

Table 1 Information of test material

品种 Varieties	特点 Characteristics	熟期 Physiological maturity	来源 Sources
新大坪 XDP	薯块椭圆形,白白肉,表皮光滑,芽眼较浅且少	中晚熟(115 d 左右)	甘肃省定西市安定区农业科学研究院
青薯 9 号 QS9	薯块椭圆形,表皮红色,有网纹,薯肉黄色,芽眼较浅	中晚熟(125 d 左右)	甘肃省天水市秦州区农业科学研究所
农天 1 号 NT1	薯块圆型,薯皮光滑、淡黄色,薯肉淡黄,芽眼少而浅	晚熟(130 d 左右)	甘肃省天水市秦州区农业科学研究所

Note: XDP: Xindaping. NT1: Nongtian No.1. QS9: Qingshu No.9. The same as following.

1.2 试验地概况

试验于 2014–2017 年在甘肃省天水市农业科学研究所和定西市农业科学研究院进行。天水市农业科学研究所位于天水市中梁镇(34°36'N, 105°38'E),海

拔 1 602 m,年蒸发量 1 271.2 mm,年日照时数 2 100 h;定西市农业科学院位于定西市安定区(35°56'N, 104°59'E),海拔 1 915 m,年蒸发量 1 540 mm,年日照时数 2 453 h。试验地土壤养分如表 2 所示。

表 2 试验地 0~30 cm 土层土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient content in 0~30 cm soil layer of experimental site

地点 Site	年份 Year	pH 值 pH value	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 NaOH-N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Olsen-K /(mg·kg ⁻¹)
天水 Tianshui	2014	8.23	15.24	0.75	65.2	27	120
	2015	8.12	15.46	0.64	70.5	28	118
	2016	8.02	16.58	0.54	62.5	24	108
	2017	8.09	20.05	0.61	59.2	21	79
定西 Dingxi	2014	8.1	20.9	0.65	69.0	12	114
	2015	8.05	18.2	0.58	72.2	13.21	132
	2016	8.02	20.1	0.59	63.2	14.52	142
	2017	7.81	19.6	0.62	70.5	15.32	135

1.3 试验设计

采用随机区组设计,3次重复。每个品种每个重复6个小区,各小区间距离1.0 m,小区面积为5.4 m² (3.6 m×1.5 m),每小区种植4垄马铃薯,垄上覆膜,株距30 cm,行距90 cm,即每垄种植5株。每次取样取任意一个小区中间6株。2014–2017年播种时间均为该年4月28日,收获时间为9月10日左右。

播种前,基施复合肥750 kg·hm⁻² (N:P₂O₅:K₂O=15:15:15,总养分≥45%,史丹利化肥定西有限公司生产)和尿素225 kg·hm⁻²后进行起垄并全覆膜,同时在垄沟内膜上打孔保证水分渗入膜下土壤,全生育期不再灌水和施肥,其他管理同一般大田。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 出苗率 播种后20 d开始统计小区出苗株数,每5 d一次,待不再有幼苗露出地面时停止统计,按照公式^[20]计算出苗率(emergence rate, ER):

$$ER = \text{出苗的株数} / \text{总株数} \times 100\% \quad (1)$$

1.4.2 冠层覆盖度 采用图像分析法^[19]测定冠层覆盖度(canopy cover, CC, %):利用数码相机(具有蓝牙和无线功能,无变焦和闪光,并调至最大像素,镜头焦距约50 mm)及有刻度的直尺分别于播种后40、55、70、85、100、115 d对马铃薯冠层进行照相记录,每小区照3次(每个品种照54次)。拍摄时相机镜头距马铃薯主茎第一花序分枝处高度为80 cm,以保证不同时期所得照片中都有2株植株,然后运用Siscob冠层覆盖度计算软件对照片进行计算分析,得到种植后40、55、70、85、100、115 d时的冠层覆盖度。

1.4.3 产量 分别于播种后40、55、70、85、100、115 d进行产量测定。每次每小区选取中间两行,每行取中间3株进行测定,播种后130 d对剩余所有植株进行测产,统计块茎数量并称重,按照公式折算产量(t·hm⁻²):

$$\text{产量} = PD \times ER \times TFW / 1000 \times 15 \quad (2)$$

式中,PD (planting density):种植密度,株·m⁻²; TFW (tuber fresh weight):单株块茎鲜重,kg。

1.4.4 干物质含量 分别于播种后40、55、70、85、100、115 d每小区取6株的块茎称量鲜重(fresh weight, FW),然后80℃烘干至恒重并称量干重(dry weight, DW)。按照公式^[20]计算块茎干物质含量(dry matter content of tubers, DMCT):

$$DMCT = DW / FW \times 100\% \quad (3)$$

将第115天采集的样品整株称量鲜重,80℃烘干至恒重并称量干重,按照公式计算植株总干物质含量(dry matter content of plant, DMCP):

$$DMCP = DW / FW \times 100\% \quad (4)$$

1.4.5 收获指数 收获指数(harvest index, HI)为第115天测产的块茎干物质含量(DMCT)与植株总干物质含量(DMCP)的比值,公式如下:

$$HI = DMCT / DMCP \quad (5)$$

1.4.6 气象数据 本试验中所用气象数据,如逐日太阳辐射(MJ·m⁻²)、日最高温度(℃)、最低温度(℃)和降雨量(mm)均来自于安装在试验地的Portlog便携式气象仪(美国RainWise公司),所有数据采集时间间隔为30 min。

1.4.7 光合辐射利用率 光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR, mol·m⁻²·s⁻¹)按照总光合辐射的50%计算。按照公式^[19]计算光合辐射截获量(intercepted photosynthetically active radiation, IPAR, mol·m⁻²·s⁻¹):

$$IPAR = \sum_{d=1}^H PAR \times 0.5 \times CC \quad (6)$$

分析IPAR与马铃薯总生物量的线性关系,斜率即为光合辐射利用率(radiation use efficiency, RUE, g·DM·MJ⁻¹·PAR)。

1.4.8 作物品种遗传参数数据库的建立 首先利用生育期内每天的太阳辐射量(MJ·m⁻²)、最高气温(maximum temperature, TMAX)、最低气温(minimum temperature, TMIN)和降雨量(mm)建立SOLANUM模型气象数据库(climate database),将气象数据由该模型的输入-气候模块导入,其中,光照时间可由模型气候变量计算模块根据试验地经纬度来计算。然后将田间调查的观测值如最大冠层覆盖度指数及相对应播种后天数、生理成熟所需天数、收获指数、出苗天数、冠层覆盖度达到最大值50%时的天数、光周期敏感指数和光周期临界指数等输入模型的工具-参数计算模块。通过气候模块和参数计算模块可计算出品种遗传参数,包括冠层覆盖度增长率达到最大时的积温(thermal time at the maximum canopy cover growth rate, Tm)、冠层覆盖度达到最大值时的积温(thermal time at maximum canopy cover, Te)、块茎生长率达到最大时的积温(thermal time at maximum tuber partition rate, Tu)、块茎开始生长的积温(thermal time just before the tuber initiation process, b)、最大收获指数(maximum harvest index, A)和最大冠层覆盖指数(maximum canopy cover index, Wmax),并建立该马铃薯品种数据库,即可进一步模拟潜在产量和冠层覆盖度。

1.4.9 品种遗传参数的校准 模型遗传参数的校准过程就是缩小试验实测值与SOLANUM模型对应遗传参数下模拟的数值之间的差异。本研究采用试错

法^[21]对 SOLANUM 模型进行调参,即使用 2014–2015 年数据进行调参,2016–2017 年数据进行验证,并采用“迭代过程”^[22]调整遗传参数以减少实测值与模拟值之间的差异,从而计算出品种对应的参数(表 3)。在参数校准的过程中,输入不同 RUE, SOLANUM 模型多次模拟得到的潜在产量并无显著差异,这与 Condori 等^[15]的研究结果一致。本试验参照 Kooman 等^[8]报道的 RUE 取值范围 2.47~2.74 g·DM·MJ⁻¹·PAR,取 RUE 为 2.5 g·DM·MJ⁻¹·PAR 进行模拟。

表 3 SOLANUM 模型的参数

Table 3 Parameters of the SOLANUM model / (°C·d)

品种 Variety	参数 Parameters			
	T _m	T _e	T _u	b
新大坪 XDP	356	936	623	194
农天 1 号 NT1	449	1 139	769	231
青薯 9 号 QS9	454	1 100	754	217

1.4.10 潜在产量和冠层覆盖度的模拟 确定品种的遗传参数后,在输入模块导入对应的气象数据和田间数据,点击模拟模块进行模拟,模拟结果由报告模块显示,同时点击该模块下的模型评估功能,对模拟值和观测值进行统计学评估,进而对模型进行整体评价。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2013 进行数据输入、整理; SigmaPlot v12.5 进行实测数据拟合; Origin 2017 作图; Solanum v3.05 软件进行潜在产量和冠层覆盖度的计算; 产能差和气候因子的变化采用“逐年作差法”^[23]计算,即不同年份对应的气候因子和产能差相减为其变化值; R 3.5.0 进行可视化相关性分析。

1.6 模型的评价标准

SOLANUM 模型的验证主要是根据马铃薯产量、冠层覆盖度模拟值和实测值的动态变化和最终产量来评价,均方根误差 (root mean squared error, RMSE)^[24–25]用于衡量模拟值与观测值之间偏差的指标,其值越趋近于 0,表示模型模拟值与实测值离散程度越小,即模拟度越高, RMSE 计算公式^[24]如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - S_i)^2} \quad (7)$$

式中, N : 观察值的个数; S_i 和 R_i 分别表示第 i 个模拟值和观测值。

Singh 等^[26]对 RMSE 进行归一化,用均方根误差 RMSE 除以实测值的平均数计算相对均方根误差 (relative root mean square error, RRMSE), RRMSE 表示 RMSE 或者残差的变化为 0。RRMSE 归一化后能更直

观的反映模拟程度,其最优值为 0。因此,通常 RMSE 和 RRMSE 值越低,一致性越好^[27], RRMSE 计算公式如下:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - S_i)^2}}{\bar{R}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, \bar{R} : 实测值的平均值。

Nash 等^[28]提出的纳什效率系数 (nash-sutcliffe efficiency, NSE) 是剩余方差与实测值方差之比的标准统计方法,也是用于评估模型模拟性能的工具。Condori 等^[15]在 SOLANUM 模型中将 NSE 命名为模型效应系数 (forecasting efficiency, EF), 并解释为参数化模型在试验农业生态环境下对不同基因型生长模拟的适用性,其值大小在 $-\infty \sim 1$ 之间, 1 为最优值, 介于 0~1 之间被认为是模拟性能可接受的范围, 当 EF 小于 0 时, 表示观测值比模拟值大, 模型不可用, EF 越接近 1, 模型模拟的性能越好^[29], 模型在该地区生态环境下的适用性越高。EF 计算公式如下:

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \right] \quad (9)$$

2 结果与分析

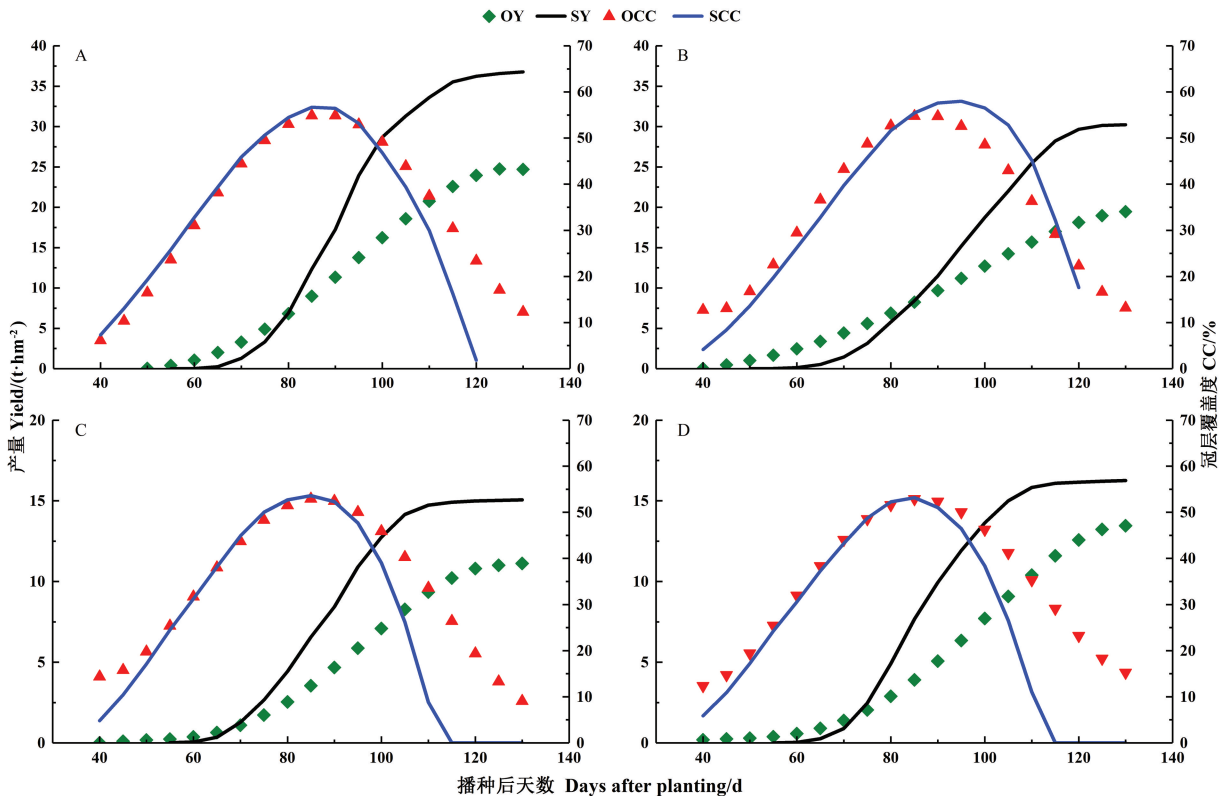
2.1 模型的模拟性能评价

由表 4 可知, 新大坪 2014–2015 调参年份产量模拟模型评价的 EF 分别为 0.076、0.068, RRMSE 分别为 71.8%、69.1%, 其 2016–2017 验证年份模型的 EF 分别为 0.306、0.464, RRMSE 分别为 73.4%、65.2%; 对冠层覆盖度模拟评价中, 其 2014–2015 调参年份模型的 EF 分别为 0.737、0.805, RRMSE 分别为 22.5%、18.8%, 2016–2017 验证年份模型的 EF 分别为 0.372、0.138, RRMSE 分别为 32.9%、35.6%。由图 1 可知, 新大坪在播种后 40~50 d 之间块茎开始膨大, 而 SOLANUM 模型模拟结果显示块茎开始膨大是在播种后 60 d 左右, 且模拟的块茎膨大速率明显高于实测值。此外, 2016 年, 在播种后 110 d 新大坪冠层覆盖度模拟值为 8.80%, 而实测值为 33.55%, 130 d 时实测值为 9.04%, 而模拟值为 0, 说明在播种后 110~130 d 冠层覆盖度模拟值与实测值之间差异较大, 导致 2016 年冠层覆盖度的模拟性能变差。2017 年, 播种后 100 d 冠层覆盖度模拟值与实测值差距逐渐增大, 且在 130 d

表 4 2014–2017 年模型的统计评价

Table 4 Statistical evaluation for model simulation from 2014 to 2017

品种 Variety	年份 Year	产量模拟评价 Evaluation for yield simulation			冠层覆盖度模拟评价 Evaluation for canopy cover simulation		
		RMSE/(t·hm ⁻²)	RRMSE/%	EF	RMSE/%	RRMSE/%	EF
		新大坪 XDP	2014	8.510	71.8	0.076	0.080
	2015	6.207	69.1	0.068	0.066	18.8	0.805
	2016	3.442	73.4	0.306	0.113	32.9	0.372
	2017	3.466	65.2	0.464	0.125	35.6	0.138
农天 1 号 NT1	2014	7.174	59.4	0.243	0.083	21.4	0.775
	2015	7.404	50.0	0.457	0.189	37.5	0.137
	2016	6.710	76.2	0.087	0.088	16.7	0.864
	2017	2.483	29.9	0.813	0.077	16.0	0.887
青薯 9 号 QS9	2014	7.309	72.7	0.149	0.104	22.4	0.722
	2015	6.573	38.3	0.690	0.224	54.6	0.128
	2016	5.546	54.4	0.598	0.154	25.1	0.597
	2017	4.353	61.2	0.440	0.140	23.4	0.684



注: OY: 实测产量; SY: 模拟产量; OCC: 实测冠层覆盖度; SCC: 模拟冠层覆盖度。A: 2014 年; B: 2015 年; C: 2016 年; D: 2017 年。下同。

Note: OY: Observed yield. SY: Simulation yield. OCC: Observed canopy cover. SCC: Simulation canopy cover.

A: 2014 years. B: 2015 years. C: 2016 years. D: 2017 years. The same as following.

图 1 2014–2017 年新大坪产量和冠层覆盖度动态变化

Fig.1 Dynamic changes in yield and canopy cover of Xindaping from 2014 to 2017

时差异最大,分别是 15.26% 和 0,表明 SOLANUM 模型对新大坪冠层覆盖度的模拟在生育后期与实测值的差距较大,低估了其生育期时长。

由表 4 可知,SOLANUM 模型对农天 1 号产量的模拟模型评价中,2014–2015 调参年份模型的 EF 分别为 0.243、0.457,RRMSE 分别为 59.4%、50.0%;2016–2017 验证年份模型的 EF 分别为 0.087、0.813,RRMSE 分别为 76.2%、29.9%。对冠层覆盖度的模拟模型评价中,2014–2015 调参年份模型的 EF 分别为

0.775、0.137,RRMSE 分别为 21.4%、37.5%;2016–2017 验证年份模型对冠层覆盖度的模拟性能较好,模型的 EF 分别为 0.864、0.887,RRMSE 为 16.7%、16.0%。由图 2 可知,在 2016 年,SOLANUM 模型模拟的块茎开始膨大时间为播种后 80 d 左右,这与实际播种后 40 d 开始膨大相比存在明显差异。2017 年收获时产量实测值为 $17.930 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与模拟值 $20.176 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 接近,表明 2017 年的产量模拟性能最优。

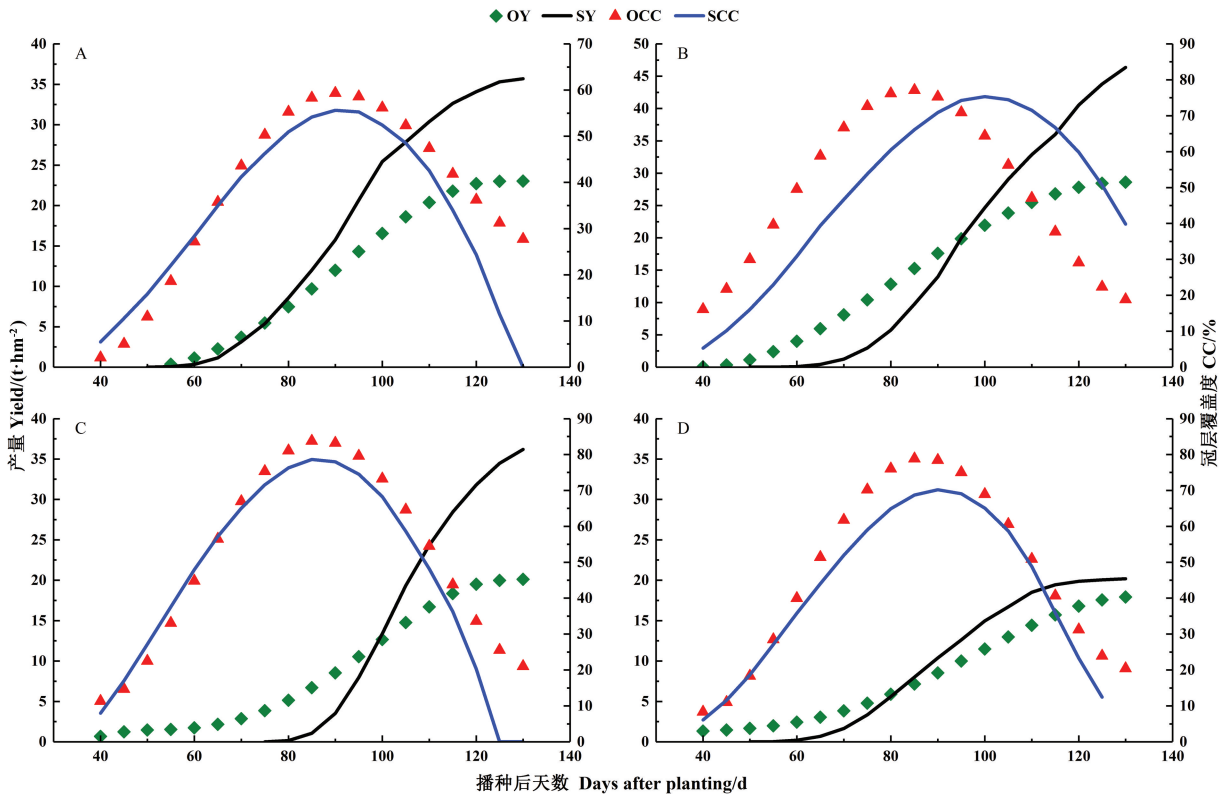


图 2 2014–2017 农天 1 号产量及冠层覆盖度动态变化

Fig.2 Dynamic changes in yield and canopy cover of Nongtian No.1 from 2014 to 2017

由表 4 可知,青薯 9 号 2014–2015 调参年份产量模拟模型评价的产量 EF 分别为 0.149、0.690,RRMSE 分别为 72.7%、38.3%;2016–2017 验证年份模型的 EF 分别为 0.598、0.440,RRMSE 分别为 54.4%、61.2%。对冠层覆盖度的模拟模型评价中,2014–2015 调参年份模型的 EF 分别为 0.722、0.128,RRMSE 分别为 22.4%、54.6%,2016–2017 验证年份模型的 EF 分别为 0.597、0.684,RRMSE 分别为 25.1%、23.4%。由图 3 可知,2015 年冠层覆盖度实测值在播种后 85 d 达到最大值(72.5%),而模拟值在 97 d 时达到最大值,为 72.0%,播种后 130 d 生理成熟期时,实测值为 1.6%,而模拟值为 25.4%。由于 SOLANUM 模型对

2015 年青薯 9 号冠层覆盖度最大值的模拟时期推迟,导致其模拟性能最差。

2.2 潜在产量、实测值和产能差与气候环境的相关性分析

由图 4 可知,定西和天水的年平均温度、年平均最高温度和年平均最低温度 4 年内变化不明显,而太阳辐射量和降雨量的波动均较大,2017 年定西和天水的太阳辐射量均达到 4 年来最低值,分别为 10.306 、 $7.414 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

气候逐渐恶劣严重影响了马铃薯的生长,进而导致其产能差变化越来越大。由图 5-A 可知,产能差变化(yield gap, ΔYG)与太阳辐射量的变化(ΔR)、降雨

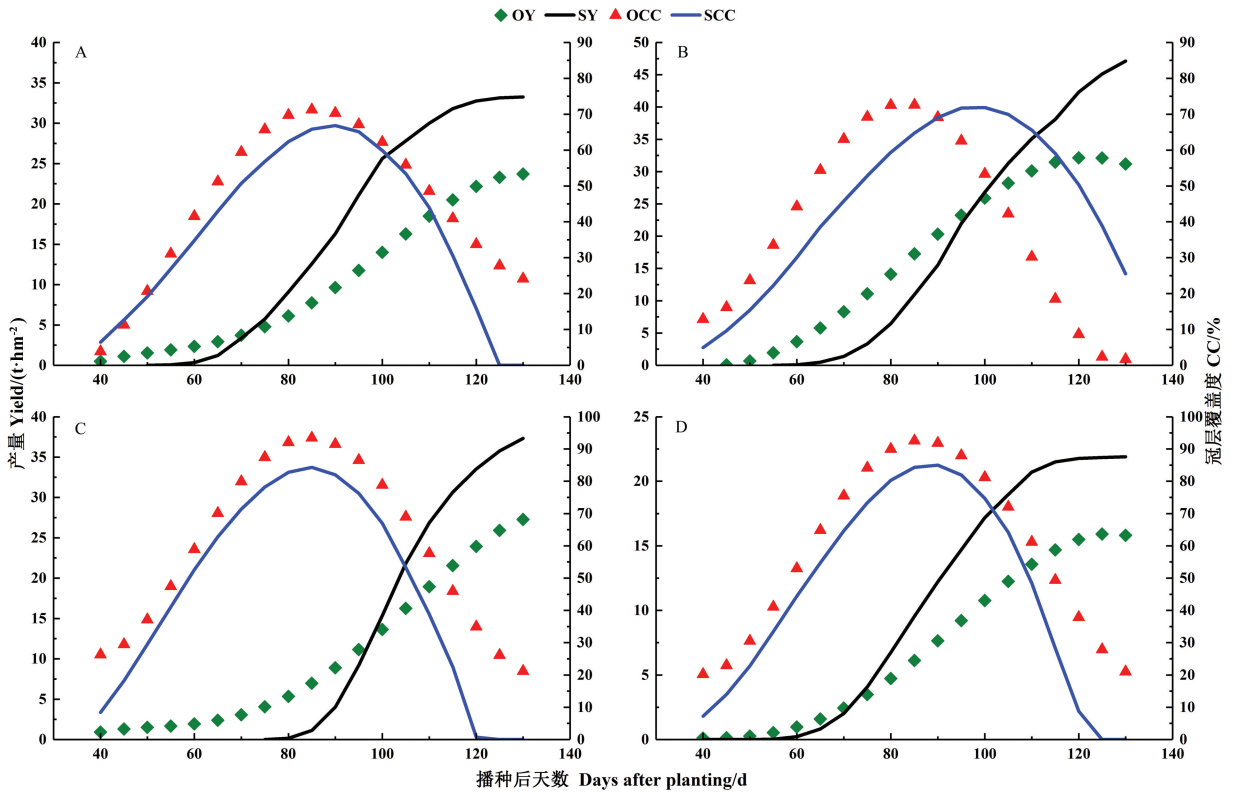


图3 2014–2017 青薯9号块茎及冠层覆盖度动态变化

Fig.3 Dynamic changes in yield and canopy cover of Qingshu No.9 from 2014 to 2017

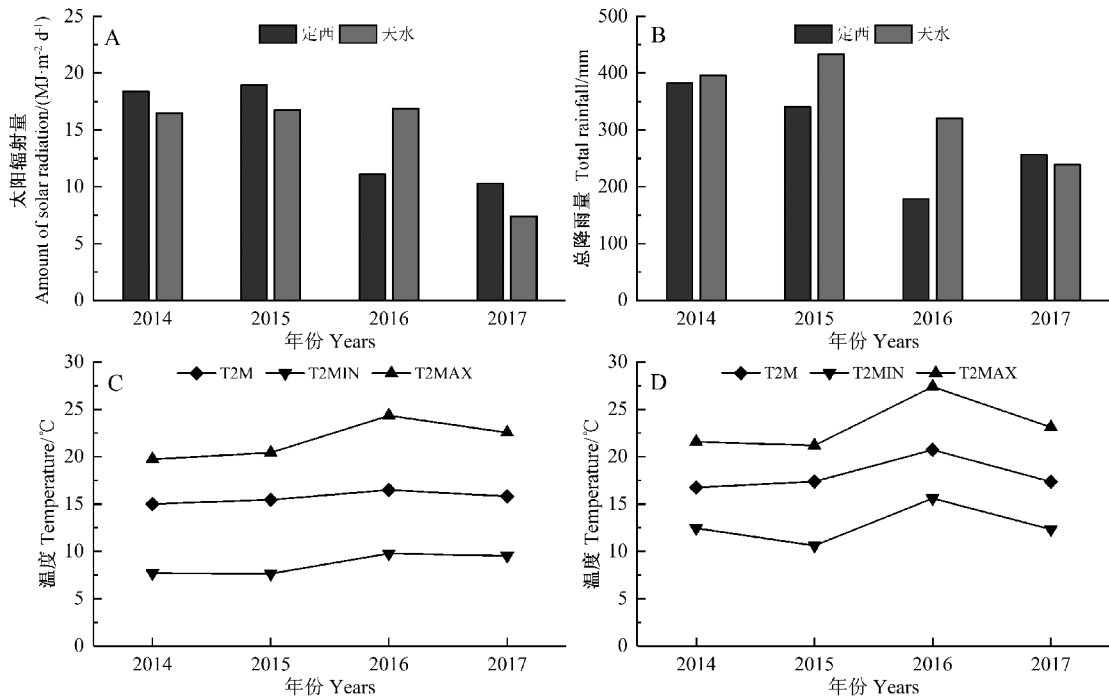
量变化(Δ RAIN)均呈显著正相关,相关系数分别为0.8和0.71,说明太阳辐射量的变化是导致产能差变化的最主要气候因子。即太阳辐射量的变化越大,产能差的变化也就越大,即潜在产量和实际产量的差值在变大。由图5-B可知,年降雨量(RAIN)和太阳辐射量(R)与甘肃省马铃薯潜在产量(potential yield, PY)、实际产量(OY)呈显著正相关,尤其是年降雨量对甘肃马铃薯产量的限制最为明显,年降雨量与潜在产量的相关系数为0.92,与实际产量的相关系数为0.89;其次是太阳辐射量对产量的影响,与潜在产量相关系数为0.78,与实际产量相关系数为0.68。

3 讨论

从 SOLANUM 模型模拟的潜在产量和冠层覆盖度的统计学意义来看,本研究中模型效应系数 EF 均在 0~1 之间,表明模型适用于对甘肃马铃薯潜在产量的预测,这与 Quiroz 等^[18]的研究结论一致,说明 SOLANUM 模型是与其他复杂模型相比具有更高预测度的单一型马铃薯预测模型。Condori 等^[30]利用 SOLANUM 模型对种植于安第斯山脉的 4 种马铃薯基因型(*Alpha*, *Gendarme*, *Ajanhuiri*, *Luki*)进行模型验证,

发现产量模拟的 EF 依次为 0.96、0.98、0.95 和 0.89,说明 4 种基因型在安第斯山脉种植的环境下,模型的适应性好。而本研究中, SOLANUM 模型对产量和冠层覆盖度模拟模型评价中,同一基因型马铃薯在同一生态环境下模型的 EF 均小于 0.805,此外,通过模拟值与实测值的动态监测发现, SOLANUM 模型高估了甘肃省中东部马铃薯块茎的生长速率,且低估了马铃薯生育期时长,导致对冠层覆盖度的模拟在生育后期与实测值有较大的差异,表明 SOLANUM 模型对甘肃省马铃薯潜在产量和冠层覆盖度的模拟还需进一步改进,这可能是由于模型算法是基于南美洲安第斯山脉气候条件和当地品种特性,模型计算马铃薯块茎的生长速率和生育期长短没有考虑到试验地的具体情况,导致存在一定的模拟误差。在今后研究中,将对模型开源文件中块茎生长速率和生育期估算方法进行改进,以增强其在甘肃省中东部地区的适用性。

SOLANUM 模型在进行模拟前,基因型所对应的品种遗传参数是确定的,因此在进行模拟的过程中,潜在产量的提高仅与该基因型在田间种植的密度、HI、RUE 和最大冠层覆盖度等指标有关。其中,HI 是作物生产效率的表现,也是农艺性状中最重要的变量^[31], Tourneux 等^[32]认为 HI 与块茎的产量显著相关,且在



注:A;定西和天水太阳辐射;B;定西和天水年总降雨量;C;定西 2014–2017 温度变化;D;天水 2014–2017 温度变化。

T2M;年平均温度;T2MIN;年平均最低温度;T2MAX;年平均最高温度。下同。

Note:A; Dingxi and Tianshui solar radiation value. B: Total annual rainfall of Dingxi and Tianshui. C: Temperature change of Dingxi 2014–2017. D: Temperature change of Tianshui 2014–2017. T2M; Annual average temperature. T2MIN; Annual average minimum temperature. T2MAX; Annual average maximum temperature. The same as following.

图 4 2014–2017 定西和天水各气候因子变化

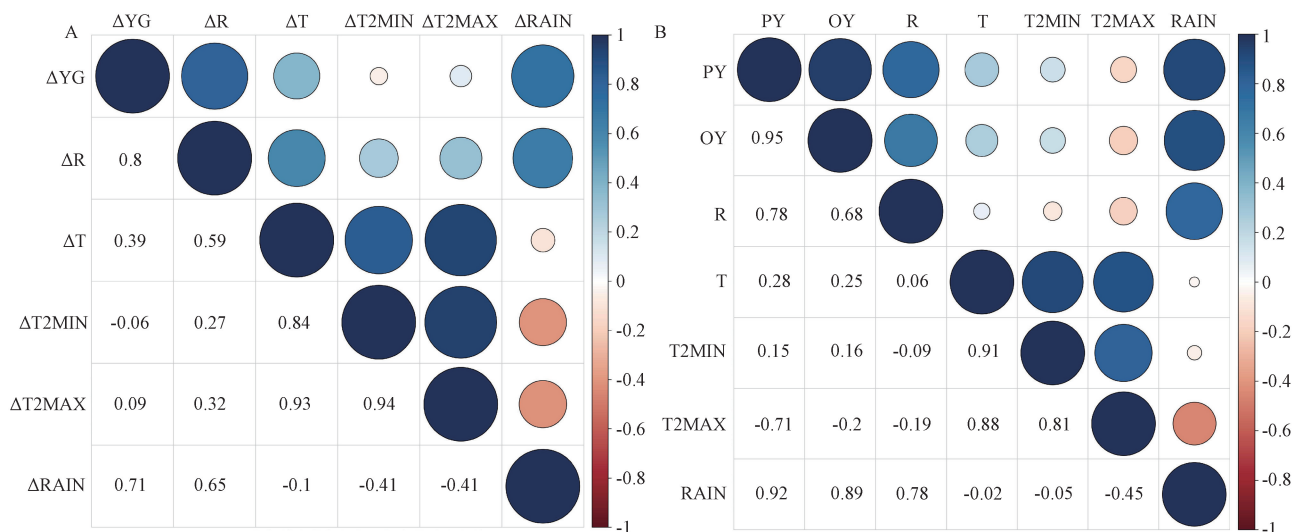
Fig.4 Change of climate factors in Dingxi and Tianshui from 2014 to 2017

受到干旱胁迫后 HI 会发生较大变化,继而影响产量。目前,全球对马铃薯潜在产量的研究已有大量报道,所运用的模型种类也相对较多。Ng 等^[33]采用 SUCROS 模型利用冠层覆盖度、光合作用和干物质分配原理来计算潜在产量;Van 等^[34]利用水分和土壤对产量的影响,更加准确的来模拟潜在产量;Kooman 等^[8]对 LINTUL-POTATO 模型进行校准优化后利用 LINTUL-POTATO-DSS 模型来预测潜在产量。Quiroz 等^[18]对种植于秘鲁胡宁的马铃薯产量分别利用 DCPM 模型和 SOLANUM 模型进行模拟,发现依赖生理数据的复杂模型 DCPM 与依赖遥感数据的简单模型 SOLANUM 的模拟结果无显著差异,突出体现了遥感数据的实用性,且在不需要生理数据的背景下,可以得到作物模型所需的关键参数,从而准确预测出马铃薯潜在产量。本研究对产能差的变化与气候因子变化进行相关性分析,发现年平均太阳辐射量变化越大,产能差的变化越大,即潜在产量和实际产量的差值越大,说明影响产能差变化的主要因素是太阳辐射量的变化,这与王颖等^[19]的研究结论一致。此外,本研究还发现降雨量与

潜在产量和实际产量存在较强的相关性,说明甘肃地区种植的马铃薯仍受干旱胁迫的影响,降雨量是限制甘肃马铃薯提高产量的主要因素之一。因此,甘肃马铃薯品种的选育不仅要考虑抗旱性,还需有较高光能利用率的品种。在马铃薯主粮化发展战略的背景下,马铃薯生产不仅要求高产,更多地是实现水肥资源的高效利用,生产绿色安全的马铃薯产品。截至目前,SOLANUM 模型对潜在产量、水分胁迫和霜冻下的定量模拟能够提供有效依据,但氮素胁迫的版本尚处于研发阶段,且缺少对马铃薯病害数据库的建立,给 SOLANUM 模型的研究带来了一定的局限性。

4 结论

本研究结果表明,SOLANUM 模型对甘肃省马铃薯中东部地区潜在产量的模拟和预测具有适用性,为了进一步提高 SOLANUM 模型在甘肃省中东部地区的适用性及其模拟预测的精准性,在后期的应用过程中还需通过试验研究和算法对该模型进行相应改进,来



注:A: 产能差变化与气候因子变化的相关性; B: 潜在产量、实际产量与在子的相关性。图中圆形符号越大, 则表示相关性越强,反之,则表示相关性弱,2种颜色的强度表示正相关的强度和负相关的强度($P < 0.05$)。

ΔT :年平均温度变化; $\Delta T2MIN$:年平均最低温度变化; $\Delta T2MAX$:年平均最高温度变化。

Note: A: Correlation between changes in AYG and change in climatic factors. B: Correlation between potential yield, observed yield and climatic factors. The larger the circular symbol in the figure, the stronger the correlation, on the contrary, it indicates that the correlation is weak. The intensity of the two colors indicates the positive correlation and the negative correlation strength, $P < 0.05$. ΔT : Annual average temperature change value. $\Delta T2MIN$: Annual average minimum temperature change value. $\Delta T2MAX$: Annual average maximum temperature change value.

图5 潜在产量、实测值和产能差与气候环境的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between climatic factors and potential yield, observed yield and yield gap

深入理解并量化马铃薯生长发育,尤其是生长速率和生育期估算的准确性对模型性能的影响。此外,降雨量和太阳辐射量是制约甘肃省马铃薯产量提高的主要气候因素,因此,选育生育期较长、抗旱型和高光效型品种是当前甘肃省马铃薯品种选育中亟待解决的问题。本研究结果为进一步利用 SOLANUM 模型预测甘肃省马铃薯潜在产量提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Obidiegwu J E, Bryan G J, Jones H G, Prashar A. Coping with drought: Stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 542
- [2] 于洪剑,白爱枝,杨晓炜,李瑞云. 马铃薯干燥方法的研究进展[J]. *核农学报*,2017,31(4):743-748
- [3] Haverkort A J, Verhagen A. Climate change and its repercussions for the potato supply chain[J]. *Potato Research*, 2008, 51(3/4):223-237
- [4] Boote K J, Kropff M J, Bindraban P S. Physiology and modelling of traits in crop plants: Implications for genetic improvements [J]. *Agricultural Systems*, 2001, 70(2):395-420
- [5] Hammer G L, Vanderlip R L. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum I. effects of temperature on radiation use efficiency [J]. *Crop Science*, 1989, 29(2):370-376
- [6] Mikhaila S, Pierre M, Peterd J. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149(6): 1095-1104
- [7] Hijmans R J. The effect of climate change on global potato production [J]. *American Journal of Potato Research*, 2003, 80(4):271-279
- [8] Kooman P L, Haverkort A J. Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO[M]//Haverkort A J, Mackerron D K L. *Potato Ecology & Modelling of Crops Under Conditions Limiting Growth*. Dordrecht: Springer, 1995: 41-59
- [9] Fleisher D H, Condori B, Quiroz R, Alva A, Asseng S, Barreda C, Bindi M, Boote K J, Ferrise R, Franke A C, Govindakrishnan P M, Harahagazwe D, Hoogenboom G, Naresh Kumar S, Merante P, Nendel C, Olesen J E, Parker P S, Raes D, Raymundo R, Ruane A C, Stockle C, Supit I, Vanuytrecht E, Wolf J, Woli P. A potato model intercomparison across varying climates and productivity levels [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3):1258-1281
- [10] White J W, Hoogenboom G, Kimball B A, Wall G W. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3):357-368
- [11] Evans L T. *Crop Evolution, Adaptation and Yield*[D]. New York: Cambridge University Press, 1996:23-31
- [12] Evans L T, Fischer R A. Yield potential: Its definition,

- measurement, and significance[J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1544–1551
- [13] Licker R, Johnston M, Foley J A, Barford C, Kucharik C J, Monfreda C, Ramankutty N. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world? [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 19(6): 769–782
- [14] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2731–2741
- [15] Condori B, Hijmans R J, Quiroz R, Ledent J F. Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling [J]. *Field Crops Research*, 2010, 119(1): 135–144
- [16] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 267–288
- [17] 李亚杰, 石强, 何建强, 张俊莲, 白江平, 王蒂. 马铃薯生长模型研究进展及其应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(2): 126–136
- [18] Quiroz R, Loayza H, Barreda C, Gavilán C, Posadas A, Ramírez D A. Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy? [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82: 104–112
- [19] 王颖, 梁淑敏, 潘哲超, 李燕山, 谢开云, Roberto Quiroz, 隋启君. 基于 Solanum 模型的云贵高原大春马铃薯潜在产量研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(11): 31–39
- [20] 王晓斌, 王瀚, 胡开明, 李亚杰, 秦天元, 曾文婕, 李鑫, 张楷露, 张俊莲, 白江平. 基于层次分析法和 GGE 双标图对引进马铃薯种质资源的综合评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(6): 1067–1078
- [21] 文新亚, 陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S2): 74–79
- [22] 张耀耀, 刘建刚, 谷中颖, 陈阜, 褚庆全. 气候变化对沧州地区冬小麦产量潜力的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(4): 31–37
- [23] Angulo C, Becker M, Wassmann R. Yield gap analysis and assessment of climate-induced yield trends of irrigated rice in selected provinces of the Philippines[J]. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 2012, 113(1): 61–68
- [24] Chu T W, Shirmohammadi A. Evaluation of the SWAT model’s hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(4): 1057–1073
- [25] Vazquezamabile G G, Engel B A. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed [J]. *Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers*, 2005, 48(3): 991–1003
- [26] Singh J, Knapp H V, Arnold J G, Demissie M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 41(2): 343–360
- [27] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the Asabe*, 2007, 50(3): 885–900
- [28] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282–290
- [29] Liu H L, Yang J Y, Drury C F, Reynolds W D, Tan C S, Bai Y L. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(3): 313–328
- [30] Condori B, Hijmans R J, Ledent J F, Quiroz R. Managing potato biodiversity to cope with frost risk in the high Andes: A modeling perspective [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e81510
- [31] Moriondo M, Bindi M, Sinclair T. Analysis of Solanaceae species harvest-organ growth by linear increase in harvest index and harvest-organ growth rate [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science American Society for Horticultural Science*, 2005, 130(6): 799–805
- [32] Tourneau C, Devaux A, Camacho M, Mamani P, Ledent J F. Effect of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (II): Water relations, physiological parameters [J]. *Agronomie*, 2003, 23(2): 181–190
- [33] Ng N, Loomis R S. Simulation of growth and yield of the potato Crop [J]. *Potato Research*, 1984, 27(3): 305–306
- [34] Van Diepen C A, Wolf J, Van Keulen H, Rappoldt C. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use & Management*, 1989, 5(1): 16–24

On Potential Yield of Potato in Central and Eastern Gansu Based on SOLANUM Model

WANG Han^{1,2} QIN Junhong³ BI Zhenzhen^{1,2} SUN Chao^{1,2}

LI Xin^{1,2} LI Yajie⁴ ZHANG Junlian¹ BAI Jiangping^{1,2,*}

(¹Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement/Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070; ²College of Agronomy, Gansu Agricultural University/Gansu Province Crop Stress Resistance Innovation and Utilization Engineering Research Center, Lanzhou, Gansu 730070; ³Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Breeding of Potato Crops in the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081; ⁴Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi, Gansu 743000)

Abstract: The aim of this study was to explore the applicability of the potato-specific growth simulation model SOLANUM to the prediction of potato potential yield in central and eastern Gansu province and analyze the effect of main climatic factors on potato yield gap in the region. Three potato genotypes were employed to calculate and calibrate the model parameters of potato varieties in Tianshui and Dingxi city of Gansu province by using SOLANUM model, and evaluate the SOLANUM model statistically. The results showed that the root-mean-square error (RRMSE) of both yield and canopy coverage simulation results in the suitability evaluation of the SOLANUM model in Gansu province was ranged from 16% to 76.2%, and the model Forecasting Efficiency (EF) was between 0.068 and 0.805. The correlation analysis showed that the correlation coefficient between productivity difference change and solar radiation change is 0.8, and the correlation coefficient between productivity difference change and annual rainfall change is 0.71. The correlation coefficient between potential yield and annual rainfall was 0.92, and that between potential yield and annual rainfall was 0.78. The correlation coefficient between actual yield and annual rainfall was 0.89, and that between actual yield and annual rainfall was 0.68. In summary, the SOLANUM model has applicability to the simulation of potato potential yield and canopy cover in the central and eastern regions of Gansu province, however, it is necessary to conduct an in-depth study on the estimation of potato growth and growth period, so as to improve the accuracy and applicability of the model simulation. It was suggested that late-maturing varieties should be cultivated in Gansu province to reduce the yield gap. The results provide decision-making basis for supplementing the simulation accuracy of SOLANUM model and increasing the potential yield of potato in Gansu province.

Keywords: potato, SOLANUM model, model evaluation, yield gap, climatic factors