

# DSSAT-SUBSTOR 马铃薯模型的参数 敏感性分析及适宜性评价

段丁丁<sup>1</sup>, 何英彬<sup>1\*</sup>, 于金宽<sup>1</sup>, 刘 莉<sup>2</sup>, 徐瑞阳<sup>1</sup>, 李文娟<sup>3</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058;  
3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

**摘 要:** 对 DSSAT-SUBSTOR 马铃薯模型进行参数敏感性分析及适宜性评价, 是利用模型进行马铃薯业务化估产的关键一步。利用全局敏感性分析方法 EFAST 对模型的 32 个输入参数进行敏感性分析; 采用实测数据对马铃薯的品种遗传参数进行标定, 以出苗日、块茎起始日、最大 LAI 值和产量作为适宜性评价指标; 通过调节品种遗传参数, 分析其对 4 个适宜性评价指标的影响机理。结果表明, 对产量敏感的品种遗传参数包括: 块茎开始生长的临界温度上限 (TC)、光周期系数 (P2)、潜在块茎生长率 (G3), 其全局敏感性指数分别为 0.69、0.35 和 0.22; 土壤参数包括: 根生长系数 (SRGF)、土壤排水上限 (SDUL)、排水率 (SLDR)、有机碳含量 (SLOC)、土壤总氮含量 (SLNI)、土壤溶液 pH 值 (SLHW), 其全局敏感性指数依次为 0.49、0.28、0.19、0.17、0.15 和 0.12; 田间管理参数包括: 播种日期 (PDATE)、灌溉日期 (IDATE)、灌溉量 (IRAVI) 和施氮量 (FAMN), 其全局敏感性指数依次为: 0.63、0.41、0.33 和 0.18。DSSAT-SUBSTOR 模型在研究区域内有很强的适宜性: 实测出苗日与模型模拟值相同, 实测块茎起始日与模拟值相差 1 d, 实测最大 LAI 值与模拟值的决定系数  $R^2=0.9188$ , 实测单产与模拟值的相对误差为 5.72%。5 个品种遗传参数均不能决定马铃薯的出苗日 (EDAPS), 但对产量 (UYAHS) 和最大 LAI 值 (LAIS) 均有不同程度的影响, 光周期系数 (P2) 和块茎开始生长的临界温度上限 (TC) 会对块茎起始日 (TDAPM) 产生不同影响。研究结果可为 DSSAT-SUBSTOR 马铃薯模型的参数优化和区域应用提供科学理论基础。

**关键词:** DSSAT 模型; 马铃薯; 敏感性分析; EFAST 方法; 适宜性

中图分类号: S532; S-03

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)03-0521-07

## Parameter sensitivity analysis and suitability evaluation of DSSAT-SUBSTOR potato model

DUAN Dingding<sup>1</sup>, HE Yingbin<sup>1</sup>, YU Jinkuan<sup>1</sup>, LIU Li<sup>2</sup>, XU Ruiyang<sup>1</sup>, LI Wenjuan<sup>3</sup>

(1. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081;

2. Institute of Agriculture Remote Sensing and Information Application, Zhejiang University, Hangzhou 301158;

3. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of sciences, Chongqing 400714)

**Abstract:** Parameter sensitivity analysis and suitability evaluation of the DSSAT-SUBSTOR potato model is a key step in the estimation of potato yield using the model. In this paper, global sensitivity analysis method EFAST was used to analyze the sensitivity of 32 input parameters of the model, the measured data were used to calibrate the genetic parameters of potato varieties, and the emergence date, tuber start date, maximum LAI value and yield were used as the evaluation indexes for suitability. By adjusting cultivar genetic parameters, the influencing mechanism of the genetic parameters on 4 suitability evaluation indexes was analyzed. The results showed that: the sensitive parameters of yield include: upper critical temperature limit (TC), photoperiod coefficient (P2), and potential tuber growth rate (G3), the global sensitivity indexes was 0.69, 0.35 and 0.22, respectively. Soil parameters include: root growth coefficient (SRGF), soil drainage upper limit (SDUL), drainage rate (SLDR), and organic carbon content (in the beginning of tuber growth). SLOC, soil total nitrogen content

收稿日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41771562) 和中国农业科学院十三五创新工程共同资助。

作者简介: 段丁丁, 硕士研究生。E-mail: 1191058832@qq.com

\* 通信作者: 何英彬, 博士, 副研究员。E-mail: heyinbin@caas.cn

(SLNI), soil solution pH (SLHW), the global sensitivity index was 0.49, 0.28, 0.19, 0.17, 0.15 and 0.12, respectively. Field management parameters include: seeding date (PDATE), irrigation date (IDATE), irrigation amount (IRAVI), and nitrogen application rate (FAMN), the global sensitivity indexes was 0.63, 0.41, 0.33 and 0.18, respectively. The DSSAT-SUBSTOR model has strong suitability in the study area: the measured seedling day is the same as the model simulation value, the measured tuber start day is 1d different from the simulated value, the determination coefficient ( $R^2$ ) of the measured maximum LAI value and the simulated value is 0.9188, and the relative error between the measured yield per unit area and the simulated value is 5.72%. The 5 cultivar genetic parameters could not determine the potato emergence date (EDAPS), but had different effects on the yield (UYAHS) and the maximum LAI value (LAIS). The photoperiod coefficient (P2) and the upper limit of the critical temperature at which the tuber began to grow (TC) has a different effect on the tuber initiation day (TDAPM). The results of this study can provide a scientific theoretical basis for parameter optimization and regional application of the DSSAT-SUBSTOR potato model.

**Key words:** DSSAT-SUBSTOR model; potato; sensitivity analysis; EFAST method; suitability

马铃薯是世界第三大粮食作物, 中国是世界上种植马铃薯面积最大的国家。从 2015 年起, 中国启动马铃薯主粮化战略, 马铃薯将成为我国的又一主粮作物<sup>[1]</sup>。同时, DSSAT-SUBSTOR-potato 模型是综合不同学科发展起来的、专门适用于马铃薯的作物生长模型, 若能将该模型应用于实际生产, 有助于提高马铃薯的生产效率, 促进“主粮化”进程。但作物生长模型运行需要众多输入参数, 有些参数的获取费时费力且不利于模型的推广, 对模型参数进行敏感性分析正是解决该问题的有效方法<sup>[2-3]</sup>。参数敏感性分析的原理是基于模型输入参数变化产生的模型结果方差来反映参数对模型结果变化的贡献度, 目的是评价不同输入参数对模型模拟结果的影响, 筛选敏感参数, 敏感性分析是模型精度校正过程中的重要环节。敏感性分析方法可分为局部敏感性分析和全局敏感性分析<sup>[4-5]</sup>, 局部敏感性分析缺乏模型参数之间的相互作用对模拟结果的综合影响的考虑, 分析结果不够全面, 而全局敏感性能够分析整个参数空间对模拟结果的影响<sup>[6]</sup>。本研究选用的全局敏感性分析方法 EFAST 方法在 DSSAT-CERES 模型<sup>[7-11]</sup>、WOFOST 模型<sup>[12-14]</sup>、EPIC 模型<sup>[15]</sup>、APSIM 模型<sup>[16]</sup>、AquaCrop 模型<sup>[17]</sup>、WASP 模型<sup>[18]</sup>、CROPGRO 棉花模型<sup>[19]</sup>、Wheat-SM 小麦模型<sup>[20]</sup>、SEBS 模型<sup>[21]</sup>的参数敏感性分析中均取得良好效果, 得到广泛的应用。DSSAT-SUBSTOR-potato 模型在中国的应用仅见于李剑萍等<sup>[22]</sup>利用该模型模拟了气候变化下的宁夏马铃薯单产, 且没有进行参数敏感性分析, 因此有必要对其进行参数敏感性分析以及适宜性验证。本研究采用 EFAST 方法对模型的输入参数进行敏感性分析, 并利用实测气象、土壤等数据对模型进行标定, 利用实测单产, LAI 等数据对其适宜性进行评价。在标定基础上, 通过

逐一调整马铃薯的品种遗传参数, 分析其对马铃薯的出苗期、块茎起始日、最大 LAI 值和产量的影响机理, 从生理上解释长势与产量之间的相对关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 DSSAT-SUBSTOR 模型

DSSAT 是由 IBSNAT 项目支持, 由美国农业部组织联合开发研制的作物生长模型, 其凭借操作简洁、功能强大、应用范围广的优点, 已经在学术界得到广泛应用。它包含谷类作物的 CERES 模型, 块根块茎类作物马铃薯 SUBSTOR-potato 模型等超过 25 种不同的作物品种模块。SUBSTOR 模型是由 Griffin、Johnson 和 Ritchie 发展起来的<sup>[23]</sup>, 该模型以 1 d 为模拟时间单元, 以植物生理学为基础, 可以模拟自然条件、田间管理措施和遗传特性对马铃薯生长与产量的影响。SUBSTOR 模型中土壤水分和营养平衡过程与 CROPGRO 和 CERES 模拟过程相同。通过模拟单株马铃薯的生长发育扩展到整个生长区域。SUBSTOR 模型包含 5 个品种特性遗传参数, 具体情况如表 1 所示。

SUBSTOR-potato 模型的运行, 除了作物品种特性遗传参数外, 还需要输入的数据包括气象参数、土壤参数 (表 2) 和田间管理参数 (表 3)。气象数据包括: 逐日太阳辐射能 ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )、逐日最高空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、逐日最低空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、逐日降水量 (mm) 等。

SUBSTOR-potato 模型的输出参数包括: 块茎起始日、生理成熟日、块茎鲜重、块茎干重、总重、副产品产量、最大 LAI 值、块茎含氮量、块茎+茎干+叶片的含氮量、最大氮含量、块茎含氮率和出苗日。

### 1.2 试验区域及数据

试验区域位于吉林省蔬菜花卉科学研究所农业

科技示范园区, 吉林省是我国马铃薯单产最高的省份, 研究区域年平均气温 4.8°C, 最高温度 39.5°C, 最低温度-39.8°C, 日照时间 2 688 h。年平均降水量 522 至 615 mm, 夏季降水量占全年降水量的 60% 以上; 最热月 (7 月) 平均气温 23°C, 非常适宜马

铃薯的种植。模型运行所需的气象数据来自于当地农业气象站点和中国气象数据网, 土壤数据源于田间实测和参考文献值, 田间管理数据来源于试验基地观测和记录。

表 1 马铃薯的品种遗传参数

Table 1 Cultivar genetic parameters of potato

品种遗传参数 Cultivar genetic parameters	定义 Definition	取值范围 Value range
G2	叶面积扩展率[cm <sup>2</sup> ·(m <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup> ]Leaf area expansion rate[cm <sup>2</sup> ·(m <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup> ]	900~2 200
G3	潜在块茎生长率[g·(株·d) <sup>-1</sup> ]Potential tuber growth rate[g·(plant·d) <sup>-1</sup> ]	21~26
PD	块茎生长胁迫系数 Tuber growth stress coefficient	0.55~1
P2	光周期系数 Photoperiod coefficient	0.3~0.9
TC	块茎开始生长的临界温度上限 Upper limit of critical temperature for tubers to start growing	15~22

表 2 土壤参数

Table 2 Soil parameters

土壤参数 Soil parameters	定义 Definition	取值范围 Value range
SALB	反照率 Albedo	0.09~0.17
SLUI	蒸发上限/mm Upper limit of evaporating/mm	2~12
SLDR	排水率 Drainage rate	0.01~0.85
SLRO	径流曲数 Runoff curve number	61~94
SLNF	矿化系数 Mineralization coefficient	0~1
SLPF	土壤光合作用系数 Coefficient of soil photosynthesis	0~1
SLLL	土壤排水下限/cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> Lower soil drainage limit	0.055~0.123
SDUL	土壤排水上限/cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> Upper limit of soil drainage	0.123~0.348
SSAT	土壤饱和上限/cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> Maximum soil saturation	0.348~0.547
SRGF	根生长系数 Root growth factor	0~1
SSKS	土壤饱和和水率传导率/cm·h <sup>-1</sup> Soil saturated water conductivity	0.06~21
SBDM	土壤容质量/g·cm <sup>-3</sup> Soil capacity quality	1~1.4
SLOC	有机碳含量/% Organic carbon content	0.348~5
SLCL	土壤黏粒含量(<0.002 mm)/% Soil clay content(<0.002 mm)	0~15
SLSI	土壤沙粒含量(0.05~0.002 mm)/% Soil sand content(0.05~0.002 mm)	30~45
SLNI	土壤总氮含量%/Soil total nitrogen content	0.05~0.3
SLHW	土壤溶液 pH 值 PH value of soil solution	6.0~7.0
SCEC	土壤阳离子交换量/cmol·kg <sup>-1</sup> Soil cation exchange capacity	1~30

田间实测 LAI 数据采用 SUNSCAN 探测器进行定期观测, 在马铃薯生育期内总计获得 8 次有效数据; 单产数据的田间测量采用每个小区随机采取 5 个试验点, 每个试验点的面积均为 1 m×1 m, 产量统计数据由吉林省蔬菜花卉科学研究院提供。

### 1.3 EFAST 参数敏感性分析

EFAST 法即扩展傅里叶幅度敏感度检验法是由 Saltelli 等结合 Sobol 法和傅里叶幅度敏感度检验法 (FAST) 提出的一种定量全局敏感性分析方法<sup>[24]</sup>。该方法提出了一阶敏感性指数和总敏感性指数作为评价敏感性高低的因子。其中一阶敏感性指数代表

了各个输入变量对输出结果总方差的直接影响度; 与之对应的总敏感性指数则在其基础上进一步考虑了参数之间的相互作用对结果总方差的整体影响度。以下是算法的相关公式:

$$V = \sum_i V_i + \sum_{ij} V_{ij} + \sum_{ijm} V_{ijm} + \dots + \sum V_{12\dots k} \quad (1)$$

输出结果总方差:

$V$  是模型输出结果总方差,  $V_i$  是输入参数  $i$  的方差,  $V_{ij}$  是参数  $i, j$  相互作用的方差,  $V_{ijm}$  是参数  $i, j, m$  相互作用的方差,  $k$  是输入参数的总个数。如果参数之间没有相互作用, 则这些指数等于 0。

一阶、多阶敏感性指数公式:

S<sub>i</sub> = V<sub>i</sub> / V ; S<sub>ij</sub> = V<sub>ij</sub> / V ; S<sub>ijm</sub> = V<sub>ijm</sub> / V (2)

输入参数 i 对应的总敏感性指数公式:

S = S<sub>i</sub> + S<sub>ij</sub> + S<sub>ijm</sub> + L + S<sub>1,2L jL k</sub> (3)

表 3 田间管理参数

Table 3 Field management parameters

Table with 3 columns: 田间管理参数 / Field management parameters, 定义 / Definition, 取值范围 / Value range. Rows include PDATE, PPOP, PLRS, PLDP, IDATE, IRAVL, FDATE, FAMN, FDEP.

2 结果与分析

2.1 作物模型参数的敏感性分析

本研究借助 DEJONGE 在 EFAST 方法中的界定, 本研究把全局敏感性指数>0.1 的模型输入参数划定为敏感性参数。

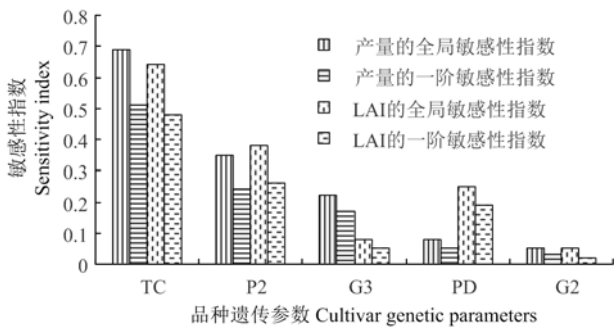


图 1 品种遗传参数对产量和 LAI 的敏感性指数

Figure 1 Sensitivity index of cultivar genetic parameters to yield and LAI

2.1.1 品种遗传参数对产量和 LAI 的敏感性 由图 1 可知, DSSAT-SUBSTOR-potato 模型中, 5 个品种遗传参数中对产量敏感的参数有: 块茎开始生长的临界温度上限 (TC)、光周期系数 (P2) 和潜在块茎生长率 (G3), 其全局敏感性指数分别为 0.69、0.35 和 0.22。对 LAI 敏感的参数有: TC、P2 和 PD,

其全局敏感性指数分别为 0.64、0.38 和 0.25。其中, TC 和 P2 对产量和 LAI 均最为敏感, G2 对产量和 LAI 的敏感性指数均最小。

TC 是对产量和 LAI 最敏感的参数, 其原因为 TC 代表马铃薯开始进入结薯期的生长温度, 对于块茎的形成和植株叶面积的扩展至关重要。同样 P2 反映了马铃薯生长季的光照强度, 光照强度影响光合作用以及有机物质的分配。G3 反映的是块茎的生长速率, 直接决定单个块茎的重量。PD 对产量的敏感性较低, 可能原因是本研究在试验设置时不存在病虫害、水分和养分胁迫等因素。G2 是 5 个作物品种参数中最不敏感参数, 在模型的标定过程中, 可采用模型默认值或参考文献值进行简化处理。

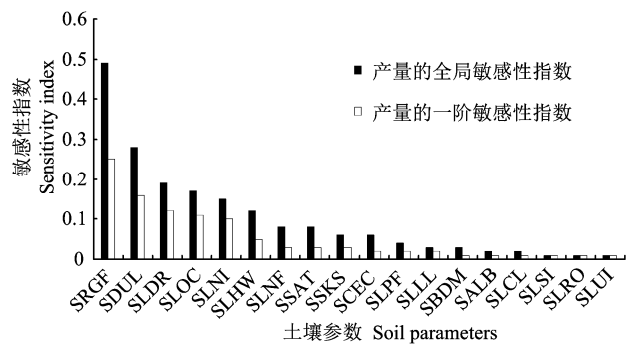


图 2 土壤参数对产量的敏感性指数

Figure 2 Sensitivity index of soil parameters to yield

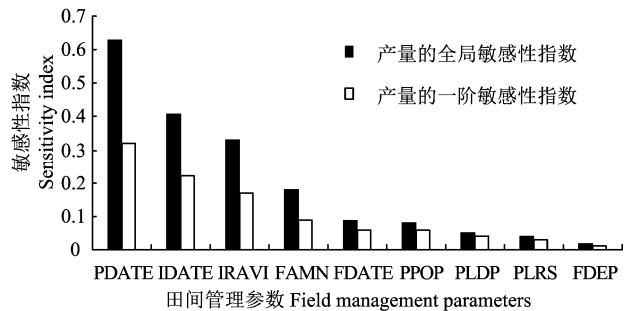


图 3 田间管理参数对产量的敏感性指数

Figure 3 Sensitivity index of field management parameters to yield

2.1.2 土壤参数对产量的敏感性 由图 2 可知, 对马铃薯产量敏感的 6 个土壤参数分别为: 根生长系数 (SRGF)、土壤排水上限 (SDUL)、排水率 (SLDR)、有机碳含率 (SLOC)、土壤总氮含率 (SLNI)、土壤溶液 pH 值 (SLHW), 其全局敏感性指数依次为 0.49、0.28、0.19、0.17、0.15 和 0.12。剩余 12 个土壤参数的全局敏感性指数均小于 0.1, 作为不敏感参数。SRGF 的全局敏感性指数最大, 原因为马铃薯为块根块茎类作物, 根生长系数对块茎的生长发育最为重要。其余的土壤敏感性参数均为描述土壤水肥和养分交换吸收的关键土壤参数,

对马铃薯生长发育影响较大, 因此表现出较强的敏感性。

**2.1.3 田间管理参数对产量的敏感性** 如图 3 所示, 在 9 个田间管理参数中, 播种日期 (PDATE)、灌溉日期 (IDATE)、灌溉量 (IRAVI) 和施氮量 (FAMN) 对产量较为敏感, 其全局敏感性指数依次为: 0.63、0.41、0.33 和 0.18。这 4 个参数变化改变了作物物候期、水分和养分分布, 对作物生长发育和产量形成影响较大。

## 2.2 作物模型的标定及适宜性评价

综合参数敏感性分析结果, 利用实测土壤和田间管理等数据驱动模型的运行, 借助 GLUE 模块不断调节获取马铃薯的品种遗传参数, 直到获取一组与马铃薯实际生长、生产情况一致性较好的品种遗传参数, 即为标定结果 (表 4)。并以出苗日 (EDAPS)、块茎起始日 (TDAPM)、产量 (UYAHS) 和最大 LAI 值 (LAIS) 4 个指标作为模型标定的验证指标和适宜性评价指标。

表 4 马铃薯品种遗传参数的标定结果

Table 4 Calibration results of cultivar genetic parameters of potato

品种遗传参数 Cultivar genetic parameters	定义 Definition	取值范围 Value range	标定值 Calibration value
G2	叶面积扩展率	900~2 200	1 500
G3	潜在块茎生长率	21~26	25.2
PD	块茎生长胁迫系数	0.55~1	0.9
P2	光周期系数	0.3~0.9	0.3
TC	块茎开始生长的临界温度上限	15~22	21.2

表 5 标定结果验证

Table 5 Verification of calibration results

出苗日/d (EDAPS)			块茎起始日/d (EDAPS)			最大 LAI 值 (LAIS)			产量 (UYAHS)		
模拟	实测	误差	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差
27 d	27 d	0 d	53 d	54 d	1 d	4.75	4.7	1.1%	31.93	33.87	5.72%

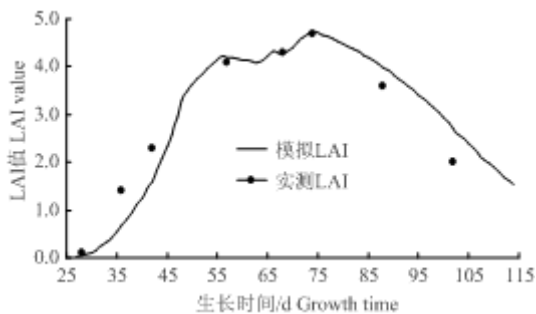


图 4 实测 LAI 与模拟 LAI 对比

Figure 4 Comparison between measured LAI and simulated LAI

表 6 G2 对 4 个适宜性评价指标的影响

Table 6 G2 impact on 4 suitability evaluation indicators

G2	EDAPS	TDAPM	UYAHS	LAIS
1 800	27	53	31.38	4.83
1 700	27	53	31.48	4.81
1 600	27	53	31.81	4.78
1 500	27	53	31.93	4.75
1 400	27	53	32.02	4.73
1 300	27	53	32.27	4.69
1 200	27	53	32.66	4.62

由表 5 可知, 模型模拟的马铃薯出苗日与实测值相同, 实测块茎起始日与模拟值相差 1 d, 模型模拟的最大 LAI 值略大于实测值, 两者的相对误差为

1.1%; 模型模拟的单产为  $31.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与实测单产  $33.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  相比, 两者的相对误差为 5.72%。

利用模型品种遗传参数的标定值得到以天为步长的马铃薯生长季内的 LAI 变化曲线, 与实测的 8 次 LAI 进行比较, 结果如图 4 所示。

由表 6 可知, 马铃薯的出苗日 (EDAPS) 和块茎起始日 (TDAPM) 不随品种遗传参数叶面积扩展率 (G2) 的变化而变化, 最终收获时的鲜重产量 (UYAHS) 随着 G2 的减小而增大, 最大 LAI 值 (LAIS) 随着 G2 的减小而减小。其变化原因为: G2 是指马铃薯植株叶面积每天的增长速率, 代表马铃薯进入出苗期后的叶片长势状况, 因此不能影响马铃薯的出苗日和块茎起始日。但 G2 越大, 表明每天的叶面积增长幅度大, 因此 LAIS 随之增大, 但随着 G2 的不断增大, 会造成马铃薯植株的徒长, 阻碍块茎的形成和生长, 因此 UYAHS 会下降。

由表 7 可知, 马铃薯的出苗日 (EDAPS) 和块茎起始日 (TDAPM) 同样不随品种遗传参数潜在块茎生长率 (G3) 的变化而变化, 而鲜重产量 (UYAHS) 随着 G3 的减小而减小, 最大 LAI 值 (LAIS) 随着 G3 的减小而增大。G3 是指马铃薯进入结薯期块茎每天的增重, 因此同样不能决定出苗日和块茎起始日。但 G3 越大, 表明块茎每日增重

越大,因此收获时的鲜重产量也就越大,因此 UYAHs 随着 G3 的增大而增大;但 G3 越大,叶片中的有机物质会向块茎大量转移,从而限制叶面积的扩展,即 LAIS 随着 G3 的增大而减小。

表 7 G3 对 4 个适宜性评价指标的影响

Table 7 G3 impact on 4 suitability evaluation indicators

G3	EDAPS	TDAPM	UYAHs	LAIS
26	27	53	34.77	4.51
25	27	53	31.70	4.77
24	27	53	30.76	4.80
23	27	53	29.85	4.83
22	27	53	28.95	4.85
21	27	53	28.11	4.86

表 8 PD 对 4 个适宜性评价指标的影响

Table 8 PD impact on 4 suitability evaluation indicators

PD	EDAPS	TDAPM	UYAHs	LAIS
1.0	27	53	34.18	4.49
0.9	27	53	31.93	4.75
0.8	27	53	31.59	4.81
0.7	27	53	31.25	4.85
0.6	27	53	30.88	4.90
0.55	27	53	30.31	4.96

表 9 P2 对 4 个适宜性评价指标的影响

Table 9 P2 impact on 4 suitability evaluation indicators

P2	EDAPS	TDAPM	UYAHs	LAIS
0.9	27	74	12.88	6.43
0.8	27	69	17.18	5.84
0.7	27	65	21.28	5.53
0.6	27	61	26.68	5.18
0.5	27	58	28.96	4.98
0.4	27	55	30.86	4.82
0.3	27	53	31.93	4.75

由表 8 可知,品种遗传参数块茎生长胁迫系数 (PD) 同样不能影响马铃薯的出苗日 (EDAPS) 和块茎起始日 (TDAPM),而马铃薯最终收获时的鲜重产量 (UYAHs) 随着 PD 的减小而减小,最大 LAI 值 (LAIS) 随着 PD 的减小而增大。PD 代表马铃薯的抗逆性,PD 值越大,其抗逆性越强,有利于增加块茎的产量,同样块茎的生长会限制叶面积的扩展,即 PD 值增大,UYAHs 增大,而 LAIS 减小。

由表 9 可知,马铃薯的出苗日 (EDAPS) 不随品种遗传参数光周期系数 (P2) 的变化而变化,而 P2 可以影响马铃薯的块茎起始日 (TDAPM),TDAPM 随着 P2 的减小而减小,而最终收获时的鲜重产量 (UYAHs) 随 PD 的减小而增大,最大 LAI 值 (LAIS) 随着 PD 的减小而减小。P2 在一定程度上反映了日照时长,P2 值越大,表明日照时长越长。

当马铃薯植株生长处于强光照和较长日照条件下,植株生长快,枝叶繁茂,故 P2 值越大,LAIS 也越大,但同时会限制块茎的形成,因此块茎起始日不断延长,TDAPM 不断增大。但在结薯期强光、短日照有利于块茎膨大和淀粉积累,产量会大幅增高,因此 P2 值越小,UYAHs 越大。

表 10 TC 对 4 个适宜性评价指标的影响

Table 10 TC impact on 4 suitability evaluation indicators

TC	EDAPS	TDAPM	UYAHs	LAIS
22	27	53	33.98	4.52
21	27	53	31.90	4.75
20	27	54	31.10	4.82
19	27	55	30.26	4.87
18	27	57	28.10	5.04
17	27	64	22.66	5.37
16	27	71	14.33	6.27
15	27	75	10.43	6.63

由表 10 可知,马铃薯的出苗日 (EDAPS) 同样不随品种遗传参数块茎开始生长的临界温度上限 (TC) 的变化而变化,块茎起始日 (TDAPM) 随着 TC 的减小而增大,鲜重产量 (UYAHs) 随着 TC 的减小而减小,最大 LAI 值 (LAIS) 随着 TC 的减小而增大。

TC 是指块茎开始生长的临界温度上限,不能影响马铃薯的出苗日,但会很大程度影响 TDAPM。结果表明,块茎开始生长的适宜温度在 18~22℃,与实际生长情况相符。温度低于 18℃,块茎起始日则明显推迟,最终产量出现大幅度减少,最大叶面积指数则迅速增大。因为块茎开始生长时的温度过低会造成块茎生长减缓,甚至趋于停滞,而植株则不断徒长,故叶面积不断增大。

### 3 讨论与结论

前人利用 EFAST 全局敏感性分析方法对 DSSAT-CERES、WOFOST 和 AquaCrop 模型的参数进行敏感性分析的研究结果表明,环境条件对参数敏感性的排序会产生较大的影响<sup>[22]</sup>。DSSAT 模型中 CERES 模块与 SUBSTOR 模块应用相同的土壤和田间管理参数,前人利用相同的 EFAST 方法对禾本科作物小麦、玉米的土壤参数进行敏感性分析的结果表明:土壤排水上限 (SDUL)、矿化系数 (SLNF)、排水率 (SLDR) 等为最敏感的土壤参数<sup>[14,16]</sup>,而本研究结果表明根生长系数 (SRGF) 是对茄科类、块根块茎类作物马铃薯产量最敏感的土壤参数,表明不同种类的作物对参数敏感性分析的

结果也会产生很大差别。

相比于谷类作物模块 CERES, SUBSTOR 马铃薯模型中只包含品种遗传参数, 缺乏生态型参数。本研究结果表明模型中包含的 5 个品种遗传参数均不能够影响马铃薯的出苗日, 这与模型缺乏生态型参数是否有关需开展进一步的研究进行探讨。

水分对于马铃薯的块茎生长也是一个关键因素, SUBSTOR 马铃薯模型缺乏描述作物对水分利用状况的参数, 而相似的作物模型中均包含描述作物水分状况的生态型参数, 如 CERES 模块中的水分生长胁迫上限系数, EPIC 模型中的水蚀因子最小值, 以及 WOFOST 模型中的水分胁迫下叶片最大相对死亡率等。进一步研究水分对马铃薯植株的生长发育以及块茎的形成和膨大的影响, 能够更全面得模拟马铃薯的生长状况, 从而有助于提高模型的校正精度, 最终提高模型的模拟精度。

(1) 对马铃薯产量敏感的品种遗传参数包括: 块茎开始生长的临界温度上限 (TC)、光周期系数 (P2)。土壤参数包括: 根生长系数 (SRGF)、土壤排水上限 (SDUL)、排水率 (SLDR)、有机碳含量 (SLOC)、土壤总氮含量 (SLNI)、土壤溶液 pH 值 (SLHW)。田间管理参数包括: 播种日期 (PDATE)、灌溉日期 (IDATE)、灌溉量 (IRAVI) 和施氮量 (FAMN)

(2) DSSAT-SUBSTOR-potato 模型在吉林省有很强的适宜性: 马铃薯的实测出苗日与模拟值相同, 实测块茎起始日与模拟值相差 1 d, 实测最大 LAI 值与模拟值的  $R^2$  值等于 0.918 8, 实测单产与模拟值的相对误差是 5.72%。

(3) 马铃薯的 5 个品种遗传参数均不能够影响马铃薯的出面日, 但对最大 LAI 值和产量均有较大影响。只有光周期系数 (P2) 和块茎开始生长的临界温度上限 (TC) 会影响马铃薯的块茎起始日 (TDAPM)。当调整同一品种遗传参数时, 产量值的增大必将使得最大 LAI 值减小, 产量值的减小总伴随着最大 LAI 值的增大。

## 参考文献:

- [1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2015(3): 1-7.
- [2] CROSETTO M, TARANTOLA S, SALTELLI A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2000, 81(1): 71-79.
- [3] CONFALONIERI R, BELLOCCHI G, TARANTOLA S, et al. Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: Exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters[J]. *Environ Modell Softw*, 2010, 25(4): 479-488.
- [4] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1056-1062.
- [5] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.
- [6] SALTELLI A, RATTO M, ANDRES T, et al. Global sensitivity analysis: the primer [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [7] 姜志伟, 陈仲新, 周清波, 等. CERES-Wheat 作物模型参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 236-242.
- [8] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138-150.
- [9] 宋利兵, 陈上, 姚宁, 等. 基于 GLUE 和 PEST 的 CERES-Maize 模型调参与验证研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 95-111.
- [10] 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [11] 张静潇, 苏伟. 基于 EFAST 方法的 CERES-Wheat 作物模型参数敏感性分析[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(5): 149-154.
- [12] 何亮, 侯英雨, 赵刚, 等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 169-179.
- [13] 刘维, 侯英雨, 吴门新, 等. WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价[J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(3): 7-13.
- [14] 张宁, 张庆国, 于海敬, 等. 作物生长模拟模型的参数敏感性分析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(1): 107-115.
- [15] 吴锦, 余福水, 陈仲新, 等. 基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 136-142.
- [16] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 148-157.
- [17] 邢会敏, 相诗尧, 徐新刚, 等. 基于 EFAST 方法的水稻作物模型参数全局敏感性分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(1): 64-76.
- [18] 张质明, 王晓燕, 李明涛, 等. 基于全局敏感性分析方法的 WASP 模型不确定性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1336-1346.
- [19] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 55-64.
- [20] 郭其乐, 李颖, 田宏伟, 等. 小麦生长发育模型 WheatSM 参数优化及适用性分析[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12): 1571-1580.
- [21] 李艳, 黄春林, 卢玲, 等. 基于 EFAST 方法的 SEBS 模型参数全局敏感性分析[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(5): 719-726.
- [22] 李剑萍, 杨侃, 曹宁, 等. 气候变化情景下宁夏马铃薯单产变化模拟[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(3): 407-412.
- [23] FLEISHER D H, CAVAZZONI J, GIACOMELLI G A, et al. Adaptation of SUBSTOR for controlled-environment potato production with elevated carbon dioxide [J]. *T ASABE*, 2003, 46(2): 531.
- [24] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.