

黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究*

李 军^{1,2} 王立祥¹ 邵明安² 樊廷录³

(¹西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; 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; ³甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃兰州 730070)

摘 要 比较了作物生产潜力常规研究方法与作物生长模拟研究方法的特点, 在玉米生长模拟模型介绍、模型验证和气候、土壤、作物数据库组建的基础上, 应用DSSAT3中的CERES—玉米模型模拟研究了黄土高原22个地点玉米光温生产潜力和气候生产潜力, 获得了各点6~15年玉米的产量潜力值, 并统计计算了研究时段内玉米生产潜力的平均值、标准差、最高值、最低值和水分满足率。黄土高原春玉米光温生产潜力、气候生产潜力和水分满足率分别为8271~15973 kg/hm²、0~13543 kg/hm²和0~1.00。黄土高原夏玉米光温生产潜力为5884~15387 kg/hm²。研究结果可为黄土高原玉米产量增进和作物结构调整提供一些信息和依据。

关键词 黄土高原; CERES—玉米模型; 玉米生产潜力; 玉米产量模拟

中图分类号: S126.1; S162.5; S513 **文献标识码**: A

Simulation of Maize Potential Productivity in the Loess Plateau Region of China

L I Jun^{1,2} WANG Li-Xiang¹ SHAO Ming-An² FAN Ting-Lu³

(¹ College of Agronomy, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; ² State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; ³ Dryland Farming Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract On the bases of maize growth simulation model introduction, model validation and database establishment, the CERES maize model of DSSAT3 was used to simulate the photothermal potential productivity (PPP) and climate potential productivity (CPP) of maize at 22 sites of loess plateau region of China. The maize yield potential data were obtained from each site for 6 to 15 year period. The mean yield, yield standard deviation, maximum and minimum yield of maize PPP and CPP as well as water content ratio (WCR = CPP/PPP) were calculated at each site. The estimates of PPP, CPP and WCR of spring maize in the loess plateau region were 8271~15973 kg/ha, 0~13543 kg/ha and 0~1.00 respectively. The value of PPP of summer maize were 5884~15387 kg/ha. These results may provide some information on maize yield increase and crop production adjustment in the loess plateau region of China.

Key words Loess plateau; CERES maize model; Maize potential productivity; Maize yield simulation

黄土高原地区是指黄土高原及其北部毗邻地区, 是我国北方主要旱作农业区域。本地区玉米播种面积190万hm², 占粮食作物面积的17.9%, 总产91.4亿kg, 占粮食总产的30.8%左右, 是黄土

高原主要的粮食作物之一。玉米实际单位面积产量4812 kg/hm², 居于黄土高原地区禾谷类作物单产之首。玉米光合效率高, 生长期与降水季节分布吻合性好, 高产稳产性优于小麦和糜谷。研究玉米生

* 基金项目: 国家“九五”科技攻关专题(96-004-04-09)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-411)和UNDP CPR 91/114项目资助。
作者简介: 李军(1964-), 男, 甘肃泾川人, 副教授, 博士, 现在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博士后流动站工作, 主要研究方向为农业资源开发与高效耕作制度。
Received on (收稿日期): 2000-10-25, Accepted on (接受日期): 2001-10-25

产潜力,有利于持续提高玉米产量,为黄土高原地区种植业结构调整提供理论依据。

1 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究方法

1.1 作物生产潜力常规研究方法与作物生长模拟研究方法的比较

早期的作物生产潜力研究以公式推导为主,但由于各估算公式建模原理不同,参数取值差异大,估算结果相差悬殊,难以合理定论。在“七五”、“八五”旱农攻关研究期间,形成了“公式概算—田区定位试验—高产纪录值调查相结合”的生产潜力研究方法^[1],虽然取得了一定成效,但由于方法粗略,结果不够准确,而且费时费力。公式概算法通常未考虑作物本身的生长发育机理,其概算值只是一种光、热、水资源的生产承载力,通常也难以得到不同气候年型的作物生产潜力值。田区定位试验法通常难以实现采用最佳田间管理措施的试验要求,不仅费时费力、投资较大,而且难以覆盖不同的气候类型区和气候年型。高产纪录值调查法只反映了某些有利气候年型和当时栽培条件下的作物生产潜力值,未能反映不同气候年型和栽培技术进步后的潜力值。这三种方法虽然在一定程度上可以相互验证,但通常三者所获得的潜力值差异较大,难以合理取舍和定论。

在“九五”旱农攻关研究期间,我们引进了美国研制的作物生长模型软件包DSSAT3,采用作物生长与产量形成的计算机模拟方法研究作物生产潜力。作物生长模型能够详细量化描述作物的基本生理生态过程,对作物生产潜力估算较通常的公式概算法精确性高,可通过作物栽培方案优化模拟试验,获得最优栽培方式下的作物产量潜力,可通过多年的连续模拟试验,获得不同气候年型的作物产量潜力,只要建立土壤、作物、气候资料数据库,就能覆盖不同的气候类型区,获得任何地点和任何年份的作物产量潜力,方法简便快捷,可节省大量人力、物力。将作物生长模拟法与田区定位试验法和高产纪录值调查法相结合,有利于准确合理的评价一个地区的作物生产潜力。

1.2 CERES—玉米模型简介

本研究利用DSSAT3中的CERES—玉米模型模拟研究黄土高原玉米的光温生产潜力和气候生产潜力。CERES—玉米模型能以天为时间步长,动态地和定量地描述玉米生长发育过程和产量形成以及

土壤水分、氮素的动态变化过程,通过模拟玉米干物质积累与分配、叶面积与根系扩大、阶段发育来计算每平方米穗数、穗粒数和粒重,最后获得玉米的经济产量。该模型是迄今为止描述“玉米—土壤—气候—管理”系统最复杂的模型,包含三百多个变量和二百五十多个数学方程,本文只将该模型中与生产潜力模拟有关的几个最主要的数学方程简述如下^[2]。

玉米的气候生产潜力(Climatic Potential Productivity, CPP)是指现有玉米优良品种在其生长期,在一个地区的光照、热量和自然降水资源存在状况范围内,旱作农田可能达到的单位面积最高产量。在模拟估算玉米气候生产潜力时,CERES—玉米模型假设玉米不受养分和病虫害胁迫,只考虑光、温、水等气候因素对玉米生长和产量形成的影响,模型中对玉米气候生产潜力的模拟计算主要采用下列数学方程:

(1) 单株干物质生产量计算方程:

$$Y_p = 0.10 \times (1 - e^{-0.6SL}) \times \frac{Q}{P} \times \min(F_t, F_{w1})$$

式中: Y_p 为逐日单株干物质生产量(g/株), L 为叶面积系数, Q 为逐日太阳辐射量(MJ/m²), P 为每平方米株数, F_t 和 F_{w1} 分别为温度胁迫因子和土壤干旱胁迫因子(均为无量纲因子,取值范围0~1), \min 表示取二者之小。

(2) 单株叶面积增长量计算方程:

$$S_l = 0.00198 \times (T_m - 7) \times (T_m - 8) \times F_{w2}$$

式中: S_l 为逐日单株叶面积增长量(cm²), T_m 为日平均温度, F_{w2} 为土壤干旱胁迫因子。

(3) 单株籽粒数计算方程:

$$G_p = G_2 \times \frac{P_s - 195}{P_s + 1018.2}$$

上式中: G_p 为单株籽粒数, G_2 为玉米品种遗传参数—潜在株粒数, P_s 为平均光合作用速率。

(4) 单株粒重增长量计算方程:

$$W_g = 0.001 \times R_g \times G_p \times G_3 \times (0.45 + 0.55 \times F_{w1})$$

上式中: W_g 为逐日单株粒重增长量(g/株); R_g 为相对灌浆速率因子; G_p 为单株籽粒数; G_3 为玉米品种遗传参数—逐日最大灌浆速率(mg/粒); F_{w1} 为土壤干旱胁迫因子。

(5) 土壤干旱胁迫因子计算方程:

$$F_{w1} = \frac{W_r}{0.11 \times Q \times (1 - e^{-L}) \times (2.04 \times 10^{-4} - 1.83 \times 10^{-4} \times A_i) \times (0.6 \times T_{\max} + 0.4 \times T_{\min} + 29)}$$

上式中: W_r 为根系总吸水量 (cm), 指土壤剖面各土层根系吸水量 $R_w(l)$ 之和, $R_w(l)$ 可由第 l 土层的土壤含水量 $W(l)$ 、凋萎系数 $L(l)$ 和根长密度 $R(l)$ 计算而得; Q 为逐日太阳辐射量 (MJ/m^2); L 为叶面积系数; A_l 为作物与土壤总体反射率。

$$F_{w2} = 0.67 \times F_{w1}$$

玉米的光温生产潜力 (Photothermal Potential Productivity, PPP) 是指现有玉米优良品种在其生长期保持最适水肥状态时, 在一个地区的光照和热量资源存在状况范围内所能实现的单位面积最高产量, 是该地区灌溉农田玉米可能达到的产量上限。在模拟玉米光温生产潜力时, CERES—玉米模型假设玉米不受养分、水分和病虫害的胁迫, 只

考虑光照和热量资源状况对玉米生长和产量形成的影响, 仍然采用上述数学方程, 只是不进行土壤水分平衡计算, 使 F_{w1} 和 F_{w2} 的取值为 1, 消除了水分对玉米生长和产量的影响。

1.3 CERES—玉米模型验证

CERES—玉米模型已在世界范围内进行了广泛的验证和应用, 我国一些学者也对 CERES—玉米模型进行了初步验证和应用, 本研究采用 1981 年西安夏玉米有关性状模拟值与观测值^[3] 的对比分析, 对该模型的模拟效果进行了验证 (见表 1), 除叶片数误差超过了 10%, 其它生育时期和产量性状误差均较小, 认为这种模型具有较好的模拟效果, 可用于黄土高原玉米生产潜力研究。

表 1 CERES—玉米模型对夏玉米有关性状模拟值与实测值的比较

Table 1 Comparison of observed value with simulated value from CERES-maize model of summer maize characteristics

性状 Characteristics	出苗期 (月-日) Emergence date (m-d)	吐丝期 (月-日) Silking date (m-d)	成熟期 (月-日) Maturity date (m-d)	生育期 Grow th period (days)	叶片数 No. of Leaf	经济 系数 Harvest index	穗粒数 Number of grain per ear	千粒重 (g) Grain weight (g/1000 gram)	籽粒产量 (kg/hm ²) Grain yield
实测值 Observed	6-16	8-9	9-17	100	22	0.455	545	293.8	6450
模拟值 Simulated	6-13	8-10	9-19	102	25	0.442	519	293.6	6856
相差 Difference	-3	1	2	2	13.64%	-2.86%	-4.77%	-0.07%	6.29%

1.4 CERES—玉米模型数据库组建

CERES—玉米模型运行需要建立黄土高原地区气象、土壤和作物参数数据库。气象资料数据库包含了覆盖黄土高原主要生态类型区的 22 个气象台站的逐日气象资料, 资料来源于有关气象台站和世界气象组织计算机网站, 资料年限为 1978~1992 年期间 6~15 年不等。逐日气象资料数据包括逐日太阳辐射值、最高气温、最低气温和降水量。除逐日太阳辐射值因为难以获得而采用多年平均月值内插计算外, 其余三个气象要素均为逐日观测资料^[4~6]。由于采用逐日气象资料, 数据量很大, 购买气象资料费用昂贵, 本研究中气象台站数量和数据序列年数增加受到限制。

土壤数据库包含了 22 个气象台站所在地面积最大的主要农田耕作土种 22 个, 将农田坡度、质地组成、水分和养分状况等 16 个土种特征资料输入计算机, 生成了黄土高原土壤特性数据库^[4, 5, 7], 在玉米生产潜力研究中用于计算土壤温度和土壤水分状况。

作物参数数据库包括了 CERES—玉米模型在黄土高原地区玉米品种的 6 个遗传特性参数, 用来描述玉米的生长发育进程、植株形态与产量形成特征。在广泛调查黄土高原各生态类型区 80 年代末期至 90 年代初期生产上玉米主栽品种性状介绍与试验资料基础上, 采用试错法模拟确定各品种遗传特性参数, 最终确立了 17 个玉米品种的遗传特性参数, 分别属于极早熟品种、早熟品种、中熟品种和晚熟品种类型^[4, 8~10]。生产潜力模拟研究中玉米的播期与种植密度均按当地大田玉米丰产栽培措施要求执行。

2 黄土高原地区玉米生产潜力模拟结果与分析

2.1 春玉米生产潜力

黄土高原北部与中部属北方春播玉米区, 南部的汾渭河谷与豫西北为夏播玉米区。选取宝鸡、铜川、洛川、延安、榆林、西峰、平凉、天水、兰州、静远、盐池、银川、中宁、鄂托克、呼和浩特、朔

州、太原、隰县、长治等 19 个气象台站来模拟春玉米生产潜力。另外,运城、洛阳、西安 3 地实际生产上春玉米种植面积很小,以夏玉米为主,仅作为参考点。现将各地 6~15 年的模拟结果统计列于表 2。在表 2 中,模拟年限代表该地点玉米产量模拟的年数,产量潜力的平均值、标准差、最高值和最低

值是指模拟研究年限内产量潜力的平均值、标准差、潜力的上、下限,分别表示各点产量潜力的高低水平、年际稳定程度及变化范围。水分满足率 WCR 用气候生产潜力 CPP 的平均值与光温生产潜力 PPP 平均值之比表示,即 $WCR = CPP/PPP$,表示自然降水条件下降水满足作物需水的程度。

表 2 黄土高原地区春玉米生产潜力模拟结果统计值

Table 2 Statistical value of multiple year simulation results of spring maize potential productivity in various districts of the loess plateau region

地区 Districts	模拟年限 Simulation years	光温生产潜力(kg/hm ²) Photothemsal potential productivity, PPP				气候生产潜力(kg/hm ²) Climate potential productivity, CPP				水分满足率 Water content ratio, WCR
		平均值 \bar{X}	标准差 S	最高值 Max	最低值 Min	平均值 \bar{X}	标准差 S	最高值 Max	最低值 Min	
宝鸡 Baoji	13	13543	792	14620	12556	13543	792	14620	12556	1.000
西安 Xi'an	13	13403	1060	15435	11860	10678	3788	14466	3209	0.797
铜川 Tongchuan	12	12660	902	13756	10621	11720	2331	13756	5339	0.926
洛川 Luochuan	6	13133	942	14294	12219	13126	948	14294	12219	0.999
延安 Yan'an	15	12988	679	13750	11626	10960	3780	13703	348	0.844
榆林 Yulin	15	15915	1040	17774	13709	5752	5980	17264	0	0.361
西峰 Xifeng	13	9817	911	11545	8074	8274	3208	11545	2267	0.843
平凉 Pingliang	15	9888	736	11852	8653	7158	3185	10986	838	0.724
天水 Tianshui	15	11685	487	12317	11005	9882	2869	12274	2281	0.846
兰州 Lanzhou	15	10013	879	11346	8772	1927	3294	9570	0	0.192
静远 Jingyuan	11	9575	758	10810	8784	2908	3934	10810	0	0.304
盐池 Yanchi	15	9310	1785	11698	3439	1902	2662	9409	0	0.204
银川 Yinchuan	10	15973	980	17328	14707	0	0	0	0	0
中宁 Zhongning	15	15815	1050	18108	13776	0	0	0	0	0
鄂托克 Ertuoke	15	8271	593	8943	6891	0	0	0	0	0
呼和浩特 Huhehaote	15	10250	1020	11373	7794	4622	3407	10796	0	0.451
朔州 Shuozhou	6	10723	392	11251	10139	5568	3825	10945	0	0.519
太原 Taiyuan	15	11705	499	12378	10385	4979	4850	10205	0	0.425
隰县 Xixian	13	12526	874	14332	11198	6843	5521	14332	0	0.536
长治 Changzhi	6	12572	565	13227	11884	12453	486	13227	11884	0.991
运城 Yuncheng	6	14245	958	15589	13135	11272	3038	15589	7743	0.791
洛阳 Luoyang	15	15299	763	16596	14413	12577	3449	16400	4997	0.822

表 2 数据表明,黄土高原 22 个地点春玉米光温生产潜力多年模拟结果平均值为 8271~15973 kg/hm²,标准差为 392~1785 kg/hm²,最高值为 8943~18108 kg/hm²,最低值为 3439~14413 kg/hm²。其中,宁夏银川平原与陕北榆林一带为春玉米光温生产潜力高值区,均超过 15000 kg/hm²,渭北高原与山西中部地区为次高值区约 12000~13000 kg/hm²,陇东、陇中黄河沿岸、鄂尔多斯高原、河套平原及晋西北约 8000~11000 kg/hm²,而西安、运城、洛阳三点在现有品种生产潜力下,由于温度高,春玉米生长期短,产量潜力并非最高。

黄土高原春玉米气候生产潜力为 0~13543 kg/hm²,标准差为 0~5980 kg/hm²,最高值为 0~

17264 kg/hm²,最低值为 0~12556 kg/hm²。其中,银川、中宁、鄂托克为干旱区,旱作农田玉米不能形成产量,气候生产潜力为零。渭北高原和长治、运城、洛阳、西安、宝鸡等地为高值区,春玉米气候生产潜力均超过 10000 kg/hm²,陇东、天水为次高值区,达 7000 kg/hm²,其余各点低于 7000 kg/hm²,黄土高原西北部各点春玉米气候生产潜力均低于 4000 kg/hm²。此外,各点气候潜力标准差明显高于光温生产潜力,说明各点气候生产潜力稳定性较差。从水分满足率看,春玉米降水满足程度普遍较高,黄土高原东南部地区春玉米水分满足率均在 0.700 以上,而黄土高原西北部则均低于 0.600。

2.2 夏玉米生产潜力

黄土高原夏玉米分布在黄土高原东南部地区, 本文选取了黄土高原东南部冬麦区西安、宝鸡、铜川、洛川、延安、天水、平凉、西峰、太原、长治、隰县、运城、洛阳等 13 个气象站模拟夏玉米生产潜力。通常夏玉米是在冬小麦收获后复种的, 夏玉米的气候生产潜力涉及因素较多, 除受夏玉米生长季节降水量影响外, 还与前茬作物遗留的土壤水分数量有关, 在不同熟制下(一年一熟、二年三熟、三

年四熟制和一年二熟) 其产量潜力是有差异的。通常情况下, 黄土高原地区凡能种植夏玉米的地区多有补充灌溉, 因而, 研究夏玉米气候生产潜力意义不大, 本文未列出夏玉米的气候生产潜力值。表 3 列出了 10 个代表点夏玉米光温生产潜力值。平凉、西峰两地夏玉米不能正常成熟, 模拟结果为零, 洛川因地势高亢, 气候冷凉, 夏玉米生长季节较短, 产量仅 $1355 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 这 3 个地点的模拟结果未在表 3 中列出。

表 3 黄土高原地区夏玉米光温生产潜力模拟结果统计值

Table 3 Statistical value of multiple year simulation results of summer maize potential productivity in various districts of the loess plateau region

地区 Districts	光温生产潜力(kg/hm^2)				地区 Districts	光温生产潜力(kg/hm^2)			
	Photothemal potential productivity, PPP					Photothemal potential productivity, PPP			
	平均值 \bar{X}	标准差 S	最高值 Max	最低值 Min		平均值 \bar{X}	标准差 S	最高值 Max	最低值 Min
西安 Xi an	12436	1575	15605	10122	太原 Taiyuan	6910	712	7643	5430
宝鸡 Bao ji	10765	1191	12573	8487	长治 Changzhi	7610	334	8081	7107
铜川 Tongchuan	6959	806	8050	5530	隰县 Xixian	5884	1310	7797	3590
延安 Yan an	6380	1357	7609	2785	运城 Yuncheng	14318	1130	16100	13024
天水 Tianshui	6642	895	7716	4935	洛阳 Luoyang	15387	1037	17639	13439

黄土高原夏玉米光温潜力平均值约 $5884 \sim 15387 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 标准差 $334 \sim 1575 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 最高值 $7609 \sim 17639 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 最低值 $2785 \sim 13439 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。其中, 以西安、宝鸡、洛阳、运城四点夏玉米

光温潜力平均值最高, 均超过了 $10000 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 其余各点均在 $5000 \sim 7000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间, 是夏玉米种植的次适宜区。平凉、西峰、洛川三地不适宜种植夏玉米。

表 4 黄土高原地区春玉米生产潜力模拟值与实测值和概算值的比较

Table 4 Comparison among simulated yield and observed yield, calculated yield of maize potential productivity in various districts of loess plateau region

地区 Districts	光温生产潜力(kg/hm^2)				气候生产潜力(kg/hm^2)			
	Photothemal potential productivity, PPP				Climate potential productivity, CPP			
	模拟值 Simulated	实测值 Observed	概算值 Calculated	模拟值 Simulated	实测值 Observed	概算值 Calculated		
榆林 Yulin	15915	12480	14003	5752	-	5310		
延安 Yan an	12988	10350	12762	10960	6828	9847		
铜川 Tongchuan	12660	-	10606	11720	7800	10342		
西安 Xi an	13403	-	10597	10678	8340	7423		
西峰 Xifeng	9817	-	13646	8274	6304	8285		
兰州 Lanzhou	10013	7765.5	9565	1927	-	4524		
长治 Changzhi	12572	-	-	12453	7902	11616		

注: 光温生产潜力实测值是水浇地产量, 气候生产潜力实测值是旱作农田产量。

Notes: Observed values of PPP and CPP are maize yields on irrigated field and dryland field respectively.

3 黄土高原地区玉米生产潜力模拟值与试验值的比较

将部分代表点春玉米生产潜力模拟值与前人有关研究的田区试验实测值和公式概算值进行了比较, 结果列于表 4。表 4 中春玉米生产潜力模拟值是各地 6~15 年模拟结果的平均值, 实测值是气象

台站附近试验点在某一年的田区试验值或调查所得的高产记录值, 公式概算值是采用蒋骏、王立祥提出的宁南概算模式计算的潜力值^[1, 11]。由于实测值和概算值分别是某种特定气候年型和平均气候条件下的潜力值, 样本数据太少, 不能与多年平均模拟值进行统计分析, 只能就其数值进行直观的比较。

表4所列11个地区的春玉米产量潜力模拟值与概算值较为接近,而与田间实测值差距较大。

对黄土高原夏玉米生产潜力前人研究较少,本文以蒋骏、王立祥的公式概算值为对照^[11],西安夏玉米光温生产潜力模拟值和概算值分别为12436 kg/hm²和10130 kg/hm²,宝鸡分别为10765 kg/hm²和7014 kg/hm²,铜川为6959 kg/hm²和8184 kg/hm²,延安为6380 kg/hm²和7279 kg/hm²。在关中地区,夏玉米光温生产潜力模拟值略高于概算值,在渭北高原,模拟值低于概算值。

上述研究结果表明,利用CERES—玉米模型研究玉米生产潜力,方便快捷,可以获得不同气候年型下的玉米产量潜力变化范围,虽然由于模型本身的某些缺陷和输入参数的误差,玉米产量潜力估值可能并不十分准确,但理论上应该较常规的作物潜力研究方法为好,应成为今后玉米生产潜力研究的有效工具之一。当前在我国存在的主要问题是多站点、长时段的逐日气象资料获取较为困难,特别是逐日太阳辐射值在气象台站也难以得到;玉米品种遗传特性参数的确定也较困难,需要进行试验测定和模拟估算;此外,CERES—玉米模型尚不能模拟研究地膜覆盖栽培条件下的玉米生产潜力。今后需要加强组建模型所需的气象与玉米品种遗传特性参数数据库,对模型进行进一步修订和完善,并增加对地膜覆盖栽培条件的模拟成分,以促进作物生长模型在玉米科学研究中的广泛应用。

References

- [1] Tao Y-F (陶毓汾), Wang L-X (王立祥), Han S-F (韩仕峰). *Water Potential Productivity and Its Exploitation in Dryland*

Farming Area of Northern China (中国北方旱农地区水分生产潜力及开发), Meteorological Press, 1993

- [2] Jones C A, Kiniry J R. CERES maize, a simulation model of maize growth and development Texas A & M University Press, College Station, 1986
- [3] Bao J-S (鲍巨松), Hao Y-C (郝引川). Study on high yield cultivation characteristics of maize cultivar Hudan 1hao. *Shaanxi Journal of Agriculture Sciences* (陕西农业科学). 1984, 2: 4~7
- [4] Tsuji G Y. DSSAT3 user's guide, vol 1~3. The University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994
- [5] Ritchie J T. *Soil and Weather Inputs for the BSNAT Crop Models* Michigan State University. 1992
- [6] Natural resources general investigation group of CAS (中国科学院自然资源综合考察队). *Atlas of Agroclimatic Resources of China* (part of light energy) (中国农业气候资源图集(光能部分)). Meteorological Press, 1984
- [7] Soil survey office of China (全国土壤普查办公室). *Records of Chinese Soil Species* (vol 4~5) (中国土种志(第四、五卷)). China Gri Press, 1995
- [8] Seed administration station of Shaanxi province (陕西省种子管理站) *Recommended New Crop Varieties and Its Cultivation Techniques* (农作物优良新品种及栽培技术). Shaanxi Sci & Tech Press, 1993
- [9] Chen G-P (陈国平), Li B-H (李伯航). *Theories and Practices of Maize High Yield Cultivation on Tight Plant Structure Patterns* (紧凑型玉米高产栽培的理论与实践). China Gri Press, 1996
- [10] Li J (李军), Shao M-A (邵明安), Fan T-L (樊廷录). Databases creation of crop growth model DSSAT3 on the loess plateau region of China. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2001, 19(1): 120~126
- [11] Xin N-Q (信乃谄), Wang L-X (王立祥). *Agriculture in Arid Regions of Northern China* (中国北方旱区农业). Jiangsu Sci & Tech Press, 1998