

# ALMANAC 模型对黄土高原玉米、谷子和糜子产量的模拟

刘刚<sup>1</sup>, 谢云<sup>1</sup>, 吴瑞俊<sup>2</sup>, 高晓飞<sup>1</sup>, 章文波<sup>1</sup>

(1. 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 用 ALMANAC 作物模型对黄土高原安塞县大南沟小流域 2000~2004 年玉米、谷子和糜子的产量进行模拟。结果显示, ALMANAC 模型能够很好地模拟该地区的粮食产量, 模拟值与实测值回归方程的决定系数大于 0.72, 回归方程接近 1:1 线。玉米、谷子和糜子模拟产量与实测产量之间的平均相对误差分别为 -2.29%、-2.32% 和 8.34%, 模拟产量与实测产量之间的标准化均方根差分别为 15.7%、11.5% 和 15.8%。梯田、阴坡和阳坡之间的模拟误差有所差异, 玉米梯田产量的模拟值比实测值偏高, 阴坡和阳坡产量的模拟值偏低; 谷子梯田和阴坡产量的模拟值偏低, 阳坡产量的模拟值偏高; 糜子梯田和阳坡产量的模拟值偏高。梯田模拟值与实测值之间的一致性较好, 其次为阴坡, 再次为阳坡。

**关键词:** 作物生长模型; 黄土高原; ALMANAC; 玉米; 谷子; 糜子

**中图分类号:** S516; S515; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0078-06

自 1990 年 IPCC 第一次评估报告提出脆弱性至 1997 年第三次报告中脆弱性的明确定义, 气候变化对农业生产的影响已经成为世界各国关注的重大问题<sup>[1,2]</sup>。通过选择合适的作物品种和调整农时, 优化种植结构, 改变施肥和灌溉方式等措施可以提高农业生产对气候变化的适应性, 降低农业生态系统的脆弱性以及农业生产的风险。作物模型作为一种工具能够弥补田间试验的不足并能够根据不同的情景做出预报, 为建立恰当的适应对策和风险评估提供理论支持<sup>[3,4]</sup>。

20 世纪 60 年代植被冠层截光理论的提出<sup>[5]</sup>和植被冠层截光模型<sup>[6]</sup>的建立, 奠定了作物模型研制的基础。20 世纪 80 年代的模型, 例如 CERES 模型<sup>[7,8]</sup>、SOYGRO 模型<sup>[9]</sup>、ALMANAC 模型<sup>[10]</sup>以及荷兰的 SUCROS 模型<sup>[11]</sup>和 WOFOST 模型<sup>[12]</sup>等, 已经能够较好地模拟作物的生长过程并具有广泛的适用性。20 世纪 90 年代以后, 作物模型逐渐完善, 此时的作物模型能够用于产量预测、区域农业生产研究、评价全球变化对粮食生产的影响<sup>[13,14]</sup>以及土壤侵蚀对土地生产力的影响<sup>[15]</sup>, 为决策提供理论依据等。

其中 ALMANAC 模型是基于 EPIC 模型<sup>[16]</sup>研制而成的一种多作物(包括树木和杂草)通用模型,

可以根据实际需要增加不同作物的生长参数以增加可以模拟的作物种类。ALMANAC 模型引入我国后, 模拟了黄淮海地区冬小麦的生长<sup>[17]</sup>, 东北地区大豆的生长<sup>[18]</sup>及黄土高原地区玉米及冬小麦的生长<sup>[19]</sup>。对我国黄淮海地区冬小麦及东北地区大豆的模拟, 通过精确的田间试验确定作物参数和土壤参数, 较好地模拟了冬小麦和大豆的产量及胁迫因素。对于黄土高原地区玉米和冬小麦的模拟, 倾向于模型对大范围农田的应用, 忽略了黄土高原丘陵沟壑区地貌类型的复杂性及耕作措施多样性的特点。

黄土高原光能资源丰富, 雨热同步, 具有较好的气候生产潜力。由于侵蚀严重, 除少数残留的黄土塬外, 大部分地区被切割成为破碎的梁峁丘陵, 形成大量面积较小的小流域。小流域内部的地貌类型复杂, 导致实际耕作方式有很大差异, 种植作物种类较多; 加之该地区气候资源季节变化和年际变化大, 使粮食产量具有较大的时空变化。因此, 应用作物模型模拟小流域内部的粮食产量对评价土地生产力及调整耕作措施具有实际意义。本研究选取陕北黄土高原延安地区安塞县境内大南沟流域, 利用 2000~2004 年连续 5 年不同地块不同作物的实测资料, 进行 ALMANAC 作物模型的模拟验证, 探讨模型在黄

收稿日期: 2008-05-18

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAD09B05)“水土流失动态监测与评价关键技术”; 国家自然科学基金项目(40671111)

作者简介: 刘刚(1978-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事气候变化影响评价、作物模型的研究。E-mail: lgboy001@163.

土高原丘陵沟壑区的适用性,为该模型在该区的应用提供理论支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 模型机理简介

模型以日为步长模拟每日有效光合辐射量的截获和潜在生物量的累积,每日实际生物量的计算是在潜在生物量的基础上通过温度,水分,N、P 养分的胁迫计算。

1.1.1 潜在生物量的计算 潜在生物量和冠层光合有效辐射量的截获通过如下公式计算:

$$\Delta BP_i = a \times (BE) \times (PAR)_i \times (1 + \Delta HLT_i)^3 \quad (1)$$

$$(PAR)_i = 0.5 \times (RA)_i \times [1 - \exp(-k \times LAI_i)] \quad (2)$$

式中:  $\Delta BP$  是潜在生物量增量( $t/hm^2$ );  $a$  是单位换算系数;  $BE$  是作物光能利用率( $kg/MJ$ );  $PAR$  是作物冠层截获的光合有效辐射量( $MJ/m^2$ );  $\Delta HLT_i$  是第  $i$  天比前一天理论日长增加的长度( $h$ );  $RA$  表示到达冠层顶部的入射太阳总辐射量( $MJ/m^2$ );  $k$  是消光系数;  $LAI$  是叶面积指数。

在作物生长过程中,叶面积指数呈先增大后减小的趋势变化,因此模型分两个阶段模拟叶面积指数的变化。增长期叶面积指数日增量采用下式表示:

$$\Delta LAI_i = (\Delta HUF_i) \times (LAI_{MX}) \times \{1 - \exp[5.0 \times (LAI_{i-1} - LAI_{MX})]\} \quad (3)$$

式中:  $i$  表示日序;  $LAI_{i-1}$  是前一日叶面积指数;  $LAI_{MX}$  是作物群体可达到的最大叶面积指数;  $HUF$  表示某热量单元条件下叶面积指数与最大叶面积指数  $LAI_{MX}$  的关系:

$$HUF_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp(ah_1 - ah_2 \times HUI_i)} \quad (4)$$

式中:  $i$  表示日序;  $HUI$  为热量单元指数,即某日积累的有效积温占生长期总有效积温的比例;  $ah_1$  和  $ah_2$  为公式系数,根据作物参数 DLAP1 和 DLAP2 确定,DLAP 参数表示作物在无胁迫情况下,不同时期叶面积指数达到该群体最大叶面积指数的百分比,例如当作物完成生长期的 18% 时,叶面积指数为最大叶面积指数的 3%,即  $HUI$  的值为 0.18,  $HUF$  的值为 0.03,则 DLAP 值为以上两值小数部分的组合 18.03。因此,可以根据两个 DLAP 参数,通过待定系数求出  $ah_1$  和  $ah_2$ :

$$ah_2 = \frac{\ln\left[\frac{-HUI_2(HUF_2-1)}{HUF_2}\right] - \ln\left[\frac{-HUI_1(HUF_1-1)}{HUF_1}\right]}{HUI_1 - HUI_2} \quad (5)$$

$$ah_1 = \ln\left[\frac{-HUI_1(HUF_1-1)}{HUF_1}\right] + ah_2 \times HUI_1 \quad (6)$$

例如,当 DLAP1 为 18.03,DLAP2 为 60.95 时,  $ah_2$  为 12.42,  $ah_1$  为 4.00,其  $HUF$  曲线如图 1 所示。

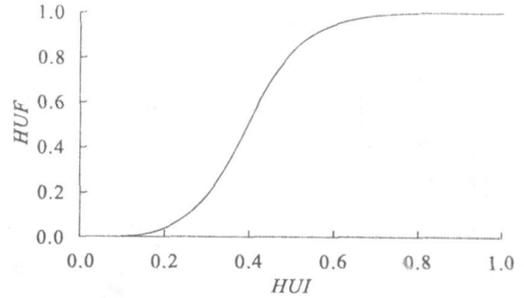


图 1 HUF 动态变化曲线

Fig.1 Dynamic curve of HUF

衰减期的叶面积指数由下式计算:

$$LAI_i = LAI_0 \times \left(\frac{1 - HUI_i}{1 - HUI_0}\right)^{ad} \quad (7)$$

式中,  $i$  表示日序;  $HUI_i$  和  $HUI_0$  分别是计算日的热量单元指数和叶面积开始降低时的热量单元指数,  $LAI_0$  为该作物叶面积增长到最大时的叶面积,  $ad$  为模型中的作物参数 RLAD,用以刻画叶面积指数的衰减速度。当  $ad = 1$  时,叶面积呈线性衰减,当  $ad < 1$ ,叶面积呈缓慢的非线性衰减,当  $ad > 1$  时,叶面积呈快速非线性衰减(图 2)。

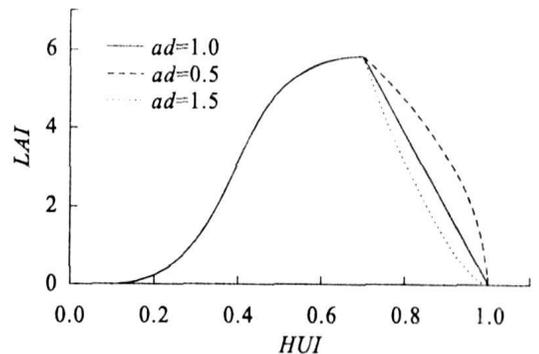


图 2 LAI 动态变化曲线

Fig.2 Dynamic curve of LAI

1.1.2 实际生物量的计算 实际生物量和叶面积指数通过以上潜在值进行胁迫订正,计算公式为:

$$\Delta B_i = \Delta BP_i \times (REG) \quad (8)$$

$$\Delta LAI_{A,i} = \Delta LAI_i \times \sqrt{REG} \quad (9)$$

式中,  $\Delta B$  是实际增加的生物量;  $\Delta LAI_A$  为实际增加

的叶面积指数;  $REG$  是温、水、N 和 P 胁迫因子的综合:

$$REG = \min[f(T), f(W), f(N), f(P)] \quad (10)$$

各胁迫因素分别由相应的温度影响、水分平衡和 N、P 养分平衡子模型根据作物对上述因子的需求状况与满足程度计算而得到的, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

作物的经济产量表示为实际产量与收获指数的乘积:

$$YLD = (HI) \times (B_{AG}) \quad (11)$$

式中,  $HI$  为作物收获指数;  $B_{AG}$  是收获时的作物地上生物产量( $t/hm^2$ )。

## 1.2 试验设计

试验于陕西省延安地区安塞境内大南沟流域( $36^{\circ}54' \sim 36^{\circ}56' N$ ,  $109^{\circ}16' \sim 109^{\circ}18' E$ )进行, 该流域位于黄土高原中部地区, 面积约  $3.9 km^2$ , 多年平均降雨量  $550 mm$ , 其中  $75\%$  集中在  $6 \sim 9$  月, 年际变率达  $74.5\%$ , 多年平均气温  $9^{\circ}C$ , 年大于  $10^{\circ}C$  积温约为  $3170^{\circ}C^{[20]}$ 。该区属于典型的黄土丘陵沟壑区, 流域内地表切割破碎, 土壤类型主要为黄土母质上发育的黄绵土。土地利用类型主要有梯田耕地、坡耕地、灌丛、果园、稀疏林地、荒地等, 其中坡耕地坡度的变化范围为  $0^{\circ} \sim 27^{\circ}$ , 退耕还林后, 耕地坡度减小。主要农作物有玉米、谷子、糜子、土豆、大豆和荞麦等, 种植面积较大的作物为玉米、谷子和糜子, 其中玉米多种植在小于  $15^{\circ}$  的坡地和梯田, 谷子和糜子的种植范围较大, 坡度  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$  皆有分布。该区在黄土高原具有典型的代表性。

表 1 玉米、谷子和糜子的主要田间管理措施

Table 1 Field management of corn, foxtail millet and pearl millet

作物 Crop	播种日期(M-d) Planting date	潜在热量单元( $^{\circ}C$ ) Potential heat unit	密度(株/ $m^2$ ) Planting density (plant/ $m^2$ )	施 N 量( $kg/hm^2$ ) N application	施 P 量( $kg/hm^2$ ) P application
玉米 Corn	05-01~06-22	1100~1650	2.3~5.0	95~197	0~30
谷子 Foxtail millet	04-20~06-22	1100~1600	10.0~32.0	26~196	0~30
糜子 Pearl millet	05-28~07-15	1000~1300	10.0~51.0	26~138	0~30

运行模型需要的气象数据主要来自安塞气象站( $109^{\circ}19' E$ ,  $36^{\circ}53' N$ ), 包括: 日最高、最低气温( $^{\circ}C$ ), 日相对湿度, 日雨量( $mm$ ); 由于安塞站观测要素的限制, 模型需要的日风速及月总太阳辐射数据来自延安气象站。月总辐射量为每日辐射量的月总和, 每日太阳总辐射量按下式计算<sup>[21]</sup>:

$$R_s = R_a(0.390 + 0.344 \times \frac{n}{N}) \quad (12)$$

式中,  $R_s$  为地面太阳总辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $R_a$  为天文辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $n$  为每日实际日照时数;  $N$

研究选取大南沟小流域种植较多的玉米、谷子、糜子三种作物进行实地调查, 调查时间为 2000~2004 年。于作物收获时, 选取代表不同作物及不同地貌条件的地块, 用米尺测量作物的株距及行距, 播种方式为撒播时, 测量  $1 m^2$  内的作物株数, 据此计算作物的生长密度。地上生物量及产量的测量, 行播作物于每一地块中随机选取一定量的植株, 撒播作物则选取  $1 m^2$  样方的植株; 记录所选植株的样本株数, 将选取植株的地上部分删割并称量鲜重, 在  $80^{\circ}C$  条件下烘干后称量茎叶干重和籽粒干重, 计算粮食单产和收获指数。为减小试验误差, 每一地块的测量保证三个重复。

## 1.3 数据库的建立

模型输入数据库包括田间管理措施、气象资料、土壤资料和作物属性资料。

田间管理措施通过实际调查获得, 为大南沟流域 2000~2004 年不同地块各作物的播种、收获日期, 化肥(折合为纯量)施用量, 种植密度等。由于作物品种的差异, 播种期有所不同, 春播品种一般 5 月初播种, 夏播品种一般 6 月中下旬播种, 其需要的有效积温也有差异。玉米的播种密度一般为  $4$  株/ $m^2$ , 低者为  $2.3$  株/ $m^2$ , 高者为  $5.0$  株/ $m^2$ , 谷子的播种密度为  $10 \sim 32$  株/ $m^2$ , 糜子的播种密度为  $10 \sim 51$  株/ $m^2$ , 坡地密度小于梯田密度。该区施肥地块之间以及年际之间存在较大差异, 基本上以施氮肥为主。

为每日最大日照时数。

模型需要的土壤数据来自以往研究<sup>[22, 23]</sup>, 分为梯田和坡地两种土壤数据, 包括土层厚度、不同深度的土壤容重、凋萎湿度、田间持水量、砂砾含量、粉粒含量、土壤 pH 值及养分状况等。

作物属性数据库中的作物参数包括作物环境参数和作物生态参数两大类。根据已有的研究对三种作物的作物参数进行修订(表 2), 其中玉米参数参考李军在该地区的研究结果<sup>[19]</sup>; 谷子参数引自 EPIC 模型, 并根据以往研究<sup>[24, 25]</sup>进行订正。糜子

作物参数参考谷子及文献资料<sup>[25,26]</sup>。

模型数据库建立后,模拟各作物的产量,根据输出结果分析模拟产量与实测产量之间的差异。建立模拟值与实测值的回归方程,分析方程与 1:1 线的

接近程度;通过计算相对误差和标准化均方根差(NRMSD)进一步分析模拟值与实测值差异的相对大小。根据模拟值和实测值分析模型在梯田、阴坡、阳坡的模拟误差。

表 2 玉米、谷子和糜子参数修订值

Table 2 Adjustment of main parameters of corn, foxtail millet and pearl millet

作物 Crop	WA	TG	DMLA	DLAI	PPL1	PPL2	DLAP1	DLAP2	HI	EXTINC
春玉米 Spring corn	39	8	6.0	0.7	5.45	12.95	18.03	60.95	0.45	0.44
夏玉米 Summer corn	39	10	5.0	0.7	5.45	13.95	15.05	60.95	0.43	0.44
谷子 Foxtail millet	35	10	5.0	0.6	3.09	50.80	15.01	50.95	0.48	0.65
糜子 Pearl millet	35	10	4.5	0.6	3.10	30.70	15.01	50.95	0.46	0.65

Note: WA: biomass-energy ratio; TG: minimum temperature; DMLA: maximum potential LAI; DLAI: fraction of growing season when leaf area declines; PPL1&PPL2: plant population parameters; DLAP1&DLAP2: two points on optimal leaf area development curve; HI: harvest index; EXTINT: extinction coefficient.

## 2 结果与分析

### 2.1 产量模拟及验证

模型能够较好模拟玉米、谷子和糜子的产量(图 3)。根据模拟值和实测值建立回归方程,玉米回归方程的决定系数  $R^2$  值为 0.72,截距为 0.03,大于 95%的置信区间为  $[-1.61, 1.68]$ ,与 0 接近,斜率为 1.05,大于 95%的置信区间为  $[0.62, 1.48]$ ,与 1 接近,由截距和斜率说明回归方程与 1:1 线接近。谷子和糜子回归方程的决定系数分别为 0.80 和 0.72,截距和斜率置信区间的检验也说明回归方程

与 1:1 线接近。

进一步分析,玉米、谷子和糜子模拟值与实测值的相对误差的平均值分别为-2.29%、-2.32%和 8.34%,其中玉米相对误差绝对值的最大值为 22.1%,最小值为 4.0%,谷子最大值为 23.7%,最小值为 1.4%,糜子最大值为 22.5%,最小值为 1.6%。通过对三种作物样本分析发现:相对误差小于 15%的样本,玉米为 71.5%,谷子为 80.6%,糜子为 70.0%。计算模拟值与实测值的标准化均方根差,玉米、谷子和糜子三种作物分别为 15.7%、11.5%和 15.8%。

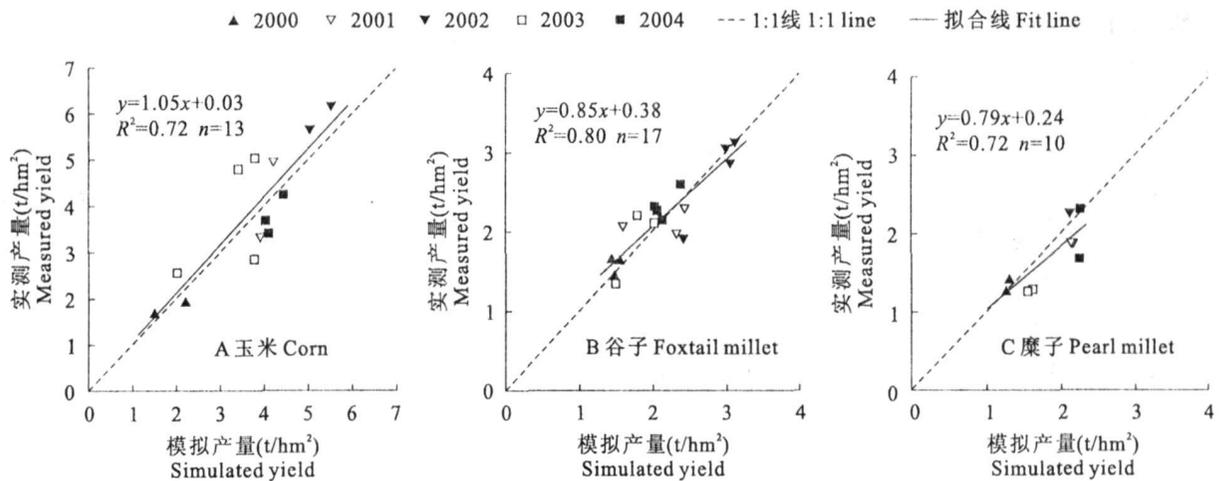


图 3 模拟产量与实测产量比较

Fig.3 Comparison of the simulated yield and measured yield

### 2.2 梯田、阴坡和阳坡产量的模拟误差

大南沟流域的农田主要分为梯田和坡耕地两类。三种作物在梯田、阴坡和阳坡的模拟误差存在着一定程度的差异(图 4)。玉米梯田产量的模拟值高于实测值,平均相对误差为 6.4%;阴坡模拟值低

于实测值,平均相对误差为-11.2%;阳坡模拟值低于实测值,平均相对误差为-1.8%。谷子梯田模拟值低于实测值,平均相对误差为-4.5%;阴坡模拟值低于实测值,平均相对误差为-2.7%;阳坡模拟值低于实测值,平均相对误差为 5.3%。糜子梯田

模拟值高于实测值,平均相对误差为 12.1%;阴坡模拟值高于实测值,平均相对误差为 5.8%。

计算不同地貌条件下相对误差的标准差(图 5),梯田产量模拟值与实测值之间的一致性较好,相对误差的标准差玉米为 10.0%,谷子为 10.6%,糜子为 9.4%,其次为阴坡,相对误差的标准差玉米为 17.1%,谷子为 15.3%,糜子为 16.7%,再次为阳坡,

相对误差的标准差玉米为 23.1%,谷子为 2.1%。

通过以上分析可以看出,ALMANAC 模型对梯田作物产量的模拟效果优于阴坡和阳坡。不同地貌部位模拟误差的产生与模型输入数据库的精度有较大关系,更高精度的气象要素和土壤属性资料的输入,将会提高模型模拟的精度程度,并揭示影响不同地貌部位作物产量的主要限制因子。

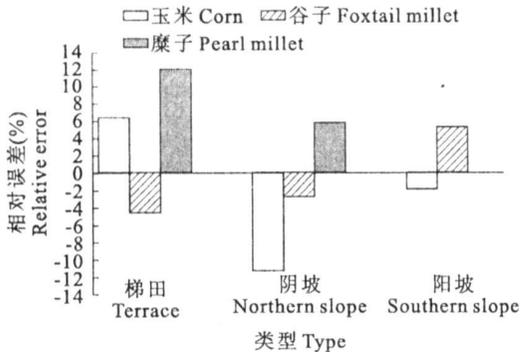


图 4 梯田、阴坡和阳坡模拟产量的相对误差

Fig. 4 Relative error of the simulated yield of the terrace, the southern and northern slopes

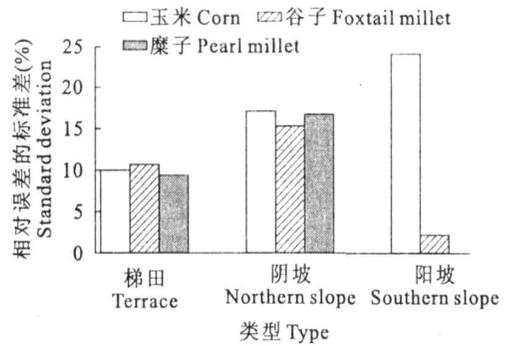


图 5 梯田、阴坡和阳坡模拟产量相对误差的标准差

Fig. 5 The standard deviation of relative error of the terrace, the southern and northern slopes

### 3 结论

ALMANAC 模型能够较好地模拟黄土高原地区田间尺度水平的玉米、谷子和糜子的产量。模拟值与实测值的回归方程与 1:1 线接近,方程决定系数大于 0.72。相对误差小于 15% 的样本,玉米为 71.5%,谷子为 80.6%,糜子为 70.2%。玉米、谷子和糜子三种作物模拟产量和实测产量相对误差的平均值分别为 -2.29%、-2.32% 和 8.34%,实测值与模拟值之间的标准化均方根差,玉米、谷子和糜子三种作物分别为 15.7%、11.5% 和 15.8%。

三种作物在梯田、阴坡和阳坡条件下,表现出不同的模拟误差。玉米梯田产量的模拟值比实测值偏高,阴坡和阳坡产量的模拟值偏低;谷子梯田和阴坡产量的模拟值偏低,阳坡产量的模拟值偏高;糜子梯田和阳坡产量的模拟值偏高。梯田模拟值与实测值之间的一致性较好,其次为阴坡,再次为阳坡。总体认为模型对梯田作物的模拟效果优于阴坡作物和阳坡作物。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change: the IPCC scientific assessment [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [2] IPCC. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [3] Curry R B, Peart R M, Jones J W, et al. Simulation as a tool for analyzing crop response to climate change [J]. Trans ASAE, 1990, 33: 981-990.
- [4] Pisal A L Du. The CERES - Corn model as a potential tool for drought assessment in South Africa [J]. Water South Africa, 1987, 13: 159-163.
- [5] Monsi M, Saeki T. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion [J]. Jpn J Bot. 1953, 14: 22-52.
- [6] de Wit C T. Photosynthesis of leaf canopies [M]. Wageningen, Netherlands: Inst Biol Chem Res Field Crops Herb, 1965: 663.
- [7] Jones C A, Kiniry J R. CERES - Corn: A Simulation Model of Corn Growth and Development [M]. College station, US: Texas A&M Univ. press, 1986.
- [8] Ritchie J T, Otter S. Description a Performance of CERES - Wheat: A User - Oriented Wheat Yield Model [M]. US: USDA - ARS. ARS - 38, 1985: 159-175.
- [9] Wilerson G G, Jone J W, Boote K J, et al. Modeling soybean growth for crop management [J]. Trans. ASAE, 1983, 26: 63-73.
- [10] Kiniry J R, Williams J R and Gassman P W etc. A general, process-oriented model for two competing plant species [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35: 801-810.
- [11] Van Keulen H, Penning de Vries F W T, Drees E M. A summary model for crop growth [C] // Penning de Vries F W T, Van Laar H H. Simulation of Plant Growth and Crop Production. Wageningen Netherlands: PUDOD, 1982: 87-98.
- [12] Van Keulen H, Wolf J. Modelling of agricultural production: weather, soils, and crops [C] // Simulation Monographs. Pudoc, 1996.

- Wageningen Netherlands; PUDOC, 1986.
- [13] Curry R B, Peart R M, Jones J W, et al. Simulation as a tool for analyzing crop response to climate change[J]. Trans ASAE, 1990, 33:981—990.
- [14] Jane Southworth, Pfeifer R A, Habeck M, et al. Changes in Soybean Yields in the Midwestern United States as a Result of Future Changes in Climate, Climate Variability, and CO<sub>2</sub> Fertilization[J]. Climatic Change, 2002, 53:447—475.
- [15] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Trans ASAE, 1983, 27:129—144.
- [16] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32:497—511.
- [17] 高晓飞, 谢 云. 用 ALMANAC 作物生长模型模拟冬小麦生长[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4):505—510.
- [18] 温美丽, 高晓飞, 谢 云, 等. ALMANAC 模型对大豆产量的模拟[J]. 资源科学, 2005, 27(4):100—105.
- [19] 李 军. 作物生长模型 ALMANAC 的验证与应用初探[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):99—104.
- [20] 陈利顶, 傅伯杰, 王 军. 黄土丘陵区典型小流域土地利用变化研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1):48—51.
- [21] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报, 1964, 34(2):303—314.
- [22] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [23] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [24] 山西省农业科学院. 中国谷子栽培学[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [25] Yongqiu Wu, Kunqing Xie, Qingchun Zhang. Crop characteristics and their temporal change on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2003, 54:7—16.
- [26] 周海艳. 毛乌素沙地主要作物糜子生理生态学特性的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(6):908—914.

## Simulation of corn, foxtail millet and pearl millet yields using ALMANAC model in the Loess Plateau

LIU Gang<sup>1</sup>, XIE Yun<sup>1</sup>, WU Rui-jun<sup>2</sup>, GAO Xiao-fei<sup>1</sup>, ZHANG Wen-bo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Crop models are helpful in the decision-making process. The purpose of this study was to evaluate the ALMANAC crop model on farm level in a small watershed, Danangou, in the Loess Plateau. The simulated crops were corn, foxtail millet and pearl millet during 2000 and 2004. The results showed that the ALMANAC crop model could simulate well the yields of three kinds of crops. Values for coefficient of determination ( $R^2$ ) between measured and simulated yields were more than 0.72. The relative errors of measured yields and simulated yields of corn, foxtail millet and pearl millet in five years were  $-2.29\%$ ,  $-2.32\%$  and  $8.34\%$ . The normal mean root square deviation between measured and simulated yields of corn, foxtail millet and pearl millet were  $15.7\%$ ,  $11.5\%$  and  $15.8\%$ . The simulated errors of three kinds of crops were different in terraces, northern slopes and southern slopes. The mean of simulated yields of corn was above measured yields in terraces, but below in northern or southern slopes. The mean of simulated values of foxtail millet was below measured yields, but above in southern slopes. The mean of simulated values of pearl millet was above measured yields. The standard deviation of relative errors showed that the terraces had the smallest difference between the simulated and measured yields, the second were northern slopes, and the third were southern slopes.

**Key words:** crop model; loess plateau; ALMANAC; corn; foxtail millet; pearl millet