

APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性

李 广¹, 黄高宝^{1,*}, William Bellotti², 陈 文³

(1. 甘肃农业大学, 兰州 730070; 2. 澳大利亚悉尼大学, 悉尼 1797; 3. 澳大利亚莫道克大学, 珀斯 6150)

摘要:为了揭示黄土丘陵区不同耕作措施对作物生长发育和土壤水分的影响及相互作用规律,根据 2002 ~ 2005 年两个轮作序列(小麦→豌豆(W→P)和豌豆→小麦(P→W))的 3 种耕作措施(传统耕作(T)、免耕(NT)和免耕覆盖(NTS))的定位试验,对 APSIM 模型的适用性进行了研究。通过定位试验得到了一套 APSIM 模型的参数值,并对其进行了率定。运用均方根误差法对 APSIM 模型进行检验,结果表明:小麦和豌豆产量与生物量的模拟值与实测值具有显著的正相关($R > 0.9$),误差范围在 $\pm 15\%$ 之内;土壤贮水量的模拟值与实测值也具有显著的正相关($R > 0.7$),误差范围在 $\pm 20\%$ 以内。表明 APSIM 模型可以用来模拟不同耕作方式和不同轮作序列的小麦和豌豆产量、生物量及土壤水分的动态变化,模型可以用于指导作物生产及耕作措施的优化管理。

关键词:APSIM; 黄土丘陵区; 耕作措施; 适用性

文章编号:1000-0933(2009)05-2655-09 中图分类号:S181 文献标识码:A

Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region

LI Guang¹, HUANG Gao-Bao^{1,*}, WILLIAM Bellotti², CHEN Wen³

1 Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Western Sydney University, 1797, Australia

3 Murdoch University, 6150, Australia

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655 ~ 2663.

Abstract: APSIM model was used to simulate crop growth and development, soil water dynamics and their interactions under different tillage systems on the Loess hill-gullied region. A suite of parameters of APSIM model was modified by using the method of standard deviation based on data from two rotational sequences (wheat → pea and pea → wheat) under conventional tillage, no-till and no-till with stubble mulch in 2002 – 2005. The results showed that the predicted and observed yields and biomass for both wheat and pea were significantly positively correlated ($R > 0.9$) with variation of $\pm 15\%$. Similar relationship was found between predicted and observed soil storage water ($R > 0.7$) with variation of $\pm 20\%$. It is suggested that APSIM model can be used to simulate crop yields, biomass and soil water dynamics under different tillage systems with different crop sequences and optimize crop production and field management.

Key Words: APSIM; loess hilly region; tillage systems; adaptation

黄土高原是世界水土流失最严重的地区之一,集中了我国三分之一的贫困人口。农户为了追求产量,“精耕细作”,一年数次深耕土壤,加之冬春农田裸露,造成严重的水土流失^[1];农业生态环境恶化则进一步加

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAD15B06);国家自然科学基金资助项目(40771132)

收稿日期:2008-10-16; 修订日期:2009-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn

加剧农户贫困。农业系统的错误管理与人民贫穷之间形成恶性循环,根源在于先天脆弱的自然生态系统中,叠加了极为不合理的人类活动。为了探索黄土高原丘陵沟壑区生产与生态双赢的农业系统模式,2000 年以来,中澳联合在“苦瘠甲天下”之称的定西研究、示范免耕、覆盖等保护性耕作技术^[2]。

在农业生产系统研究中,作物的生长模型可以提高农业生产、风险性评估和可持续管理等方面的研究水平,已经在作物栽培、优化管理、气候变化对粮食产量影响预测、区域粮食安全评估和水资源管理等方面发挥着日益重要的作用^[3]。目前,国内外在系统水平模拟作物生产优化决策的模型很多,模拟对象分别为作物、土壤、作物-土壤综合等 3 类,在研究和应用方面最得了大量的成果,但作物生长模型的研发是耗费巨大的系统工程。因此引进经过广泛验证的生长模型是当今国际生产研究最流行和最经济的办法^[4]。为此,引进了澳大利亚农业生产系统研究组 (APSRU),包括联邦科工组织和昆士兰政府等单位开发的农业生产系统模型 APSIM (agricultural production system simulator)。APSIM 模型虽然产量和经济评估功能与其他模型相似,但该模型长于作物轮作系统模拟^[5~8]。模型可以模拟轮作系统不同耕作措施各组份动态,作物生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量、土壤水分动态的关系以及各种气候背景组合条件下的产量,可以实现不同年型下的动态决策和气候应变管理,还可以对新品种的应变管理提供参考^[4]。国外 APSIM 在作物轮作决策、水土保持评价、气候变化的作物响应和保护性耕作效应综合评估等方面取得大量研究成果^[8~17]。在我国,主要由于田间数据积累较少,目前只有模型简介、冬小麦气候风险评估与水肥管理的研究报道^[5,18~20]。为了 APSIM 在国内取得更广泛的应用,本研究以定西雨养农业区小麦→豌豆轮作系统为对象,运用 APSIM 模型评估不同保护性耕作措施的作物-土壤互作效应,以评估模型的适用性,确定一套适用黄土丘陵区参数,以期为该模型的本土化和农业优化决策提供有益借鉴,特别是用来分析研究不同耕作措施和轮作系统中作物生长发育及其影响因子的相互作用机理,为农业生产研究提供一些理论依据。

1 材料与方法

1.1 APSIM 模型简介

APSIM 模型自 1991 年开始研制,主要由 4 部分组成:(1)生物物理模块,模拟作物系统的生物与物理过程;(2)管理模块,为用户提供管理措施和控制模拟;(3)控制模块,调用指令/数据进出的模块,以启动模拟过程;(4)中心引擎,控制其它模块的模拟过程。中心引擎是一个模块化主平台,是模型的核心,子模块可以分别开发并“键合”到主平台,目前能够比较准确地预测在各类气候、作物品种、土壤与管理因素相互作用的作物与土壤效应,评估气候变化的作物风险^[5~9]。

1.2 试验区概况

田间试验于 2002~2005 年在甘肃省定西市安定区李家堡乡定位试验站进行,地处陇中黄土高原,为典型的雨养农业区,一年一熟制,春小麦、豌豆是种植面积较大的两个作物,麦→豆轮作是主要种植方式。海拔 2000m,年均太阳辐射 $141.6 \times 4.183 \text{ kJ/cm}^2$,日照时数 2476.6h,年均气温 6.4°C ,年均 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 2933.5 $^\circ\text{C}$,年均 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2239.1 $^\circ\text{C}$,无霜期 140d,多年平均降雨量 391.0mm,年蒸发量 1531mm。试验地平坦无起伏,土壤为黄绵土,土壤容重 1.19 g/cm^3 ,pH 值 8.36,土壤有机质 12.01 g/kg ,全氮 0.76 g/kg ,全磷 1.77 g/kg 。

1.3 试验设计

采用春小麦 (W) 和豌豆 (P) 双序列轮作方式 (W→P 和 P→W)。3 种耕作方式:传统耕作 (T)、免耕 (NT) 和免耕 + 作物秸秆覆盖 (NTS)。试验小区面积 $20 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,边行 0.5m 为保护行,完全随机区组设置,4 次重复。参试作物为定西 35 号春小麦,播种量 187.5 kg/hm^2 ;绿豌豆,播种量 180 kg/hm^2 ;中国农业大学研制的免耕播种机播种。春小麦播种时施纯氮 105 kg/hm^2 ,纯 P_2O_5 105 kg/hm^2 (AU + 二铵);豌豆各处理均施纯氮 20 kg/hm^2 ,纯 P_2O_5 105 kg/hm^2 (过磷酸钙 + 二铵)。覆盖秸秆为当年作物秸秆 (第一年除外),切碎 (5cm 左右) 后均匀覆盖于各自小区。

1.4 取样与测试

收获时取样 20 株进行考种,以各小区打碾产量折算公顷产量。试验期间每隔 15 d 测定 1 次土壤水分。

其中 0 ~ 10 cm 用烘干法测定, 10 cm 以下用中子水分仪测定。共 9 层: 依次为 0 ~ 5 cm, 5 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 80 cm, 80 ~ 110 cm, 110 ~ 140 cm, 140 ~ 170 cm, 170 ~ 200 cm。同时测定田间最大持水量 (drainage upper limit, DUL) 及作物有效水分下限 (crop lower limit, CLL)。CLL 是对土壤和作物特性的反映, 是一种作物在特定土壤上吸水能力的一种极限, 与凋萎湿度有很大的区别, 它更客观、更准确地反映一种作物在特点土壤上吸水的能力和状况。中子仪的读数最后矫正成体积含水量。矫正曲线:

$$Y_{10-30\text{cm}} = 63.226x + 3.7518 \quad (R^2 = 0.754)$$

$$Y_{40-200\text{cm}} = 58.923x + 0.4483 \quad (R^2 = 0.7666)$$

1.5 模型的验证

模型的检验主要选用标准统计参数作为检验指标, 对不同耕作措施下小麦/豌豆双序列轮作系统中的作物生长情况 (以产量和生物量为参考指标) 和土壤水分变化 (以土壤贮水量为参考指标) 的模拟进行检验。检验指标包括相关系数 (R)、均方根误差 ($RMSE$)、归一化均方根误差 ($NRMSE$) 及模型的有效性 (M_E)。公式:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{Obs}} - Y_{\text{Sim}})^2}$$

$$NRMSE = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{Obs}} - Y_{\text{Sim}})^2}{Y_{\text{mean}}}}$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{sim}})^2}{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{mean}})^2}$$

式中, $RMSE$ 、 $NRMSE$ 、 M_E 分别为均方根误差, 归一化均方根误差和模型的有效性; Y_{obs} 为实测值; Y_{sim} 为模拟值; Y_{mean} 为实测值的平均值。其中 $RMSE$ 的值越小, 表明模拟值与实际观测值的偏差越小, 两者的一致性越好, 模型的模拟结果越准确、可靠; M_E 的值等于 1, 表示模拟值与实测值的每一对数据均相等; M_E 为 0 值表示实测值的平均值和模型的模拟值对实测值具有相同的相关性; M_E 值为负值表示实测值的平均值对实测值的相关性要高于模型的模拟值。张勋昌认为当 M_E 大于 0.5 时, 表明模型的模拟结果较好^[21,22]。

2 APSIM 模型的参数调试和有效性检验

2.1 APSIM 模型的参数调试及模块的组建

2.1.1 气候模块组建

气候模块是 APSIM 模型的基础, 因此建立合理和精确气候模块是决定整个模型应用的关键。模型是在逐日气象要素变量的驱动下, 进行逐日作物生理生态、土壤剖面水肥动态和土壤侵蚀量等过程的数值模拟。模型运行所需的最基本 (最少) 一组逐日气象要素变量包括: 逐日太阳辐射量 (MJ/m^2)、逐日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$) 和逐日降水量 (mm), 当地的纬度、月平均温和月均温变化等参数项, 并以文本的形式存储于 Weather. met 文件中。以安定区 1970 ~ 2001 年的气象要素为基础气候背景 (甘肃省气象局), 2002 ~ 2005 年的气象资料是由澳大利亚提供的气象自动观测仪在试验点测得。组建气候模块其它参数较容易获取, 主要是逐日太阳辐射值难以得到, 因此模型利用日照时间进行转换计算逐日太阳辐射, 转换公式:

① 赤纬的计算

$$\sin \delta = -\sin(\pi \times 23.45/180) \times \cos[2\pi \times (t_d + 10)/365]$$

式中, δ 为赤纬; t_d 为年的日序 (1 月 1 日取为 1, 12 月 31 日为 365, 如果当年是闰年, 那么最后一天为 366)。

② 太阳高度角的计算

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

式中, h 为太阳高度角; ϕ 为地理纬度; δ 为赤纬; ω 为时角, 时角 ω 为地方时, 正午时 $\omega = 0$ 。

③ 天文辐射的计算

$$Q_{\text{日}} = \frac{TI_0}{2\pi\rho^2}(\omega_0\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\sin\omega_0)$$

式中, $Q_{\text{日}}$ 为天文辐射; T 为一天的时间 ($T = 24 \times 60 \times 60 = 86400s$); ω_0 为日出日没时角 ($\cos\omega_0 = -\tan\varphi \tan\delta$); I_0 为太阳常数; ρ 为日地距离。

④ 总辐射的计算

$$Q = Q_{\text{日}}(a + b \times (n/N))$$

式中, Q 为总辐射; s 为相对日照; a, b 为常数 (在西北地区分别取 0.18, 0.55), 其中 N 用 Goudriaan 和 Van Laar 提出的公式计算: $N = 12 \times [1 + (2/\pi) \times \sin(a/b)]$ ($a = \sin\varphi \times \sin\delta, b = \cos\varphi \times \cos\delta$)。

2.1.2 土壤属性模块组建

在一定的气候条件下, 土壤是影响作物生长的决定性因素。这也是 APSIM 与其他作物模型不同之处, APSIM 模拟系统的核心突出的是土壤而非植被, 天气和管理措施引起土壤特征变量的连续变化被作为模拟中心, 而作物在土壤中的生长、发育只不过是使土壤属性改变。因此建立合理和精确的土壤属性模块是至关重要的。根据在试验地测定的土壤属性参数建立土壤模块^[2,3~26] (表 1), 模块命名为 Dingxi_soil.par。

由于 APSIM 模型所采用的一些土壤理化性状参数及其单位与我国常用的参数有所不同, 需要对其进行适当转换。如用土壤体积含水量计算以 m^3/m^3 表示的方法为:

$$\text{土壤体积含水量}(m^3/m^3) = \text{土壤重量含水量}(t/t) \times \text{土壤容重}(t/m^3)$$

在管理模块中可以用“SET”进行初始土壤含水量设置: Soilwat2 set insoil = 0.5 (m^3/m^3); 也可以在土壤水分模块用不同的方法进行定义初始土壤含水量。

假如用户自定义土壤含水量, 那么土壤初始含水量值应该大于 1 ($\text{Insoil} > 1$); 如果土壤初始含水量值在 0 ~ 1 之间, 那么每一层土壤含水量 (SW):

$$\text{Soil water}(SW) = LL15 + (DUL - LL15) \times \text{Insoil}$$

式中, SW 为不同层土壤含水量; $LL15$ 为萎蔫系数; DUL 为最大田间持水量; Insoil 为土壤初始含水量。

表 1 APSIM 模型模拟研究区的主要土壤属性参数

Table 1 Soil properties of the experiment site used for specifying APSIM simulation

模块 Model	土层 Soil layer 深度 Depth (mm)	1 50	2 100	3 300	4 500	5 800	6 1100	7 1400	8 1700	9 2000
土壤水分 Soil water	容重 BD (g/cm^3)	1.29	1.23	1.32	1.20	1.14	1.14	1.13	1.12	1.11
	萎蔫系数 LL15 (mm/mm)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.13	0.13
	最大持水量 DUL (mm/mm)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26
	饱和含水量 Sat (mm/mm)	0.46	0.49	0.45	0.50	0.52	0.52	0.48	0.53	0.53
	风干系数 Air_dry (mm/mm)	0.01	0.01	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
作物水分 Crop water	土壤导水 SWCON (ks mm/h)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	小麦 CLL of wheat (mm/mm)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15
	豌豆 CLL of pea (mm/mm)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.22	0.26	0.27	0.27	0.27

2.1.3 作物模块的组建

APSIM 模型采用的是通用作物生长模型来模拟各种 1 年生和多年生作物的生长, 只是各作物具有不同的模型参数值。为此通过 2002 ~ 2005 年定位研究的作物属性资料, 建立作物属性模块, 模块命名为: Dingxi_crop.par。作物属性模块主要包括研究区小麦和豌豆品种遗传特性参数、作物生长发育进程、植株形态与产量形成等参数 (表 2 和表 3)。

2.2 APSIM 模型的检验

2.2.1 APSIM 模型模拟作物产量的检验

在小麦→豌豆 (W→P) 和豌豆→小麦 (P→W) 双序列轮作系统中小麦和豌豆从 2002 ~ 2005 年两次轮

作产量的模拟结果来看,T、NT 和 NTS 3 种不同耕作措施的模拟值和实测值之间表现了很好的一致性,模拟产量分布在 $-15\% \sim +15\%$ 的误差线内(图 1)。

表 2 小麦模块的初始参数值
Table 2 Initial parameters of wheat

参数 Parameters	值 Value
从灌浆到成熟的积温 Accumulative temperature from filling to maturity(℃)	580
穗粒数 Grain number per spike (number/spike)	30
灌浆速率 Rate of filling (mg/grain/d)	2.3
分蘖重 Weight of tiller(g/tiller)	1.22
单株重 Weight of single plant(g)	4
株高 Stem length(mm)	1000

表 3 豌豆模块的初始参数值
Table 3 Initial parameters of field pea

参数 Parameters	值 Value
收获指数的增长率 Growth rate of harvest index (%)	0.015
最大收获指数 Maximal harvest index (g/d)	0.5
灌浆期积温 Accumulative temperature of filling(℃)	500
出苗到开花天数 Number of days from seeding emergence to anthesis (d)	40
光周期 Photoperiod (h)	12
分枝到始花期积温 Accumulative temperature from branching to beginning date of flowering(℃)	150
苗期积温 Accumulative temperature of seedling stages(℃)	300
生育期 Growth duration (d)	100
单株重 Weight of single plant(g)	10
株高 Stem length(mm)	1000

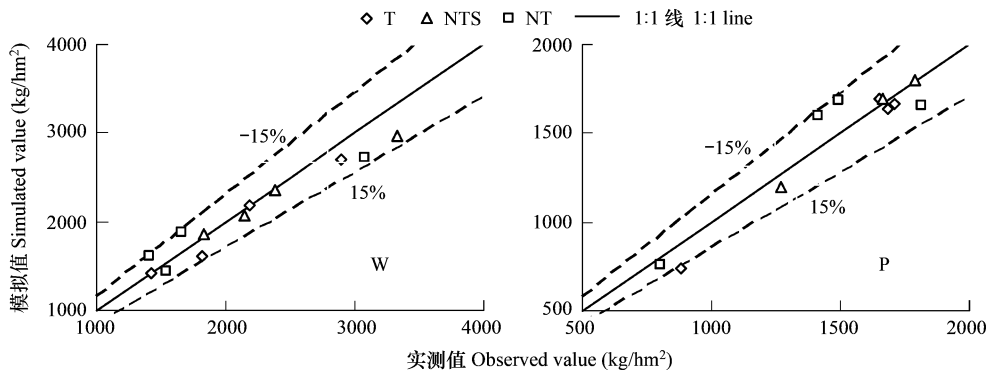


图 1 不同耕作措施下模拟和实测产量相关分析
Fig. 1 Correlation analysis of observed and simulated value of yields in different tillage systems

为了进一步验证模拟值与实测值之间的拟合程度,运用相关分析法进行统计分析(表 4)。产量模拟值和实测值呈正相关,并且相关系数(R)都大于 0.9,归一化均方根误差都小于 10%, M_E 都远大于 0.5,表明 APSIM 模型对 3 种耕作措施下的产量有较高的模拟性。在 3 种耕作措施中,NTS 相对其它两种耕作方式相对差一些,分析原因,模型的覆盖量是理想的,而实际生产当中,可能会出现覆盖的均匀性和密度等因素的影响造成的,但也可以进行准确的模拟。

2.2.2 APSIM 模型模拟作物生育期生物量的检验

整个生育期生物量能够反映收获指数的合理性和干物质分配的可靠性,因此整个生育期生物量的模拟精

度的检验也是对模型评价的重要指标。为了较为合理的模拟生物量,小麦从出苗到成熟每个生育期取了四次样,豌豆取了3次样,通过对比实测和模拟的生物量,分布趋势表现了很好的一致性,其分布趋近 1:1 趋势线,并都控制在 $-15\% \sim +15\%$ 误差线内(图 2),相关系数(R)都大于 0.9,模型有效性 M_E 都远大于 0.5,均一化均方根误差也都控制在 10% 以内(表 5)。表明 APSIM 模型模拟的生物量与产量具有同样高的精度。

表 4 不同耕作措施下模拟和实测产量的统计指标

Table 4 Statistical indices of simulated and observed values of yields in different tillage systems

耕作方式 Tillage	小麦 Wheat				豌豆 Field pea			
	RSME	NRSME	M_E	R	RSME	NRSME	M_E	R
T	144.78	6.96%	0.93	0.985	82.24	5.55%	0.94	0.995
NT	233.84	9.66%	0.92	0.963	156.41	9.14%	0.90	0.921
NTS	184.88	7.64%	0.89	0.994	155.48	9.08%	0.74	0.904

表 5 不同耕措施的模拟和实测生物量的统计指标

Table 5 Statistical indices of simulated and observed values of biomass in different tillage systems

耕作方式 Tillage	小麦 Wheat				豌豆 Field pea			
	RSME	NRSME	M_E	R	RSME	NRSME	M_E	R
T	257.3	9.53	0.989	0.972	207.8	9.93	0.984	0.985
NT	268.5	7.84	0.989	0.994	163.0	8.09	0.990	0.976
NTS	25.0	0.81	0.918	0.970	197.5	7.91	0.990	0.995

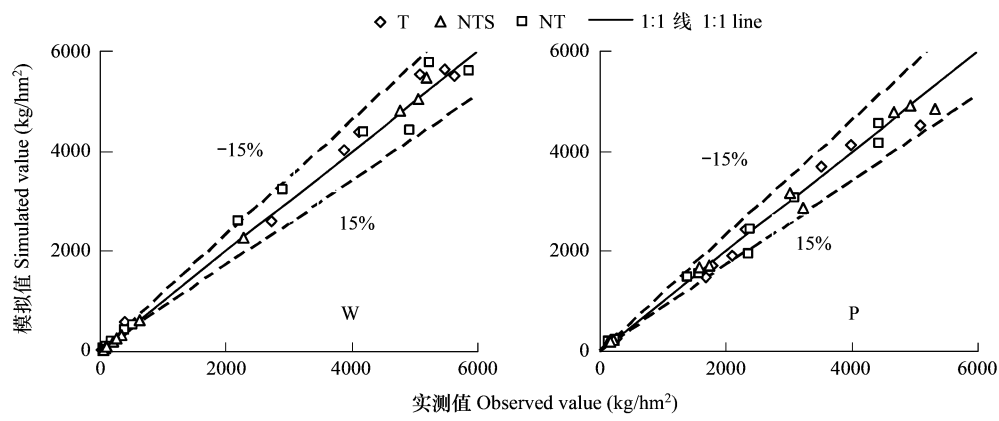


图 2 不同耕作措施下模拟和实测生物量相关分析

Fig. 2 Correlation analysis of observed and simulated value of biomass in different tillage systems

2.2.3 APSIM 模型模拟土壤水分的检验

APSIM 模型从 2002 ~ 2005 年(两个轮作序列)对整个生育阶段作物生长与土壤贮水量(0 ~ 200cm)运移耦合的复杂过程进行了模拟,然后把土壤贮水量的模拟值与实测值进行比较与分析(图 3)。3 种耕作措施在两个轮作序列(W→P 和 P→W)中,都表现出了非常好的拟合性,年际变化趋势一致。为了进一步计算土壤贮水量的模拟值与实测值之间的相关程度,对 3 种耕作措施下的土壤贮水量进行相关分析(表 6),归一化均方根误差都小于 20%,并且土壤贮水量在两个轮作序列中相关系数(R)都大于 0.7。表明 APSIM 模型的土壤水分模块可以用来模拟研究区土壤水分变化趋势及动态。

3 结论和讨论

APSIM 模型是以 1d 为步长,可以详细地模拟作物生长发育的日积累过程,并可以对不同耕作措施、不同种植制度及各种气候背景组合条件下的作物生长、土壤水分动态变化等要素进行模拟,同时也可以实现不同组合设计的动态决策及应变管理。

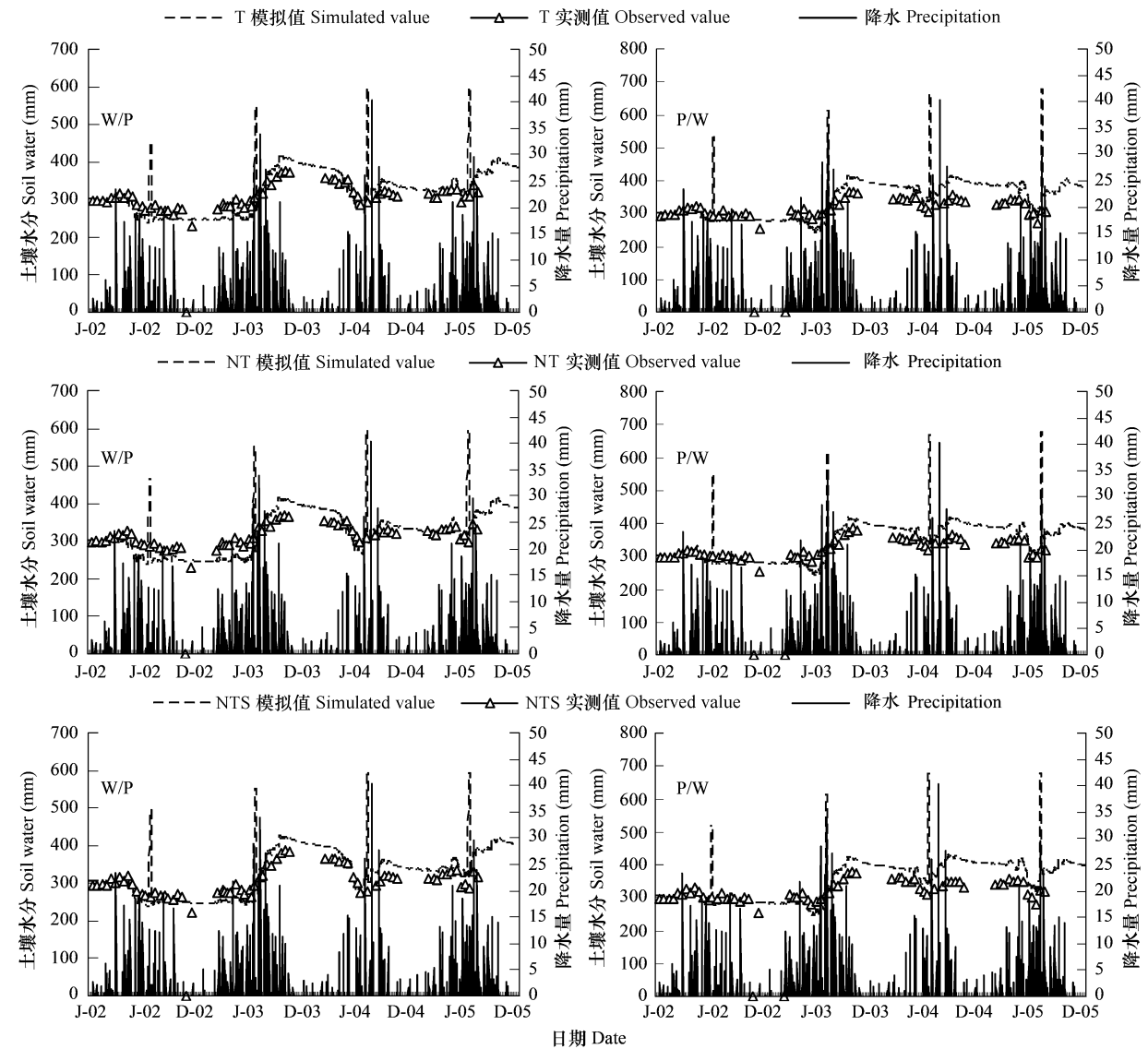


图3 不同耕作措施的模拟与实测土壤水分

Fig. 3 Observed and simulated value of soil water in different tillage systems

表 6 不同耕作措施的模拟和实测土壤贮水量的统计指标

Table 6 Statistical indices of simulated and observed values of soil storage water in different tillage systems

耕作方式 Tillage	小麦 Wheat			豌豆 Field pea		
	RSME	NRSME(%)	R	RSME	NRSME(%)	R
T	16.4	5.28	0.880	52.2	16.44	0.702
NT	16.2	5.16	0.877	47.5	14.67	0.766
NTS	19.7	6.42	0.896	53.9	16.72	0.725

根据定西李家堡实验站 2002 ~ 2005 年的定位试验研究,确定了模块参数,并对其进行了反复的率定。在率定参数的基础上运用模型对 3 种耕作措施下小麦→豌豆和豌豆→小麦双序列轮作的产量、生物量和土壤贮水量进行了模拟检验。结果表明:

(1)小麦和豌豆产量与生物量在两个轮作序列中的模拟与实测值在 $\pm 15\%$ 的误差范围内,并且呈显著的正相关,相关系数(R)都大于 0.9,归一化均方根误差都小于 10%,并且模型有效性指数 M_e 都远大于 0.5,表明模型对 3 种耕作措施下产量和生物量都有较高的模拟性。从 APSIM 模型对小麦和豌豆的模拟结果来看,

对小麦产量和生物量的模拟结果非常理想,对豌豆产量和生物量的模拟拟合度相对较低。模型模拟的生物量和产量大都高于实测值,由于模型虽已考虑了耕作措施对作物吸收养分和水分的影响,但对于病虫害等方面的模拟似乎还有所欠缺,从而导致模拟值比实际值偏高。而其中 2004 年的模拟值比其他年份都好,不论是生物量还是产量的模拟值都与实测值非常吻合,而 2004 年比较干旱,降水量较其他年份明显偏低,说明 APSIM 模块干旱年的适应性优于湿润年,这与模型最初设计时针对的是澳大利亚干旱气候条件有密切关系。APSIM 经过参数本土化,当地品种物候特征修改后,APSIM 模块已经可以反映黄土丘陵区小麦和豌豆产量和生物量的动态变化,但其精确性仍有待提高。

(2) 土壤贮水量的模拟值与实测值的归一化均方根误差小于 20%,相关系数(R)都大于 0.7,表明土壤水分模块可以用来模拟研究区土壤水分变化趋势及动态。从 APSIM 模型模拟 2002~2005 年两次轮作的土壤贮水量来看,对 2004~2005 年模拟的土壤贮水量在 3 种耕作措施下都高于实测值,且精度低于 2002~2003 年模拟的土壤贮水量,原因是前茬作物对后茬作物在水分方面有很大的影响造成的,表明土壤水分模块在长序列的模拟中还需要调整相关参数来进一步提高和改善模型的性能。

APSIM 模型与其他作物模型不同的是,APSIM 模拟系统的核心突出的是土壤而非植被。天气和管理措施引起的土壤特征变量的连续变化被作为模拟的中心,而作物在土壤中的生长、只不过是使土壤属性改变,因此不同耕作措施只是引起土壤特征变量值的变化,通过控制文件的参数来实现覆盖量和耕作方式对土壤特征值的改变,而基础土壤数据库在同一研究区是不变的。模型由于参数众多、结构复杂,相关参数要严格根据所选作物品种特性及土壤理化性质进行设置,模型仍存在不少需要改进的地方。如各作物生育期详细的作物生理参数(如叶面积指数、地下生物量等)和病虫害对作物生长过程的影响都没有特殊考虑,特别是耕作措施的长期效应,还需要整理运用多年气象、试验数据进一步长期、精细的验证。

References:

- [1] Dong S C, Wu Y P, Wang H Y. A study on the eco-economic development model in the eco-environmental vulnerable and needy region on Loess Plateau: the case of Dingxi Prefecture in Gansu Province. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 590—600.
- [2] Huang G B, Guo Q Y, Zhang R Z, *et al.* Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dry land. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1176—1185.
- [3] Luo Y, Guo W. Development and problems of crop models. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5): 307—312.
- [4] Cheeroo N F, Robertson M J, Wegener M K, *et al.* Using a simulation model to assess potential and attainable sugarcane yield in Mauritius. *Field Crops Research*, 2000, 66: 225—243.
- [5] Shen Y Y, Nan Z B, Bill B, *et al.* Development of APSIM and its application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 1027—1032.
- [6] Asseng S, Keating B A, Fillery I R P, *et al.* Performance of the APSIM-Wheat model in Western Australia. *Field Crops Res*, 1998, 57(2): 163—179.
- [7] Asseng S, Keulen H V, Stol W, *et al.* Performance and application of the APSIM N-Wheat model in the Netherlands. *Europ J Agronomy*, 2000, 12(1): 37—54.
- [8] Sun N, Fen L P. Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models. *Transaction of the CSAE*, 2005, 21(2): 106—110.
- [9] Sinclair T R, Seligman N. Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*, 2000, 68: 165—172.
- [10] Ritchie J T. IBSNAT and CERERS-Rice model. *Weather and Rice*, IRRI, 1987, 271—282.
- [11] Jones J W, Keating B A, Porter C H. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, 2001, 70: 421—443.
- [12] Mccown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, *et al.* APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50: 255—271.
- [13] Mccown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, *et al.* APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1995, 39: 225—231.
- [14] Asseng S, Dunin F X, Fillery I R P, *et al.* Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate Temporal and spatial variability. *Aust J Agric Res*, 2001, 52(1): 57—66.
- [15] Steiner J L, William J R, Jones O R. Evaluation of the EPIC simulation model using dry land wheat sorghum fallow crop rotation. *Agron J*, 1987,

79:223—232.

- [16] Keating B A, Meinke H. Assessing exceptional drought with a cropping systems simulator: A case study for grain production in northeast Australia. *Agric Sys*, 1998, 57(3): 315—332.
- [17] Keating B A, Robertson M J, Muchow R C, *et al.* Modeling sugarcane production systems I. Description and validation of the sugarcane module. *Field Crops Res*, 1999, 61(3): 253—271.
- [18] Wang L, Zheng Y Y, Yu Q, *et al.* Applicability of agricultural production systems simulator (APSIM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2480—2486.
- [19] Lin Z H, Mo X G, Xiang Y Q. Research advances on crop growth models. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 750—758.
- [20] Wang L, Zheng Y F, Yu Q. Application in management of land and fertilizer water resources. *Agro-Environment and Development*, 2007, 3: 27—32.
- [21] Wang J X, Zheng F L, Jiang Z S. Assessment on WEPP model (hill slope version) applicability to hilly gully region on the Loess Plateau; a case study in slope length factor. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 50—55.
- [22] Zhang X C. Calibration, refinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production. *ASAE*, 2004, 47(4): 1075~1085.
- [23] Sun L J, Zhang R Z, Huang G B. Effects of the conservation tillage on the physicochemical characteristics of soil surface in the semi-arid areas of the Loess plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 207—211.
- [24] Li L L, Huang G B, Zhang R Z, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2326—2332.
- [25] Li L L, Huang G B, Zhang R Z, *et al.* Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 94—97.
- [26] Jin X J, Huang G B. Effects of different tillage methods on soil water and water use efficiency in semi-arid area of Gansu. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 109—112.

参考文献:

- [1] 董锁成, 吴玉萍, 王海英. 黄土高原生态脆弱贫困区生态经济发展模式研究——以甘肃省定西地区为例. *地理研究*, 2003, 22(5): 590~600.
- [2] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序轮作体系的水分动态及产量效应. *生态学报*, 2006, 26(4): 1176~1185.
- [3] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 307~312.
- [5] 沈禹颖, 南志标, Bill Bellotti, 等. APSIM 模型的发展与应用. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1027~1032.
- [8] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 106~110.
- [18] 王琳, 郑有飞, 于强. APSIM 模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2480~2486.
- [19] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述. *作物学报*, 2003, 29(5): 750~758.
- [20] 王琳, 郑有飞, 于强, 等. 农田生产系统模型 (APSIM) 在土地和水肥资源管理中的应用. *农业环境与发展*, 2007, 3: 27~32.
- [21] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价——以坡长因子为例. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 50~32.
- [23] 孙利军, 张仁陟, 黄高宝. 保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 207~211.
- [24] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326~2332.
- [25] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 94~97.
- [26] 晋小军, 黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 109~112.