

分布式水文模型在陕西省冬小麦产量模拟中的应用

李明星^{1,2}, 刘建栋³, 王馥棠³, 刘文泉³, 戴晓苏⁴, 廖要明⁴

(1. 中国科学院 大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 利用分布式水文模型和作物模型模拟了不同深度的土壤含水量, 以及在连接分布式水文模型和不连接分布式水文模型两种方式下, 利用作物模型分别对冬小麦叶面积指数、干物重增量和产量进行了模拟, 最后采用连接分布式水文模型的作物模型模拟了全流域内冬小麦产量的空间分布。模拟结果经对比检验表明, 分布式水文模型在土壤水分模拟方面准确性高于作物模型; 连接分布式水文模型的作物模型对冬小麦生长过程和产量的模拟结果准确性均高于作物模型独立模拟的结果; 连接分布式水文模型的作物模型在流域内对冬小麦产量的空间分布模拟结果也与农业试验站观测产量和社会统计产量基本一致, 高产区、低产区分布与实际基本相吻合。这为分布式水文模型和作物模型耦合应用, 以及通过引进分布式水文模型来推动作物模型和产量预报研究进一步发展提供了基本的试验支持。

关键词: 分布式水文模型; 作物模型; 冬小麦; 产量模拟

文献标识码: A **文章编号:** 1000—288X(2008)05—0148—07 **中图分类号:** S165⁺27, P334⁺.92

Application of Distributed Hydrological Model to Yield Simulation of Winter Wheat in Shaanxi Province

LI Ming-xing^{1,2}, LIU Jian-dong³, WANG Fu-tang³, LIU Wen-quan³, DAI Xiao-su⁴, LIAO Yao-ming⁴

(1. START Regional Center for Temperate East Asia, Key Laboratory of Regional

Climate Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate University of the Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences,

Beijing 100081, China; 4. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Soil water content at different soil depths is simulated using distributed hydrological model and crop model. Leaf area index (LAI), increment of dry matter, and grain yield are simulated respectively using the crop model, together with linked distributed hydrological model and the crop model only. Finally, the spatial distribution of grain yield in the whole watershed is simulated using the crop model linking distributed hydrological model. Results show that the accuracy of soil water content simulated by distributed hydrological model is higher than that calculated by crop model. The accuracy of winter wheat growth and grain yield simulated by the crop model linking distributed hydrological model is higher than that simulated by crop model only. The simulation of spatial distribution of grain yield is consistent with that of observed yield and statistical yield on the whole, and the distribution in high yield region and low yield region is consistent with the actual distribution, basically. The study is a fundamental trial of the application of crop model coupled with distributed hydrological model and attempts to promote the development of the research on crop model and yield forecast through incorporating distributed hydrological model into crop model.

Keywords: distributed hydrological model; crop model; winter wheat; yield simulation

粮食产量预报信息对确保我国粮食安全, 经济平稳发展和社会稳定等都具有十分重要的意义。粮食产量预报研究为决策部门规划国民经济, 优化产业结

构提供了基本参考数据。目前作物生长模型是作物产量模拟和预报研究所采用的最主要的方法和手段之一。近年来, 随着作物生长模型的逐步完善以及计

算水平的提高,使得影响作物生长发育的许多环境因子能够通过耦合其它模型加以研究,进一步推动了作物模型以及作物产量模拟和预报研究的发展。

从作物生长模型产生至今,作物模型主要对地形理想状况下(如平原)的作物进行气候生产力的模拟和预报研究^[1-2],它对土壤水分的计算过程是依据水分平衡原理,多以饱和和下渗的方法处理,其中一些作物模型对土壤水分的描述已经采用的 Darcy 或 Richards 方程^[3],对土壤中水分的分布和运移描述较为详细,但无论那种作物模型都无法描述地形对降水的二次分配和对土壤水分的影响,地形因子对降水的再分配效应在平原地区不太明显,但对于地形复杂,作物生长受土壤水分胁迫严重的雨养农业区,其影响是很显著的^[4-5]。

我国西北地区地形复杂,气候干旱,土壤水分对作物生长起着至关重要的作用,作物模拟和产量预报必须充分考虑地形对降水的再分配效应和对土壤中作物可利用含水量的影响。而分布式水文模型可以借助于 DEM(数字高程模型)数据,详细刻画研究区域的流域分布和地形变化,充分考虑地形因子在降水到达地面进入土壤前,产生径流的过程,由此对降水的重新分配,进而对土壤中作物可利用含水量的影响。目前国内外连接分布式水文模型和作物生长模型,对地形复杂地区进行冬小麦产量模拟和预报研究的文献报道比较少。本文通过作物模型和水文模型相结合的方法对西北地区冬小麦生长模拟和产量预报进行了探索研究,以期在应用水文模型进一步完善作物模型生长过程模拟、产量模拟和预报方面做出新的尝试。

1 模型和方法

1.1 水文模型简介

本文所采用的水文模型为分布式水文模型 SWAT2000 (soil water and assessment tools),该模型是由美国农业部的农业研究中心(USDA—ARS)开发的,以日为时间步长,是一个长时段流域分布式模型,适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域,并能在资料缺乏的地区建模。模型中对降水到达地面及形成地表径流,土壤中水分的分配和运移过程的描述主要分为冠层截留、下渗、重新分配、蒸发蒸腾、壤中流、地表径流、输移损失、地下径流等过程。

本文对研究区域进行子流域划分和土壤水分计算时所采用的 DEM 数据、土壤分类、土地利用和河流分布数据为 1:400 万的小比例尺数据。气象资料

为 1991 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日 10 a 的日降水量、日最高最低气温、日平均风速、日总辐射、日平均相对湿度。

1.2 作物模型简介

本文采用的作物模型是在 ARIDCROP 模型的基础上改进而来的。ARIDCROP 模型最初是由荷兰和以色列科学家联合开发用以研究半干旱地区作物的真实和潜在生产力。1975 年 Van Keulen 等^[11-12]将该模型发展成为半干旱条件下作物的生长模拟模型。20 世纪 80 年代基于实用性考虑对模型的输入数据进行了简化并进一步发展了该模型,ARIDCROP 模型引入我国后,刘建栋等^[13-14]对光合等过程进行了改进,并修正了部分基本参数。ARIDCROP 模型用以计算作物在土壤水分因子影响下的干物质生产过程,考虑到干物质生产过程在品种之间的差异较小,对作物从生理、物候、机理上进行了定义,简化了植物品种之间的差异。对大田冬小麦这样单一物种模拟,计算相对简单,结果也更接近实际。模型需要输入的气象数据为气象台站观测数据,包括:日降水量、日总辐射、最高和最低气温、日平均风速、露点湿度(或干湿球湿度)。

1.3 研究方法

本文选定我国陕西省为研究区域,并对整个研究区域进行子流域划分,分别计算每个子流域各层土壤的作物可利用含水量,以文本文件的形式保存计算结果,并对水文模型模拟结果与土壤湿度观测数据进行了相关检验,然后通过直接读取土壤水分数据文件的形式连接作物模型和水文模型,进行冬小麦生长和产量模拟。作物模型分别采用连接 SWAT 模型和不连接 SWAT 模型两种方式模拟冬小麦的生长过程和产量形成过程,进而对比分析和评价连接分布式水文模型对作物生长和产量模拟的影响。

2 土壤水分模拟、验证和对比

按照作物模型输入数据格式的要求,在水文模型中把土壤分为 10 层,模拟了 1991—2000 年各层的土壤含水量,选择 0—50 cm 土层作物可利用含水量与 50 cm 土壤墒情观测数据进行了对比,并以陕西省北、中、南部 6 个代表性观测站进行相关性检验,相关系数如表 1 所示。

由于观测数据和计算数据单位不同,而且分别表示了 50 cm 处约 5 cm 厚土层平均含水量和 0—50 cm 土层土壤总含水量,但两组数据的波动基本能够反映土壤水分的增减变化趋势,所以这种趋势上的吻合越接近则反映计算值越接近观测值。相关检验表

明在 0.01 水平上波动相关显著,即水文模型模拟土层含水量波动与土壤湿度观测值相关显著。

为了比较分布式水分模型和作物模型土壤水分计算准确性的高低,选择 ARIDCROP 模型模拟的 20—30 cm 土层总含水量(mm)和 SWAT 模型模拟的 10—50cm 土层的总含水量(减去凋萎含水量/mm)与土壤湿度观测值(重量百分含水率)进行波动趋势对比。由于土壤湿度实测资料的限制,只选择了研究区域内北、中、南部共 7 个观测点。另外转换成相同单位进行对比会人为引进误差,所以只通过对比两个模型计算值和观测值变化趋势的吻合程度,用相关系数来比较两个模型计算结果相对于观测值的准确性差异。相关系数计算结果如表 2—3 所示。

表 2 作物模型和水文模型模拟土壤含水量与观测值的 Pearson 相关系数

模型	榆林	绥德	洛川	蒲城	长安	城固	安康
ARIDCROP	0.055	0.181 **	0.440 **	-0.096	-0.066	0.105	-0.025
SWAT	0.282 **	0.375 **	0.353 **	0.470 **	0.621 **	0.280 **	0.200 *

表 3 作物模型和水文模型模拟土壤含水量与观测值的 Spearman 相关系数

模型	榆林	绥德	洛川	蒲城	长安	城固	安康
ARIDCROP	0.065	0.186 **	0.389 **	-0.073	0.009	0.148	0.055
SWAT	0.147 **	0.216 **	0.244 **	0.453 **	0.586 **	0.326 **	0.347 **

注: *表示在 0.05 水平相关显著(双尾检验); **表示在 0.01 水平相关显著(双尾检验)。

在 7 个观测站中 SWAT 模型计算结果都与观测值相关显著,并且 6 个观测站相关性明显高于 ARIDCROP 模型计算结果。其中洛川由于年降水量较少,10—50 cm 土层含水量(减去萎蔫含水量)零值较多,对相关系数计算有一定影响(略差于 ARIDCROP 模型),但仍通过了显著性检验。这一结果较好地验证和支持了 SWAT 模型的土壤水分模拟过程在理论上较 ARIDCROP 模型更完善,SWAT 模型对土壤水分处理更精细,考虑更多影响土壤水文过程的因子,对土壤水分的分配、输移描述更加符合真实过程。

3 冬小麦生长过程和产量模拟对比

为了评价引进分布式水文模型土壤水分计算过程对作物模型生长过程和产量过程模拟的影响水平,同时利用土壤水分过程不作修改的作物模型和土壤水分过程输入水文模型计算数据的作物模型,采用 1992—1997 年陕西省内 8 个农试站观测产量进行作物模型的参数调整,然后对 1995—1997 这 3 年进行了回代模拟检验,并对 1998—2000 年的冬小麦生长和产量进行了外推模拟检验。

3.1 回代模拟

3.1.1 叶面积指数模拟 研究区域内只有咸阳市一

表 1 水文模型模拟土壤含水量和湿度观测值相关系数

模型	地区	相关系数
Pearson 相关系数	榆林	0.121
	延安	0.323 **
	永寿	0.350 **
	长安	0.567 **
	城固	0.296 **
	安康	0.243 **
Spearman 相关系数	榆林	0.133 *
	延安	0.321 **
	永寿	0.339 **
	长安	0.542 **
	城固	0.338 **
	安康	0.311 **

注: *表示在 0.05 水平相关显著(双尾检验), **表示在 0.01 水平相关显著(双尾检验);下同。

个观测站进行冬小麦叶面积等生物量观测,数据记录从 1995 年开始,因此利用咸阳市的实测数据与该观测站所在水文单元 HRU42 的模拟叶面积指数进行了关联度分析,相关系数如表 4 所示。

表 4 叶面积指数模拟值和观测值相关系数

项目	模型	1995 年	1996 年	1997 年
Pearson 相关系数	实测与模型 II	0.901 **	0.634	0.929 **
	实测与模型 I	0.901 **	0.593	0.885 **
Spearman 相关系数	实测与模型 II	0.964 **	0.893 **	0.929 **
	实测与模型 I	0.964 **	0.786 *	0.929 **

注:模型 II:土壤水分采用 SWAT 模型计算数据的 ARIDCROP 模型;模型 I:土壤水分没有经过修改的 ARIDCROP 模型。下同。

冬小麦叶面积观测是在生育期内不等时间间隔进行的,是一列按时间序列分布的数值,变化曲线具有非线性的特点,所以非参数关联的 Spearman 关联度更能表达两列数据变化趋势的关联程度,其中输入 SWAT 模型土壤水分模拟数据的 ARIDCROP 模型叶面积指数模拟值与观测值在 99% 的置信水平上相关显著,而没有引入 SWAT 模型土壤水分计算值的 ARIDCROP 模型模拟结果 1996 年只在 0.05 水平上

相关显著。两种土壤水分模拟方式下的叶面积指数模拟值与观测值的对比结果如图 1 所示。

从两个方案的模拟值与观测值对比和关联分析可以看出,引入 SWAT 水文模型后 ARIDCROP 模型回代检验结果优于未采用水文模型土壤湿度计算数据的 ARIDCROP 模型模拟结果。

3.1.2 干物重模拟 干物重回代模拟检验,选择咸阳 1995—1997 年的实测和模拟数据,分别对输入和不输入 SWAT 分布式水文模型土壤水分计算数据的 ARIDCROP 模型模拟值和观测值进行相关检验和对比。

植株地上部分干物重变化是在生育期内不等时间间隔观测的,变化曲线具有非线性特点,采用非参数关联系数(Spearman)分析,由于 Spearman 关联系数对数值变化的敏感度较低,所以两种方案的细微差异没能得到表达,但从 Pearson 相关系数和模拟结果(如图 2 示)依然可以看到,1996,1997 年连接水文模型的 ARIDCROP 模型模拟干物重效果好于没有连接水文模型的作物模型模拟结果。关联度检验表明,干物重的回代模拟结果与实测数值非常接近,3 a 的相关系数都为 1.0。

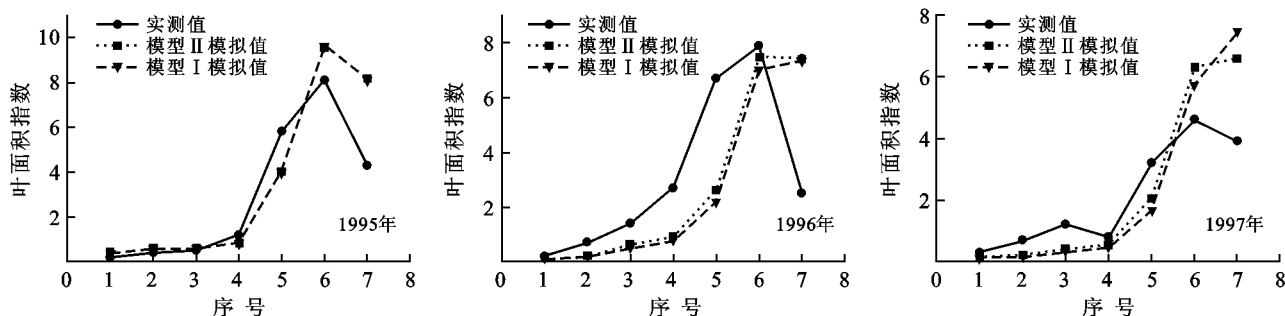


图 1 叶面积指数模拟值与观测值对比

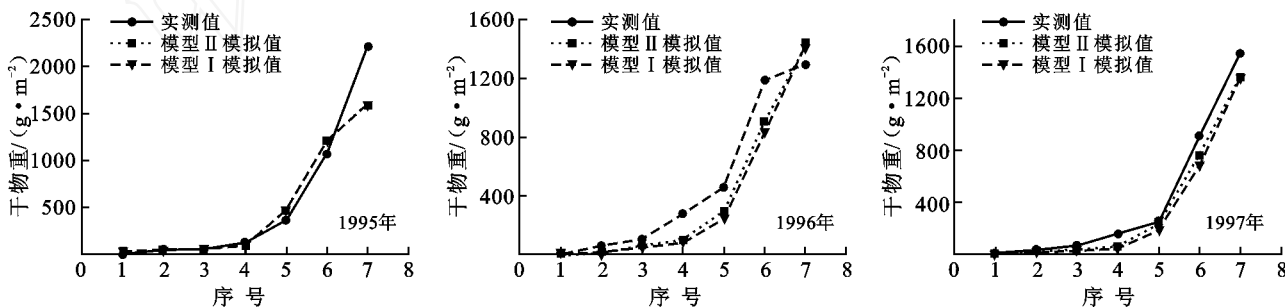


图 2 干物重模拟值和观测值对比

3.1.3 产量模拟 产量的回代模拟检验,分别模拟了 1995,1996 和 1997 年 12 个观测站,并与实测产量进行相关性检验。另外,通过统计回归和多种拟合方法试图建立冬小麦不同生育期生物量与实际产量,气候生产力与实际产量之间的有效预报模型,检验结果表明预报产量和实际产量分布过于离散。因此采用气候生产力与实际产量来检验 SWAT 模型对 ARIDCROP 模型产量模拟的影响,产量模拟值和观测值的相关系数如表 5 所示。

1995—1997 年产量模拟结果及其与观测值相关检验表明,引入 SWAT 土壤水分模拟值后 ARIDCROP 模型产量模拟结果更加合理,干旱状况下产量模拟值为零的缺陷得到了克服;连接和不连接 SWAT 模型的 ARIDCROP 模型产量模拟结果与产量观测值相比,在相关性上前者平均大于后者,3 a 的相关系数相对变化也更加合理。

表 5 产量模拟值和观测值 Pearson 相关系数

模型	1995 年	1996 年	1997 年
实测与模型 相关系数	0.816 **	0.831 **	0.571
实测与模型 相关系数	0.838 **	0.761 **	0.467

通过对模型进行叶面积指数、干物重和产量的回代模拟检验。结果表明,ARIDCROP 模型模拟结果的稳定性、可靠性在输入 SWAT 模型土壤水分计算数据后得到了提高,连接 SWAT 模型后 ARIDCROP 模型生物量模拟和产量模拟准确性有所提高。

3.2 外推模拟

3.2.1 叶面积指数外推模拟 采用 1992—1997 年的气象和产量数据调整模型参数,然后用 1998—2000 年气象数据外推模拟冬小麦叶面积指数。由于陕西省进行作物生物量观测的台站只有咸阳市一个台站,所以叶面积指数只进行了咸阳一个台站的外推模拟对比验证。

1998—2000 年咸阳冬小麦叶面积指数不同时间段的模拟值和观测值的分布如图 3 所示。总体上,连接 SWAT 后的 ARIDCROP 模型模拟结果与观测值更接近。相关检验表明,修改土壤水分过程对叶面积模拟准确性的提高有帮助。非参数性的关联系数由于敏感性较差,没有体现出 1999 年和 2000 年模拟值与观测值之间相关程度的差异,但总体上连接 SWAT 模型后的 ARIDCROP 模型模拟效果较好。

3.2.2 干物重外推模拟 由于资料的限制,只选择了咸阳市一个观测站点对植株地上部分干物质增长量进行了模拟和对比检验。干物重外推模拟值和观测值的相关系数如表 6 所示。

从植株干物质的增长过程可以看出,干物重随时间的动态变化过程呈非线性。线性相关系数不能恰当地说明两组非线性数据变化趋势的密切程度,所以计算了非参数性的关联系数 Spearman 相关系数,但该系数对数据变化的敏感性不高,所以 1999 年和 2000 年两组数据的 Spearman 相关系数相等。总体上表现为:

土壤水分采用 SWAT 模型计算值的 ARIDCROP 模型对干物重的模拟结果与观测值更接近。

3.2.3 产量外推模拟 为了对比说明模型中土壤水分过程对产量模拟的影响。本文选择对 ARIDCROP 模型中土壤水分过程采用 SWAT 水文模型计算值与原模型中土壤水分过程不做修改两种方式进行产量的外推模拟对比分析,并采用气候生产力与实际产量来检验连接 SWAT 模型对 ARIDCROP 模型产量模拟的影响。模拟值与观测值的相关系数见表 7。

1998—2000 年不同观测站两种土壤水分模拟方式的作物模型外推模拟产量和观测产量的对比如图 4 所示。

表 6 干物重外推模拟值和观测值 Spearman 相关系数

项目	1995 年	1996 年	1997 年
模型 II 相关系数	0.976 **	0.994 **	0.994 **
模型 I 相关系数	0.927 **	0.994 **	0.994 **

表 7 产量外推模拟值和观测值相关系数

项目	1998 年	1999 年		2000 年	
		全部数据	部分数据	全部数据	部分数据
模型 II 相关系数	0.738 **	0.885 **	0.880 **	0.851 **	0.903 **
模型 I 相关系数	0.338	0.902 **	0.868 **	0.862 **	0.900 **

注: 除去安康后的相关系数; 除去大荔、永寿后的相关系数。

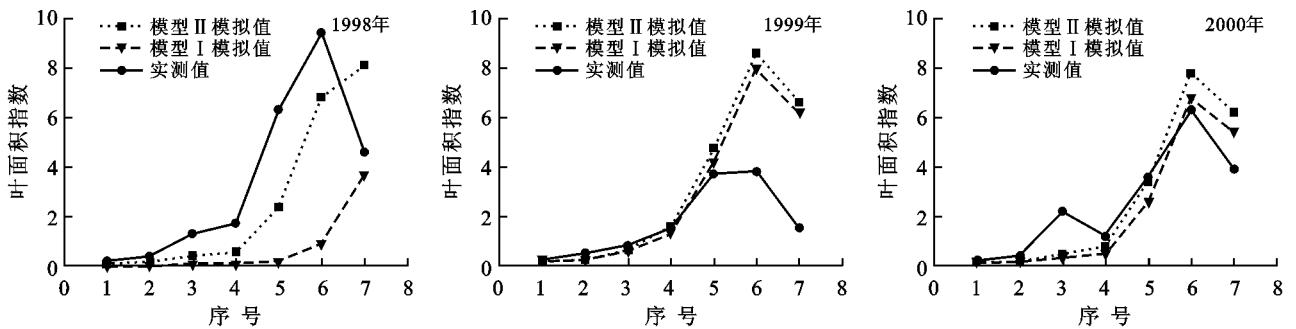


图 3 叶面积指数外推模拟值与观测值对比

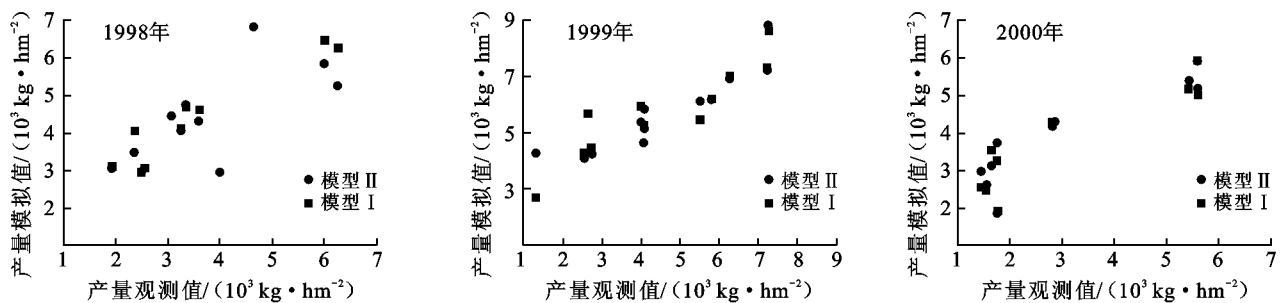


图 4 产量外推模拟值与观测值对比

1998年模拟结果中商州、渭南、旬邑3个观测站3—5月份降水量较少,发生严重干旱。ARIDCROP模型在计算土壤水分过程中,当降水偏少,蒸发旺盛时就出现土壤水分过低的现象,使得作物的生长发育模拟过程停止,所以出现产量模拟值为零的结果。而事实上土壤水分除了与降水量和蒸发有直接关系外,还存在水分在土壤中的运动和分布,SWAT模型在计算土壤水分过程中考虑了土壤水分不同方向的运移,计算结果更符合实际。当然灌溉在两个方案中都未能考虑。两种方案对1998年冬小麦产量预报结果,12个观测站中有9个观测站土壤水分过程采用SWAT模型计算值的ARIDCROP模型模拟值优于未修改的模型模拟结果。总体趋势,修改后的模型模拟结果与观测值更接近。1999年的产量实测结果中安康出现了 305.0 kg/hm^2 的不正常记录,而统计社会平均产量为 $2\,625.0\text{ kg/hm}^2$ 。估计该记录为人为错误或试验观测对象受其它严重灾害影响导致产量异常偏低。所以去除该记录后从相关系数来看(如表

7),土壤水分采用SWAT模型计算值的ARIDCROP模型产量模拟稍优。2000年在实验观测记录中大荔、永寿两观测站产量出现了超出正常气象因子影响水平的波动。大荔观测产量为 $5\,399.5\text{ kg/hm}^2$,1999年为 $2\,999.7\text{ kg/hm}^2$,1998年为 $3\,249.7\text{ kg/hm}^2$,1992—1997年平均产量为 $4\,148.25\text{ kg/hm}^2$ 。永寿2000年产量观测值为 $5\,100\text{ kg/hm}^2$,同年社会统计平均产量:高产 $4\,500\text{ kg/hm}^2$,低产 $3\,750\text{ kg/hm}^2$ 。1998年该站观测产量值为 $1\,619.9\text{ kg/hm}^2$,1998年 $3\,599.3\text{ kg/hm}^2$ 。产量的异常增加估计与品种改良等非气象因素有关,因此去除这两个观测站后计算相关系数,发现土壤水分过程采用SWAT模型计算值的ARIDCROP模型模拟结果与实测产量总体水平更接近。

3.2.4 全流域产量外推模拟 利用引入SWAT模型土壤水分计算值的ARIDCROP模型对1998—2000年整个研究区域内的83个子流域进行冬小麦产量外推模拟,产量的空间分布情况如图5所示。

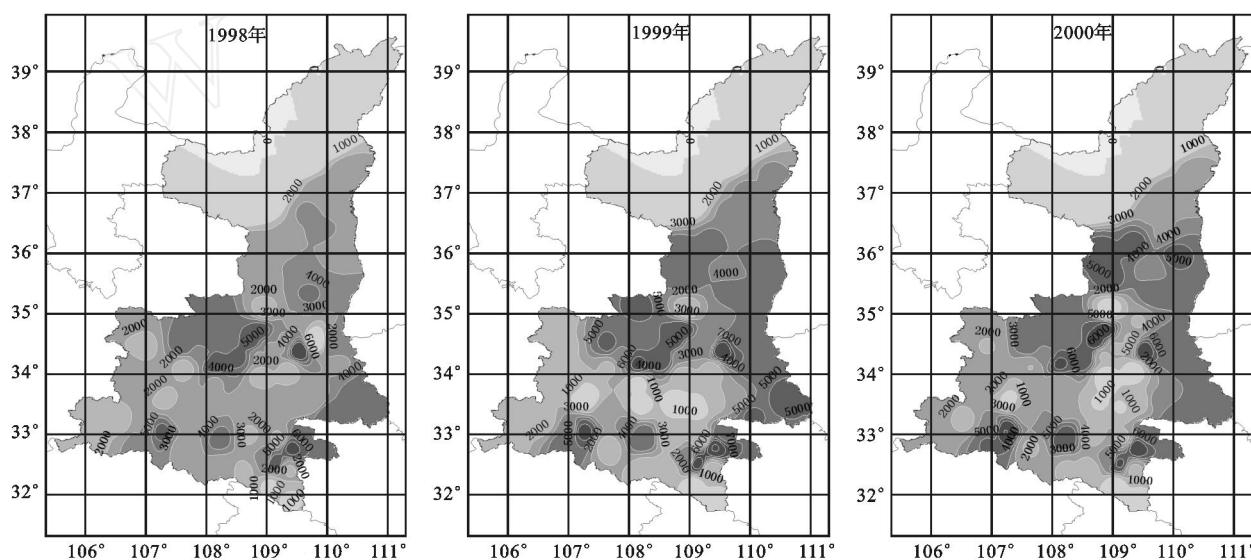


图5 陕西省冬小麦产量空间分布

模拟结果与陕西省冬小麦实际产量分布吻合较好,1998—2000年的模拟值都较好地反映了关中平原高产区 and 汉水谷地高产区,以及秦岭和大巴山两大山区低产区,陕北高原地区由北向南产量逐渐增高的趋势。而陕北黄土高原向关中平原过渡带,由于水土流失严重,地形复杂,多山地,冬小麦产量波动表现明显。为了比较模拟结果与实际情况的差异,选择陕西省农试站的冬小麦产量观测数据和《陕西统计年鉴》中公布的社会调查产量与模拟值进行对比。具有代表性的杨凌1999年较1998年增产3.78%,其附近3个子流域的模拟产量平均值较1998年增产9.16%。

示范区内水肥和管理措施都较好,产量随气象条件的变化而波动的幅度较小,同时示范区冬小麦产量已经较高,增产潜力相对较小。而邻近地区土壤肥力和管理状况差异较大,对气候要素的变化抵抗性差,产量受气候状况影响更明显,所以在气候条件适宜的年份增产幅度更显著。模型2000年模拟结果与前两年模拟结果在趋势上具有相同的特点,高产区和低产区分布与实际情况吻合较好,杨凌2000年产量与1999年比较增产2.5%。邻近3个子流域平均产量2000年比1999年平均增产1.8%,产量波动趋势相同,同为增产,仅在增产幅度上略有差异。

4 结论

本文采用分布式水文模型,借助 DEM 数据细致地刻画了不同地貌地形对地表径流的重新分配过程,模拟各层土壤含水量,并以文本文件的形式连接了水文模型与作物模型,使得作物模型对不同深度的土壤含水量描述更加符合真实物理过程,弥补作物模型的不足。通过对叶面积指数、干物重和产量的回代模拟和外推模拟检验,得出以下结论。

(1) 分布式水文模型 SWAT 对土壤水分的模拟准确度高于作物模型 ARIDCROP 模型。

(2) 引进 SWAT 模型土壤水分计算过程后,作物模型 ARIDCROP 对叶面积指数、干物重和产量的回代和外推模拟的准确性都有所提高。

(3) 连接分布式水文模型后,作物模型 ARIDCROP 基于水文研究单元进行了全流域产量外推模拟,模拟结果中高产区、低产区分布与实际观测基本相吻合,产量的空间分布与观测和统计结果基本一致。

本文尝试将分布式水文模型和作物模型连接进行作物生长过程和产量模拟,模拟结果对比验证表明,与未连接 SWAT 模型的 ARIDCROP 模型相比较,连接 SWAT 模型的 ARIDCROP 模型在模拟冬小麦生长过程和产量方面有了一定的提高,对产量空间分布的模拟也比较合理。但本文作为两个模型耦合应用的初步尝试还存在一些不足之处。分布式水文模型和作物模型的耦合采用数据文件的方式单向连接,未能实现真正意义上的耦合。建立不同生育期生物量和实际产量,气候生产力和实际产量之间的有效预报模型是今后产量预报研究中需要解决的问题之一。本文只就陕西省 20 世纪 90 年代的资料进行了模拟研究,在其它地区和年代是否有不同的变化,还有待进一步研究。随着水文模型和作物模型的进一步完善和推广应用,实现两个模型真正意义上的耦合是今后研究的主要方向,同时还会出现更多的问题需要深入探讨。

[参 考 文 献]

[1] 汪永钦,王信理,刘荣花. 冬小麦生长和产量形成与气象条件关系及其动态模拟的研究:以河南省黄淮平原冬

小麦中、低产地区为例[J]. 气象学报,1991,49(2):205—214.

- [2] 李新平,黄进勇. 黄淮海平原玉米三熟高效种植模式复合群体生态效应研究[J]. 植物生态学报,2001,25(4):476—482.
- [3] Eitzinger J, Trnka M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions[J]. Ecological Modelling, 2004,171:223—246.
- [4] 山仑,孙纪斌,刘忠民,等. 宁南山区主要粮食作物生产力和水分利用的研究[J]. 中国农业科学,1988,21(2):9—16.
- [5] 陈培元,李英,蒋永罗. 黄土旱塬冬小麦耗水模式的研究[J]. 西北植物学报,1986,6(4):225—234.
- [6] Mein R G, C Larson L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973,9(2):384—394.
- [7] Larson L L, Peck E L. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling[J]. Water Resources Research, 1974,10:857—863.
- [8] Bouwer H. Infiltration of water into nonuniform soil[J]. Journal Irrigation and Drainage Div. Asce. 1995,4:451—462.
- [9] Nearing M A, Liu B Y, Risse L M, et al. Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities[J]. Water Resources Bulletin, 1996,32:125—136.
- [10] Rawls W J, Brakensiek D L. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling[C]// Jones E B, Ward (eds) T J. Watershed Management in the 80's. New York:Asce,1985.
- [11] van Keulen H. Simulation of water use in herbage growth in arid regions[M]. Wageningen: Pudoc Center of Agriculture and Publication and Documentation,1975.
- [12] Seligman N G, van Keulen H, Goudriaan J. An elementary model of nitrogen uptake and redistribution by annual plant species[J]. Oecologia,1975,21(3):243—261.
- [13] 刘建栋,王石立,于强,等. CO₂ 倍增对黄淮海气候生产力影响的数值模拟[J]. 自然灾害学报,2001,10(1):17—23.
- [14] 刘建栋,傅抱璞,金之庆,等. 应用 ARIDCROP 模型对中国黄淮海地区冬小麦气候生产力的数值模拟研究[J]. 自然资源学报,1997,12(3):282—287.