

# 基于遥感信息的区域农业干旱模拟技术研究

王治海, 刘建栋, 刘玲, 邬定荣, 邱美娟, 俸玉端

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 区域农业干旱监测预测对农业生产具有十分重大的指导意义, 但受观测手段所限, 目前大范围的区域农田水分信息尚无法通过常规观测直接获取。利用微波遥感(AMSR-E)获取大范围农田水分信息, 继而与作物干旱模型结合对河南省冬小麦农业干旱发生发展进行了模拟研究。结果表明, 加入遥感信息后, 作物干旱模型对冬小麦生长发育的模拟能力有较大提高, 并且区域农业干旱的模拟结果更加接近实际情况。研究表明, 将遥感信息与作物干旱模型相结合, 可以提高模型对农业干旱的模拟能力, 这为农业旱情监测预测提供了更有力的科技支撑。

**关键词:** 遥感信息; 农业干旱模型; 土壤水分; 冬小麦

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)05-0096-05

中图分类号: S423

## Regional Agro-drought Simulation Based on Remote Sensing Technology

WANG Zhi-hai, LIU Jian-dong, LIU Ling, WU Ding-rong, QIU Mei-juan, FENG Yu-duan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Regional agro-drought monitoring and prediction are of great importance to agricultural production and however, constrained by measuring techniques, the regional large-scale soil moisture information cannot be obtained directly through the conventional observation. As a case study, regional agro-drought in He'nan Province was simulated by combing a crop growth model with the regional moisture information obtained using microwave remote sensing technology(AMSR-E). It was found that the model supported by the regional soil moisture information performed better in simulating winter wheat growth and the results were much closer to the actual situation. This research identified that the capability for agro-drought simulation could be enhanced by the combination of the crop model and microwave remote sensing technology, which may provide more accurate information for regional agro-drought monitoring and prediction.

**Keywords:** remote sensing information; agro-drought model; soil moisture; winter wheat

华北平原是我国冬小麦重要生产基地, 近年来该地区干旱发生频繁, 对当地农业生产产生了一定的不利影响。因此, 及时地开展农业干旱监测预测, 对于该地区农业生产具有十分重要的现实意义。

长期以来, 国内外学者对农业干旱监测预测进行了大量的较为深入的系统研究。Palmer<sup>[1]</sup>将前期降水和水分供需结合在水文计算系统中, 提出了基于水平衡的干旱指数(PDSI); 安顺清等<sup>[2]</sup>对帕默尔旱度模式进行了修正, 建立了我国华北地区气象旱度模式, 并提出了优化灌溉的理论依据; 王石立<sup>[3]</sup>建立了水分胁迫下的冬小麦生长模式, 并进行了冬小麦干旱影响评价; 赵艳霞等<sup>[4]</sup>以农业干旱识别和预测模型为

基础, 开发了农业干旱识别和预测技术系统; 刘建栋等<sup>[5]</sup>在提出农业干旱指数和农业干旱预警指数的基础上, 建立了华北干旱预测数值模式。以上研究为农业干旱预测提供了较为坚实的理论基础。

然而, 大多数模型模拟的土壤湿度与实测值往往存在一定偏差<sup>[6-7]</sup>, 对区域农业旱情监测预测产生不利影响, 并且传统方法对土壤水分主要进行单点观测, 难以满足实时、大范围旱情监测的需要<sup>[8]</sup>。相对而言, 遥感技术则可以快速同步地获取大面积的土壤水分信息, 这为区域旱情监测研究奠定了一定的基础<sup>[9]</sup>。与其他遥感手段相比, 微波遥感不仅能穿透云层和雨区, 还能穿透一定深度的地表, 从而获取植被

收稿日期: 2013-03-19

修回日期: 2013-04-17

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“重大农业气象灾害预测预警关键技术研究”(2011BAD32B02); 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目“基于作物生长及生物地球化学过程的农田生态系统模式研究”(2009Z002)

作者简介: 王治海(1988—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为农业干旱监测预警模拟。E-mail: shan\_huhai@163.com。

通信作者: 刘建栋(1969—), 男(汉族), 河北省辛集市人, 研究员, 主要从事农业干旱监测预警模拟研究。E-mail: liujd2001@263.net。

覆盖的地表及地表以下一定深度的信息<sup>[10]</sup>。因此,借助微波遥感技术的优势,将微波遥感反演的宏观土壤水分信息嵌入到作物干旱模型中,使模型中土壤水分“流动”更加真实,将有可能提高区域农业旱情的预测精度,促进农业干旱模拟模型的发展和应用。

据此,本研究在作物干旱模型研究基础上<sup>[5]</sup>,拟以土壤水分为结合点,将微波遥感与作物干旱模型相结合,对河南区域农业干旱进行了较为深入的模拟研究,以期为该地区农业旱情监测提供更有力的科技支撑。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况与试验数据

本研究选取了具有代表性的河南省作为研究区,该地区位于中国中东部、黄河中下游,是华北地区农产品的重要生产基地。年均气温 12~16 °C,年均降水量 550~1 400 mm,属温带湿润半湿润气候。

研究中所采用的数据包括气象数据、站点数据和遥感数据。其中,气象数据为中国气象局提供的 1961—2006 年河南省 17 个气象站点的逐日气象要素值,包括辐射、最高气温、最低气温、水汽压、风速和降雨量等。其中,部分辐射数据左大康等<sup>[11]</sup>的研究用常规资料处理得到;站点数据来自全国农业气象观测记录报表 1—2,报表 1 包括 2001—2006 年郑州及信阳 2 个站点有冬小麦种植的农业气象观测资料,即冬小麦生长发育期、生长状况、干物重、产量以及叶面积指数(LAI)等。报表 2 包括河南省 17 个站点的土壤参数数据,即土壤容重、田间持水量和凋萎系数等。无观测数据的站点,选取距离该站最近的站点资料替代;表层土壤水分遥感数据是美国冰雪数据中心(NSIDC)AMSR-E\_L3\_DailyLand\_V06 产品的重采样结果<sup>[12-13]</sup>。AMSR-E 传感器于 2002 年由美国 NASA 发射的 Aqua 卫星搭载升空,其赤道过境时间约为当地时间下午 1:30(升轨)和凌晨 1:30(降轨)<sup>[12]</sup>。有研究表明,AMSR-E 传感器升轨时的数据质量在一定程度上优于降轨<sup>[14]</sup>。因此本文选取了该传感器升轨时的表层土壤水分逐日遥感数据,其时间序列为 2004—2006 年。由于冬小麦在拔节后对土壤水分的盈亏更加敏感,因此提取各年 3—6 月的遥感数据用于本研究。

### 1.2 研究方法

本研究采用的作物干旱模型是在 ARID CROP 模型基础上改进而来的<sup>[5,15]</sup>。De Wit 与 van Keulen 在原 De Wit 理论的基础上,考虑了光、温、水对作物相互作用的影响,发展了一个 ARID CROP 数值模拟模型<sup>[16-17]</sup>。该模型机理性很强,主要依据作物生长的生

理特点设计,用于模拟作物在土壤水分因子影响下的生长过程<sup>[18]</sup>。模型主要由初始化、潜在日总光合量、潜在蒸腾、实际蒸腾等子模型构成,其主要部分如下:

(1) 初始化。模型的初始化主要是将作物参数、土壤参数等基本信息以相应的文件格式输入,为模型的模拟计算奠定基础。

(2) 潜在日光和总量。潜在日光合总量为冠层光合量时空上的积分,其计算公式为:

$$P_{\text{net}} = \frac{\alpha P_{\text{ar}} P_{\text{max}}}{\alpha P_{\text{ar}} - P_{\text{max}}} - R_d \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{net}}$ ——叶片净光合速率 [kg/(hm<sup>2</sup>·h)];  $\alpha$ ——初始光合作用量子效率;  $P_{\text{ar}}$ ——光合有效辐射 [cal/(cm<sup>2</sup>·h)];  $P_{\text{max}}$ ——最大光合速率 [kg/(hm<sup>2</sup>·h)];  $R_d$ ——呼吸速率 [kg/(hm<sup>2</sup>·h)]。

(3) 潜在蒸腾。依据能量平衡原理,潜热通量 LE 可表示为:

$$LE = \frac{\Delta R_n + E_a}{\Delta + r} \quad (2)$$

式中:LE——汽化潜热(mm/d);  $R_n$ ——单位叶面积吸收的辐射量 [cal/(cm<sup>2</sup>·d)];  $E_a$ ——空气干燥力(mm/d);  $\Delta$ ——温度—饱和水汽压曲线斜率(mb/K);  $r$ ——视干湿表常数(mb/K)。视干湿表常数的计算公式为:

$$r = r_0 = \frac{(r_a + r_c)}{r_a} \quad (3)$$

式中:  $r_0$ ——常数( $r_0 = 0.63$  mb/K);  $r_a$ ——边界层阻力(d/cm);  $r_c$ ——叶片表面对水汽的阻力(d/cm)。空气干燥力  $E_a$  的计算公式为:

$$E_a = \frac{(e_a - e) \rho C_p}{r_a} \quad (4)$$

式中:  $e_a$ ——饱和水汽压(mb);  $e$ ——实际水汽压(mb);  $\rho$ ——空气密度(g/cm<sup>3</sup>);  $C_p$ ——空气的定压比热容[J/(g·K)]。

(4) 实际蒸腾。利用达西定律与物质连续方程联立的思路,采用水分平衡方法求解实际蒸腾速率。其中,达西定律与物质连续方程联立,可以推导出以下关系式:

$$C(h) = \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)] - S \quad (5)$$

式中:  $C(h)$ ——单位时间内的容积含水量(mm/h);  $h$ ——土壤水压差(mm);  $K(h)$ ——导水率(mm/h);  $t$ ——时间(h);  $z$ ——垂直坐标(mm);  $S$ ——单位土壤容积的根在单位时间内吸收的水量(mm/h)。

之后,研究人员对模型不断改进以应用于不同国家的很多地区。刘建栋等<sup>[5]</sup>在提出农业干旱指数和农业干旱预警指数两个基本概念的基础上,将模型进

一步发展成我国华北地区农业干旱预测数值模式。该模式的时间步长为 1 d,需要输入的数据有辐射、最高气温、最低气温、水汽压、风速和降雨量等。

土壤水分反演采用了指数滤波方法<sup>[19]</sup>,利用表层土壤水分遥感数据反演 0—20 cm 土层的土壤水分。指数滤波法主要是依据表层与深层土壤水分的关系得到,具体算法如下:

$$SWI(t) = \frac{\sum_i ms(t_i) e^{-(t-t_i)/T}}{\sum_i e^{-(t-t_i)/T}} \quad (t_i \leq t) \quad (6)$$

式中:SWI——土壤水分指数(0≤SWI≤1);ms(*t<sub>i</sub>*)——*t<sub>i</sub>*时刻表层土壤湿度遥感反演值(标准化,无量纲);*T*——特征时间长度(d)。特征时间长度是计算土壤水分指数 SWI 的关键参数,其计算思路为:赋予 *T* 一组特定值 *T<sub>i</sub>*,计算每一个 *T<sub>i</sub>* 对应的 SWI 与田间实测值(标准化)的相关系数。提取相关系数最大值 *R<sub>max</sub>*,此时 *R<sub>max</sub>* 对应的 *T<sub>i</sub>* 即特征时间长度最优值。为反演深层土壤湿度,还需要一些与土壤质地有关的信息,如田间持水量、凋萎系数等。其关系式为

$$W(t) = WL + SWI(t) \cdot (FC - WL) \quad (7)$$

式中:*W*——深层土壤湿度(%);*WL*——凋萎系数(%);*FC*——田间持水量(%).

得到 0—20 cm 土层的土壤湿度后,将反演结果替代模型中同一土层含水量的计算过程,从而实现微波遥感与作物干旱模型的链接。模型分别采用链接遥感技术和不链接遥感技术 2 种方式模拟冬小麦生长过程中的农业干旱情况,进而评价基于遥感信息的作物干旱模型的模拟能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型校正及验证

以郑州站点为代表点,将实测资料按年份均衡分组,其中 2001—2003 年的资料作为模型校正,2004—2006 年的数据用于模型验证。由图 1 可知,校正后的模型预测的干物重与实测值吻合较好;叶面积指数(LAI)预测值随时间的变化趋势与实际情况也比较一致。因此,校正后的模型能较好地预测冬小麦生长发育过程,其预测结果能反映冬小麦生长发育的基本趋势。

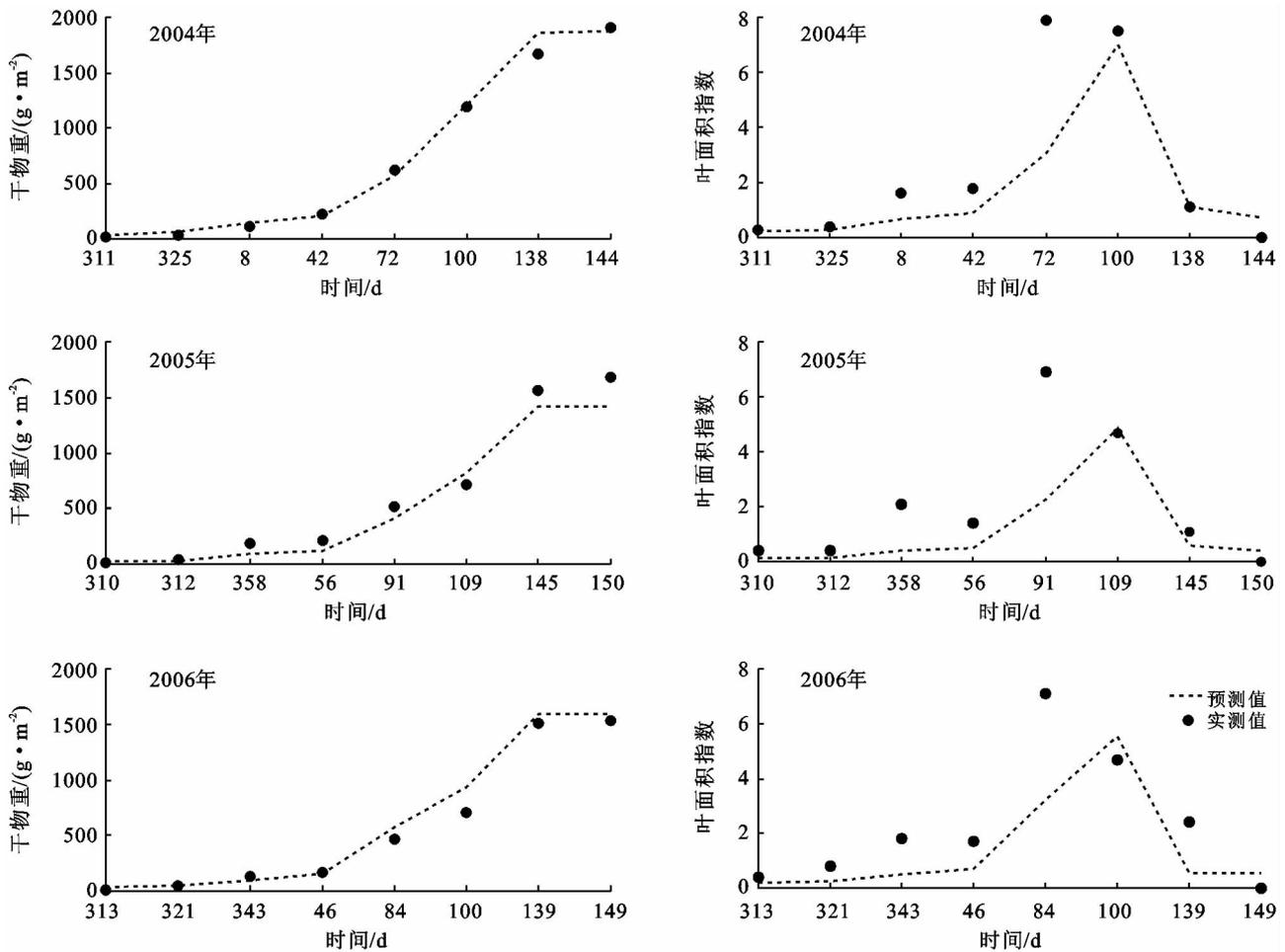


图 1 干物重、LAI 的预测值与实测值比较

### 2.2 土壤水分遥感反演

采用指数滤波方法<sup>[19]</sup>,利用表层土壤水分遥感数据(0—1 cm 土层)反演 0—20 cm 土层的土壤水分指数 SWI。在此基础上,结合实测资料反演得到 0—20 cm 土层的土壤湿度。

(1) 特征时间长度最优值确定。特征时间长度  $T$  是反演土壤水分指数 SWI(0—20 cm 土层)一个极其关键的参数,其计算过程为:利用式(7)对遥感反演资料和田间实测资料标准化,并剔除不在正常范围( $0 \leq SWI \leq 1$ )内的数值。在此基础上,计算每一个特征时间长度  $T(4 \text{ d} \leq T \leq 30 \text{ d}, T$  为整数)对应的 SWI,继而求出 SWI 计算值与实测值的相关系数  $R$ 。

由图 2 可知,相关系数  $R$  在 0.31 与 0.39 之间波动。 $T$  等于 11 d 时,相关系数  $R$  达到 0.38 以上;当  $T$  不等于 11 d 时,相关系数  $R$  均小于 0.38。综上所述,当特征时间长度  $T$  等于 11 d 时,对应的相关系数  $R$  最大( $R=0.382$ ),SWI 计算值与实测值最接近。因此,特征时间长度最优值为 11 d。

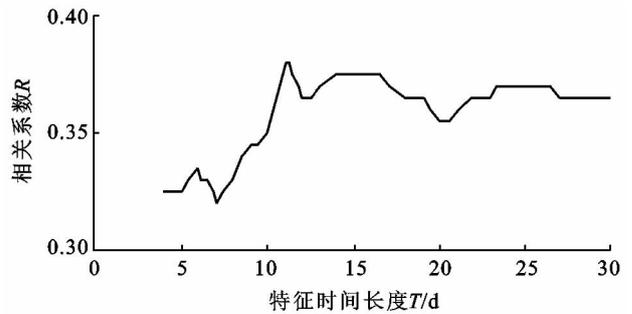


图 2 不同特征时间长度  $T$  对应的相关系数

(2) 深层土壤水分反演。在确定最优特征时间长度( $T=11 \text{ d}$ )的基础上,利用式(6)计算出 0—20 cm 土层的土壤水分指数 SWI。之后,结合田间实测资料,由式(7)反演得到土壤湿度。进一步对反演值与实测值的符合度进行检验,结果如表 1 所示。

表 1 显示,均方根误差 RMSE 的平均值为 6.3%。由此说明,土壤湿度反演结果与实际情况比较接近,其反演效果较好。

表 1 土壤湿度反演结果统计检验

站点名称	新乡	三门峡	卢氏	栾川	郑州	许昌	南阳	驻马店	商丘	固始	平均值
均方根误差/%	8.8	4.5	5.4	4.7	5.6	4.3	5.0	9.3	4.4	10.6	6.3
样本数	28	18	30	19	25	27	26	26	27	18	—

### 2.3 微波遥感与作物干旱模型的结合

在调整模型参数的基础上,将 0—20 cm 土层的土壤湿度遥感反演信息直接嵌入到模型中,实现微波遥感与作物干旱模型的结合,继而对冬小麦生长发育及其农业干旱进行模拟。

(1) 冬小麦生长发育模拟。以 2004—2006 年郑州站点冬小麦生长发育为例,检验基于遥感信息的作物干旱模型对叶面积指数的模拟效果。由表 2 可知,引入遥感信息后,叶面积指数模拟值与实测值的均方根误差 RMSE 由 1.76 降低至 1.75。由此说明,将微波遥感与作物干旱模型相结合,可以在一定程度上提高模型对作物生长发育的模拟能力。

表 2 叶面积指数模拟值与实测值的均方根差 RMSE

年份	单纯作物干旱模型	基于遥感信息的作物干旱模型
2004	1.811	1.809
2005	1.786	1.766
2006	1.682	1.677
历年平均值	1.760	1.751

(2) 农业干旱模拟。目前,农业气象旬报中只有农业干旱的定性描述,而没有类似温度、降水等气象

要素的定量记录,这为模型验证带来一定困难<sup>[5]</sup>。为解决这一问题,引入基准值这一概念,以更好地实现模型验证。基准值的计算方法为,采用 3 次样条函数对土壤水分实测数据进行插值,得到逐日土壤水分数据。之后,将插值结果替代作物干旱模型中土壤水分的计算过程,其模拟结果即为基准值。模型验证分为单点验证和区域验证。

首先进行单点验证,将农业气象旬报中的定性描述按农业干旱预警指数定义<sup>[5]</sup>转化为相应的农业干旱预警指数数值(SP),并作为实测值与模拟结果对比。以卢氏、商丘和许昌等站点的冬小麦生长过程为例,对农业干旱预警指数基准值的模拟效果进行检验。由图 3 所示,在农业气象旬报没有旱情记录时(3 月),基准值与实测值之间存在一定差异。而对于有记录的农业干旱时段(4 月上旬至 5 月下旬),基准值与实测值比较接近,模型对这一时段的旱情有较为准确的再现。因此,农业干旱预警指数基准值具有较高的可靠性,可以作为模型验证的基础。

进而利用改进后的模型对区域农业干旱进行模拟验证。农业气象旬报记录:2004 年 5 月中旬,“除豫北、豫西南、豫东南等地墒情适宜外,其他县市均表现出不同程度的旱情,尤其是豫中大部、豫南部分等地土壤

湿度 $\leq 10\%$ ,属重度干旱”(附图 7)。由附图 7 可知,对于豫中大部分地区,农业干旱模拟结果与实际情况比较吻合,均显示该地区出现了严重干旱;在豫北、豫南和豫东南等地,模拟结果显示这些地区农业干旱程

度很轻,其墒情接近适宜状态,这与旬报记录也比较一致。从总体上看,基准值的模拟结果比较符合旬报记录的描述,再次证明基准值可以作为模型验证的基础。

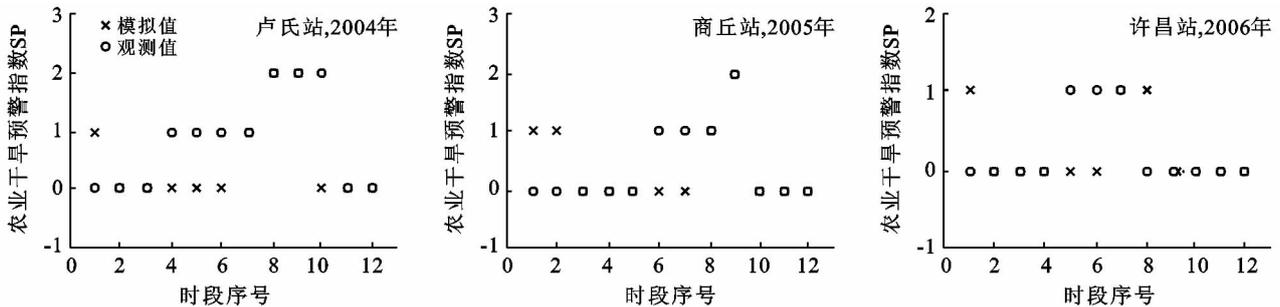


图 3 农业干旱预警指数模拟值与实测值的比较

注:时段序号 1—12 依次表示 3—6 月上、中、下旬。

将模型分别采用链接遥感技术和不链接遥感技术 2 种方式模拟区域农业干旱,并将其模拟结果与基准值进行对比。结果表明,对于豫北地区,链接遥感技术的模型的模拟结果显示该地区墒情适宜,而单纯模型的模拟结果表明该地区农业干旱严重。结合基准值与农业气象旬报记录可知,引入遥感信息后,模型在豫北地区的模拟结果更接近实际情况。此外,对于其他地区(如豫中大部),基于遥感信息的模型的模拟结果也更加接近基准值和旬报记录。因此可以认为,引入遥感信息后,作物干旱模型对区域农业干旱的模拟能力有明显的提高。

### 3 结论与讨论

(1) 引入遥感信息后,模型对冬小麦生长发育模拟的准确率有所提高,并且单点农业干旱的模拟结果更接近实际情况。

(2) 区域农业干旱验证结果表明,将微波遥感与作物干旱模型相结合,可以提高模型对农业干旱的模拟能力,这为农业旱情监测提供了更有力的科技支撑。

本研究尝试以土壤水分为结合点,将微波遥感技术与作物干旱模型相结合,使模型中土壤水分“流动”更加真实,起到了优化模型的作用,进而提高了区域农业旱情的模拟精度。但本文作为初步尝试,还存在一些不足之处。例如本文只改进了模型中 0—20 cm 土层含水量的计算过程,进一步的研究将扩展到土壤的更深层次。随着遥感技术和作物干旱模型的进一步发展,将两者结合进行农业干旱监测预测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] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington D C, USA: U S Weather Bureau, 1965:45-58.
- [2] 安顺清,邢久星. 帕默尔气象旱度模式的修正[J]. 气象科学研究院院刊,1986,1(1):75-82.
- [3] 王石立. 冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用[J]. 应用气象学报,1998,9(1):15-23.
- [4] 赵艳霞,庄立伟,王馥棠. 农业干旱识别和预测技术系统[J]. 应用气象学报,2000,11(S1):192-199.
- [5] 刘建栋,王馥棠,于强,等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报,2003,14(5):593-604.
- [6] Stamm J F, Wood E F, Lettenmaier D P. Sensitivity of a GCM simulation of global climate to the representation of land-surface hydrology[J]. Journal of Climate, 1994,7(8):1218-1239.
- [7] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification [J]. Global and Planetary Change, 1996,13(1/4):195-206.
- [8] 王利民,刘佳,邓辉,等. 我国农业干旱遥感监测的现状与展望[J]. 中国农业资源与区划,2008,32(6):4-8.
- [9] 刘欢,刘荣高,刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展[J]. 地球信息科学学报,2012,14(2):232-239.
- [10] 杨绍镔,闫娜娜,吴炳方. 农业干旱遥感监测研究进展[J]. 遥感信息,2010,1(21):103-109.
- [11] 左大康. 地球表层辐射研究[M]. 北京:科学出版社,1991:1-25.
- [12] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(2):215-229.
- [13] Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, et al. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil products[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(12):4256-4272.

(下转第 122 页)

大到小依次是胡枝子 19.3%, 紫穗槐 16.9%, 狗牙根 7.2%。

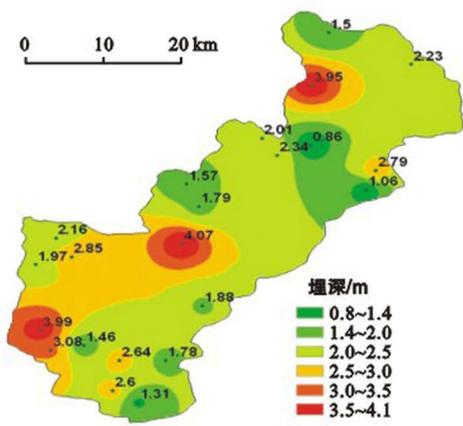
(3) 紫穗槐及胡枝子根—土复合体和狗牙根—土复合体对土壤的抗剪强度影响不同。在工程实践中, 考虑具体条件和要求选择不同的物种, 以达到最佳的治理效果。

通过本试验研究, 阐明了在不同含根量、不同法向应力作用下, 有根系存在的根—土复合体抗剪强度明显高于无根扰动土的抗剪强度, 初步总结出不同含根量、不同植物根系对根—土复合体抗剪的影响规律, 可为试验区和相似地区开展边坡浅层护坡, 治理水土流失等地质灾害的防治提供理论依据。本试验没有对 0.2~1.2 mm 非木质化根和木质化根的根—土复合体抗剪强度进行研究, 今后应针对不同径级根系的根—土复合体抗剪性能的变化规律进行深入研究, 为防风固土, 防治荒漠化和水土流失提供更科学的理论依据。

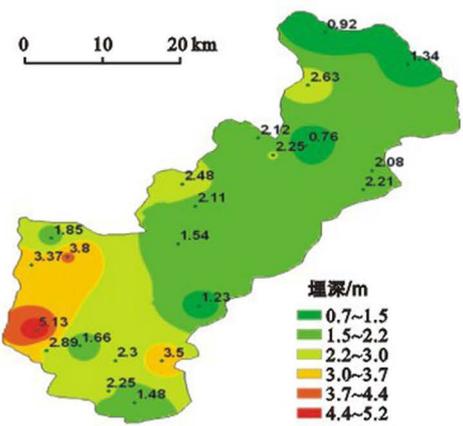
#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 64-76.
- [2] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review[J]. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402.
- [3] Van Beek L P H, Wint J, Cammeraat L H, et al. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 55-74.
- [4] Operstein V, Frydman S. The stability of soil slopes stabilized with vegetation[J]. *Ground Improvement*, 2002, 6(4): 163-168.
- [5] Greenwood J R. SLIP4EX-A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(3): 449-465.
- [6] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的三轴试验[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 54-58.
- [7] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J]. *中南公路工程*, 2006, 31(2): 14-17.
- [8] 黄晓乐, 许文年, 夏振尧. 植被混凝土基材 2 种草本植物根—土复合体直剪试验研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 158-161.
- [9] 刘洪伟. 瓮福磷矿英坪矿段露天采矿场边坡稳定性研究及安全治理措施[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [10] 刘晓芳. 新疆优良绿化树种[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2007: 196-197.
- [11] 陈雅君. 园林草坪学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 50.
- [12] 钟亮根. 紫穗槐在赣南红层路基边坡防护应用的试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- [13] 南京水利科学研究所. 土工试验规程 SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [14] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(3): 250-252.
- [15] 周其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. *土工基础*, 2010, 24(5): 85-87.
- [16] 王玉珏. 土工试验与土力学教学指导[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [17] 王磊. 植被根系固土力学机理试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [14] Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: an intercomparison and validation study across Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3390-3408.
- [15] 王天铎. 数值模拟在黄淮海地区生物资源评价中的应用[M]//刘昌明. 中国水问题研究. 北京: 气象出版社, 1996: 191-197.
- [16] van Keulen H, Seligman N G, Benjiami R W. Simulation of water use and herbage growth in arid regions: A reevaluation and further development of the model “ARID CROP”[J]. *Agricultural Systems*, 1981, 6(3): 159-193.
- [17] Penning F W T, van Laar H H. Simulation of plant growth and crop production[M]. PUDOC: Wageningen, 1982: 40-82.
- [18] 李明星, 刘建栋, 王馥棠, 等. 分布式水文模型在陕西省冬小麦产量模拟中的应用[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 148-154.
- [19] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1999, 70(2): 191-207.

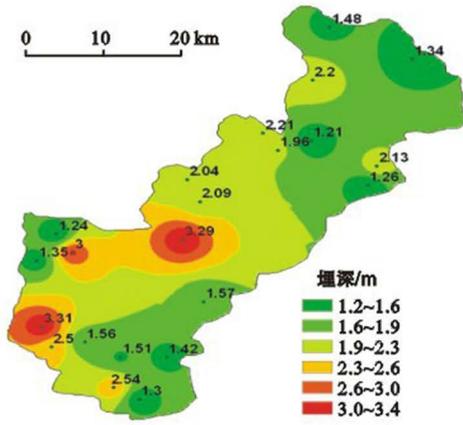
(上接第 100 页)



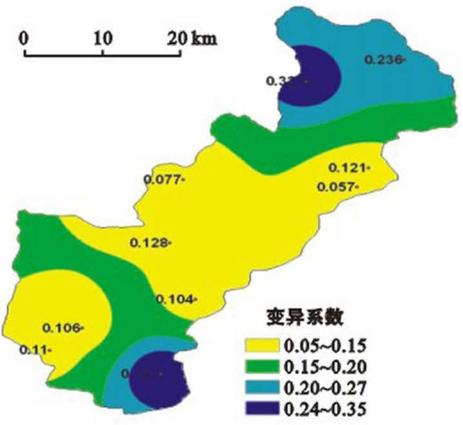
附图1 山东省齐河县2000年地下水埋深分布



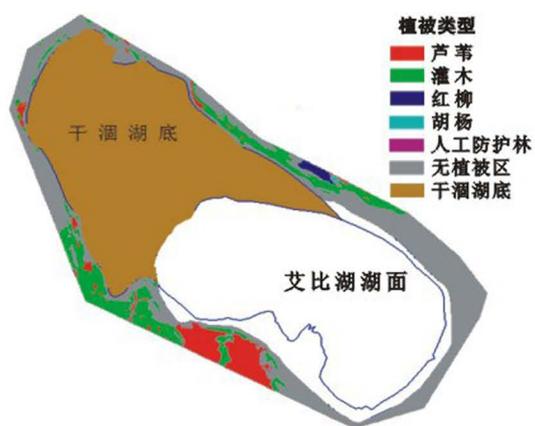
附图2 山东省齐河县2005年地下水埋深分布



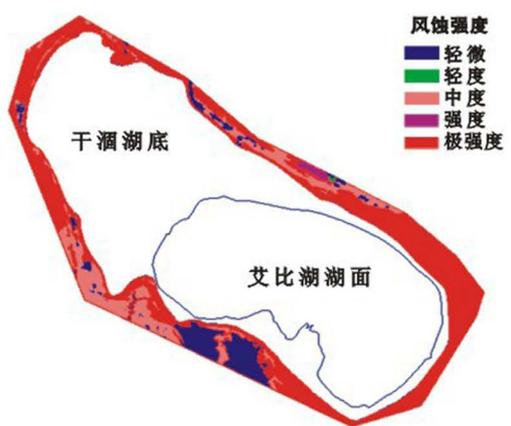
附图3 山东省齐河县2009年地下水埋深分布



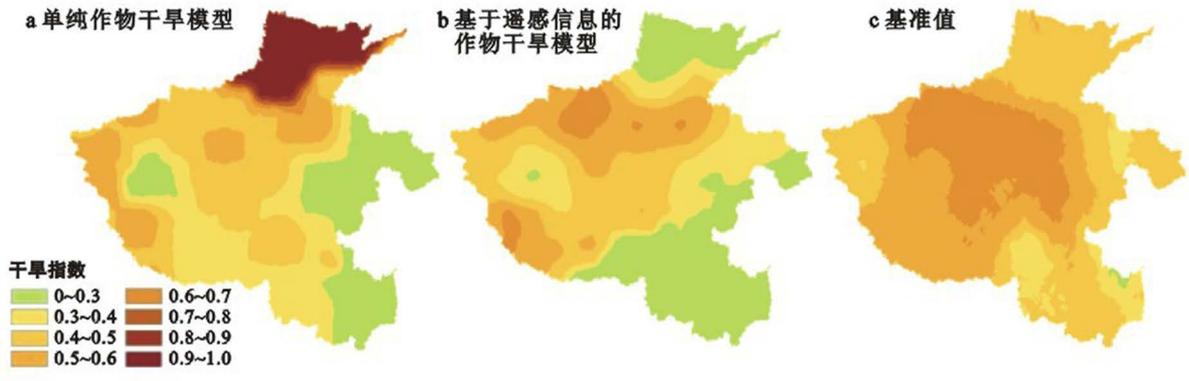
附图4 山东省齐河县地下水埋深变异系数空间插值



附图5 艾比湖湖岸周边植被分布



附图6 艾比湖湖岸周边土壤风蚀现状



附图7 河南省2004年5月中旬区域农业干旱模拟与验证