

## 基于空间数据库和 GIS 的 SPAC 系统水分运动模型

张圣微<sup>1,2</sup>, 雷玉平<sup>1\*</sup>, 郑力<sup>1</sup>, 李红军<sup>1,2</sup>, 王晓磊<sup>1,2</sup>, 姚琴<sup>1,2</sup>, 赵鸿彬<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 农田 SPAC 系统水分空间变异通常较大, 一维模型无法反应区域农田水分的运动和空间分布。该研究以空间数据库和组件式 GIS 为基础, 结合适于北方平原农田水文过程的机理公式, 开发出可以在 ArcMAP (ESRITM) 中加载的区域 SPAC 系统水分运动模拟工具, 该工具结合 GIS 空间分析功能、空间数据库管理和水文过程数值模拟于一体, 可以模拟计算 SPAC 系统水分的时空分布和运动, 并提供二维或三维的输出结果。模型由多个数据处理和过程计算子模块组成, 可模拟 SPAC 系统内土壤水分动态和蒸散量。验证表明, 区域土壤水分模拟绝对误差在 0.05 (即体积含水量相差 5%) 以下的栅格点数达到总计算区域栅格数的 95.61%; 蒸散量验证显示, 玉米生长季平均绝对误差为 0.15 mm, 平均相对误差为 3.1%; 小麦生长季平均绝对误差为 0.13 mm, 平均相对误差为 5%。

**关键词:** SPAC; 水文模型; 空间数据库; 组件 GIS; 水平衡; 蒸散发 (ET); 降雨截留

**中图分类号:** S126; TP392

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-4-0001-08

张圣微, 雷玉平, 郑力, 等. 基于空间数据库和GIS的SPAC系统水分运动模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 1-8.

Zhang Shengwei, Lei Yuping, Zheng Li, et al. SPAC system water movement model based on GIS and spatial database[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 1-8.(in Chinese with English abstract)

### 0 引言

随着人们对生态系统安全的重视和对可持续发展理论不断实践, 土壤-植被-大气连续系统 (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, SPAC) 水分运动模拟的方法和理论已经逐渐成为国际学术界的热点之一。基于 SPAC 理论的模型也随之快速发展<sup>[1,2]</sup>。但是以往的模型大多数都是基于点或者测站数据的一维模拟, 无法表示 SPAC 系统水分的空间差异; 同时, 随着计算机技术的快速发展和地理信息系统 (GIS) 应用的普及, GIS 技术已被广泛的应用到水文水资源的研究和管理中来。但是, 虽然大多数 GIS 软件能很好的完成诸如: 图层叠加(Overlay)和索引操作 (Index Operation) 等空间分析功能, 可对于基于过程 (Process-based) 的水文过程模拟却无能为力<sup>[3]</sup>。而将 GIS 和水文模型耦合为解决这一问题提供了可能。在过去的二十年中研究人员和软件工程师们开发出很多工具和接口程序来实现 GIS 与水文模型的整合<sup>[4,5]</sup>, 并尽量将输入的参数和数据最小化以减少人为误差发生的机率<sup>[6]</sup>。但是随着研究区域的不断扩大和研究精度的不断提

高, 模型的输入输出数据也随之不断增加, 海量高质量的数据已成为模型模拟精度和准确度的保证。因此数据库技术随之而来, 空间数据库技术可以很好的解决数据对模型的限制, 同时还可以很好的与 GIS 的空间分析功能相结合。但是目前将 GIS、空间数据库、水文模型三者完全整合的成功例子很少, 在 Radu 等人<sup>[3]</sup>的研究中也只是提出基于数据库与地下水数字模型接口 GMS 的松散耦合工具; Jian Shen 等<sup>[7]</sup>提出的基于数据库技术的流域模型虽然是一个完整的集成 GIS、数据库和水文模型为一体的系统, 但是存在开发复杂, 系统庞大的问题。此外, 以往大多数的模型只能对符合系统设计的特定格式数据进行处理, 因此除非重新更改并编译模型程序, 否则很难同各种区域生态决策系统、农业决策系统、环境决策系统等与生产生活密切相关的决策支持系统相整合。

本研究在 GIS 技术和空间数据库的支持下, 以 SPAC 系统水分运动模拟为目的, 利用组件式 GIS 技术和空间数据库引擎技术将 GIS 和水文模型紧密耦合, 开发出一个能在 ArcMAP 中加载的工具箱, 用以进行 SPAC 系统中水分的时空分布模拟, 并可根据需要提供二维或三维的输出结果。该模型与传统的松散耦合模型不同的是, 将数据库作为系统的支撑框架, 所有数据流和事件的响应都围绕数据库而进行。模型运行所需的数据和参数都存储在服务器端的数据库中, 使用者不但可以通过模型界面编辑输入数据和显示模拟结果, 还可以直接通过访问服务器端数据库对数据和参数进行读取、修改或增减。独立运行的关系型数据库管理系统本身就是具有强大的

收稿日期: 2007-06-11 修订日期: 2008-02-20

基金项目: 中科院知识创新重要方向项目(KSCXZ-YW-N-037); 欧盟 FP6 项目 (BRAHMATWINN) No. 036952

作者简介: 张圣微 (1979-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要从事遥感、GIS 技术及水文模型研究。石家庄 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 050021。Email: zsw@sjziam.ac.cn

\*通讯作者: 雷玉平, 副研究员, 主要从事水文、GIS 与遥感系统集成研究。石家庄 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 050021。Email: leiyp@sjziam.ac.cn

数据管理能力和丰富的内建数据处理方法的软件系统,从而使得数据存储、数据修改和不同数据间的关系处理等问题能得到高效的解决。通过这一基于数据库引擎思想的总体设计,很好的解决了模型与数据之间的整合问题,使模型不但能很好的与数据库管理系统进行耦合,更为模型灵活运用和重组提供可能。利用中科院滦城生态系统实验站 2005 年田间中子管实测数据以及 Lysimeter 数据对模型模拟的土壤水分和蒸散量进行验证,结果显示模型运行稳定,模拟结果可靠。最后利用模型对实验场进行了水分运动模拟研究。

## 1 组件式 GIS 与水文模型

### 1.1 组件式平台

组件式平台主要有微软公司的 COM (Component Object Model, 组对象模型) / DCOM (Distributed Component Object Model, 分布式组件对象模型) 和 OMG 的 CORBA (Common Object Request Broker Architecture, 公共对象请求代理体系结构)。组件式地理信息系统 (ComGIS) 就是面向对象技术和组件式软件技术在 GIS 软件开发中的应用。ComGIS 不依赖于某一种开发语言,而是嵌入通用的开发环境(如: Visual C++、Visual Basic、Delphi 等)中实现 GIS 功能,专业模型则可以使用这些通用开发环境来实现,也可以插入其它的专业性模型分析控件。各个 GIS 控件之间以及 GIS 控件与其它非 GIS 控件之间,可以方便地通过可视化的软件开发工具集成起来,形成最终的 GIS 应用。通过标准的通信接口实现交互,构成应用系统。因此,使用 ComGIS 进行二次开发可以实现高效、无缝的系统集成,并且具有良好的扩展性。同时基于组件式 GIS 开发的系统还能克服各种 GIS 软件内嵌二次开发语言无法脱离基础平台的不足,可以编译成独立软件推广<sup>[8]</sup>。

### 1.2 水文模拟模型与 GIS 系统的集成

目前水文模型与 GIS 的集成一般可通过以下 3 种途径实现: 1) 嵌入式集成 (Embedded Integration) 包括在专业的模型软件中集成 GIS 功能和在 GIS 软件中扩展专业模型两种。2) 松散连接 (Loose Coupling), 是在标准 GIS 软件包(如 Arc/Info)与水文模型软件(如 Modflow)之间通过接口程序,以数据流方式实现模型与 GIS 之间的数据交换。3) 完全整合 (Tight Coupling, Fully Coupled), GIS 和模型共享同一平台,通过 GIS 宏语言或其它编程语言将模型直接嵌入到 GIS 系统中。近几年,随着组件式 GIS 技术的出现和逐渐成熟,通过高级编程语言 (VB、VC、Delphi 等) 将 GIS 功能与专业模型进行完全整合已经很容易实现了<sup>[9]</sup>。

## 2 模型建立

本研究所建立的模型是一个与 GIS 和数据库完全耦合的 SPAC 系统水分运动模拟工具,模型运行界面如图 1 所示。

模型在 Visual Basic 环境下开发,利用 ESRI 的 ArcObjects (AO) 技术以 ComGIS 为指导思想来实现数字模型和 GIS 耦合,同时通过标准 SQL 语言与数据库进行通信,通过查询技术从数据库中检索模型所需的输入数据和参数,及不同时间和空间输出结果的存储。



图 1 模型在 ArcMAP 中的运行界面

Fig.1 Model's interface in ArcMAP

### 2.1 模型结构

模型设计结构如图 2 所示。用户通过 ArcGIS 加载模型工具,确定输入输出数据位置,并设置相应参数;模型通过与标准 SQL 语句和 AO 控件从数据库中获取用户指定的数据,通过栅格运算得出不同土层每天的土壤含水量,再存入数据库。用户也可以通过直接操作数据库来对模型的输入和输出数据进行管理。以数据库为核心的设计将数据库管理软件的数据管理及分析能力很好的发挥出来,模型所需输入数据组成、用途及格式如表 1 所示,数据存储在数据库服务器中,通过关系型数据库管理系统 SQLServer2000 进行管理;输出数据组成及类型如表 2 所示,输出数据全部存储在数据库服务器中待输出模块调用。模型程序设计流程如图 3 所示。首先,模型从数据库中读取初始数据,并按用户定义的区域进行数据筛选和叠加;其次,用户通过图形界面设定计算步长、土层厚度、计算时间、栅格大小等参数,并根据需要选择插值方面;第三,模型通过 GIS 空间分析功能对初始数据按照用户的设定进行栅格化,在对每个栅格点进行土壤水分运算;最后将结果存入数据库,用户可以根据需要进行显示输出。

ArcMAP 作为模型的前端操作环境,不但为模型提供输入数据和调整参数的图形界面,还是模型结果的显示输出平台,而且其空间分析功能也为进一步对输出数据进行分析提供了方便,用户可以根据需要对模型模拟结果作各种分析和不同的输出形式。另外,为了便于数据的管理和模型的使用,在模型中还设计了数据管理接口程序,为用户提供图形化的数据管理界面。

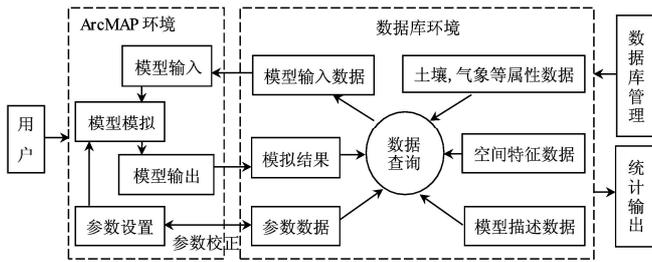


图 2 模型总体设计

Fig.2 Diagram of modeling system architecture

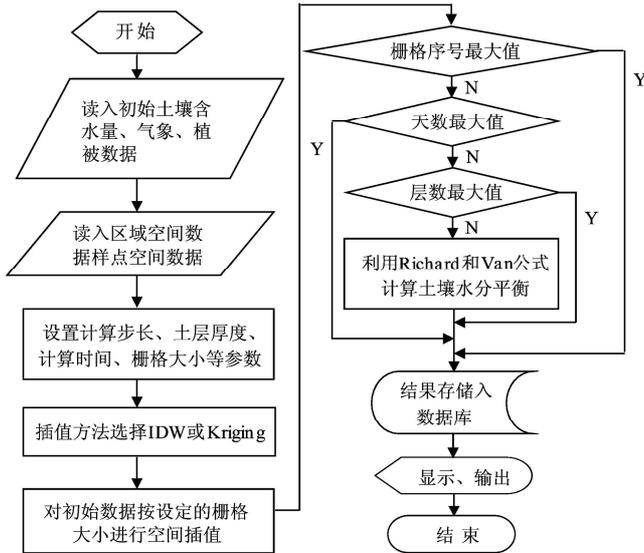


图 3 模型设计流程图

Fig.3 Flowchart of model design

表 1 模型所需输入数据组成、用途及格式

| 数据项名称 | 用途                 | 数据格式              |
|-------|--------------------|-------------------|
| 模拟区域  | 提供模拟所需的区域范围        | GIS polygon layer |
| 测点位置  | 定义取样点位置            | GIS point layer   |
| 气象数据  | 长时期的每日气象数据         | RDBMSa            |
| 土壤数据  | 提供土壤分层基本属性数据和含水量数据 | RDBMSa            |
| 植被数据  | 植被类型、LAI、最大根深等植被数据 | RDBMSa            |
| 参数数据  | 模型运行所需经验参数         | RDBMSa            |

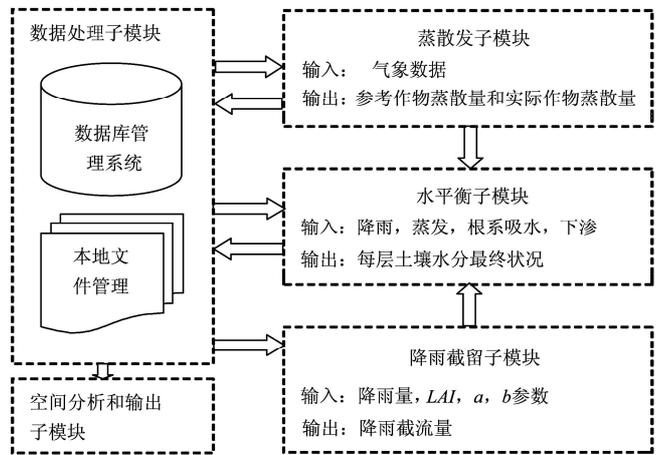
表 2 模型输出数据及格式

| 数据项名称  | 数据库中名称 | 数据描述              | 数据格式 |
|--------|--------|-------------------|------|
| 天数     | NAME   | 模拟结果为那一天的数据       | 单精度  |
| 层数     | LAYER  | 模拟结果为那一层的数据       | 整型   |
| 深度     | DEPTH  | 结果所在深度            | 单精度  |
| 栅格数    | Z      | 当前栅格在整个输出阵列中的位置   | 整型   |
| 最终含水量  | EWC    | 模拟结束时的含水量         | 单精度  |
| 水势     | PSI    | 模拟结束时的水势          | 单精度  |
| 单层水量变化 | SWRC   | 与模拟开始时时刻比较含水量的变化量 | 单精度  |

注：<sup>a</sup>关系型数据库管理系统。

## 2.2 模块组成

本模型主要由五个子模块构成：数据处理子模块、水平衡子模块、蒸散发子模块、降雨截流子模块、空间分析和输出子模块。模块间相互关系以及各个模块的输入输出如图 4 所示，原始数据流分别从数据库和本地文件通过数据接口输入到模型的各个运算模块中，分别进行蒸散发、水分平衡和降雨截留的运算；蒸散发子模块和降雨截留子模块又将数据输出给水平衡子模块作为水分平衡计算的输入数据；水平衡子模块和蒸散发子模块进一步将运算结果输出到数据库中存储；最好通过空间分析和输出子模块进行输出显示。下面将分别对其基本原理和所使用的方法进行阐述。



注：其中 LAI 为叶面积指数，a 是经验参数，b 是土壤覆盖度(≈LAI/3)

图 4 模型模块示意图

Fig.4 diagram of the modules for model

### 2.2.1 数据处理子模块

负责按照用户的设置来处理模型的输入、输出和参数数据。模型运行时本模块根据设定的模拟区域和模拟时段在本地读取空间数据“模拟区域”和“测站位置”，同时从数据库中查询出模拟时段内的气象、植被等属性数据；另外数据处理子模块还负责将模型输出数据按照如表 2 所示内容存入数据库服务器，并根据用户的需要将数据库中的数据转化成栅格数据格式在 ArcMAP 中显示。另外本模块负责对参数数据校正如图 5 所示，系统通过查询从默认的参数库中按照用户的定义读取模型运行所需的相关参数，并在运行窗口中显示出来，此时用

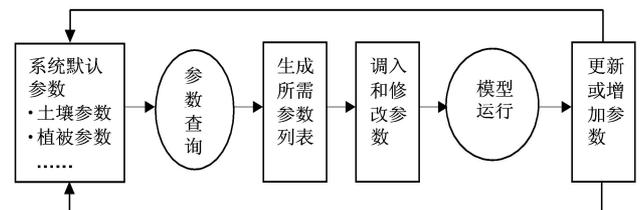


图 5 模型参数校正流程图

Fig.5 Flowchart of default parameter mapping and updating

户可以通过接受默认参数或根据实际情况和经验来对参数进行修改,最后根据模型的运行情况将参数数据更新并存入系统默认参数库,从而完成模型参数的校正。

### 2.2.2 水平衡子模块

将土壤剖面根据使用者设定分为若干层,并考虑上下边界条件和作物根系吸水,得到水平衡计算方程如方程(1)所示。利用 Richards 方程的扩散形式(2),(3)和 van Genuchten 方程公式(3)和(4)<sup>[10]</sup>计算层间和不同时间段水分平衡。因为 van Genuchten 方程模拟的曲线形状与实测结果非常接近,近年来被广泛的应用到土壤水分运动的研究中<sup>[11, 12]</sup>。将得到的导水率( $K$ )值代入(2),(3)式用 Newton-Raphson 迭代算法解 Richards 方程,通过设定最大迭代次数及模拟最大时段等边界条件对模型运算精度加以控制。

$$D \frac{d\theta}{dt} = P + I - E \pm Q - S \quad (1)$$

式中  $D$ ——土层厚度, cm;  $\theta$ ——土壤体积含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $t$ ——时间, s;  $P$ ——降水量, mm;  $I$ ——灌溉量, mm;  $E$ ——蒸发量, mm;  $Q$ ——下边界通量,  $\text{cm}/\text{d}$ ;  $S$ ——根系吸水量,  $\text{cm}/\text{d}$ 。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

式中  $\theta, t$ ——同上;  $z$ ——距基准面的距离, 向上为正, m;  $K(\theta)$ ——土壤导水率,  $\text{cm}/\text{d}$ ;  $\psi_m(\theta)$ ——土壤水势,  $\text{cmH}_2\text{O}$ ;  $D(\theta)$ ——土壤水分宏观扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 即基质势梯度为 1 时的导水率。

van Genuchten 水势与含水率函数为

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha \psi)^n)^m \quad (4)$$

van Genuchten 水势与导水率函数为

$$K = K_s \left( 1 - (\alpha \psi)^{n-1} (1 + (\alpha \psi)^n)^{-m} \right) / (1 + (\alpha \psi)^n)^{2m} \quad (5)$$

式中  $\psi$ ——土壤水势,  $\text{cmH}_2\text{O}$ ;  $\theta_r$  和  $\theta_s$ ——分别代表土壤的残余和饱和和体积含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $K$ ——非饱和土壤导水率,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $K_s$ ——饱和导水率,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$ ——经验拟合参数, 且  $m = 1 - 1/n$ 。

### 2.2.3 蒸散发子模块

通过气象和作物数据的输入计算出参考作物蒸散量 and 实际作物蒸腾量, 为进一步计算作物需水和水平衡打基础。其中参考作物蒸散量的计算是通过 Penman-Monteith 公式求得<sup>[13, 14]</sup>, Penman-Monteith 公式是联合国粮农组织 FAO 推荐的参考作物蒸发蒸腾量计算公式<sup>[15]</sup>, 且在华北地区有很好的应用<sup>[16, 17]</sup>。在得到潜在蒸散量的基础上进而利用不同的作物系数  $k_c$  计算出潜在作物蒸散量如(7)式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1.0 + 0.34 u_2)} \quad (6)$$

$$ET_{p0} = k_c ET_0 \quad (7)$$

式中  $ET_0$ ——参考作物蒸散量, mm;  $ET_{p0}$ ——潜在作物蒸散量, mm;  $R_n$ ——地表净辐射,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $G$ ——土壤热通量,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $T_{mean}$ ——2 m 高度处的平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u_2$ ——2 m 高度处风速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $e_s$ ——饱和水气压, kPa;  $e_a$ ——实际水气压, kPa;  $\Delta$ ——饱和水气压与温度曲线斜率,  $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma$ ——干湿表常数,  $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $k_c$ ——作物系数。

为了将潜在作物蒸散量分解为潜在蒸腾量和潜在蒸发量, 需要用到叶面积指数 ( $LAI$ ), 其随作物生长发育而变化。土壤表层由于风速相对很小所以蒸发量中的空气动力学项就变得很小, 进而使空气阻力  $R_{air}$  变得很大<sup>[18]</sup>。因此土壤蒸发的能量来源就仅仅剩下到达地面的太阳净辐射。假设通过冠层的太阳净辐射依照经验方程而减少, 并且土壤热通量可以忽略不计, 我们可以得出(8)式计算<sup>[19]</sup>:

$$E_p = ET_{p0} e^{-kgrLAI} \quad (8)$$

式中  $E_p$ ——潜在蒸发量, mm;  $kgr$ ——消减系数;  $LAI$ ——叶面积指数。

此外, 本文认为被植被截留的降雨或灌溉水的蒸发速率与  $ET_0$  相等, 而与植被覆盖度无关。如果计算的当天有降雨或灌溉时作物被淋湿, 冠层表面从湿到干所需的时间为  $W$  可由截流量  $P_i$  和  $ET_0$  计算得出, 如式(9)所示, 其中截留量的计算将通过降水截留模块给出。

$$W = P_i / ET_0 \quad W \leq 1 \quad (9)$$

考虑到降雨截留部分的蒸发以及潜在土壤蒸发量, 得到式(10)来计算每日潜在作物蒸腾量  $T_p$ ,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

$$T_p = (1 - W) ET_{p0} - E_p \quad T_p \geq 0 \quad (10)$$

### 2.2.4 降雨截留子模块

植物冠层对降雨具有在数量和时间上重新分配的功能。是一个复杂的混合过程。对于林冠降雨截留模型的研究较多<sup>[20]</sup>, 但是对于农田冠层截留的研究却不多见<sup>[21]</sup>。Von Hoyningen-Hune 和 Braden 测量了不同作物对降雨的截留量得出了如(11)式的冠层截留一般方程。该方法因被集成到 SWAP (Soil-Water- Atmosphere-Plant) 模型中, 而被广泛应用<sup>[22, 23]</sup>。但随着降雨量的增加, 截留量也逐渐接近饱和值, 即达到  $a \cdot LAI$ <sup>[24]</sup>。

$$P_i = a \times LAI \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \frac{b \times P_{gross}}{a \times LAI}} \right\} \quad (11)$$

式中  $P_i$ ——降雨的截流量  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $P_{gross}$ ——总的降雨量,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $a$ ——经验参数,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $b$ ——植被覆盖度 ( $\approx LAI/3$ )。

### 2.2.5 空间分析和输出子模块

其中空间分析部分主要是通过空间插值运算 IDW 或 Kriging 方法对初始数据按照用户给定的模拟区域和分辨率进行空间插值, 然后在设定的时间和深度范围内按照给定的步长利用 Richard 方程和 Van Genuchten 公式, 逐天、逐层、逐个栅格点的进行土壤水势和含水量数据, 并根据需要在 ArcMap 中输出显示研究区域不同时间, 不同土层的水势或含水量分布图, 从而反映土壤水分的时空变化。对于插值方法的选择本模型采用菜单形式, 可以根据使用者的要求采用 Kriging 或 IDW 方法, 但由于 Kriging 方法的计算量颇大, 在某些情况下无法进行插值运算, 此时模型会自动切换到 IDW 插值法, 从而使运算能顺利进行。输出部分通过运用 AO 组件实现了与 ArcMAP 的无缝集成, 不但可以按使用者的需要提供地下水一维点上的垂向分布曲线、二维面上的水含量和水势分布图, 还通过 OpenGL 技术实现了模拟结果的三维显示。

## 3 模型验证

### 3.1 研究区域及实验布置

栾城站位于石家庄市栾城县城东, 北纬  $37^{\circ} 50'$ , 东经  $114^{\circ} 40'$ , 海拔高度 50.1 m, 属中国东部暖温带半湿润季风气候, 可以代表太行山前平原约 250 万顷耕地的褐土高产农业生态类型。试验地长 208 m, 宽 130 m, 耕作制度为冬小麦—夏玉米连作, 在试验地内埋设 9 根 2 m 长的中子管, 位置 (S1~S9) 及初始含水量 (2005 年 8 月 19 日) 见图 6。土壤水分动态监测工具为 CNC503DR 型中子水分仪。每隔一周测量一次, 遇到灌溉或降水时会加测, 确保准确监测土壤水分的动态变化。

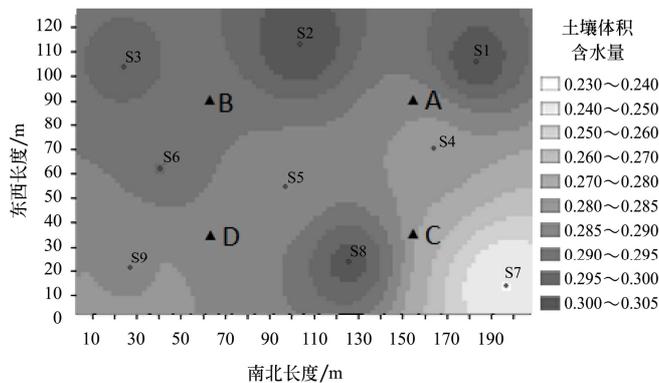


图 6 中子管 (S1~S9), 土壤采样点 (A~D) 分布图及 60 cm 深处初始土壤含水量

Fig.6 Distribution of neutron tube, sample site and initial soil moisture of 60cm depth

土壤参数测定: 利用美国 Geoprobe 公司生产的 Geoprobe® Model 54DT 在试验地内进行土柱取样, 取样深度为 2 m, 共取 4 根土柱位置分布如图 6 所示。对从试验地取回的土样, 先根据目测和手测将土壤质地分段, 分段结果如图 7。用烘干法测定含水量, 再利用筛细和比重计法得到土壤剖面的岩性, 参照美国农业部的土壤分类标准进行分类, 确定研究区的土壤质地为壤土和粉砂壤土<sup>[25]</sup>, 并分别用环刀法和称重法测定其容重和含水率, 每根土柱每种土壤类型取 3 个样本。最后确定各种模型所需的土壤参数, 并通过 RETC<sup>[26]</sup> 软件及前人试验成果<sup>[27]</sup> 进行修正, 如表 3。

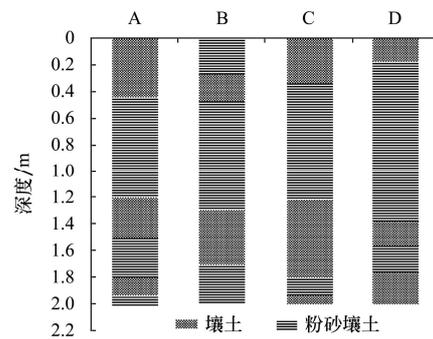


图 7 土柱剖面垂直分层情况

Fig.7 Vertical variation of soil profile in different soil column

表 3 栾城土壤水分运动模型模拟参数表

Table 3 Parameter of Luancheng1 for soil water movement model

| 土壤类型 | 残留含水量<br>/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | 饱和含水量<br>/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | A<br>/ $\text{cm}^{-1}$ | n    | 饱和导水率<br>/ $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ |
|------|---|---|-------------------------|------|--|
| 壤土   | 0.078   | 0.43  | 0.036                   | 1.56 | 24.96                                      |
| 粉砂壤土 | 0.067   | 0.45  | 0.02                    | 1.41 | 10.8                                       |

### 3.2 土壤水分模拟验证

在 ArcMap 中用模型对实验地进行土壤水分模拟, 分辨率设为 2 m, 模拟开始时间为 2005 年 8 月 19 日, 结束时间为 2005 年 8 月 25 日, 模拟时间为 6 d, 时间步长为 1 d, 模拟最大深度为 2 m, 深度步长为 20cm, 共包括 10 个土层, 通过模拟得到 60 幅土壤水分分布图, 在此不能同时列出。考虑到表层土壤由于受地表干扰严重, 而深层又变化不明显, 本研究选取第 3 层 (60 cm) 处土壤水分进行模型验证, 如图 8 所示。与同期 (2005 年 8 月 19 日至 2005 年 8 月 25 日) 利用 CNC503DR 型中子水分仪对布置在实验地内的 9 个中子管进行测量得到的数据插值图相比较可以看出, 虽然从图上看含水量等值线形状存在一定的差别, 但通过对对应点的数据进行比较得出其值很接近。进一步对结果统计分析得出, 在总面积为 27040  $\text{m}^2$  的研究区域内, 2 m 的分辨率, 共有 6592 个栅格点, 其中有 60303 个点模拟值与中子仪测量值的误差在 0.05 (含水量相差 5%) 以下, 达到总像素的 95.61%,

有 63.1%在 3%~4%之间, 可见模型的计算结果是可靠的。

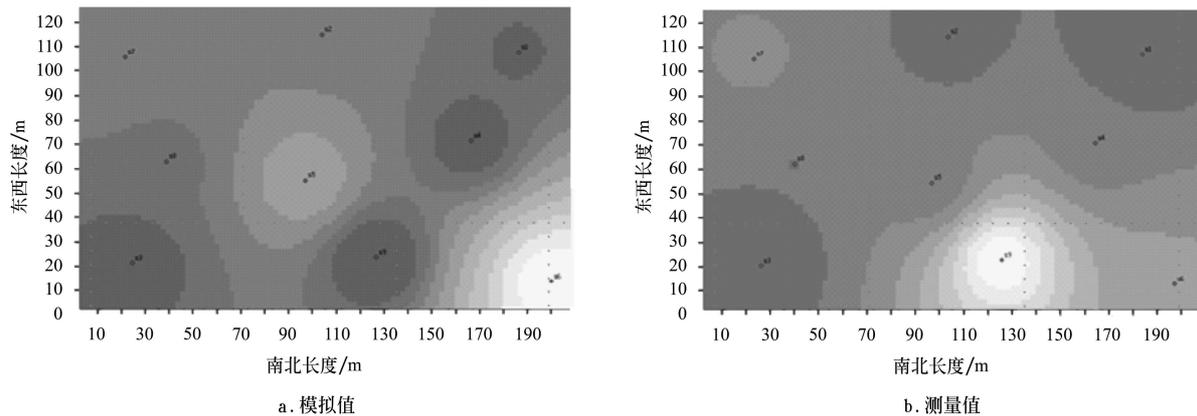


图 8 研究区含水量模拟值与测量值比较

Fig.8 Comparison between observed values and simulated values of soil water content in research region

### 3.3 蒸散发模拟验证

除了土壤水分 SPAC 系统水分运动另外一个重要元素是蒸散发, 本研究中对于蒸散发的验证是通过大型称重式蒸渗仪 (Lysimeter) 完成的。大型称重式蒸渗仪, 位于中国科学院栾城农业生态系统试验站, 建成于 1995 年 5 月, 是一个内部装满原装土体的大型容器, 置于田间检测每日的蒸散量, 每天早 8:00 和晚 8:00 测定作物的日蒸散量。大型称重式蒸渗仪内含原状土体, 共重约 14 t, 表面积 3 m<sup>2</sup>, 深 2.5 m, 测量精度为 0.02 mm。种植方式和作物都与田间相似, 采用等行播种, 10 月初种冬小麦, 6 月 11 日收获, 6 月 12 日种夏玉米, 9 月底收获。内装中子管可以监测土壤水分, 每 5 d 测量一次。

对于蒸散量的验证本研究共包括两部分, 分别为小

麦生长季模型模拟结果的验证和玉米生长季模型模拟结果的验证。分别从小麦生长季和玉米生长季选择一个月为模拟时段, 小麦生长季选择 5 月份, 玉米生长季选择 8 月份。因为 5 月和 8 月都是作物生长比较茂盛的季节, 作物与大气和土壤水分交换强烈, 日蒸散量变化明显, 有利于对模型进行验证。验证结果如图 9 所示。从图上可以看出无论是小麦生长季, 还是玉米生长季模型的模拟结果与 Lysimeter 的测量效果吻合的很好, 大体趋势一致, 波动情况基本吻合。进一步分析得到对于玉米生长季模拟结果与 Lysimeter 的测量结果之间的平均绝对误差为 0.15 mm, 平均相对误差为 3.1%; 对于小麦生长季平均绝对误差为 0.13 mm, 平均相对误差为 5%。

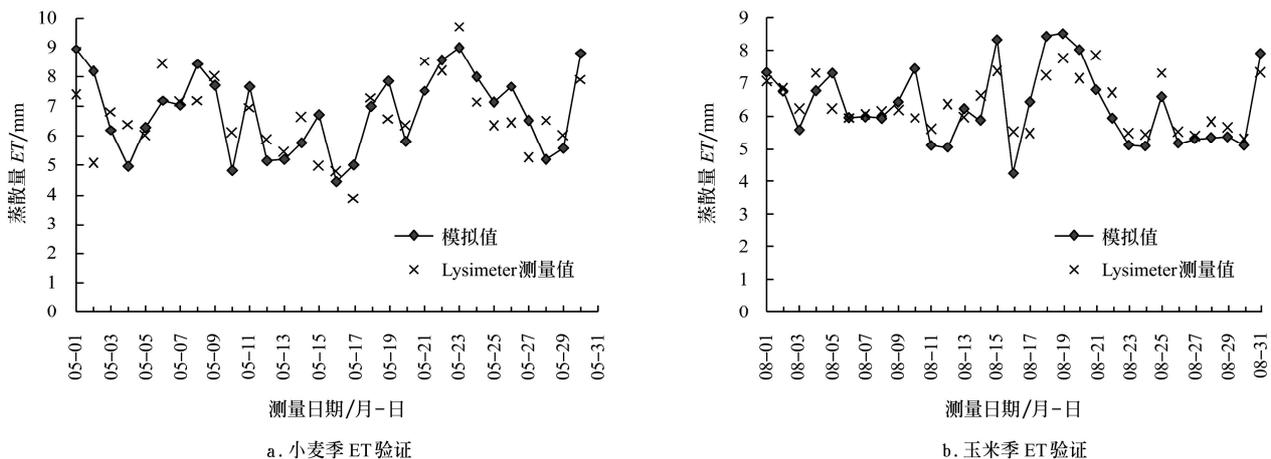


图 9 研究区域 ET 模拟值与 Lysimeter 测量值

Fig.9 Comparison between observed values with Lysimeter and simulated values of ET in research region

## 4 结论

本研究建立了基于空间数据库和 GIS 的 SPAC 系统水分运动模拟工具。工具包括: 数据处理子模块、水平

衡子模块、蒸散发子模块、降雨截流子模块、空间分析和输出子模块等模块。通过数据库和 ComGIS 将数据处理、数学模型和水分运动的物理过程完全耦合, 即完全遵循 SPAC 系统的水分运移规律又充分考虑到模型的实

用性。模型以空间数据库为核心, 将水文过程和 GIS 有机的整合在一起, 不再仅仅是数据的存储工具, 而是作为 GIS 和模型的接口单元, 起到桥梁的作用。而且数据库本身对用户是开放的, 用户可以根据自己的需要来定义模型的输入和输出, 而不需要修改模型本身。模型作为工具条加载运行于 GIS 平台, 充分利用了 GIS 的地图显示、图层控制、空间分析、空间数据查询与存贮等功能, 因此模型具有开发成本低、操作界面友好、可与其他系统共享数据、能在各种尺度下高效计算等特点。应用本模拟工具在中科院栾城生态系统试验站进行实际应用表明模拟效果良好。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刁一伟, 裴铁璠. 森林流域生态水文过程动力学机制与模拟研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, (12): 2369—2376.
- [2] 丛振涛, 雷志栋, 杨诗秀. 基于 SPAC 理论的田间腾发量计算模式[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 6—9.
- [3] R Gogu, G Carabin, V Hallet, et al. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modeling[J]. Hydrogeology Journal, 2001, 9: 555—569.
- [4] Arnold, J G, Fohrer, N SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 563—572.
- [5] G B Sahoo, C Ray, E H De Carlo. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict stream flow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1-2): 94—109.
- [6] Duda P, Kittle Jr, Gray J, et al. An Interactive Windows Interface to HSPF (WinHSPF), User's Manual[R]. Health Protection and Modeling Branch Standards and Health Protection Division Office of Science and Technology Office of Water, United States Environmental Protection Agency, 2001.
- [7] Jian Shen, Andrew Parker, John Riverson. A new approach for a Windows-based watershed modeling system based on a database-supporting architecture[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(9): 1127—1138.
- [8] 孙波, 严浩, 施建平, 等. 基于组件式 GIS 的施肥专家决策支持系统开发和应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 75—79.
- [9] 雪芹, 潘世兵, 张建立. 流域水文模型和 GIS 集成技术研究现状与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 10—13.
- [10] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci, 1980, 44: 892—898.
- [11] 徐绍辉, 张佳宝, 刘建立, 等. 表征土壤水分滞留曲线的几种模型的适应性研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 498—504.
- [12] 马英杰, 虎胆·吐马尔拜, 沈冰. 利用阻尼最小二乘法求解 Van Genuchten 方程参数[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 179—180.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Rase D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [J]. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 17—156.
- [14] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243: 192—204.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Rase D, et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper56, FAO, Rome, 1998.
- [16] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12—18.
- [17] 杨聪, 于静洁, 宋献方, 等. 华北山区短时段参考作物蒸散量的计算[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 71—80.
- [18] Goudriaan J. Crop micrometeorology: A simulation study [M]. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen, 1977.
- [19] Belmans C, Wesseling J G, Feddes R A. Simulation model of the water-balance of a cropped soil: SWATER [J]. Journal of Hydrology, 1983, 63: 271—286.
- [20] 王安志, 裴铁, 金昌杰, 等. 白山阔叶红松林降雨截留量的估算[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1403—1407.
- [21] 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 255—263.
- [22] Kite T, Droogers G W, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1-2): 3—18.
- [23] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 92—96.
- [24] Braden, H Ein Energiehaushaltsund Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete[J]. Mittelungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 1985, 42: 294—299.
- [25] Taxonomy, United States Department of Agriculture Online Soil[DB/OL].<http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/>.2005, 10.2005, 10.
- [26] USDA-ARS George E. Brown, Jr. Salinity Lab RETC online[DB/OL].<http://www.ussl.ars.usda.gov/models/retc.htm>.2005, 10.
- [27] 张喜英, 张 槽, 刘昌明. 太行山前平原土壤水分特征曲线拟合参数的确定[J]. 华北农学报, 2001, 16(2): 75—82.

## SPAC system water movement model based on GIS and spatial database

Zhang Shengwei<sup>1</sup>, Lei Yuping<sup>1\*</sup>, Zheng Li<sup>1</sup>, Li Hongjun<sup>1,2</sup>, Wang Xiaolei<sup>1,2</sup>, Yao Qin<sup>1,2</sup>, Zhao Hongbin<sup>1,2</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The spatial variation of water in crop field soil-plant-atmosphere-continuum (SPAC) is often significant. One-dimension model could not describe the spatial distribution and movement of water accurately. This study presents a regional SPAC water movement tool based on spatial database and ComGIS. It integrates hydrological process function that is suitable for north-China plain. This tool can be loaded in ArcMap (ESRI<sup>TM</sup>) as a tool-box. The model combines spatial analyses, spatial database management and simulation of hydrological process. The results of SPAC water movement simulation can be outputted two-dimension or three-dimension. It is consisted by several submodules, also can be used for estimating evapotranspiration (ET). The validation of the model shows that the grid number absolute error below 0.05 is 95.61% in regional soil moisture simulation. In wheat ET simulation the absolute error and average relative error are 0.15mm and 3.1%, respectively. In summer corn ET simulation the absolute error and average relative error are 0.13mm and 5%, respectively.

**Key words:** SPAC; hydrological model; spatial database; ComGIS; water balance; evapotranspiration (ET); precipitation interception