

# 基于 CoupModel 模型的三峡库区典型林地土壤水分和温度模拟以及参数敏感性分析

王贤<sup>1</sup>, 张洪江<sup>1</sup>, 杜仕才<sup>2</sup>, 程金花<sup>1</sup>, 孙龙<sup>3</sup>, 张东旭<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆市林业局, 重庆 401147;

3. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 根据 2008 和 2009 年野外试验资料, 应用 CoupModel 模型, 对位于长江三峡库区末端的重庆市四面山阔叶林(木荷×石栎)和针叶林(杉木×马尾松)0—80 cm 土层的土壤水分和温度进行了逐日模拟验证, 并在此基础上采用 OAT 方法(即每次只改变其中 1 个参数的方法), 对模型参数进行了敏感性分析。验证结果表明, CoupModel 能较好地模拟土壤水分和温度的动态变化, 2 种林分土壤水分决定系数( $R^2$ )、平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)、Nash 效率系数(NSE)分别为 0.81~0.94, -0.01%~0.26%, 0.24%~1.83%和 0.80~0.87; 土壤温度的  $R^2$ , ME, RMSE, NSE 分别为 0.92~0.99, -0.14~0.06 °C, 0.18~0.34 °C, 0.90~0.98。说明该模型在该地区表现出良好的适用性。参数敏感性分析表明, 对土壤水分模拟结果影响较大的参数有孔隙分布参数、进气吸力、残留含水量、饱和含水量、饱和导水率和蒸发阻力系数(PsiRs-1p), 对土壤温度模拟结果影响较大的参数有土壤热传导系数、有机质层厚度、植被反照率、消光系数、水汽压亏缺和蒸发阻力系数。

**关键词:** CoupModel 模型; 三峡库区; 林地; 土壤水分和温度; 参数敏感性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)06-0295-06

中图分类号: S152.7, S152.8

## Modelling Forest Soil Moisture and Temperature in Three Gorges Reservoir Area with CoupModel and Sensitivity Analysis of Parameters

WANG Xian<sup>1</sup>, ZHANG Hong-jiang<sup>1</sup>, DU Shi-cai<sup>2</sup>, CHENG Jin-hua<sup>1</sup>, SUN Long<sup>3</sup>, ZHANG Dong-xu<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Chongqing Forestry Bureau, Chongqing 401147, China; 3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** A physical process-based model(CoupModel) was applied to simulate daily soil moisture and temperature of broadleaved forest(*Schima superba* × *Lithocarpus glaber*) and coniferous forest(*Cunninghamia lanceolata* × *Pinus massoniana*) in Simian Mountain, which located in the Three Gorges Reservoir area. Then, the OAT method(one factor at a time) was adopted to analyze sensitivities of the model parameters. The validation results showed that CoupModel could fairly simulate the dynamic changes of soil moisture and temperature. Determination coefficient( $R^2$ ), mean error(ME), root mean square error(RMSE), and Nash-sutcliffe efficiency coefficient(NSE) of soil moisture were 0.81~0.94, -0.01%~0.26%, 0.24%~1.83% and 0.80~0.87 respectively, while they were 0.92~0.99, -0.14~0.06 °C, 0.18~0.34 °C, and 0.90~0.98 for soil temperature. It meant that the model had a good applicability in this region. The results of the sensitivity analysis indicated that, many parameters had great influence on the simulation of soil moisture, such as lambda, air entry, residual water, saturation, matrix conductivity and PsiRs-1p. While scaling coefficient, organic layer thick, plant albedo, light extinction coefficient, cond VPD and PsiRs-1p impacted on simulation of soil temperature.

**Keywords:** CoupModel; the Three Gorges Reservoir area; forest; soil moisture and temperature; sensitivity analysis

收稿日期: 2013-03-17

修回日期: 2013-05-08

资助项目: 国家林业局林业科技推广项目“三峡库区低山丘陵区水土保持型植被群落建设技术”(2012-42); 国家自然科学基金项目(41271300; 30900866); 中央高校基本科研业务费专项(TD2011-2)

作者简介: 王贤(1987—), 女(汉族), 山东省邹城市人, 博士研究生, 研究方向为土壤水分运动。E-mail: sdneyx.wangxian@163.com。

通信作者: 张洪江(1955—), 男(汉族), 河北省易县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀与流域管理。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn。

土壤水热环境作为植被恢复的关键性因子,对植物的生长发育、群落类型和分布特点具有重要影响<sup>[1]</sup>。传统的田间实验测量土壤水分具有一定的复杂性和不确定性,费时且费力,应用模型可使用更少的成本,更精确地分析土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 系统中水热迁移转化过程<sup>[2]</sup>。“土壤—植物—大气系统热量、物质运移综合模型”,是由 Jansson 和 Karlberg 等<sup>[3]</sup>瑞典科学家在 20 世纪 80—90 年代研究开发的,已经被数次修正。CoupModel 是一个基于过程的一维模型,可以模拟土壤—植物—大气系统的土壤热量过程、水分过程、植物水分过程、大气和积雪过程及碳、氮过程<sup>[4]</sup>,在国外得到广泛应用。很多学者利用该模型在瑞典<sup>[5-6]</sup>,丹麦<sup>[7]</sup>,芬兰<sup>[8]</sup>,德国<sup>[9]</sup>,以色列<sup>[10]</sup>等国对森林生态系统碳循环<sup>[5-6]</sup>,土壤溶质(氮)运移<sup>[7-9]</sup>,土壤水分和热量的耦合<sup>[11-12]</sup>,植物光合和蒸腾作用及对水分的利用效率<sup>[10,13-14]</sup>等方面开展了研究。该模型引入我国后,在东北地区<sup>[15]</sup>、西北地区的黑河流域<sup>[16]</sup>、黄土高原<sup>[17-18]</sup>等地区都进行过模拟验证,但在三峡库区尚未进行相关应用。CoupModel 作为一种广泛适用于林地的物理模型,引入参数较多。在欧洲国家应用时,高密度、长序列的观测数据积累较好,模型参数较容易确定。但本研究区所在的三峡库区模型基础资料较少,土壤性质及气象条件较为复杂,造成参数评估的困难。所以有必要对影响模型效率的参数进行敏感性分析,并在此基础上确定关键参数,提高模型运行效率和减少参数的不确定性,为模型的推广应用提供更加可靠的依据。

因此,针对 2 方面的问题开展研究:(1) 以位于三峡库区库尾的重庆四面山林地土壤和气候条件为背景,阔叶林和针叶林 2 种林分为试验对象,通过 2008 和 2009 年的土壤水分和温度观测值验证模型适用性;(2) 采用 OAT(即每次只改变其中 1 个参数)方法,对模型参数进行敏感性分析,找出其中的敏感参数,为模型的推广应用提供实践依据。

## 1 试验区概况

试验区选择在位于长江三峡库区末端的重庆市四面山张家山,地理坐标为东经 106°17′—106°31′,北纬 28°31′—28°46′,距重庆市区 138 km,海拔 900~1 500 m,地势南高北低。属于中亚热带湿润性季风气候区,年均温 10~14 °C,年均降雨量 1 221~1 530 mm,相对湿度高达 80%~90%,多年平均日照时数 1 082.7 h。

研究区主要森林土壤类型为黄壤和黄棕壤。植被具有典型的亚热带常绿阔叶林特征,群落优势树种以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、木荷(*Schima superba*)等为主,竹类大约有 20 余种,以毛竹(*Phyllostachys heterocyla*)为主。

在对试验区进行全面踏勘的基础上,2008 年 4 月,选取在当地较为常见、广泛分布的木荷石栎阔叶林和杉木马尾松针叶林,各设置 20 m×20 m 的标准样地,进行植被调查(林龄由样地优势树种的标准木年龄确定)。样地基本情况详见表 1。

表 1 研究区样地基本状况

林分类型	立地因子		林型			土壤质地	主要植被种
	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	郁闭度	盖度/%		
阔叶林	1 167	5	35	0.75	80	砂壤土	木荷、石栎、中华里白( <i>Hicriopteris chinensis</i> )、蕨( <i>Pteridium aquilinum</i> )等
针叶林	1 178	6	40	0.7	75	砂壤土	杉木、马尾松、胡枝子、三脉紫菀( <i>Aster ageratoides</i> )等

## 2 材料与方法

### 2.1 模型简介

CoupModel 的核心是两个耦合的水热流偏微分方程,遵循质量和能量守恒定律,假定流动是由水势梯度和温度梯度产生的,用有限差分法求解方程<sup>[3-4]</sup>。在土壤水热运移模拟运算中,水分特征曲线依据 Brooks—Corey 方程,非饱和导水率采用 Mualem 公式计算。本研究中使用 CoupModel 3.0 版本。

2.1.1 水循环过程模拟 每日的水量平衡计算公式如下:

$$P = I + E + T + R + D + \Delta S \quad (1)$$

式中: $P$ ——降雨量(mm); $I$ ——冠层截留量(mm); $E$ ——土壤蒸发量(mm); $T$ ——植被蒸腾量(mm); $R$ ——地表径流量(mm); $D$ ——根系层以下深层渗透(mm); $\Delta S$ ——土壤储水增量(mm)。

冠层截留由经验阈值函数计算。实际蒸发散在考虑植被覆盖率、冠层叶面积指数、土壤含水量及根系分布的基础上,由潜在蒸发能力计算而来。它包括裸露土壤的蒸发,植被截留蒸发,由根系吸水经植被冠层叶面的蒸腾。空气动力学阻力( $r_a$ )和冠层表面阻力( $r_s$ )是进行蒸发散计算的关键性参数。大气稳定或不稳定时,气流运动量、水蒸汽及热输送还受到浮力的影响, $r_a$ 需根据 Monin—Obukhov 相似理论计

算。冠层表面阻力( $r_s$ )随季节变化,受叶面积指数(LAI)和总辐射影响根据 Lohammar 方程计算。位移高度和粗糙度根据 Shaw—Pereira 方程计算。地表径流由经验公式积水覆盖函数计算。土壤水分运动主要依据 Darcy 定律和 Richards 方程。排水与深层渗透为非饱和和下边界条件,采用单位梯度流。详细内容参见文献[3—4]。

2.1.2 能量循环过程模拟 蒸发蒸腾与能量循环过程密切相关,模型对土壤—植被—大气间的能量平衡进行了比较详细的模拟。地表能量平衡方程为:

$$R_{ns} = L_v E_s + H_s + G \quad (2)$$

式中: $R_{ns}$ ——土壤表面净辐射量 ( $J/(m^2 \cdot d)$ );  
 $L_v E_s$ ——潜热通量 ( $J/(m^2 \cdot d)$ );  
 $H_s$ ——感(显)热通量 ( $J/(m^2 \cdot d)$ );  
 $G$ ——土壤热通量 ( $J/(m^2 \cdot d)$ )。

## 2.2 试验设计

CoupModel 的驱动数据为气象、土壤和植被参数,模型输出可以根据需要来选择。本试验模拟输出阔叶林和针叶林 0—80 cm 土层土壤水分和温度,输出步长为日。实验时间 2 a,以 2008 年 5 月 1 日至 10 月 13 日为率定期,模型率定后,保持所有参数不变,用实测值对 2009 年 5 月 1 日至 9 月 1 日模拟结果进行验证,对模型在本地区的适用性进行研究。

土壤水分和温度使用 Diviner2000 FDR(澳大利亚)土壤水分测定仪和 ZDR-41 温度记录仪(杭州)定位观测,每日 1 次,测定深度为 80 cm,土层间隔 20 cm。

因模型中“植被冠层截留容量( $i_{base}$ )、单位叶面积截留容量( $i_{LAI}$ )”2 个参数的校核需要,还应选取几场典型降雨进行林冠截留的测定。选取样地标准木(3 株)下布设简易雨量筒收集穿透降雨。树干径流量测定采用收集槽法。在标准木 1.5 m 高处环状刻出小沟,将聚乙烯塑料管纵向剖开后,沿树干周围呈螺旋状固定在,用硅胶将接触处密封,塑料管下端接容器承接树干径流。雨后由降雨量、穿透雨量及树干径流订算出林冠截留量<sup>[17-19]</sup>。径流小区法测定地表径流。本实验中 2 个样地地形较为平坦,试验期间未观测到地表径流。

## 2.3 模型数据库

2.3.1 气象参数 使用小型气象站观测。在样地周围的气象站观测场中,布置有一台 Vantage PRO 2 小型气象站(美国产),连续观测降雨、风速、气温、相对湿度、总辐射,观测高度为 2 m,步长为 1 h。气象站在出厂前已经和标准气象站观测数据进行了校正。

2.3.2 土壤参数 来自试验区土壤剖面属性测定。试验前挖掘深 80 cm 的土壤剖面,每 20 cm 一层进行土样采集。比重计法测定土壤颗粒组成,环刀法测定土壤密度和孔隙度,压力膜仪法测定土壤水分特征曲线<sup>[20]</sup>,恒定水头法测定土壤饱和导水率<sup>[21]</sup>。根据室内土壤物理性质的测量初步确定参数值,并在模拟过程中进一步确定。

2.3.3 植被参数 每月测定一次冠层高度、根系深度、叶面积指数。株高采用米尺测量,根系深度采用人工挖土壤剖面的方法测量,叶面积指数采用 LAI-2000(美国)冠层影像分析系统。以上参数取样地内不低于 10 株植物进行测量。

2.3.4 模型结构参数 因考虑到植被对土壤—植被—大气系统中水能传输的影响,2 种林地均采用明确多层大叶模型和指数分布的根密度模型,实现土壤与冠层的耦合。CoupModel 中包含较多的参数,模型的开发者根据研究成果给模型的参数设置了合理的范围,同时给出较为理想的默认值<sup>[17-19]</sup>。但在率定过程中还需要根据模拟结果调整部分参数使模拟达到合适的精度,其它参数均采用模型的默认值(表 2)。

表 2 本研究中 CoupModel 模型被调整的参数

模型结构参数	阔叶林	针叶林	来源
气象站海拔 $e_{levmet}/m$	1 165	1 165	测定
试验地海拔 $e_{levsin}/m$	1 167	1 178	测定
东西坡向 $p_x/(m \cdot m^{-1})$	0.59	0.63	测定
南北坡向 $p_y/(m \cdot m^{-1})$	-0.117	-0.08	测定
年平均气温 $T_{amean}/^{\circ}C$	19	19	测定
试验地纬度 $e_{latit}/(^{\circ})$	28.51	28.51	测定
湿土反照率 $a_{wet}/\%$	15	15	专著[3]
干土反照率 $a_{dry}/\%$	25	25	文献[22]
植被反照率 $a_{veg}/\%$	15	15	文献[22]
消光系数 $k_m$	0.5	0.5	文献[22]
植被冠层截留容量 $i_{base}/mm$	2.3	1.5	文献[23],校正
单位叶面积截留容量 $i_{LAI}/(mm \cdot m^{-2})$	0.15	0.15	文献[18]
水汽压亏缺 $g_{vpd}/Pa$	450	450	校正
根系吸水补偿度 $f_{umov}$	0.9	0.6	文献[19]
根系吸水折减临界水头 $\psi_c/cm$	1 500	1 000	文献[19],校正
根系需求相关系数 $p_1$	0.6	0.3	文献[10],校正
表征根系分布的参数 $r_{rac}$	0.1	0.05	文献[18],校正
蒸发阻力系数 $r_{\psi}$	150	450	校正,文献[18-19]
裸地动量粗糙度 $z_{OM}/m$	0.008	0.005	校正,文献[15]
气动阻力增加值 $r_{alai}/(s \cdot m^{-1})$	60	60	校正
土壤无风交换率 $r_{a,max}^{-1}/(m \cdot s^{-1})$	0.03	0.05	校正,文献[15,22]
水汽扩散系数 $d_{vapb}$	0.66	0.66	文献[18,22]
土壤热传导系数 $\chi_{hf}$	0.4	0.4	文献[22]

## 2.4 敏感性分析

敏感性也称敏感度,敏感性分析的主要目的是确定参数、边界条件、源汇项等的不确定性对模型计算结果的影响程度,从而检查模型的正确性<sup>[24]</sup>。在调参前进行敏感性分析可以帮助建模者确定调参的方向,在调参后进行敏感性分析,可以检验已建立模型的可用性,理解和改进模型结构<sup>[24]</sup>,指导各种参数的获取,更好地完成模拟和预报工作。

采用 OAT 方法对模型参数进行敏感性分析,即每次运行模型时只对其中一个参数值增加或减少 10%,直至超出该参数取值范围。用相对敏感度表示敏感性大小<sup>[25]</sup>:

$$RS = \left| \frac{[y(x+\Delta x) - y(x)]/y(x)}{\Delta x/x} \right| \quad (2)$$

式中:RS——相对敏感度; $x$ ——模型参数中的某一参数值; $\Delta x$ ——该参数的改变量; $y(x)$ , $y(x+\Delta x)$ ——参数改变前后的土壤水分(或温度)模拟输出值。将 RS 分成 4 个等级,其值愈大表明该参数的敏感性越高(表 3)。

表 3 敏感性分类

分类	相对敏感度数值	敏感性
I	$RS < 0.05$	低
II	$0.05 \leq RS < 0.20$	中
III	$0.20 \leq RS < 1.00$	高
IV	$RS \geq 1.00$	极高

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤水验证

采用决定系数( $R^2$ )、平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)<sup>[15,22]</sup>和 Nash 效率系数(NSE)<sup>[26]</sup>对模拟结果进行评价。验证期 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm 土层土壤水分和温度模拟结果详见表 4。这 4 个指标中, $R^2$  和 NSE 均反映了模拟值与实测值随时间变化的符合程度。就土壤水分而言, $R^2$  和 NSE 范围分别为 0.81~0.94 和 0.80~0.87,均在 0.8 以上,说明该模型对土壤水分总体模拟效果较好。ME 和 RMSE 则反映了模拟值与实测值之间的偏差,其范围分别为 -0.01%~0.26% 和 0.24%~1.83%,说明模拟值与实测值偏差较小,模拟结果是可信的。

表 4 验证期模拟结果

林分	土层深度/cm	土壤水分					土壤温度				
		$R^2$	ME/%	RMSE/%	NSE	实测均值/%	$R^2$	ME/°C	RMSE/°C	NSE	实测均值/°C
阔叶林	0—20	0.81	0.268	0.823	0.806	9.201	0.92	-0.111	0.320	0.905	19.778
	20—40	0.92	0.129	0.443	0.867	17.055	0.96	0.008	0.342	0.963	19.341
	40—60	0.83	-0.018	0.634	0.822	12.912	0.98	-0.058	0.247	0.977	18.803
	60—80	0.89	0.012	0.392	0.856	11.305	0.99	0.017	0.183	0.986	18.400
针叶林	0—20	0.82	0.254	1.826	0.802	10.074	0.96	-0.020	0.317	0.972	19.685
	20—40	0.94	-0.013	0.947	0.883	17.862	0.97	-0.006	0.257	0.980	19.103
	40—60	0.87	-0.093	1.376	0.814	13.849	0.93	-0.136	0.224	0.923	18.471
	60—80	0.90	0.010	0.240	0.875	11.820	0.99	0.059	0.204	0.984	18.175

注: $R^2$ , ME, RMSE, NSE 分别为决定系数,平均误差,均方根误差和 Nash 效率系数。

从图 1 可以看出,CoupModel 模拟结果能够反映出土壤水分的动态变化过程,但模拟值与实测值仍然存在一定偏差。第一,剖面上不同土壤层次的模拟效果不同,模型对表层含水量的模拟效果较差,对较深层含水量的模拟效果较好(表 4 和图 1)。作为重要的环境变量,土壤水分的动态变化同时受到气象、土壤性质和植被蒸散的综合影响<sup>[27]</sup>,而处于土壤—大气界面的表层土壤水分对环境因素更敏感,其变异性也更大,这是表层土壤水分模拟结果稍差的原因。第二,时间角度上,模拟效果偏差较大的时段主要发生在降雨后和长时间未降雨的情况下。次降雨过后,部分模拟值较实测值偏低,未能表示出某些极端值;而长时间未降雨的情况下,模拟值较实测值却偏高(如 7 月中下旬)。这可能与模型中应用的土壤水分运动方程

有关,Darcy 定律、Richards 方程都假设土壤为均质介质,不能真实反映和准确解释水分在异质性土壤中的流动速度、路径和动态变化过程(例如优先流)。另外,除了模型结构因素和仪器测量误差以外,Bergh<sup>[28]</sup>和 Mellander<sup>[11]</sup>等认为,受不同年份降雨、气温等差异的影响,植物生长季长短不同,这也对 2009 年整个验证期的模拟精度具有一定影响。

### 3.2 土壤温度验证

图 2 和表 4 为验证期 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm 土层土壤温度的日平均模拟值与实测值的对比结果。 $R^2$ , ME, RMSE 范围分别为 0.92~0.99, -0.14~0.06 °C, 0.18~0.34 °C 和 0.90~0.98,模拟值与实测值吻合程度较好。说明 Coup-Model 能够较好地描述试验期间土壤温度的变化过

程,具有一定的可靠性与稳定性。与图 1 对比可以发现,土壤温度变化幅度比土壤水分要小,且变化频率比土壤水分的低得多。相对土壤水分而言,土壤温度

是比较稳定的变量,正是由于这一特性使得水热耦合模拟的计算过程趋于平稳,减缓一些对模型中方程求解不利突变现象的影响。

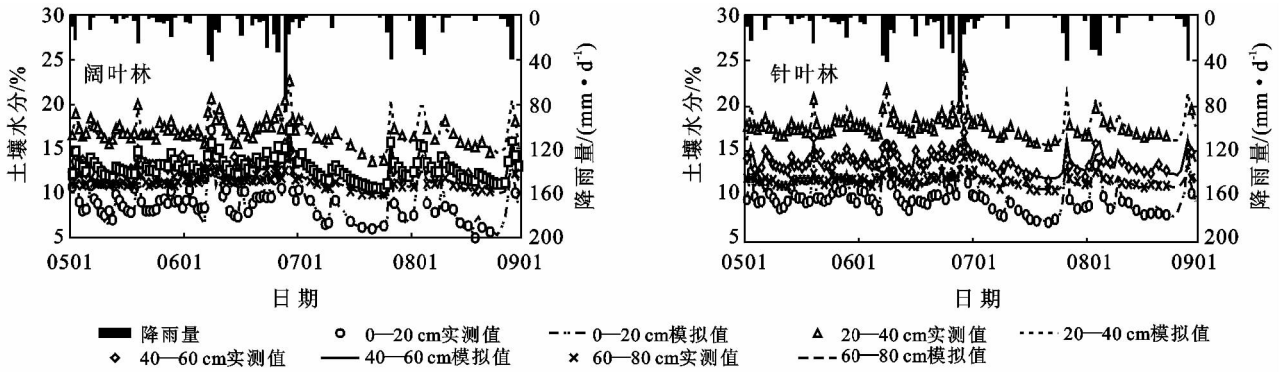


图 1 验证期阔叶林与针叶林土壤水分动态变化(2009 年)

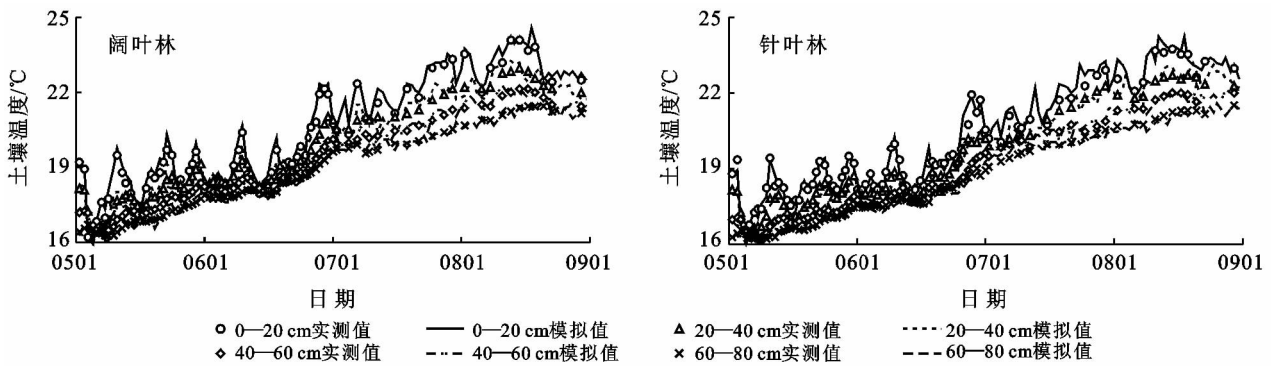


图 2 验证期阔叶林和针叶林土壤温度动态变化(2009 年)

### 3.3 参数敏感性分析

3.3.1 土壤水分参数敏感性 由表 5 可见,土壤参数对水分模拟结果均有显著影响。其中 Brooks—Corey 方程中的 3 个参数:孔隙分布参数( $\lambda$ )、进气吸力( $\psi_a$ )、残留含水量( $\theta_r$ )相对敏感度均在 0.3 以上,敏感性高。饱和含水量( $\theta_s$ )和饱和导水率( $k_{sat}$ )也对模拟结果具有显著影响,RS 分别为 0.904~1.001 和 0.0191~1.221。其它土壤参数对模拟结果则呈现出中度敏感性,其中水汽扩散系数( $d_{vapb}$ )是指相邻土层间水汽流的调整参数。需要说明的是,该模型中土壤初始含水量( $\theta_{init}$ )只表示模拟开始状态的单次含水量,对模拟结果几乎没有影响。总之,土壤的水动力学性质是建模的关键参数,在进行土壤水分模拟时,应精确测量。

植被参数主要包括有机质层厚度( $\Delta z_{humus}$ ),叶面积指数( $A_1$ ),冠层高度( $H_p$ ),根系深度( $p_{root}$ )。这些参数在模型中没有默认值,需要手动输入。由表 4 可知,植被参数的 RS 为 0.051~0.09,均为中度敏感性参数。在运行模型时,应以测量值为主,必要时可根据校核需要进行微调。

模型结构参数主要影响林地蒸发的模拟。对土壤水分模拟结果影响最大的是蒸发阻力系数( $r_\psi$ ),RS 为 0.273~0.359。此参数表征地表阻抗与最上层土壤水势关系,是模拟土壤蒸发的关键参数。因模型采用 Ponteiith—Monteith 方程模拟林地蒸发,影响空气动力学阻力( $r_a$ )和冠层表面阻力( $r_s$ )的 4 个参数:裸地动量粗糙长度( $z_{OM}$ ),气动阻力增加值( $r_{alai}$ ),土壤无风交换率( $r_{a,max}^{-1}$ )和水汽压差亏缺( $g_{vpd}$ )均对模拟结果呈现出中度敏感性。另外,表征根系对水分吸收的 4 个参数:根系吸水补偿度( $f_{umov}$ )、根系吸水折减临界水头( $\psi_c$ )、根系需求相关系数( $p_1$ )、表征根系分布的参数( $r_{frac}$ ),其中 3 个参数为中度敏感参数。影响土壤表面辐射收入的 4 个参数中除了植被反照率( $a_{veg}$ )以外,均为低敏感参数。在模拟过程中,这些参数可以引用原值或者文献记录,结合校核需要来调整。

综上所述,对土壤水分模拟结果影响较大的参数有孔隙分布参数、进气吸力、残留含水量、饱和含水量、饱和导水率和蒸发阻力系数。

表 5 模型参数相对敏感度(土壤水分)

土壤植被参数	$\lambda$	$\psi_a$	$\theta_s$	$\theta_{wilt}$	$\theta_r$	$\theta_m$	$k_{sat}$	$\theta_{init}$	$d_{vapb}$	$x_{hf}$	$\Delta z_{humus}$	$A_1$	$H_p$	$\rho_{zroot}$	
阔叶林	1.233	0.372	1.001	0.077	0.307	0.081	0.221	0.001	0.061	0.059	0.052	0.056	0.064	0.051	
针叶林	1.030	0.365	0.904	0.058	0.301	0.088	0.191	0.001	0.059	0.051	0.057	0.090	0.055	0.062	
敏感性	IV	III	III	II	III	II	III	I	II	II	II	II	II	II	
模型结构参数	$a_{wet}$	$a_{dry}$	$a_{veg}$	$k_{rn}$	$i_{base}$	$i_{LAI}$	$g_{vpd}$	$f_{umov}$	$\psi_c$	$\rho_1$	$r_{frac}$	$r_\psi$	$z_{OM}$	$r_{alai}$	$r_{a,max}^{-1}$
阔叶林	0.035	0.047	0.115	0.040	0.049	0.093	0.083	0.068	0.026	0.052	0.054	0.359	0.065	0.059	0.049
针叶林	0.029	0.043	0.052	0.038	0.041	0.081	0.057	0.053	0.025	0.057	0.058	0.273	0.058	0.052	0.075
敏感性	I	I	II	I	I	II	II	II	I	II	II	III	II	II	II

注:土壤参数中, $\lambda$ 、 $\psi_a$ 和 $\theta_r$ 分别表示孔隙分布参数、进气吸力和残留含水量,由Brooks—Corey方程拟合; $\theta_{wilt}$ 、 $\theta_s$ 、 $k_{sat}$ 和 $\theta_{init}$ 分别表示萎蔫含水量、饱和含水量、饱和导水率和土壤初始含水量。植被参数中, $\Delta z_{humus}$ 、 $A_1$ 、 $H_p$ 和 $\rho_{zroot}$ 分别为有机质层厚度、叶面积指数、冠层高度和根系深度。下同。

3.3.2 土壤温度参数敏感性 土壤参数敏感性结果详见表6。土壤热传导系数( $x_{hf}$ )描述了土壤热量传递性质,相对敏感度达到0.584~0.691,而其它土壤水力性质均呈中度或低度敏感性,这与土壤水分敏感性结果差异较大。

植被参数中,有机质层厚度( $\Delta z_{humus}$ )RS为0.248~0.397,对模拟结果具有较大影响,其原因与有机物质的热传导率与土壤的热量传导性质不同有关。两林分对比,大部分参数对阔叶林模拟结果的影响更加明显。

模型结构参数中,影响土壤表面辐射收入的4个参数中植被反照率( $a_{veg}$ ),消光系数( $k_{rn}$ )均对模拟结

果敏感性较高。另外,水汽压亏缺( $g_{vpd}$ )、蒸发阻力系数( $r_\psi$ )的RS也达到了高敏感性(RS为0.209~0.271和0.294~0.339),主要是因为这2个参数与表面阻力和土壤蒸发紧密相关,进而对地表能量平衡产生影响。而表征根系对水分吸收的4个参数对土壤温度的模拟结果影响都不大。

综上所述,对土壤温度模拟结果敏感性较大的参数有土壤热传导系数、有机质层厚度、植被反照率、消光系数、水汽压亏缺、蒸发阻力系数。与土壤水分敏感参数不同,这些参数很难通过实际测量来获取,模拟过程中,可以在模型默认值的基础上结合文献记录和校核需要做出适当调整。

表 6 模型参数相对敏感度(土壤温度)

土壤植被参数	$\lambda$	$\psi_a$	$\theta_s$	$\theta_{wilt}$	$\theta_r$	$\theta_m$	$k_{sat}$	$\theta_{init}$	$d_{vapb}$	$x_{hf}$	$\Delta z_{humus}$	$A_1$	$H_p$	$\rho_{zroot}$	
阔叶林	0.104	0.026	0.414	0.196	0.103	0.019	0.175	0.001	0.002	0.691	0.397	0.148	0.065	0.056	
针叶林	0.079	0.016	0.296	0.085	0.083	0.002	0.071	0.001	0.025	0.584	0.248	0.077	0.082	0.058	
敏感性	II	I	I	II	II	I	II	I	I	III	III	II	II	II	
模型结构参数	$a_{wet}$	$a_{dry}$	$a_{veg}$	$k_{rn}$	$i_{base}$	$i_{LAI}$	$g_{vpd}$	$f_{umov}$	$\psi_c$	$\rho_1$	$r_{frac}$	$r_\psi$	$z_{OM}$	$r_{alai}$	$r_{a,max}^{-1}$
阔叶林	0.137	0.127	0.305	0.255	0.029	0.031	0.209	0.099	0.105	0.018	0.011	0.339	0.001	0.019	0.034
针叶林	0.121	0.092	0.281	0.219	0.035	0.024	0.271	0.086	0.084	0.031	0.049	0.294	0.022	0.036	0.029
敏感性	II	II	III	III	I	I	III	II	II	I	I	III	I	I	I

## 4 结论

采用实地观测与 CoupModel 模拟相结合的方法,以位于三峡库区库尾的重庆四面山林地土壤和气候条件为背景,阔叶林和针叶林2种林分为试验对象,对2008和2009年的土壤水分和温度进行了逐日模拟。在获取气象、植被、土壤参数后,模型得到良好验证,说明该模型应用于本地区林地土壤水热模拟是可靠的、可行的。

采用 OAT(即每次只改变其中1个参数)方法对模型参数进行敏感性分析。结果表明,对土壤水分模拟结果敏感性较大的参数有孔隙分布参数、进气吸力、残留含水量、饱和含水量、饱和导水率和蒸发阻力系数。土壤的水动力学性质是建模的关键参数,在进

行土壤水分模拟时,应精确测量。对土壤温度模拟结果影响较大的参数有土壤热传导系数,有机质层厚度,植被反照率,消光系数,水汽压亏缺,蒸发阻力系数。在模拟过程中,可以在模型默认值的基础上结合文献记录和校核需要做出适当调整。OAT方法能够较快确定模型需要最低限度的参数量,为模型的推广应用提供实践依据。在今后的研究中,应进行长期连续定位观测,根据不同反馈信息,反复修正参数,以便对该模型进行更全面地验证。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王延平,邵明安,张兴昌. 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3769-3778.

- [2] 张均华,刘建立,张佳宝. 作物模型研究进展[J]. 土壤, 2012,44(1):1-9.
- [3] Jansson P E, Karlberg L. Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil—Plant—Atmosphere Systems [M]. Stockholm: Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, 2004.
- [4] 张洪江,程金花,王伟,等. 土壤—植物—大气系统热量、物质运移综合模型理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [5] Karlberg L, Gustafsson D, Jansson P E. Modeling carbon turnover in five terrestrial ecosystems in the boreal zone using multiple criteria of acceptance[J]. *Ambio.*, 2006, 35(8):448-458.
- [6] Svensson M, Jansson P E, Kleja B D. Modelling soil C sequestration in spruce forest ecosystems along a Swedish transect based on current conditions[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 89(1): 95-119.
- [7] Christiansen J R, Elberling B, Jansson P E. Modeling water balance and nitrate leaching in temperate Norway spruce and beech forests located on the same soil type with the CoupModel[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237(12):545-556.
- [8] Nykänen A, Salo T, Granstedt A. Simulated cereal nitrogen uptake and soil mineral nitrogen after lover-grass leys[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(1): 1-15.
- [9] Conrad Y, Fohrer N. A test of CoupModel for assessing the nitrogen leaching in grassland systems with two different fertilization levels[J]. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2009, 172(6): 745-756.
- [10] Karlberg L, Ben-Gal A, Jansson P E, et al. Modeling transpiration and growth in salinity-stressed tomato under different climatic conditions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(1/2): 15-40.
- [11] Mellander P E, Laudon H, Bishop K. Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133(11): 109-118.
- [12] Gustafsson D, Lewan E, Jansson P E. Modeling water and heat balance of the boreal landscape-comparison of forest and arable land in Scandinavia[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(11):1750-1767.
- [13] Wu Sihong, Jansson P E. Modelling soil temperature and moisture and corresponding seasonality of photosynthesis and transpiration in a boreal spruce ecosystem [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2012, 9(5): 6419-6455.
- [14] Ladekarl U L, Rasmussen K R, Christensen S, et al. Groundwater recharge and evapotranspiration for two natural ecosystems covered with oak and heather[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 300(1): 76-99.
- [15] Wu Sihong, Jansson P E, Zhang Xingyi. Modelling temperature, moisture and surface heat balance in bare soil under seasonal frost conditions in China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(6): 780-796.
- [16] 阳勇,陈仁升,吉喜斌,等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1):30-35.
- [17] Wang Li, Wei Sanping, Horton Robert, et al. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2011, 87(1): 90-100.
- [18] Wang Li, Wei Sanping, Shao Hongbo, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau in China[J]. *Plant Biosystems*, 2012, 146(S1):226-243.
- [19] 王力,卫三平,王全九. 黄土丘陵区燕沟流域农林草地土壤水库充失水过程模拟[J]. *林业科学*, 2011, 47(1): 29-35.
- [20] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [21] 王贤,张洪江,程金花,等. 重庆四面山典型林分土壤饱和导水率研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(2):29-34.
- [22] Zhang Shulan, Lövdahl L, Grip H, et al. Modeling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(2): 283-298.
- [23] Manzi A O, Planto S. Implementation of the ISBA parametrization scheme for land surface processes in a GCM-an annual cycle experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 155(3/4): 37-46.
- [24] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [25] 刘刚,谢云,高晓飞,等. ALMANAC 作物模型参数的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(3): 259-263.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models (I): A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3):282-290.
- [27] Verstraeten W, Veroustraete F, Feyen J. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation [J]. *Sensors*, 2008, 8(1): 70-117.
- [28] Bergh J, Linder S, Lundmark T, et al. The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway Spruce in Northern and Southern Sweden[J]. *Forest Ecology Management*, 1999, 119(1/3): 51-62.