

张添, 黄春林, 沈焕锋. 土壤水分对土壤参数的敏感性及其参数优化方法研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 678-685. [Zhang Tian, Huang Chunlin, Shen Huanfeng. Sensitivity and parameters optimization method of soil parameters to soil moisture in common land model[J]. Advances in Earth Science 2012, 27(6): 678-685.]

# 土壤水分对土壤参数的敏感性及其 参数优化方法研究\*

张 添<sup>1,2</sup>, 黄春林<sup>2\*</sup>, 沈焕锋<sup>1</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 利用 2008 年 1 月 1 日至 2009 年 9 月 31 日黑河流域阿柔冻融观测站的气象和土壤水分数据, 采用基于方差的多参数敏感性分析方法研究通用陆面模型(Common Land Model, CoLM) 模拟的土壤水分对土壤质地(砂土和黏土)的敏感性, 进而采用 SCE-UA 参数优化算法分别优化土壤质地和土壤水力参数, 分析不同优化策略对土壤水分模拟结果的影响。研究结果表明, 浅层土壤水分对土壤质地较为敏感, 敏感性系数达到了 0.45 以上, 并且砂土含量对土壤水分的影响更为显著; 利用 SCE-UA 算法优化土壤质地或土壤水力参数都可以有效地提高土壤水分的模拟精度, 优化土壤水力参数易产生“异参同效”现象, 而优化土壤质地能够使土壤水力参数的取值范围更加合理。

**关 键 词:** 土壤质地; 土壤水力参数; 土壤水分; 敏感性分析; SCE-UA 算法

中图分类号: P349

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2012)06-0678-08

## 1 引 言

土壤水分是陆地—大气相互作用的关键变量, 它影响着地表的能量分配、径流、辐射平衡等, 在气象、水文、农业等诸多领域都扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>。随着陆面过程和水文模型不断发展, 已经可以模拟土壤水分的连续变化。但是, 模型模拟的精度很大程度上受限于模型参数的准确性。

在陆面过程和水文模型中, 土壤水分的估算需要许多土壤水力参数, 如土壤孔隙率、导水率、导热率等, 这些参数都与土壤质地有关。Clapp 等<sup>[2]</sup>提出了土壤湿度转换系数( $b$ )与土壤质地之间关系的经验公式; 黄冠华等<sup>[3]</sup>和 Cosby 等<sup>[4]</sup>研究了土壤水分与不同

土壤质地样本之间的关系; Fare 等<sup>[5]</sup>和 Farouki<sup>[6]</sup>研究表明土壤饱和导水率是土壤水分运动的重要参数, 并且也与土壤质地有关。目前, 在各类陆面过程和水文模型中的土壤质地数据基本都是采用各种土壤数据集, 如 BATS 数据集<sup>[7]</sup>、FAO 数据集<sup>[8]</sup>和 STATSGO 数据集<sup>[9]</sup>等。但是, 由于土壤空间的高度异质性, 仅仅依靠土壤数据集的分类来代表不同区域上的土壤质地往往是粗糙、不恰当的<sup>[10, 11]</sup>。

关于陆面、水文模型的敏感性及其参数优化方法已经得到了广泛的研究, 常用的敏感性分析方法有 Morris-OAT 法<sup>[12]</sup>、FAST 法<sup>[13]</sup>和 Sobol 法<sup>[14]</sup>等; 参数优化算法包括模拟退火算法<sup>[15]</sup>、遗传算法<sup>[16]</sup>和粒子群算法<sup>[17]</sup>等。在优化土壤参数的研究中, 当今

\* 收稿日期: 2012-01-04; 修回日期: 2012-04-13.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“基于数据同化方法的人类活动对植被动态变化贡献率估计及其不确定性分析”(编号: 41101387); 中国科学院“百人计划”项目“寒旱区地表水文关键要素的多源遥感数据同化研究”(编号: 29Y127D01); 国家重点基础研究发展计划项目“空间观测全球变化敏感因子的机理与方法”(编号: 2009CB723905) 资助。

作者简介: 张添(1988-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事陆面数据同化、定量遥感研究。E-mail: whtzhang@whu.edu.cn

\* 通讯作者: 黄春林(1979-), 男, 宁夏青铜峡人, 研究员, 主要从事陆面数据同化研究。E-mail: huangcl@lzb.ac.cn

比较流行的方法是通过直接优化土壤水力参数来提高模型模拟土壤水分的精度。但是,土壤水力参数之间存在一定的关联性,在直接优化过程中无法体现它们之间的相互作用。土壤质地直接决定着土壤的物理性质,通过优化土壤质地能够较好地描述土壤物理参数之间的关系。所以,研究模型模拟的土壤水分对土壤质地的敏感性以及选取适当的方法优化土壤物理参数,对理解陆气过程的相互作用和改进气候与环境变化的预测精度有着重要的意义。

本文利用黑河流域阿柔冻融观测站的观测数据,结合通用陆面模型(CoLM)开展数值实验,研究土壤水分对土壤质地的敏感性,进而采用 SCE-UA 算法分别对土壤质地和土壤水力参数进行优化,对这 2 种优化方案进行比较分析。

## 2 模型和方法

### 2.1 模型描述

通用 CoLM<sup>[18,19]</sup> 是 20 世纪 90 年代中期,由美国几个研究机构共同开发出来的第三代陆面过程模型。CoLM 是在 BATS<sup>[7]</sup>, LSM<sup>[20]</sup>, IAP94<sup>[21]</sup> 等模型的基础上,增加了一些新的陆表过程,如地表径流、生物物理化学过程、植被动力学、碳循环等,涵盖了对植被、土壤、冰雪、冻土、湿地及湖泊等过程的参数化。它集中了国际上已有陆面模型的大部分优点,是当今国际上较为流行的陆面过程模型。CoLM 主要考虑了微气象、植被、土壤和水文等陆面过程,纵向分为 1 层植被和 10 层不均匀的土壤层以及最多 5 层的积雪。土壤水力参数的参数化方案来自于文献[4],其表达式如下:

$$\theta_s = 0.489 - 0.00126 \times SAND \quad (1)$$

$$\psi_s = -10 \times 10^{1.88 - 0.013 \times SAND} \quad (2)$$

$$b = 2.91 + 0.159 \times CLAY \quad (3)$$

$$K_s = 0.0070556 \times 10^{-0.884 + 0.0153 \times SAND} \quad (4)$$

式中: $\theta_s$ 、 $\psi_s$ 、 $b$ 、 $K_s$  分别为土壤的孔隙率、饱和水势、Clapp 指数、饱和导水率;  $SAND$ 、 $CLAY$  分别为砂土和黏土的百分比含量。由此可见,上述土壤水力参数均是由土壤质地决定的。

### 2.2 基于方差的多参数敏感性分析

敏感性分析是指输入参数的不确定性对模型输出结果的影响程度。通过敏感性分析可以定量描述参数的不确定性与模型输出变量之间的关系<sup>[23]</sup>。本文利用蒙特卡罗思想进行敏感性实验,其基本思想是利用随机变量进行统计实验,通过大统计量的分析,得到满足一定条件的统计特征值<sup>[24,25]</sup>。多参

数敏感性分析能够有效地表达多个参数对模型输出的影响程度,避免了单参数采样计算时无法表达参数间相互作用的局限性。本文运用 Saltelli 等<sup>[26,27]</sup> 基于方差的多参数敏感性分析方法,对土壤质地进行敏感性实验,研究不同土壤层水分对土壤质地的敏感性。模型输出结果  $Y$  对模型参数  $X_i$  的敏感性系数( $S_i$ )可表示为:

$$S_i = \frac{\sigma_{E(Y/X_i)}^2}{\sigma_Y^2} \quad (5)$$

式中: $\sigma_Y^2$  为模型输出结果的方差; $\sigma_{E(Y/X_i)}^2$  表示由模型参数  $X_i$  对输出结果  $Y$  产生的条件方差。 $S_i$  取值范围为 0 ~ 1,  $S_i$  越大,输出结果对参数  $X_i$  越敏感。

### 2.3 SCE-UA 参数优化算法

SCE-UA 算法是 Duan 等<sup>[28~30]</sup> 于 20 世纪 90 年代,在研究降水概念性水文模型参数率定优化问题时提出的一种全局优化算法。SCE-UA 算法已经在各种水文模型中得到广泛应用<sup>[31~33]</sup>。其基本思想是将基于确定性的复合型搜索技术和自然界中的生物竞争进化原理相结合。SCE-UA 算法的具体步骤如下(图 1):

(1) 初始化。选择复合型的个数  $p$  ( $p \geq 1$ ) 和每个复合型的样本数目  $m$  ( $m \geq n + 1$ ), 计算样本数目:  $s = p \times m$ 。

(2) 生成样本点。在参数可行域范围内随机生成  $s$  个样本点  $x_1, \dots, x_s$ , 分别计算每个样本  $x_i$  的函数值  $f_i$ 。在缺少先验信息时,使用一个统一的均匀采样分布。

(3) 样本点排序。将  $s$  个样本点以升序进行排列,将其存储到一个数组  $D$  中,  $D = \{x_i, f_i, i = 1, \dots, s\}$ ,  $i = 1$  表示目标函数最小的样本点。

(4) 复合型划分。将  $D$  划分为  $p$  个复合型  $A_1, \dots, A_p$ , 每个复合型包含  $m$  个点,  $A^k = \{x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$ 。

(5) 根据竞争复合性演化算法(CCE)进化每一个复合型。

(6) 混合复合型。替换  $D$  中的  $A_1, \dots, A_p$ , 然后对  $D$  按目标函数的升序进行排列。

(7) 收敛性判断。如果满足收敛条件则停止,否则返回(4)。

## 3 结果分析

### 3.1 研究区域和数据

黑河流域是我国第二大内陆河流域,面积约为

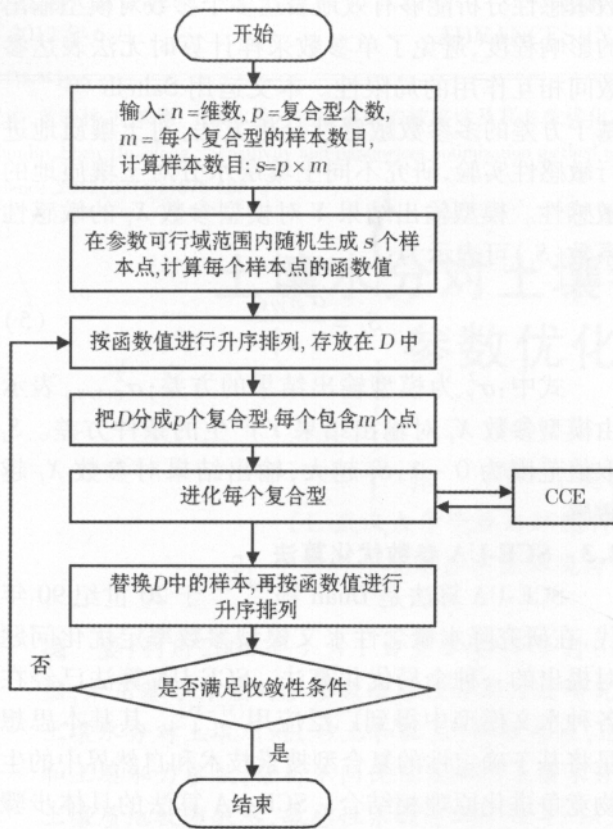


图 1 SCE-UA 计算流程

Fig. 1 Flow chart of SCE-UA algorithm

12.87 万 km<sup>2</sup>。本文的气象驱动数据采用黑河流域内的阿柔冻融观测站。该观测站位于黑河上游支流八宝河南侧的河谷高地上, 自动气象站观测点的经纬度为 100°27′25.8″E, 38°03′1.7″N, 海拔高度为 2 995 m, 主要植被类型为草地。试验场周围地势相对平坦开阔, 自东南向西北略有倾斜下降, 南北两侧约 3 km 外是连绵的山丘和高山, 符合大气边界近地层理论中水平均匀下垫面的要求<sup>[34~37]</sup>。

CoLM 中将土壤分为 10 层, 为了将模型模拟与站点实测的土壤水分进行比较, 重新定义了 CoLM 模型每层土壤的节点深度, 使其与观测土壤水分数据的节点深度相同(表 1)。根据公式(1)~(4)可以看出, 土壤水力参数只与砂土和黏土的含量有关, 所以选取 10 层土壤的砂土与黏土的百分比含量作为参数进行研究。

### 3.2 土壤水分对土壤质地的敏感性分析

在本次实验中, 样本数目为  $N = 1\ 000$ , 参数个数  $k = 20$  (10 层的砂土和黏土的百分比含量), 每个参数均在数值为 [5~95] 范围内生成均匀分布的随机矩阵, 并对砂土和黏土的含量之和进行约束, 使其小

表 1 CoLM 的土壤层厚度及节点深度

Table 1 The defined thickness and node depth of soil layers

土壤层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
节点深度/cm	2	5	10	20	40	80	120	160	200	300
土壤层厚度/cm	3.5	4	7.5	15	30	40	40	40	70	100

于 100。根据基于方差的多参数敏感性方法计算出相应的敏感性系数, 结果见表 2。

从表 2 可以看出, 砂土和黏土含量对土壤水分有较大的影响。各层土壤水分对土壤质地的总敏感性系数表明, 土壤水分对表层的土壤质地 (0~10 cm) 比较敏感, 达到了 0.45 以上, 在 5 cm 处达到 0.735。这主要是由于土壤表层的能量交换过程相对剧烈, 受太阳辐射、温度、降水等的影响较大, 土壤质地的作用比较明显。随着土壤深度的增加, 水分运动过程逐渐稳定, 土壤质地的影响逐渐减弱, 此时土壤水分主要受初值影响。从各层砂土和黏土的敏感性系数可以看出, 砂土含量对土壤水分的影响更为显著。这是由于在 CoLM 中, 砂土含量对土壤水分参数的贡献更大, 对土壤孔隙率、饱和水势和饱和导水率起决定性作用。

### 3.3 基于 SCE-UA 的参数优化结果

根据上述的参数敏感性分析可以看出, 砂土和黏土含量对土壤水分的模拟有较大的影响。本文采用 SCE-UA 算法分别对土壤质地和土壤水力参数进行优化, 然后将模型模拟结果与实测数据进行对比分析。SCE-UA 算法中包含许多控制确定性成分与概率的参数, Duan 等<sup>[29]</sup>对这些参数进行了详细的分析。本文选取其推荐的默认值进行优化。由于观测只有 6 层土壤水分数据, 我们采用这 6 层模拟的土壤水分与相对应的观测数据之间的均方根误差之和作为目标函数, 其表达式如下:

$$f = \sum_{j=1}^{Num} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Sim_i^j - Obs_i^j)^2} \quad (6)$$

式中,  $Num$  为有观测的土壤层数 ( $Num = 6$ );  $N$  为模型模拟的步数;  $Sim_i^j, Obs_i^j$  为第  $i$  步时模型模拟和观测的第  $j$  层的土壤水分。

本文分别对土壤质地和土壤水力参数进行优化, 并对这 2 种方案进行比较分析。①方案 1: 优化土壤质地。将砂土和黏土的取值范围定义为 [5~95], 初值均为 50, 并且对砂土和黏土的含量之和进行约束, 使其小于 100。②方案 2: 优化土壤水力参数。根据参数的物理性质和研究区域的特性, 表 3

表 2 土壤水分对土壤质地的敏感性系数

Table 2 The sensitivity coefficient of soil moisture to soil texture

土壤质地	敏感性系数										总敏感性系数
	$\omega_{liq(1)}$	$\omega_{liq(2)}$	$\omega_{liq(3)}$	$\omega_{liq(4)}$	$\omega_{liq(5)}$	$\omega_{liq(6)}$	$\omega_{liq(7)}$	$\omega_{liq(8)}$	$\omega_{liq(9)}$	$\omega_{liq(10)}$	
SAND <sub>(1)</sub>	0.340	0.002	0.002	0.008	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.570
CLAY <sub>(1)</sub>	0.179	0.009	0.010	0.009	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(2)</sub>	0.191	0.254	0.004	0.005	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.735
CLAY <sub>(2)</sub>	0.120	0.144	0.003	0.004	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(3)</sub>	0.001	0.051	0.227	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.447
CLAY <sub>(3)</sub>	0.009	0.011	0.138	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(4)</sub>	0.001	0.012	0.053	0.204	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.383
CLAY <sub>(4)</sub>	0.004	0.003	0.026	0.068	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(5)</sub>	0.001	0.007	0.002	0.053	0.187	0.013	0.001	0.000	0.000	0.000	0.376
CLAY <sub>(5)</sub>	0.002	0.003	0.003	0.023	0.073	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(6)</sub>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.057	0.118	0.008	0.000	0.000	0.000	0.323
CLAY <sub>(6)</sub>	0.001	0.001	0.001	0.002	0.028	0.088	0.015	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(7)</sub>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.013	0.020	0.035	0.000	0.000	0.000	0.182
CLAY <sub>(7)</sub>	0.001	0.001	0.001	0.002	0.008	0.044	0.054	0.000	0.000	0.000	
SAND <sub>(8)</sub>	0.000	0.000	0.001	0.002	0.008	0.018	0.019	0.002	0.001	0.001	0.076
CLAY <sub>(8)</sub>	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.008	0.011	0.002	0.000	0.000	
SAND <sub>(9)</sub>	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.006	0.006	0.008	0.007	0.055
CLAY <sub>(9)</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.009	0.001	0.003	0.005	0.002	
SAND <sub>(10)</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.008	0.013
CLAY <sub>(10)</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	

注: SAND<sub>(i)</sub>, CLAY<sub>(i)</sub>,  $\omega_{liq(i)}$  ( $i=1, 2, \dots, 10$ ) 分别表示砂土含量、黏土含量和土壤水分;  $i$  为土壤层数

给出了本文土壤水力参数的上边界、下边界和初始值。

表 3 土壤水力参数的边界条件(10层)

Table 3 The boundary conditions of soil hydraulic parameters (ten layers)

参数	土壤	饱和水势	Clapp	饱和水力传导率
	孔隙度	/mm	常数 b	/(mm/s)
下边界	0.1	10	5	0.001
上边界	0.6	800	20	0.04
初始值	0.3	500	10	0.02

3.3.1 理想实验

理想实验是通过模型默认的土壤质地和土壤水力参数模拟出的 10 层土壤水分作为“真值”,使用 10, 20, 40, 80, 120 和 160 cm 的土壤水分数据作为观测“真值”,进行参数优化实验。这样能够避免参数化方案和观测误差造成的影响,检验参数优化算法的性能。土壤水分模拟结果的比较见表 4 和图 2。结果表明,利用 SCE-UA 参数优化算法优化土壤质地或土壤水力参数都可以很好地描述土壤水分的变化,优化土壤质地的精度略高于优化土壤水力参数,这主要是由于优化土壤质地的参数数目(20 个)少于优化土壤水力参数数目(40 个)。

根据公式(1)~(4),一方面,可以利用“方案 1”得到的土壤质地参数计算土壤水力参数;另一方面,还可以利用“方案 2”得到的不同土壤水力参数反算出土壤质地参数。图 3 显示了利用不同方案得到的土壤质地。其中 SAND( $\theta_s$ ), SAND( $\psi_s$ ) 和 SAND( $K_s$ ) 分别为利用土壤孔隙率、饱和水势和饱和导水率计算得出的砂土含量,CLAY( $b$ ) 为利用 Clapp 常数计算得出的黏土含量。可以看出,由“方案 2”得到的土壤水力参数反算出的砂土含量与“真值”存在明显差异(特别是 SAND( $\theta_s$ ) 结果),而“方案 1”优化出的砂土含量与“真值”基本一致。对黏土含量而言,“方案 1”结果略高于“真值”,而由“方案 2”反算出的黏土含量(CLAY( $b$ ))略低于“真值”。图 4 为不同方案得到的土壤水力参数。与“方案 2”相比,“方案 1”得到的土壤水力参数与“真实”土壤水力参数更加接近。同时,“方案 2”优化出的饱和水势、Clapp 常数和饱和导水率都与实际参数存在明显的差异。因此,当土壤水力参数的参数化方案与观测数据没有误差的情况下,由于土壤质地能够精确地表达土壤水力参数的状态,优化的参数较少,所以通过优化土壤质地能够更加准确地表现土壤水力参数的变化,得到更加符合“真实”的土壤水力参数。直接优化土壤水力参数时,如果在参数的可行

空间内存在多个极值区域,且这些区域的极值与全局极值非常接近,都能够使参数估计中的目标函数达到全局极值,就可能出现“异参同效”现象,参数优化的结果就会存在较大的误差,故合理地选取参数寻优空间具有重要的意义。

3.3.2 真实实验

在理想实验的基础上,利用实测的土壤水分数据来比较这 2 种参数优化方案对土壤水分模拟结果的影响。选取 2008 年 1 月 1 日到 2009 年 9 月 31 日的气象和辐射观测数据作为 CoLM 的强迫驱动数据,利用 2008 年 1 月 1 日至 2009 年 6 月 31 日的驱

动数据来运行 CoLM,提供一个较长的 spin-up 时期,使模型逐渐稳定。然后选取 2009 年 7 月 1 日到 9 月 31 日模拟的土壤水分进行研究。利用站点观测的土壤水分数据作为验证数据,其土壤深度分别为 10, 20, 40, 80, 120 和 160 cm。为减小初始场对模拟结果的影响,模型各层土壤的初始温度和水分由观测数据通过线性插值给出。土壤水分模拟结果的比较见图 5 和表 5。从中可以看出,在真实条件下,通过优化土壤质地或土壤水力参数都能够有效地提高各层土壤水分的模拟精度,优化土壤水力参数的精度略优于优化土壤质地。

表 4 土壤水分模拟结果比较(理想实验)

Table 4 The comparison of soil moisture simulation (ideal experiment)

土壤深度/cm		10	20	40	80	120	160
方案 1	RMSE	1.0E-3	1.0E-3	1.0E-3	2.0E-3	2.0E-3	2.0E-3
	BIAS	-2.7E-5	-2.2E-5	-3.5E-4	-4.5E-4	-5.7E-4	1.0E-3
方案 2	RMSE	8.0E-3	1.1E-2	4.0E-3	5.0E-3	2.0E-3	3.0E-3
	BIAS	-3.4E-3	-2.2E-3	-6.8E-4	1.2E-3	6.0E-4	1.3E-3

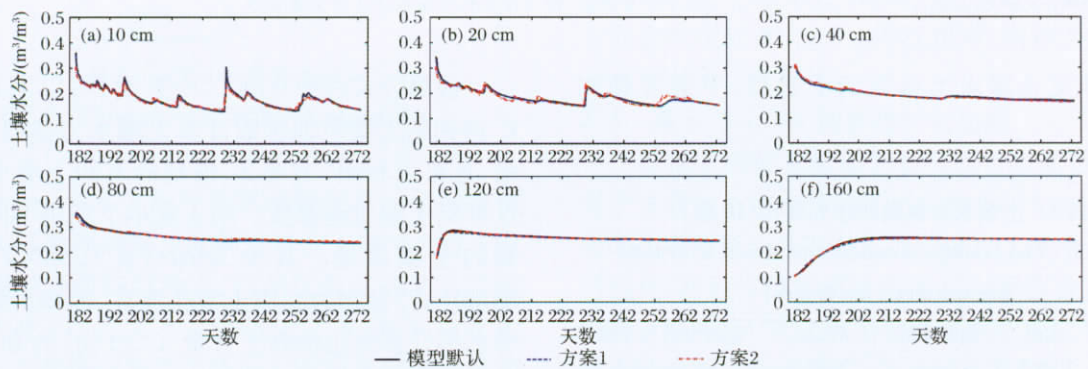


图 2 土壤水分模拟结果比较(理想实验)

Fig. 2 Comparison of soil moisture with default model parameters (black line) to results with optimal soil texture (blue line) and hydraulic parameters (red line) in ideal experiment

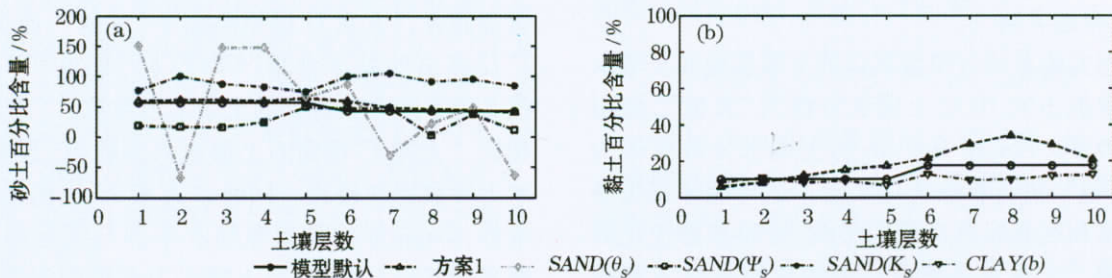


图 3 土壤质地优化结果比较(理想实验)

Fig. 3 Comparison of “true” soil texture (circle) to results which are derived from optimal soil texture (triangle) and optimized hydraulic parameters in ideal experiment

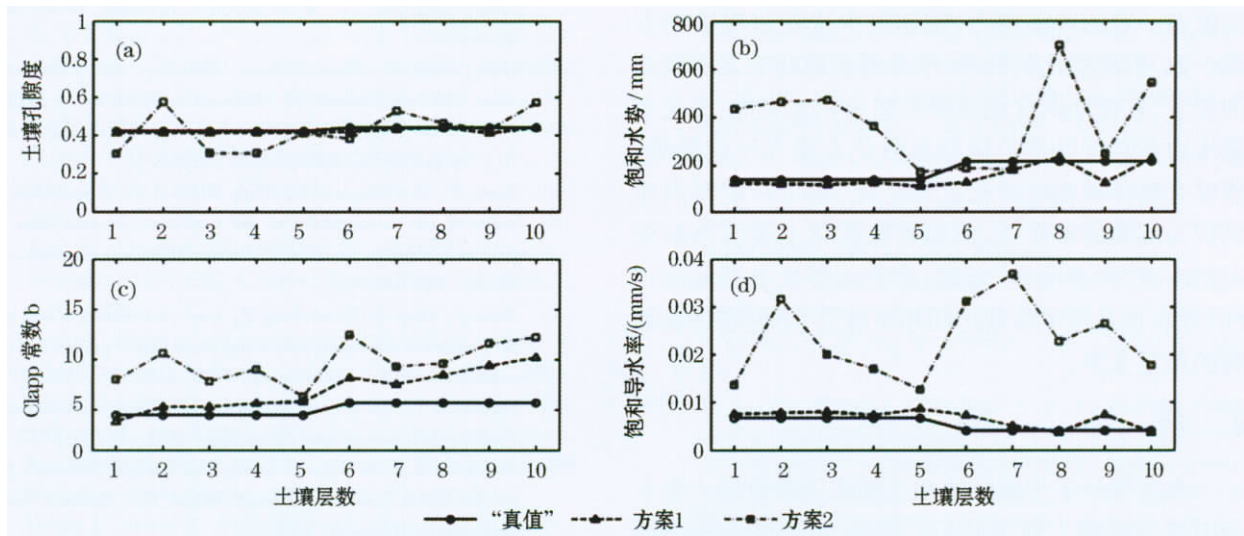


图 4 土壤水分模拟结果比较(理想实验)

Fig. 4 Comparison of "true"hydraulic parameters (cycle) to results which are derived from optimal soil texture (triangle) and optimized hydraulic parameters (square) in ideal experiment

表 5 土壤水分模拟结果比较(真实实验)

Table 5 The comparison of soil moisture simulation (real experiment)

土壤深度/cm		10	20	40	80	120	160
模型默认	RMSE	2.2E-1	1.8E-1	1.3E-1	9.0E-2	7.2E-2	1.3E-1
	BIAS	-2.2E-1	-1.7E-1	-1.2E-1	-8.7E-2	6.8E-2	1.2E-1
方案 1	RMSE	2.5E-2	1.6E-2	1.2E-2	5.0E-3	2.4E-2	1.1E-2
	BIAS	-1.5E-2	2.1E-3	2.4E-3	1.4E-5	-1.7E-2	1.7E-3
方案 2	RMSE	1.2E-2	1.0E-2	9.0E-3	4.0E-3	6.0E-3	6.0E-3
	BIAS	1.1E-3	1.6E-3	-4.7E-4	-3.8E-4	-3.6E-4	-3.3E-4

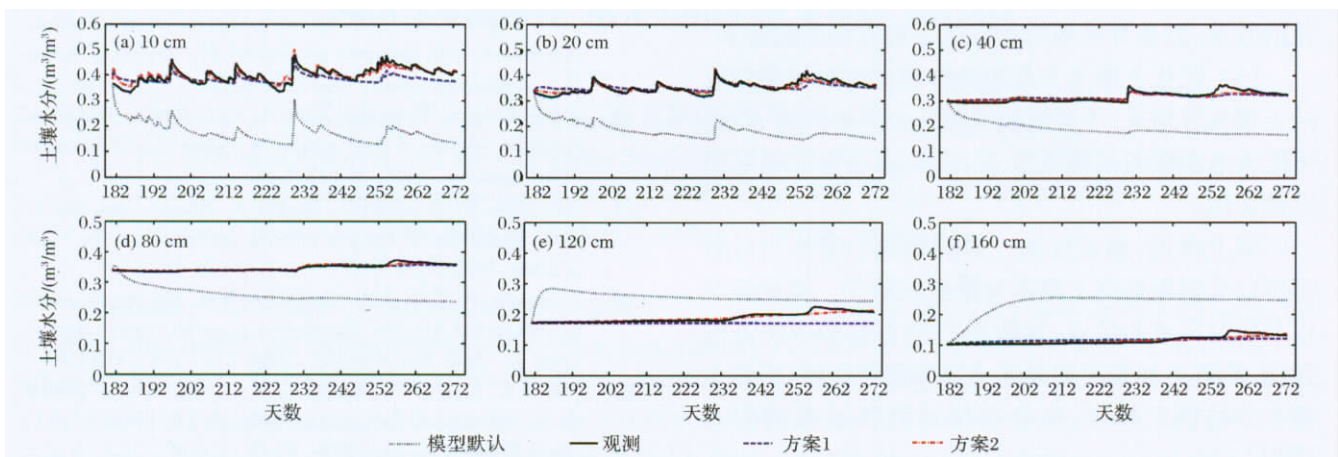


图 5 土壤水分模拟结果比较(真实实验)

Table 5 Comparison of "true" soil moisture (black line) to results with default model parameters (gray dot line), derived from optimal soil texture (blue line) and optimal hydraulic parameters (red line) in real experiment

通过以上实验可知,优化土壤质地对土壤水力参数有一定的约束能力,能够减少优化过程中的参数个数,提高优化的效率,但是对参数化方案有较高的要求,直接影响优化结果的精度和真实性;优化土壤水力参数可以避免模型参数化方案产生的影响,能够直接针对相应参数进行优化,在可行空间内得到较为准确的参数值,但是直接优化土壤水力参数可能出现“异参同效”现象,参数的寻优空间起决定性作用,并且每个参数之间相对独立,不能表达参数间的相互关系。

## 4 结 论

本文探讨了土壤质地和土壤水力参数对土壤水分模拟的影响。利用 CoLM 模型,对土壤质地进行了敏感性分析,并且通过 SCE-UA 算法分别对土壤质地和土壤水力参数进行了优化。结果表明:

(1) 在相同的气象驱动数据下,土壤水分对土壤质地比较敏感,特别是对表层土壤质地(0~10 cm)敏感性系数达到了 0.45 以上,并且在 5 cm 处达到最大,为 0.735。其中,砂土含量对土壤水分的影响较为显著。随着土壤深度的增加,土壤质地的作用逐渐减弱。

(2) 利用 SCE-UA 算法优化土壤质地或土壤水力参数都可以提高模型模拟土壤水分的精度。

(3) 优化土壤质地能够较好地表达土壤物理参数之间的相互关系,对土壤水力参数有一定的约束能力,并且可以减少优化过程中的参数个数,提高优化的效率,但是对模型的参数化方案有较高的要求。

(4) 优化土壤水力参数能够得到相对较高精度的土壤水分结果,不受模型参数化方案的约束,但是不能表达参数间的相互关系,参数的寻优空间起决定性作用。

综上所述,通过优化土壤质地或土壤水力参数都可以有效地提高土壤水分模拟的精度。根据模型以及研究区域的特点,选取适当的参数和方法进行优化,能够更加真实地描述土壤的物理性质,提高土壤水分的模拟精度,更好地描述陆气过程的相互作用。

## 参考文献(References):

[1] Li Xin, Huang Chunlin, Che Tao, et al. Development of a Chinese land data assimilation system: Its progress and prospects [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 881-892. [李新, 黄春林, 车涛, 等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(8): 881-892.]

[2] Clapp R B, Hornberger G B. Empirical equations for some soil hydraulic properties [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 601-604.

[3] Huang Guanhua, Zhan Weihua. Modeling soil water retention curve with fractal theory [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 55-60. [黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟 [J]. *水科学进展*, 2002, 13(1): 55-60.]

[4] Cosby B, Hornberger G B, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 682-690.

[5] Fares A, Alva A, Nkedi-kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and guelph permeameter [J]. *Soil Science*, 2000, 165(10): 768-777.

[6] Farouki O T. The thermal properties of soils in cold regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1981, 5(1): 67-75.

[7] Dickinson R E. Biosphere/Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model [R]. National Center for Atmospheric Research, 1986.

[8] Batjes N H. A world dataset of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modeling [J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(1): 9-16.

[9] US Department of Agriculture. State Soil Geographic (STATSGO) Database of Arizona [M]. State College, PA: Penn State University Earth Systems Science Center, Natural Resources Conservation Service, 1994.

[10] Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 490-500. [冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球 1km 覆盖数据中国区域的精度评价 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 490-500.]

[11] Chandra G, Zhiliang Z, Bradley R. A comparative analysis of the global land cover 2000 and MODIS land cover data sets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 123-132.

[12] Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(10): 1509-1518.

[13] Fu X, Chu X F, Tan G M. Sensitivity analysis for an infiltration-runoff model with parameter uncertainty [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(9): 243-251.

[14] Pappenberger F, Beven K J, Ratto M, et al. Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models [J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(1): 1-14.

[15] Steinbrunn M, Moerkotte G, Kemper A. Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem [J]. *The VLDB Journal*, 1997, 6(3): 8-17.

[16] Termansen M, Colin J M, Christopher D P. The use of genetic algorithms and Bayesian classification to model species distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 192(3/4): 410-424.

[17] Gill M K, Kaheil Y H, Khalil A, et al. Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(7): 1-14.

[18] Dai Y J, Zeng X, Dickinson R E, et al. The common land model [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013-1024.

[19] Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis and stomatal conductance [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2281-2299.

[20] Bonan G B. Land Surface Model (LSM version 1.0) for Ecological, Hydrological and Atmospheric Studies: Technical Descrip-

- tion and Users Guide [R]. National Center for Atmospheric Research, 1996.
- [21] Dai Y J, Zeng Q C. A land surface model ( IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(4): 433-460.
- [22] Dai Y J, Zeng X, Dickinson R E. Common Land Model ( CLM): Technical Documentation and User's Guide [R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2001.
- [23] Helton J C, Johnson J D, Sallaberry C, et al. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(10/11): 1175-1209.
- [24] Annan J. Modeling under uncertainty: Monte Carlo methods for temporally varying parameters [J]. *Ecological Modeling*, 2001, 136(2/3): 297-302.
- [25] Decker K M. The Monte Carlo method in science and engineering: Theory and application [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991, 89(1/3): 463-483.
- [26] Saltelli A, Annoni P, Azzini I, et al. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(2): 259-270.
- [27] Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al. Global Sensitivity Analysis: The Primer [M]. Wiley Online Library 2008: 25.
- [28] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [29] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications* 1993, 76(3): 501-521.
- [30] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 158(3/4): 265-284.
- [31] Tang Yunyi, Luan Chengmei. Application of SCE-UA method in calibrating parameters of Xin'anjiang Model and TOPMODEL [J]. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(6): 33-35. [唐运忆 栾承梅. SCE—UA 算法在新安江模型及 TOPMODEL 参数优化应用中的研究 [J]. 水文, 2007, 27(6): 33-35.]
- [32] Van L M, Veith T L, Bosch D D, et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(2): 173-190.
- [33] Ajami K N, Gupta H, Wagener T, et al. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 298(1/4): 112-135.
- [34] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, et al. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [35] Wang Jian, Che Tao, Zhang Lixin, et al. The cold regions hydrological remote sensing and ground-based synchronous observation experiment in the upper reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 189-197. [王建, 车涛, 张立新, 等. 黑河流域上游寒区水文遥感—地面同步观测试验 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 189-197.]
- [36] Li X, Li X W, Li Z Y, et al. Watershed allied telemetry experimental research [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D22103, doi: 10.1029/2008JD011590.
- [37] Zhao T, Zhang L, Jiang L, et al. A new soil freeze/thaw discriminant algorithm using AMSR-E passive microwave imagery [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(11): 1704-1716.

## Sensitivity and Parameters Optimization Method of Soil Parameters to Soil Moisture in Common Land Model

Zhang Tian<sup>1,2</sup>, Huang Chunlin<sup>2</sup>, Shen Huanfeng<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The sensitivity analysis of soil moisture to soil texture (sand and clay) was studied by using the common land model and meteorological forcing data from January 1, 2008 to September 31, 2009 at the Arou Observation Station in Heihe river basin. The SCE-UA algorithm was utilized to optimize the soil texture and soil hydraulic parameters separately and the impact of the result of soil moisture with different strategies was analyzed. The result shows that surface moisture is quite sensitive to soil texture, the sensitivity coefficients are larger than 0.45, and the sand percentage is more significant to the soil moisture; SCE-UA algorithm is used to optimize the soil texture or soil hydraulic parameters which can effectively improve the accuracy of soil moisture simulation. However, optimizing soil hydraulic parameters will likely lead to the appearance of the phenomenon of equifinality for different parameters, while optimizing soil texture can constrain the range of soil hydraulic parameters and make them more reasonable.

**Key words:** Soil texture; Soil hydraulic parameter; Soil moisture; Sensitivity analysis; SCE-UA algorithm.