

大尺度分布式水文模型 VIC 在嘉陵江流域 径流模拟中的应用

金君良^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 刘翠善^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}, 严小林^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 大尺度分布式流域水文模型是目前评价流域环境变化的重要工具, 以嘉陵江流域为研究对象, 构建了嘉陵江流域大尺度分布式 VIC 模型 (Variable Infiltration Capacity, VIC model), 利用 Maryland 大学的全球 1 km × 1 km 土地覆盖数据, 同时参考 LDAS (Land Data Assimilation System) 成果, 建立了嘉陵江流域 VIC 模型的参数库, 通过 4 个水文站以上流域的水文模拟试验, 结果表明建立的 VIC 模型能有效地模拟嘉陵江流域各典型站的日、月径流过程, 模拟的水量平衡误差在 5% 以内, 日径流过程模拟的确定性系数均在 70% 以上, 月径流过程模拟的确定性系数超过 90%。该模型可以用来分析环境变化对嘉陵江流域水资源及洪水过程的影响。

关键词: VIC 模型; 水文模拟; 嘉陵江流域

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0055-04

Application of large scale distributed hydrological model to runoff simulation in Jialingjiang River Basin

JIN Junliang^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}, LIU Cuishan^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}, YAN Xiaolin^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Research Center for Climate Change, MWR., Nanjing 210029, China)

Abstract: Large scale distributed hydrological model has currently been an important tool to assess environmental change. Taking Jialingjiang River catchment as a case, the paper established the grid-based VIC model, used the land surface data derived by University of Maryland, constructed the parameter dataset of VIC model as well through referencing results from LDAS. Simulation results of four hydrometric stations in Jialingjiang River catchment indicated that the VIC model can effectively simulate the daily or monthly runoff procedure, water balance errors between simulated and recorded runoffs for four hydrometric station are less than 5% while Nash – Sutcliffe coefficients of daily and monthly discharge simulation are both beyond 70% and 90% respectively. The established VIC model can be used to assess impact of climate change on water resources and flood process in Jialingjiang River catchment.

Key words: VIC model; hydrological simulation; Jialingjiang River Catchment

全球气候变暖已是一个不争的事实。气候变化对工业、农业及水资源都造成不同程度的影响。水文模型是评价气候变化对水资源的影响的一个重要工具^[1-5]。然而, 传统的水文模型侧重于描述流域从降水, 下渗, 产流直至汇流形成河道径流至流域出口断面的这个水的汇集和运动过程, 而对于陆面和大气之间交换的过程则考虑较少^[6-10]。

陆面模型通常更细致地考虑流域下垫面的土壤、植被及大气之间的水分和能量的交换过程, 考虑

植被的蒸腾及对大气阻抗等, 比水文模型的结构更为复杂, 建模难度更大。但是由于陆面模式采用的土壤-植被-大气传输模式使得其与大气的双向耦合性能更好, 更适合与气候模式相结合来评价气候变化对流域水文水资源的影响^[9-14]。

本文就以我国长江的重要支流嘉陵江流域为例, 构建国际上气候变化对水文水资源的影响评价中应用较为广泛的大尺度分布式陆面 VIC 模型 (Variable Infiltration Capacity Model), 检验其在流域

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-10-11

基金项目: 水利部公益性行业专项 (20110100304); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y509004, Y511008); 中英瑞气候变化适应项目 (ACCC20100202) 联合资助

作者简介: 金君良 (1982-), 男, 浙江金华人, 博士, 从事流域水文模拟、气候变化影响评价等方面的研究。

径流模拟中的应用能力。

1 资料和方法

1.1 研究流域概况

嘉陵江作为中国长江上游的重要支流,发源于秦岭,自陕西省凤县的东源与甘肃天水的西汉水汇合后,西南流经略阳,穿大巴山,至四川省广元市昭化纳白龙江,南流经南充到合川先后与涪江、渠江汇合,到重庆市注入长江。河流全长 1 119 km,流域面积近 16 万 km²,其中北碚站以上集水面积为 156 142 km²。嘉陵江是长江支流中流域面积最大,长度仅次于汉水,流量仅次于岷江的大河。

嘉陵江流域大部分属亚热带湿润季风气候。在中下段的盆地地区,冬季温暖多雾,霜雪少见,上游段山区则冬季寒冷,霜雪较多,又多风暴,往往一雨成灾。春夏时节,流域内降雨自东向西移动,若遇季风弱而迟,则西部常形成春旱和初夏干旱天气。流域内年均气温 10℃ 左右,降水量在 1 000 mm 以上,其中 50% 的年降水量集中在 7-9 月。

嘉陵江流域内主要设有亭子口,射洪及罗渡溪等几个国家级控制水文站,流域的水系及水文气象站点分布如图 1 所示。

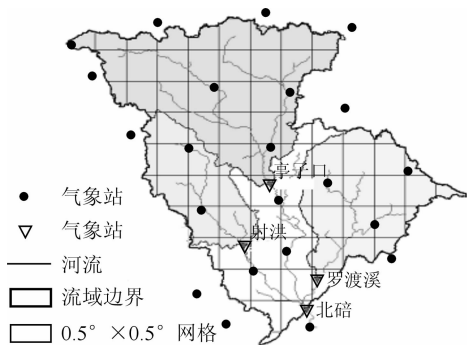


图 1 嘉陵江流域水文气象站点及水系概况

1.2 VIC 模型简介

VIC 模型(Variable Infiltration Capacity Model)是由 Washington 大学、California 大学 Berkely 分校以及 Princeton 大学的研究者基于 Wood 等人的思想共同研制出的大尺度分布式水文模型,也可以称之为“可变下渗容量模型”。VIC 模型是一种基于 SVATS(Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes)思想的大尺度分布式水文模型,考虑了大气-植被-土壤之间的水分及能量的物理交换过程。模型考虑了积雪、融雪及土壤冻融等过程,在一个计算网格内考虑了裸地及不同的植被覆盖类型。因此,VIC 模型可同时考虑陆气之间水量平衡和能量平衡过程的模拟,弥补了传统

水文模型对能量过程描述的不足,是气候变化影响评价中的重要工具,在实际应用中,VIC 模型也可只进行水量平衡的计算,输出每个网格上的径流和蒸发,再耦合汇流模型将网格上的径流转化为流域出口断面的流量过程。模型在北美以及中国许多地方都已经有了成功的应用^[9-15]。

VIC 模型在产流计算引进了新安江模型流域饱和和容量曲线的思想,但又与新安江模型有所区别,新安江模型假设在降雨超过土壤最大可能缺水量的面积上产生直接径流 Q_d ,而 VIC 模型假设降雨超土壤饱和和容量的面积产生直接径流 Q_d 。VIC 模型将蒸发计算分为冠层截留蒸发、植被蒸腾和裸土蒸发。模型运用 Penman-Monteith 联合方程计算日蒸发,可以比新安江模型少输入一项实测资料,因此对在缺少蒸散发资料的地区的应用上具有更好的优势。

VIC 模型常用的参数主要分为四类:气候地理参数、植被参数、土壤参数和水文参数。气候地理参数主要包括网格点中心的经纬度,网格平均高程、网格平均气温、平均降水量等;植被参数主要考虑了空间分布的不同植被类型,每种植被类型对应不同的叶面积指数、反照率及粗糙度等;而土壤参数包括 53 个变量,主要有饱和土壤水力传导度,土壤水扩散系数、土壤的临界含水量及凋萎含水量等。这三类参数一般经确定后在模型运行过程中就保持不变。VIC 模型还包括 8 个水文参数,除了对基流非线性增长指数(C)和表层土壤厚度(D_1)分别取 2 和 0.1 m 外,其余 6 个参数需要利用流域实测的水文资料进行率定。分别为:表征入渗能力形状的参数 B,表征底层土壤一天内产生基流的最大值的参数 D_m ,表征非线性基流占 D_m 的比例的参数 D_s ,表征当基流非线性增长时,底层土壤含水量与最大土壤含水量的比值的参数 W_s ,以及表征第 2 层和第 3 层的土壤厚度 D_2 和 D_3 。

2 建模及应用

2.1 模型参数

VIC 模型的网格植被类型包括了每个网格所包含的植被类型数目、比例、根系分布及逐月叶面积指数(LAI)过程。本研究的网格的植被类型是基于 Maryland 大学发展的全球 1km × 1km 土地覆盖数据来确定的,分为 14 种土地覆盖类型。植被参数库中包含所有植被类型的相关参数,当网格中包含某类植被时,就取用相应的参数。参数的确定参考 LDAS(Land Data Assimilation System)的成果,图 2

为参考 LDAS (Land Data Assimilation System) 确定的嘉陵江流域 1 km × 1 km 植被类型空间分布图。主要分为 11 种植被类型以及大型水体、建筑物等。可以看出,嘉陵江流域的土地覆盖主要有常绿针叶林、草地、混交地及耕地组成。

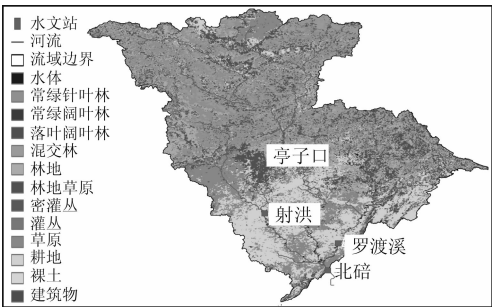
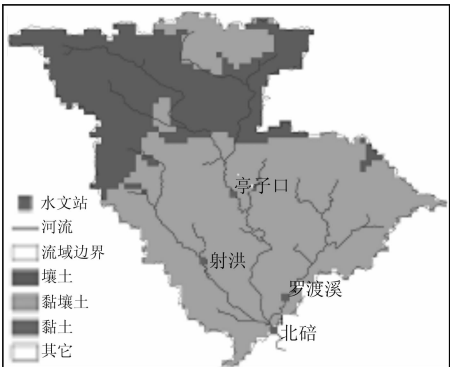


图 2 嘉陵江流域植被 1 km × 1 km 空间分布图

VIC 模型土壤参数的确定采用基于土壤类型查表和直接计算相结合的方法。本研究土壤类型、土壤含砂量及土壤黏土含量等基于 Reynolds 等人^[10-11] (1999) 发展的 10 km × 10 km 土壤数据库设定,共分 12 种土壤质地类型。取网格内的优势土壤类型作为模型网格的土壤类型,10 km × 10 km 土



壤数据分为上下两层,0 ~ 30 cm 为上层,30 ~ 100 cm 为下层,本文建立的 VIC 模型中 D₁ 层的参数取上层的值,D₂ 和 D₃ 层的参数取下层的值。基于土壤类型查表的参数确定参考了 Rawls 等工作,并采用 Saxton 的公式计算土壤饱和和水力传导度、土壤临界含水量和凋萎含水量^[16]。

图 3 为嘉陵江各流域上层 (0 ~ 30cm) 及下层 (30 ~ 100cm) 的 10km × 10km 土壤空间分布图。由图 3 可以看出,嘉陵江流域的土壤类型较少,主要由壤土、黏壤土及粘土组成,性质相对较为相近。

研究构建了空间分辨率为 0.5° × 0.5° 网格上 1951 - 2007 年日降水量和日最高气温、最低气温资料作为模型输入,在嘉陵江流域范围内网格运行 VIC 模型。模型逐个计算网格的蒸散发和产流,并用汇流程序汇集流域内网格的产流,经汇流得到各站出口断面流量来与实测值比较。本研究以各站 1961 - 1980 年观测径流量资料率定模型参数,1981 - 1990 年观测径流量资料作为检验。模型输入的降水和气温数据系列起始时间比率定期提前一年,这一年数据用于初始化土壤含水量,不参加参数率定。

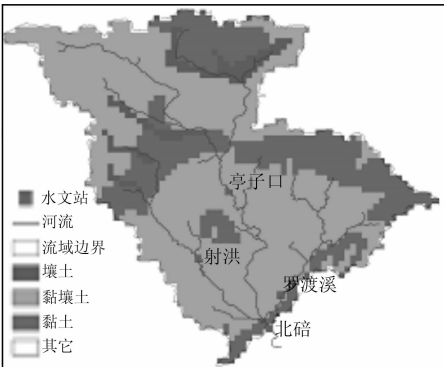


图 3 流域上层 (0 ~ 30 cm) (左图) 及下层 (30 ~ 100 cm) (右图) 10 km × 10 km 土壤类型空间分布图

研究采用基于 Rosenbrock 算法与人工干预相结合的方法进行水文参数优化^[17]。人工干预就是根据各参数的物理意义和合理的取值范围,结合流域特性确定各参数的初始值,以及对优化结果进行合理性判断和最终参数的选择。各子流域的水文参数结果如表 1。

表 1 嘉陵江流域各典型子流域采用的水文模型参数

水文参数	B	D_m	D_s	W_s	C	D_1	D_2	D_3
亭子口	0.39	9.0	0.63	0.41	2	0.1	0.55	0.23
射洪	0.38	7.0	0.59	0.38	2	0.1	0.58	0.24
罗渡溪	0.39	8.5	0.61	0.46	2	0.1	0.65	0.23
北碚	0.36	9.5	0.70	0.37	2	0.1	0.49	0.31

2.2 水文模拟结果

分别在嘉陵江流域各子流域建立基于水量平衡模式的 VIC 模型,经汇流后,模型连续输出各站 1961 - 1990 年日径流过程,其中 1961 - 1980 年为率定期,1981 - 1990 年为检验期。结果采用水文中常用的两个指标来衡量:反映总量精度的多年径流相对误差 Er (%) 和反映流量过程吻合程度的 Nash - Sutcliffe 确定性系数。计算公式如下:

$$Er = \frac{(\overline{Q_s} - \overline{Q_0})}{\overline{Q_0}}$$

(1)

$$Ns = \frac{\sum (Q_{i,0} - \overline{Q_0})^2 - \sum (Q_{i,s} - \overline{Q_0})^2}{\sum (Q_{i,0} - \overline{Q_0})^2}$$

(2)

式中: $\overline{Q_s}$ 和 $\overline{Q_0}$ 分别为模拟和水文站实测的长时间

系列的平均径流量, m^3/s , 相对误差 Er 越接近于零, 精度越高。 $Q_{i,0}$ 和 $Q_{i,s}$ 分别为实测和模拟的径流量, m^3/s 。确定性系数 Ns 越接近于 1, 精度越高。

采用距离平方反比法将气象资料插值计算到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 空间分辨率的网格上驱动模型, 经参数率定得出嘉陵江流域各典型子流域的模拟结果, 如表 2 和图 4。由此可以看出, VIC 模型对嘉陵江流域四个子流域 30 年的模拟结果较好, 在率定期和检验期的水量相对误差都控制在 5% 以内, 日径流过程的 Nash 效率系数在 68.9% ~ 82.6% 之间, 月径流

过程的效率系数更高, 基本上都大于 90%, 因此, 据此可以看出 VIC 模型对嘉陵江流域的径流过程模拟具有较好的适应性。

同时模拟结果也显示了模型对日径流过程的模拟普遍比月径流过程模拟要差, 这主要是由于研究只采用了流域内 12 个全国基本气象站的气象资料, 而没有获取流域内的水文站降水资料, 因此, 流域内降水信息的代表性及准确性不足使得模型对日径流过程的模拟效果略有欠缺。

表 2 嘉陵江流域各典型子流域基本信息及径流模拟结果 km², %

序号	控制站	集水面积	东经	北纬	率定期			检验期		
					Er	NS_d	NS_m	Er	NS_d	NS_m
1	亭子口	61089	105°50′	31°51′	1.5	71.9	92.5	2.3	72.8	90.5
2	射洪	23574	105°24′	30°20′	3.5	77.6	91.3	1.3	70.4	92.6
3	罗渡溪	38064	30°20′	30°20′	-1.6	72.6	90.1	1.4	71.9	89.7
4	北碚	156142	106°25′	29°51′	-2.6	78.3	91.8	4.1	82.6	92.1

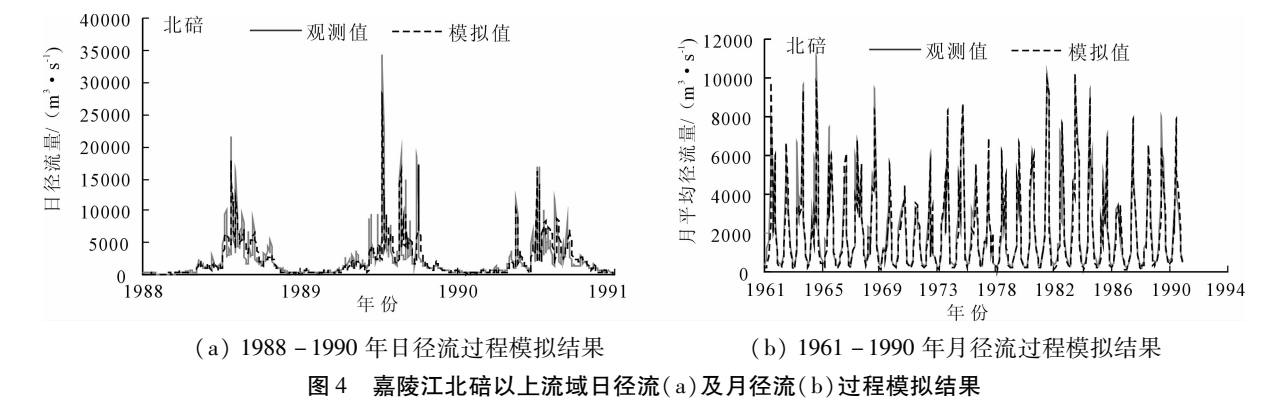


图 4 嘉陵江北碚以上流域日径流(a)及月径流(b)过程模拟结果

3 结 语

(1) VIC 模型可以较好适应于嘉陵江流域的水文过程模拟, 月径流过程的 Nash 效率很高, 可以作为水资源系统的气候评价模式的有效工具。

(2) 由于本研究只采用了流域气象站点的实测降水资料, 因此, 在日径流过程的模拟略有不足, 在以后的研究中需进一步采用实测水文站点的降水资料来更深入的分析模型在流域水文模拟中的适应性。

(3) VIC 模型作为大尺度分布式陆面水文模型, 其对陆面过程的各个分量考虑的很细致, 模型构建需充分考虑流域下垫面的地形、土壤植被分布等特性, 涉及变量及参数较为复杂, 因此如何构建一套适合我国各流域特点的下垫面水文参数数据库也是今后需要进一步深化研究的工作。

参考文献:

[1] Athanasios L, Michael C Q. Effect of climate change on hydrological regime of two climatically different watersheds [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(2): 77-87.

[2] 王国庆, 王云璋, 尚长昆. 气候变化对黄河水资源的影响[J]. 人民黄河, 2000, 22(9): 40-46.

[3] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.

[4] Fu G B, Michael E B, Chen S L. Impacts of climate change on regional hydrological regimes in the Spokane River Watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(5): 452-461.

[5] Benedikt N, Lindsay M, Daniel V, et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region [J]. Journal of Hydrology, 2007, 343: 266-278.

4 结 语

通过年地下水埋深序列的 M-K 检验的趋势分析表明,14 眼井中,除板桥东柳地下水埋深略有减小外,其余都为增大趋势,其 Z 值都大于 2.32,通过了 99.% 的显著性检验,区域地下水位下降趋势明显。通关代表观测井的年内季节变化的时间序列分析表明:

(1)近 20 年来,临泽灌区地下水位呈现了显著的下降趋势,突出表现在 2000 年以后。地下水位持续下降的决定性因素是水利化程度的提高,大型水库的兴建减少了天然河道对地下水的补给作用,渠道衬砌更减少了沿途的下渗,致使地下水的补给来源大幅度的减弱;

(2)2000 年以后地下水位埋深的迅速增大表明分水对于农业灌溉的影响巨大,河水灌溉的不足导致地下水迅速开采是引起这一时期地下水位下降的主要因素;

(3)天然径流补给仍然是灌区地下水的主要补给来源,夏秋季节的埋深增幅迅速,区域地下水正在由水文-灌溉型,向开采型转变,这种变化在平川区最为剧烈。

参考文献:

[1] 李启森,赵文智. 黑河分水计划对临泽绿洲种植业结构调整及生态稳定性发展的影响——以黑河中游的临泽县平川灌区为例[J]. 冰川冻土,2004,26(3):333-343.

(上接第 58 页)

[6] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响[M]. 北京:科学出版社,2007.

[7] Li L, Hao Z C, Wang J H, et al. Impact of future climate change on runoff in the head region of the Yellow River [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008,15(5):347-354.

[8] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.

[9] 王国庆,张建云,贺瑞敏,等. 黄河流域大尺度水文过程模拟研究[J]. 水利水电技术,2009,40(2):5-8.

[10] 金君良,陆桂华,吴志勇. VIC 模型在西北干旱半干旱地区的应用研究[J]. 水电能源科学,2010,28(1):12-14.

[11] 吴志勇,陆桂华,张建云,等. 基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟[J]. 地理科学,2007,27(3):359-364.

[12] 陆桂华,金君良,吴志勇,等. 水文模型植被参数获取方法及应用研究[J]. 水利水运工程学报,2009(4):1-6.

[2] 高前兆,李小雁,仵彦卿,等. 河西内陆河流域水资源转化分析[J]. 冰川冻土,2004,26(1):48-54.

[3] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 甘肃河西地区近 24 年来气象和水文序列的变化趋势[J]. 兰州大学学报,2002,38(2):163-170.

[4] 陈仁升,康尔泗. 黑河干流中游地区季平均地下水位变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5):36-43.

[5] 王浩,常炳炎,秦大庸. 黑河流域水资源调配研究[J]. 中国水利,2004(9):18-21.

[6] 高前兆,仵彦卿,等. 黑河流域水资源的统一管理与管理能力的提高[J]. 中国沙漠,2004,24(2):156-161.

[7] 魏智,金会军,蓝永超,等. 黑河实施分水后中游灌区地下水资源量的变化分析[J]. 冰川冻土,2008,30(2):334-350.

[8] 杨玲媛,王根绪. 近 20 a 来黑河中游张掖盆地地下水动态变化[J]. 冰川冻土,2005,27(2):290-296.

[9] 张立伟,延军平. 咸阳市气候变化与地下水变化趋势分析——以泾河两岸黄土高原区为例[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):102-105.

[10] 张福. 浅析临泽县地下水资源开采潜力及井网布局规划[J]. 甘肃农业,2002(10):60-61.

[11] 刘燕. 泾惠渠灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J]. 人民长江,2010,41(8):100-107.

[12] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化与突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.

[13] 吉喜斌,康尔泗,赵文智. 黑河中游典型灌区水资源供需平衡及其安全评估[J]. 中国农业科学,2005,38(5):974-982.

[13] Jin J, Lu G, Wu Z. Estimating precipitation for poorly-gauged areas in western China[C]//. Hyderabad, India: IAHS Publication, 2009:238-244.

[14] Liang X, Xie Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advances in Water Resources, 2001,24(9):1173-1193.

[15] Abdulla F A, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red river basin[J]. Journal of Geophysical Research, 1996,101(3):7449-7459.

[16] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(4):1031-1036.

[17] 张建云,轩云卿,李健. 模型参数优化方法及其应用[J]. 水文,1999,19(增刊):61-66.