

基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟

吴志勇^{1,2}, 陆桂华^{1,2}, 张建云³, 杨 扬³

(1 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098

2 河海大学水问题研究所, 江苏 南京 210098 3 水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 基于 VIC (Variable Infiltration Capacity) 大尺度水文模型, 采用实测的日降水和日最高、最低气温数据, 模拟了近 35 年 (1971~2005) 全国范围 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ 分辨率的逐日土壤含水量。文章利用 43 个流域的实测流量资料, 率定模型水文参数, 建立和验证水文参数移用公式, 确定无资料地区的水文参数。选取全国范围内的 28 个站 19 年的土壤含水量实测值, 对模拟的土壤含水量进行了验证。结果表明, VIC 模型较好地模拟了土壤含水量, 尤其是在湿润和半湿润地区。模拟的 0~100 cm 的土壤含水量多年平均值与实际的全国土壤水分分布较为一致。

关 键 词: VIC 模型; 土壤含水量; 干旱

中图分类号: P349 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2007)03-0359-06

陆面是大气圈和水圈相互作用的一个界面, 其水文过程由土壤水分、表面径流、壤中流、基流和其它的水文变量组成^[1~11]。虽然土壤水只占世界水资源很小的一部分, 但是在全球水量和能量交换中却起着重要的作用^[12~15]。例如, Entekhabi 等在陆面水文研究的建议中, 特别指出陆面土壤水分对气候系统的影响作用同海面温度一样重要^[16]。Koster 等在全球陆气耦合实验 (GLACE) 中得出, 土壤水分异常会对世界上的某些地区的降水产生很大的影响^[17]。

然而, 通过野外观测获得大面积 ($> 10^6\text{ km}^2$) 的土壤水分含量是很难的。近来, 陆面水文模型的发展, 为获取大面积土壤水分的时空分布提供了可能。VIC (Variable Infiltration Capacity) 模型就是一个这样的陆面大尺度陆面水文模型, 它同新安江模型^[18]和通用产流模型^[19]一样, 利用一个空间分布函数表示次网格内的土壤蓄水能力的变化。有关 VIC 模型的详细描述参见文献 [20, 21]。Nijssen 等利用 VIC 模型生成了 14 年 (1980~1993) 分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的全球土壤水分逐日分布^[22]。Andreadis 等基于 VIC 模型模拟的分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的土壤水分和径流资料, 重建了历史上北美大陆历史上的干旱^[23]。Li 等利用中国地区实测土壤含水

量资料, 对多种再分析产品的土壤水分模拟结果进行了检验^[24]。

本文利用 VIC 模型, 采用实测的日降水和日最高、最低气温资料, 生成 35 年 (1971~2005) 全国范围分辨率为 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ 的日土壤含水量。利用 43 个流域的实测流量资料率定和验证模型, 并建立水文参数的移用公式, 同时通过 28 个站的实测土壤含水量资料验证结果。对模拟的 0~100 cm 的 35 年土壤含水量和中国气候区划进行比较。

1 资料和方法

本文采用 4.04 版的 VIC 模型模拟生成 1971 年 1 月 1 日到 2005 年 10 月 31 日的日土壤含水量。陆地表面的土壤含水量分布具有不均匀性, 应尽可能采用较高的网格分辨率进行模拟, 考虑到模拟计算的速度, 本文选用分辨率为 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ 网格进行陆面水量平衡计算, 共有 10 458 个。由于未能得到实测的短波辐射等资料, 所以没有考虑能量平衡计算, 只进行水量平衡计算。VIC 模型的参数分为 4 类: 土壤参数、植被参数、水文参数和背景参数。这里所讲的背景参数是指流域地理特性 (纬度、经度和高程) 和气候参数 (近地表的多年平均气温和多年平均降水量)。土壤参数、植被参

收稿日期: 2005-12-25 修订日期: 2006-03-17
基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371023)、“948”计划项目 (200317) 资助。
作者简介: 吴志勇 (1979-), 男, 浙江松阳人, 博士研究生, 主要从事水信息理论及技术研究。E-mail: Wuzhiyong_110@163.com

数和背景参数具有比较明确物理基础,可以直接给定。对于每一个网格的土壤和植被参数,分别基于全球 10 km 的土壤数据库^[25]和全球 1 km 的陆地覆盖类型数据库^[26]来确定。“背景参数”根据美国地质调查局的全球 30 s 高程数据库和实测站点的多年平均近地表气温和多年平均降水量来确定。驱动模型的日降水量、日最高和最低气温数据来自于水利部水文局的全国 624 个基本气象站数据库(图 1)。这是一个持续更新的,具有质量保证的数据库。网格的日降水量、日最高和最低气温通过距离加权法求得,并采用高程上升 100 m,气温下降 0.65℃ 的关系,考虑高程对气温的影响^[27,28]。因没有得到相关的资料,故不对流量数据进行水库和灌溉影响的订正。试验分析表明,初始土壤含水量对模拟结果的影响将从几个月到几年不等,取决于当地的气候条件。为了将初始土壤含水量的影响降到最低,本文分两步确定初始土壤含水量:第一步,以田间持水量为初始土壤含水量进行模拟计算;第二步,将第一步模拟得出的 1972~2005 年每年的 1 月 1 日的土壤含水量的平均值,作为本文研究模拟起始时间 1971 年 1 月 1 日的初始土壤含水量,再次进行模拟计算。

D_1 (表层土壤厚度)、 D_2 (第二层土壤厚度)和 D_3 (第三层土壤厚度)。模型率定采用流域出口断面的实测流量过程线,因为它是流域水文过程的总体响应。对于表层土壤层厚度 D_1 ,通过敏感性分析,认为可以保持不变(0.1 m)。剩下的 6 个参数,分别在 35 个流域上利用实测的流量来率定,这些流域的集水面积从 190~351 530 km² 不等。对率定的水文参数的验证,采用这 35 个流域在不同时间段上的实测流量过程线。率定和验证的时间段分别为 5~6 年和 2 年。然后,利用率定的参数和选取的 17 个流域的土壤和气候特征变量,采用多元逐步回归的方法分别建立 6 个参数的移用公式。通过参数移用公式可以确定率定流域以外无资料流域网格的水文参数。对于参数移用公式的验证,采用另外 8 个的流域(图 1)的实测流量,这些流域集水面积从 1 230~10 010 km²。所选取的 43 个流域,既考虑了中国气候条件的多样性,也考虑了多种流域的特性。

对于模拟的土壤含水量,采用 28 个站的实测土壤含水量资料^[29]来验证(图 1)。这些实测值自 1981~1999 年每月分三次(8、18、28 号)在 0~100 cm 的 11 个土层深度处实测获得。从干旱地区到湿润地区,28 个站的多年平均降水量和 0~100 cm 多年平均土壤含水量的变化范围分别为 13~1 316 mm 和 67~381 mm。由于土壤分布具有高度的非均匀性,所以,实测站点的土壤含水量(代表面积 <0.005 km²)通常与模型模拟的网格平均值(代表面积 >500 km²)的结果很不一致。因此,模拟的土壤含水量和站点实测值相比较受到质疑,是一个被激烈讨论的问题。一些学者提出,比较土壤含水量的距平值是较为实用的方法^[30]。因此,本文利用实测的土壤含水量距平值来验证模型模拟值。

2 结果分析

2.1 参数率定

模型率定的过程如下:首先,根据流域的特性和 6 个待率定的水文参数的物理意义,确定流域内各网格点参数的合理取值范围和初始值;然后,采用网格化的实测日降水、日最高和最低气温资料驱动 VIC 模型,设置 Lohmann 等^[31]开发的汇流模型,生成流域出口流量过程;最后,采用基于 Resonbrock 方法^[32]的参数自动优选程序进行模型率定,优选程序选用了两个目标函数:

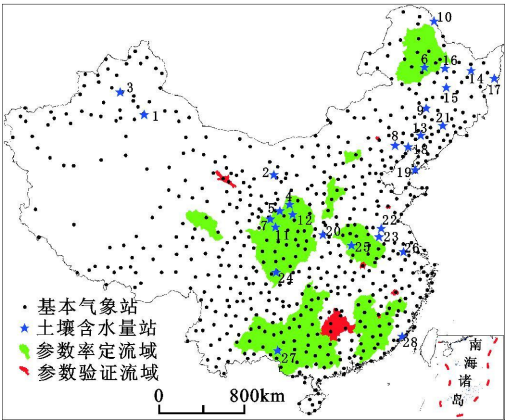


图 1 基本气象站、土壤含水量站、VIC 模型率定和验证流域分布图

Fig 1 Distribution of meteorological stations, soil moisture measurement sites, calibration and validation catchments

VIC 模型有 7 个待率定的水文参数,分别是: B (入渗能力形状参数)、 D_s (当基流非线性增长发生时,所占 D_m 的比例)、 D_m (这是底层土壤一天内产生基流的最大值)、 W_s (当基流非线性增长发生时,底层土壤含水量与最大土壤含水量的比值)、

$$E_r = (\overline{Q_c} - \overline{Q_o}) / \overline{Q_o}$$
$$E_c = 1 - \sum_i (Q_{ic} - Q_{io})^2 / \sum_i (Q_{io} - \overline{Q_o})^2$$

式中, $\overline{Q_c}$ 和 $\overline{Q_o}$ 分别指模拟和实测流量的多年平均值, E_r 是相对误差; Q_{ic} 和 Q_{io} 分别是时间步长为 i 时的模拟和实测流量, E_c 为模型效率系数^[23]。

值得注意的是, 通过实测流量过程, 采用系统识别的方法优选参数, 需要考虑参数之间存在相关性问题。一方面, 参数初始值会影响其优选结果; 另一方面, 本参数的最优值与其它参数取值有关。比如, D_s 和 D_m 有一定的相关性, 当保持乘积不变, 而 D_s 与 D_m 取值不同时, 可能得到相同的结果。为了尽量克服参数之间相关性带来的优选问题, 本文采用 Resonbrock 方法进行多方向多初值优选。具体做法是, 当前一轮优选结束后, 将其结果定为后二轮如初值, 并改变参数优选先后顺序, 进行再一次的优选; 重复这样的过程, 直至稳定到一组参数。

图 2a 给出了 35 个率定流域中两个流域的模拟和实测的流量过程线, 这两个流域分别属于长江流域和珠江流域。从图上可以看出, 模拟的流量过程线和实测流量过程线拟合得很好。35 个流域的 E_r 和 E_c 的平均值分别为 -1.4% 和 0.71, 率定结果令人满意。总的说来, VIC 模型在中国的东部、东南部、中部、南部和中南部的湿润和半湿润地区的模拟的结果较好。西部和西北干旱地区 VIC 模型模拟的结果不太理想。一般来说, 水文模型在干旱条件下很难模拟出好的结果。一方面, 干旱条件下多以超渗产流为主, 而 VIC 模型是基于蓄满产流的; 另一方面, 由于这些地区条件恶劣、人口稀少和经济欠发达, 比起湿润和半湿润地区, 其气象站网密度较稀疏, 增加了模型输入的不确定性。

2.2 参数验证

首先, 采用 35 个流域上验证期的模拟和实测流量过程线, 验证率定的水文参数。35 个流域验证期的 E_r 和 E_c 平均值分别为 3.9% 和 0.65, 这说明了 VIC 模型率定期和验证期的结果是相一致, 模型具有一定的稳定性。接着, 我们验证另外 8 个流域的结果。如上一节所述, 对模型在 35 个流域上率定和验证后, 建立 6 个水文参数的回归关系, 即参数移用公式, 用于估计无资料流域的参数。为了验证参数移用公式, 把它应用于 8 个验证流域, 其水文参数由移用公式计算。图 2b 给出了其中两

个流域的模拟和实测流量过程线, 这两个流域同属于长江流域。总的来说, 结果较好: 8 个流域的 E_r 和 E_c 的平均值分别为 -12% 和 0.53。和率定结果一样, VIC 在干旱地区的效果也不理想。如果通过率定的方法确定 8 个流域的水文参数, 其 E_r 和 E_c 的平均值将变为 -0.2% 和 0.74。这和上面所讨论的率定结果是相一致的。有一点需指出, VIC 模型对地面积雪融水的模拟还不太理想, 如在降雪较多的东北地区 E_r 和 E_c 的值比较低 (分别为 18.7% 和 0.34), 其春季径流的模拟偏少, 这一点有待进一步研究。最后采用参数移用公式计算全国 10 458 个网格的水文参数, 各参数的范围如下: B 的范围为 0.01~0.35; D_s 的范围为 0.003~0.4; D_m 的范围为 5~30 mm; W_s 的范围为 0.4~0.95; D_2 的范围为 0.2~1.5 m; D_3 的范围为 0.2~1.5 m。根据参数的物理意义和参数取值的分布来看, 本文确定的水文参数都在合理范围内。

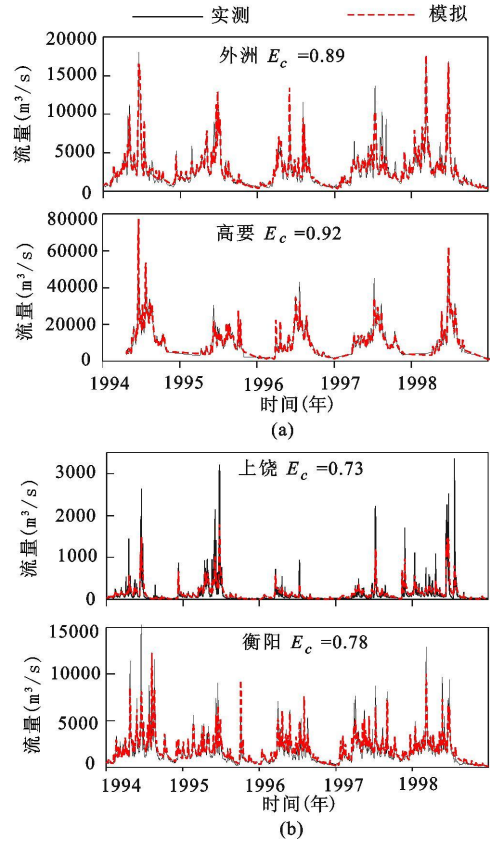


图 2 率定流域和验证流域的实测和模拟日流量过程线比较

Fig 2 Comparison between the simulated and observed hydrographs over the calibration and validation catdments

2 3 土壤含水量

本文采用 28 个站的实测土壤含水量资料, 验证模型模拟的土壤含水量。图 3 给出了位于半湿润地区的西峰镇和海红(图 1 中的第 12 和 21 站)的模拟和实测土壤含水量距平过程线。图中同时给出了模拟和实测土壤含水量距平的相关系数(r), 结果令人满意。对于深度为 0~ 20、20~ 100 和 0~ 100 cm 的相关系数, 28 个站的平均值分别为 0.60、0.50 和 0.52。由此可知模拟的结果较好。接下来, 对不同的降水条件下的模拟结果进行分析。根据 28 个站的多年平均降水量, 从小到大为每个站编号(图 1)。图 4 表明, 0~ 20 cm 的相关系数 r 值从干旱地区到湿润地区呈明显的上升趋势, 这说明越是湿润地区土壤含水量模拟得越好, 然而, 在 20~ 100 cm 深处并没有此趋势, 可见, 上层土壤较易受降水影响。

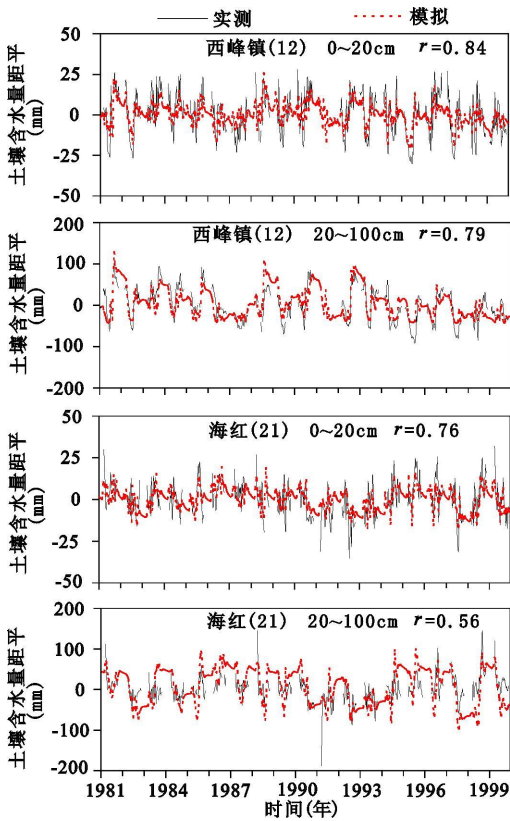


图 3 0~ 20 cm 和 20~ 100 cm 土层实测和模拟的土壤含水量距平比较

Fig 3 Comparison between simulated and observed soil moisture anomalies for depths of 0- 20 cm and 20- 100 cm

图 5 是模拟的 0~ 100 cm 土壤含水量 35 年(1971~ 2005)的平均值和 180 mm 等值线。图中

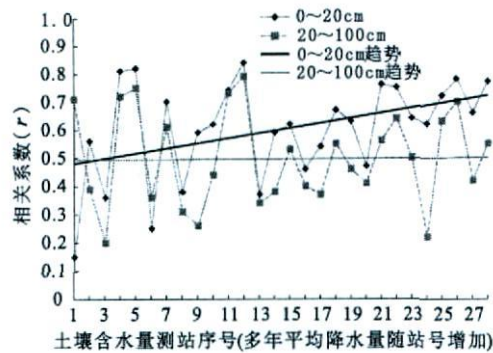


图 4 0~ 20 cm 和 20~ 100 cm 模拟和实测土壤水分异常相关系数随测站多年平均降水量的变化

Fig 4 The variation of the correlation coefficient of simulated and observed soil moisture anomalies with annual precipitation for depths of 0- 20 cm and 20- 100 cm

显示了从南部的湿润地区到北部的干旱地区土壤含水量的分布趋势。在 10 548 个网格中, VIC 模型 0~ 100 cm 的凋萎含水量在 43~ 331 mm 之间变化, 其平均值为 173 mm, 接近于 180 mm 等值线。多年平均土壤含水量分布和中国气候区划干湿的分布较一致, 模拟的 180 mm 土壤含水量等值线与区划中的干旱与湿润地区分界线^[34-35]基本吻合。目前, 本文作者正在进行基于模拟土壤含水量的干旱分析, 并采用 1949~ 1990 年间的中国干旱历史记录^[28]来检验。初步结果表明, 模拟的 1971~ 1990 年土壤含水量, 在时间和空间上都与相应的干旱历史有较好的相关性。

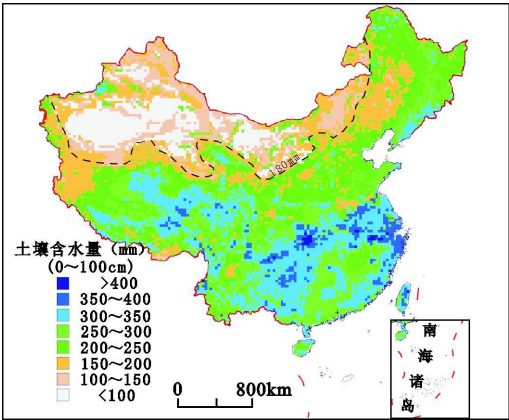


图 5 0~ 100 cm 模拟的多年平均土壤含水量分布和 180 mm 等值线图(1971~ 2005)

Fig 5 Simulated soil moisture distribution for 0- 100 cm and 180 mm contour (1971- 2005)

3 结 语

本文利用VIC模型, 采用实测的日降水和日最高、最低气温资料, 生成全国范围1971年1月1日到2005年10月31日逐日的土壤含水量分布。模型的率定和验证以及水文参数的移用公式的建立, 利用了43个流域的实测的日流量过程资料。模拟的土壤含水量距平与28个站点的实测结果具有较好的一致性, 尤其是在湿润和半湿润地区。模拟的0~100 cm的35年平均土壤含水量和中国实际的土壤水分分布相一致。本文生成的土壤含水量数据库, 是中国利用水文模型模拟全国范围30 km分辨率土壤含水量的一次尝试。此数据库将有助于我们进一步研究干旱和气候的变化趋势。在本文工作的基础上, 水利部水文局已将VIC模型用于干旱监测业务系统中, 并利用VIC模型模拟的土壤含水量计算干旱指数, 每天发布全国干旱指数分布图, 用于干旱监测。

参考文献:

[1] Lin A C, Wen L, Chaumont D, et al. The use of coupled meteorological and hydrological models for flash flood simulation [A]. De Jong C, Collins D, Ranzi R. Climate and Hydrology in Mountain Areas [C]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005: 231~242

[2] 赵延治, 张春来, 邹学勇, 等. 西藏日喀则地区生态安全评价与生态环境建设 [J]. 地理科学, 2006, 26(1): 33~39

[3] 索安宁, 王兮之, 胡玉喆, 等. DCCA在黄土高原流域径流环境解释中的应用 [J]. 地理科学, 2006, 26(2): 205~210

[4] 王学雷, 吕宪国, 任宪龙. 江汉平原湿地水系统综合评价与水资源管理探讨 [J]. 地理科学, 2006, 26(3): 311~315

[5] 黄初龙, 邓伟. 东北区农业水资源可持续利用地域分异的因子分析 [J]. 地理科学, 2006, 26(3): 284~291

[6] 何钢, 蔡运龙. 不同比例尺下中国水系分维数关系研究 [J]. 地理科学, 2006, 26(4): 461~465

[7] 赵秀兰, 延晓冬. 近20年黑龙江省土壤水储量变化趋势研究 [J]. 地理科学, 2006, 26(5): 569~573

[8] 王永洁, 邓伟. 扎龙湿地水环境可持续性度量研究 [J]. 地理科学, 2006, 26(6): 722~727

[9] 杜娟, 赵景波. 西安高陵人工林土壤干层与含水量季节变化研究 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 98~103

[10] 朱永恒, 濮洪杰, 赵春雨. 景观生态质量评价研究——以吴江市为例 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 182~187

[11] 岳文泽, 徐丽华. 城市土地利用类型及格局的热环境效应研究——以上海市中心城区为例 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 243~248

[12] 杨梅学, 姚檀栋, 何元庆, 等. 藏北高原地气之间的水分循环

[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 29~33

[13] 杨凯, 唐敏, 周丽英. 上海近30年来蒸发变化及其城郊差异分析 [J]. 地理科学, 2004, 24(5): 557~561

[14] 于兴修, 杨桂山, 王瑶. 土地利用覆被变化的环境效应研究进展与动向 [J]. 地理科学, 2004, 24(5): 627~633

[15] 孙风华, 任国玉, 赵春雨, 等. 中国东北地区及不同典型下垫面的气温异常变化分析 [J]. 地理科学, 2005, 25(2): 167~171

[16] Entekhabi D, Asrar G R, Betts A K, et al. An agenda for land surface hydrology research and a call for the second international hydrological decade [J]. Bull Amer Met Soc., 1999, 80: 2043~2058

[17] Koster R D, Dimeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 2004, 305: 1138~1140

[18] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984

[19] 文康, 李蝶娟, 金管生, 等. 流域产流计算的数学模型 [J]. 水利学报, 1982, 8: 1~12

[20] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. J Geophys Res., 1994, 99 (D7): 14 415~14 428

[21] 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: 195~206

[22] Nijssen B, Schnur R, Lettenmaier D P. Global retrospective estimation of soil moisture using the Variable Infiltration Capacity land surface model, 1980~93 [J]. J Climate, 2001, 14: 1790~1808

[23] Andreadis K M, Clark E A, Wood A W, et al. 20th Century Drought in the Continuous United States [J]. J Hydrometeorol (accepted), 2005, 6(6): 985~1001

[24] Li H B, Robock A, Liu S X, et al. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations [J]. J Hydrometeorol, 2005, 6: 180~193

[25] Reynolds C A, Jackson T J, Rawls W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions [J]. Water Resour Res., 2000, 36: 3653~3662

[26] Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach [J]. Int J Remote Sensing, 2000, 21: 1331~1364

[27] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于DEM的地理要素PRISM空间内插研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 205~211

[28] 朱求安, 张万昌, 赵登忠. 基于PRISM和泰森多边形地形要素日降水量空间插值研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(2): 233~238

[29] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The Global Soil

Moisture Data Bank[J]. Bull Amer Meteorol Soc , 2000, **81**: 1281– 1299

[30] Dimeyer P A. Problems in initializing soil wetness[J]. Bull Amer Meteor Soc , 1995, **76**: 2234 – 2240

[31] Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, et al Regional scale hydrology: I Formulation of the VIC – 2L model coupled to a routing model[J]. Hydrological Sciences Journal 1998 **43**: 131 – 141.

[32] Rosenbrock H H. An automatic method for finding the greatest or least value of function[J]. Computer Journal 1960 **3**(3): 175– 84.

[33] Nash JE, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1 – a discussion of principles[J]. J Hydrol , 1970, **10**(3): 282 – 290.

[34] 张海伦, 骆承政, 张世法, 等. 中国水旱灾害 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997

[35] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系 [J]. 地理科学, 2005 **25**(4): 441~ 447.

Simulation of Daily Soil Moisture Using VIC Model

WU Zhi-Yong^{1, 2}, LU Gu-Hua^{1, 2}, ZHANG Jian-Yun³, YANG Yang³

(1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098; 2 Research Institute of Water Problems Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098; 3 Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053)

Abstract On the basis of Variable Infiltration Capacity (VIC) land surface macroscale hydrology model and observed maximum and minimum air temperature and precipitation this paper simulated daily soil moisture values over China for the period January 1, 1971 to October 31, 2005. The model was applied over a grid of 10 458 points with a resolution of 30 km × 30 km. The model was first calibrated and validated by using observed hydrographs over 43 catchments. In situ soil moisture measurements from 28 sites over the country were also used for model validation. VIC performs well over both calibration and validation catchments especially in humid and semi-humid regions. The 35-yr soil moisture climatology for the 0– 100m from VIC is consistent with known soil moisture conditions in China.

Key words Variable Infiltration Capacity Model; soil moisture; drought