

基于 VIC-3L 模型的黑河上游流域径流模拟研究

赵登忠^{1,2}, 张万昌², 程学军¹

(1. 长江科学院 空间信息技术应用研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 南京大学 环境学院, 江苏 南京 210093)

摘要:为解决我国西部地区气象水文站点稀少、分布不均匀的问题,并充分表达气象要素的空间差异性,利用 VIC-3L 模型对黑河上游山区流域进行了模拟研究,以检验该模型在干旱区较细网格尺度上的适用性和模型参数移植以及改造的可能性。模型所需要的土壤参数和植被参数主要通过野外实测、土壤普查数据或根据有关参考文献获得。模拟结果显示,在日、月尺度上的径流模拟变化趋势与实测径流除了在时间上有大约 2~3 d 的滞后外,其他方面较为吻合,在丰水年日、月尺度上的径流模拟远好于同尺度上枯水年的模拟精度,说明模型在研究区具有一定的适用性,但有待于进一步改进。

关键词: VIC-3L 分布式水文模型; PRISM 空间内插模型; 地表径流黑河; 上游山区流域

中图法分类号: P334.92 **文献标志码:** A

用陆面过程模式或水文模型对我国西部流域水文过程进行模拟,对于解决本地区的水资源问题具有重要意义。但是由于气候条件等原因,陆面过程或水文模型并不具有普适性。因此,选择一个适合于我国西北干旱地区气象条件的陆面过程模式或水文模型成为重要课题。

1 研究进展

水文模型的发展经历了一个集总式到分布式的过程。集总式水文模型并不考虑地形、土壤、植被等地理要素的空间和时间变化,而是把整个流域看成一个均匀一致的整体,并把流域参数平均化后进行水文过程和水循环的模拟,这种方法只代表了流域的平均自然状况,没有考虑流域内部差异^[1]。由于这种模型忽略了地理要素的空间异质性和时间变化,因此它的模拟结果并没有表达水文因子的空间特征。

1969 年, R. A. Freeze 和 R. L. Harlan 提出了分布式水文模型的概念^[2]。与传统的集总式水文模型不同,分布式水文模型在水平方向上考虑模型输入参数的空间分布特征,把下垫面划分为能够表达各种参数

空间异质性的网格或具有相同水文特征的响应单元,在垂直方向上将土壤分层,充分表达了自然界的真实状况,与集总式水文模型相比具有明显的优点。

VIC-3L 模型是一个目前应用比较广泛的分布式水文模型,它首先由美国水文学家 F. E. Wood 提出^[3], X. D. Liang 等完善了模型中有关水和能量平衡理论并进一步把模型改造为 VIC-2L 模型^[4-5]。X. D. Liang 等考虑了模型中降水的空间分布特征并提出了土壤湿度和地表热通量的参数化方案,取得了良好的模拟结果^[6-8]。为了精确地表达土壤在垂直方向上对产流的影响,对土壤划分的层数越来越多,模型也被改造为 VIC-3L 甚至 VIC-NL 模型。其中 VIC-3L 模型在世界上很多地区均取得了良好的效果^[9-14]。PILPS 项目在美国 Red-Arkansas 河流进行了多个水文模型比较,以检验各种模型的适用性,结果表明, VIC-3L 模型在本地区的表现非常出色^[15-17]。杨宏伟和谢正辉采用有限元方法发展了地下水位的计算模块并与 VIC-3L 模型进行了耦合^[18],给出了模型地下水位的动态表示。谢正辉等考虑 Horton 和 Dunne 两种产流机制,改进了 VIC-3L 模型并在淮河流域进行水文模

收稿日期:2012-02-15

基金项目:国家自然科学基金(51009011)

作者简介:赵登忠,男,高级工程师,博士,主要从事陆面数据同化、水库温室气体源汇变化、遥感地表参数反演的研究。E-mail: njuzhaodz@163.com

拟^[19-20],模拟径流量与实测径流量非常吻合。

VIC-3L 模型的主要产流方式适合干旱地区超渗产流的特点,并充分利用了 Horton 下渗曲线理论来表示土壤下渗能力的空间差异性。该模型是一个大尺度水文模型,到目前为止,虽然在湿润地区有比较出色的表现,但在干旱地区中小尺度流域更细网格上的模拟研究比较少。基于以上原因,本研究选择 VIC-3L 模型在我国西部干旱地区更细网格尺度上的黑河上游山区流域进行模拟验证,检验模型在该研究区的适用性和模型参数移植以及改造的可能性。这种尝试,对模型在各种气候条件下的应用具有重要的理论意义。

2 研究区介绍

黑河上游山区流域面积为 10 009 km²,属于干旱半干旱地区,出山径流由莺落峡水文站(38°48'N,100°11'E,1674 m)控制,流域海拔范围为1 674 ~ 5 120 m,流域内有莺落峡、札马什克和祁连 3 个子流域及控制站点(见图 1)。根据多年资料统计,黑河上游山区流域平均冰川覆盖面积 59 km²,冰川覆盖度 0.59%,冰川储水量 13.808 亿 m³,径流量 16.05 亿 m³。森林主要分布在中山地带,以青海云杉和祁连圆柏为主。灌木和牧草分布在流域各处,主要为高寒植被。

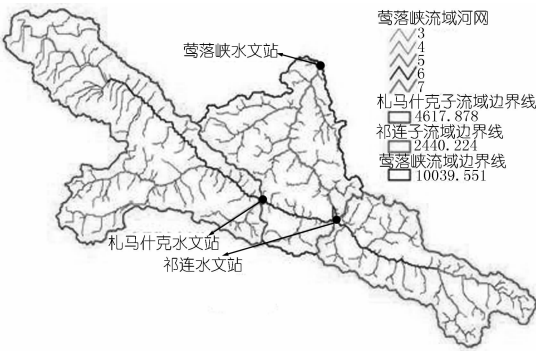


图 1 黑河上游山区流域示意

3 VIC-3L 模型框架

VIC-3L 模型主要考虑了大气-植被-土壤之间的物理交换过程,反映它们之间的水热状态变化和水热传输。模型把陆地表面分为多种地表覆盖类型,同时每个网格在垂直方向上分为地表植被层以及 3 个土壤层,其垂直和水平特性可以概化为如图 2 所示。地表覆盖类型的主要参数有植被每月叶面积指数(LAI)、叶面气孔阻抗以及根系在不同层之间的分配比例。第 1 层顶薄层反映土壤水分的动态变化,上层(第 1 层和第 2 层)土壤用来反映土壤对降雨过程的动态影响,下层土壤(第 3 层)用来刻画土壤含水量的季节特性。根系在土壤层中的分布,取决于陆地覆盖

和土壤类型。同时,只有第 1 层土壤产生地表径流,第 3 层土壤产生基流,中间层只有下渗过程。

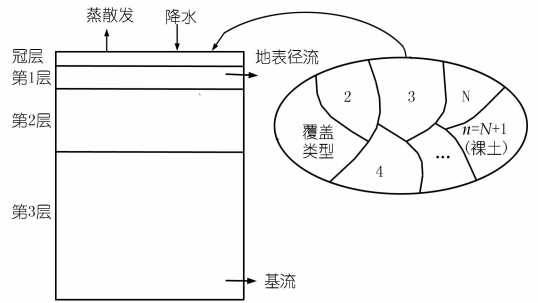


图 2 VIC-3L 模型概化示意

在地表径流产流过程中,VIC-3L 模型主要运用了超渗和蓄满两种产流机制进行产流,利用 Horton 下渗曲线和土壤湿度面积分配曲线表达土壤下渗能力的空间异质性对产流的影响。Horton 下渗曲线理论认为,当雨强小于下渗能力时,所有降雨都被土壤吸收;大于下渗能力时,吸收率只能等于下渗能力,其余部分就成为产流量。土壤把降水分为两部分,一部分成为地表径流进入河道;另一部分进入土壤或者经过渗透成为地下径流或经过地表蒸发重新进入大气(如图 3)。图 3 中, P 为降水; W_0 为在降水前的土壤水; Q_d 为地表径流; I_0 为在土壤饱和前的下渗能力; I_m 为最大下渗能力; A_s 为网格内的饱和面积比例。

VIC-3L 模型地表径流由公式(1)计算:

$$Q_d = \begin{cases} P + W_0 - W_0^{\max} & I_0 + P \geq I_m \\ P + W_0 - W_0^{\max} [1 - (1 - \frac{I_0 + P}{I_m})^{1+\beta}] & I_0 + P \leq I_m \end{cases} \quad (1)$$

在上式中,下渗能力的空间分布由公式(2)确定:

$$I_0 = I_m [1 - (1 - A_s)^{1/\beta}] \quad (2)$$

式中, β 为下渗曲线的形象参数; W_0^{\max} 为上层土壤的最大含水量;其余参数和图 3 中一致。

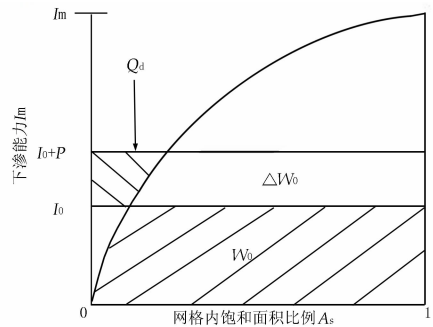


图 3 Horton 下渗曲线理论示意

VIC-3L 模型的汇流方案采用单位线法和圣-维南方程方法,并在德国 Weser 河上得到应用^[21-23]。由于模型产流部分只在每个栅格上产生径流深,因此模型汇流部分首先在栅格内采用单位线法把产流部分产

生的径流深汇到栅格单元的出口处,然后再采用圣-维南方程方法进行河网汇流,把径流汇到流域的出口处,形成断面径流。

4 VIC-3L 水文模型输入数据和参数

4.1 气象数据空间内插

由于水循环模拟中的很多水文变量在时间和空间上都具有高度的异质性,我国西部地区气象水文站点比较稀少,分布不均匀。为了得到每个网格上的气象输入数据,本文利用 PRISM 空间内插方法分别对日降水、日最高气温和日最低气温进行空间数字制图,进而得到模型所需要的强迫气象数据。

PRISM 空间内插方法由美国气象科学家 Christopher Daly 提出^[24],这种方法认为,在一定的区域内控制气象要素空间分布最主要的因素是高程。它以数字高程模型(DEM)为平台结合 GIS 空间插补技术,综合考虑高程、距离、坡向、坡度等因子对气象要素的影响,通过开窗技术对整个大区域进行线性插值,从而得到气象要素的空间分布特征。赵登忠等曾研究了 PRISM 空间内插方法在黑河上游山区流域的适用性^[25]。

4.2 模型主要植被参数

模型主要输入的植被参数有:结构阻抗、最小气孔阻抗、叶面积指数、反照率、粗糙度、零平面位移及根区在每一层土壤所占的比例。这些参数主要根据 LDAS (Land Data Assimilation System) 来确定,部分参数通过实际测量得到。LDAS 中植被参数的确定分别参考了 IGBP、BATS、NCAR LSM、SiB、SiB2 和 Mosaic 中的参数。模型中需要在每种植被覆盖类型上标定不同的植被参数,植被分类图根据甘肃省张掖市土地分类图数字化得到。由于参数众多,本文就不再一一列出。

4.3 模型主要土壤参数

模型主要输入土壤参数和植被参数的处理相似,需要对每一类土壤类型标定各种土壤参数。土壤分类数据根据甘肃省张掖市土壤数字化分类图得到。由于得到的土壤分类图分类太细,土壤参数不易获取,本文根据一定的原则合并了其中几种土壤类别,成为 9 类土壤。同时为便于模型的应用,把矢量数据格式的土壤分类图层转换为栅格数据格式的土壤分类图,其空间分辨率为 1 km。选取每个网格内面积比例最大的一类土壤及其对应的土壤参数,生成土壤参数文件,其主要土壤参数如表 1 所示,表中变量的标号为土壤层数。土壤参数在模型中标定后就不再改动,如土壤饱和和水传导率 K_s (mm/d)、土壤石英含量 Q (%)、土壤容重度 S_d (kg/m^3) 及用于描述非饱和产流的指数 b , 只

有 Horton 下渗曲线形象参数、每层土壤厚度、基流最大流动速率、产生非线性基流的比例等几个参数作为可调参数加以调节。这些参数的确定参考了 Cosby 等、Rawls 等的工作^[26-27]。

表 1 模型主要土壤参数

| 土壤参数 | 灌溉潮土 | 寒冻钙土 | 寒冻毡土 | 寒漠土 | 寒毡土 | 黑钙土 | 灰褐土 | 栗钙土 | 潜育土 |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|
| K_s [1] | 1 462.4 | 1 340 | 1 215.6 | 2 316.2 | 1 316.5 | 1 616.8 | 1 392.8 | 2 690 | 2 120 |
| K_s [2] | 1 182.4 | 1 400 | 2 568.9 | 1 526.4 | 1 316.5 | 1 139.2 | 1 231.2 | 122.4 | 3 122.3 |
| K_s [3] | 1 212 | 1 390 | 256.7 | 104.8 | 1 453.4 | 1 430.4 | 110.4 | 314.4 | 254.3 |
| Q [1] | 0.02 | 0.43 | 0.41 | 0.42 | 0.35 | 0.02 | 0.07 | 0.41 | 0.21 |
| Q [2] | 0.05 | 0.43 | 0.42 | 0.43 | 0.36 | 0.02 | 0.25 | 0.38 | 0.20 |
| Q [3] | 0.07 | 0.43 | 0.36 | 0.40 | 0.40 | 0.04 | 0.11 | 0.33 | 0.25 |
| S_d [1] | 1 270 | 1 340 | 1 270 | 1 340 | 1 420 | 1 230 | 220 | 1 140 | 1 170 |
| S_d [2] | 1 370 | 1 400 | 1 270 | 970 | 1 436 | 1 100 | 210 | 1 250 | 1 182 |
| S_d [3] | 1 540 | 1 390 | 1 180 | 1 380 | 1 352 | 1 180 | 1 470 | 1 300 | 1 156 |

4.4 汇流模型参数

汇流模型参数包括河流网络、流域内部栅格流向、单位线、网格贡献面积等。在汇流模型中,首先通过流向文件中的栅格流向利用经验性单位线方法进行网格汇流,然后再沿河道网络采用圣-维南方程方法进行河道汇流。本研究利用 DEM 数据通过 Rivertools 软件提取黑河上游山区流域的河流网络和栅格流向(如图 4),栅格流向表示了一个栅格的地表径流流向其周围 8 个栅格的方向。

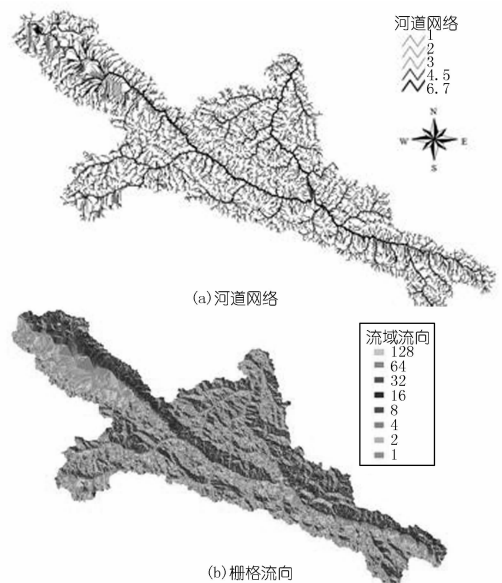


图 4 黑河上游山区流域的河网系统和栅格流向示意

5 结果与分析

模型经过产流和汇流过程产生流域出口断面径流,同时模拟了径流深的空间分布特征。为了定量表示模型的模拟效果,本研究采用 NSE 系数衡量实际测量径流量和模拟径流量之间的差异。NSE 系数的计算

式为^[28]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

式中, NSE 为 Nash 系数, 其值越接近于 1, 表明模拟的结果越好; Q_{obs} 为观测的径流量; Q_{mod} 为模型模拟的径流量; $\overline{Q_{obs}}$ 为观测径流量的平均值。

经过模型参数的调节后, 图 5, 6 分别是黑河上游山区流域在出山径流控制站点莺落峡水文站 1990 ~ 1994 年 5 a 的日径流和月径流模拟结果。在这次模拟中, 模型可调参数 Horton 下渗曲线形象参数、基流最大流动速率、产生非线性基流面积的比例、非线性基流发生最大土壤湿度面积的比例分别为 0.05, 6.5, 0.001, 0.5。本次模拟日径流和月径流的 NSE 系数分别为 0.31 和 0.45。模拟结果表明, 在日、月尺度上的径流模拟变化趋势与实测径流除了在时间上有大约 2 ~ 3 d 的滞后外, 其他方面较为吻合, 在丰水年日、月尺度上的径流模拟远好于同尺度上枯水年的模拟精度。月径流模拟结果的 NSE 系数达到 0.45, 和实测径流更加吻合。

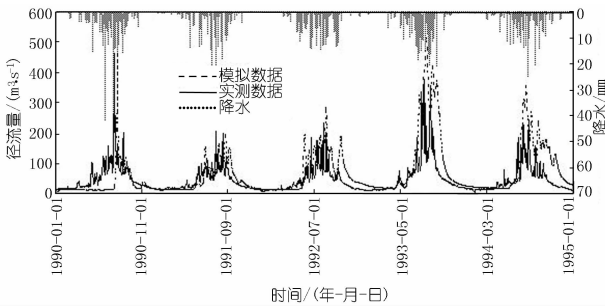


图 5 莺落峡水文站日径流量实测值和模拟值比较

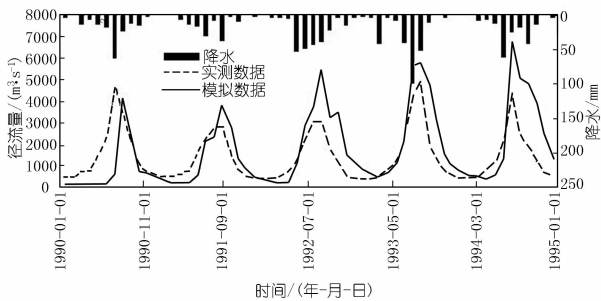


图 6 莺落峡水文站月径流量实测值和模拟值比较

模型在本研究区地表径流模拟的结果出现了 2 ~ 3 d 的时间延迟, 通过对输入气象数据和有关参数的分析, 其原因可能有以下几点: ① 模型参数难以获取。由于在对模型降水的空间分布特征、土壤湿度的空间差异性、土壤属性参数和植被参数进行参数化时, 考虑的物理过程比较复杂。这种复杂性在详细地描述水文物理过程的同时也为模型带来了不确定性, 很多参数

难于精确地获取, 只能利用经验公式计算得到或参考有关文献。② 由于 VIC-3L 模型是一个大尺度的模型, 空间分辨率比较低, 一般为 $0.25^\circ \sim 3^\circ$, 产流过程中并没有考虑网格之间的侧向流。但在本研究所使用的 DEM 数据空间分辨率比较高, 网格之间的侧向流就需要考虑, 否则就会对径流的产生有很大的高估或低估。因此, 如果在本地区使用 VIC-3L 模型, 必须在模型中加入网格间侧向流的部分, 模型的模拟精度可能会有所提高。③ 黑河上游山区流域内的水文气象站点太少, 3 个气象站点数据可能是远远不够的。因此, 由于站点数据资料的限制, 虽然研究中所采用的 PRISM 空间内插方法取得了较好的效果, 但是进一步提高 PRISM 空间内插模型内插气象要素的精度是非常困难的。

6 结论

本研究采用 VIC-3L 水文模型对我国西北干旱地区黑河上游山区流域进行水文模拟, 从模型运行过程和模拟结果中可以得到以下结论: 在日、月尺度上的径流模拟变化趋势与实测径流, 除了在时间上径流有大约 2 ~ 3 d 的滞后外, 其他方面较为吻合; 在丰水年日、月尺度上的径流模拟远好于同尺度上枯水年的模拟精度, 月径流模拟结果的 NSE 系数达到 0.45, 说明该模型在本研究区具有一定的适用性。但模型的总体模拟效果还是并不令人满意, 有待于对模型进一步改进。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445.
- [2] Freeze R A, Harlan R L. Blue print for a physically-based digital simulated hydrologic response model[J]. J. Hydrol, 1969, (9): 237-258.
- [3] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models[J]. J. Geophys. Res, 1992, 97(D3): 2717-2728.
- [4] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GCMs[J]. J. Geophys. Res. 1994, 99(7): 14415-14428.
- [5] Liang X A Two-Layer Variable Infiltration Capacity Land Surface Representation for General Circulation Models[C] // Water Resour. Series, 1994, Seattle: [s. n.], 2008.
- [6] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional Statistical Dynamic Representation of Subgrid Spatial Variability of Precipitation in the Two-Layer Variable Infiltration Capacity Model[J]. J. Geophys. Res, 1996, 101(16): 21,403-21,422.
- [7] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modifications[J]. Global and Planetary Change, 1996, (13): 195-206.

- [8] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D. P. Modeling ground heat flux in land surface parameterization schemes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104 (D8): 9581 - 9600.
- [9] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (3): 7449 - 7459.
- [10] Wood E F, Lettenmaier D L. Hydrological modeling of continental - scale basins [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1997, 25: 279 - 300.
- [11] Raschke D E, Nijssen B, Lettenmaier D P. Regional scale hydrology: II. Application of the VIC - 2L model to the Weser river, Germany [J]. *Hydrological Sciences*, 1998, 43(1): 143 - 158.
- [12] Matheussen B, Kirschbaum R L, Goodman I A. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia river basin (USA and Canada) [J]. *Hydrol. Process*, 2000, (14): 867 - 885.
- [13] Hamlet A F, Lettenmaier D P. Effects of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Columbia River Basin [J]. *Am. Water Res. Assoc.*, 1999, 35(6): 1597 - 1623.
- [14] Nijssen B N, Schnur R, Lettenmaier D P. Global retrospective estimation of soil moisture using the VIC land surface model. 1980 - 1993 [J]. *J. Clim.*, 2001, (14): 1790 - 1808.
- [15] Liang X, Wood E F, Lohmann D, Lettenmaier D P. The Project for Intercomparison of Land - surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase - 2c Red - Arkansas River Basin Experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons [J]. *J. Global and Planetary Change*, 1998, (19): 115 - 135.
- [16] Liang X, Wood E F, Lohmann D, Lettenmaier D P. The Project for Intercomparison of Land - surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase - 2c Red - Arkansas River Basin Experiment: 2. Spatial and Temporal Analysis of Energy Fluxes [J]. *J. Global and Planetary Change*, 1998, 19: 137 - 159.
- [17] Liang X, Wood E F, Lohmann D. The Project for Intercomparison of Land - surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase - 2c Red - Arkansas River Basin Experiment: 3. Spatial and Temporal Analysis of Water Fluxes [J]. *J. Global and Planetary Change*, 1998, 19: 161 - 179.
- [18] 杨宏伟, 谢正辉. 陆面模式 VIC 中动态表示地下水水位的新方法 [J]. *自然科学进展*, 2003, (6): 615 - 620.
- [19] Xu Liang, Xie Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid - scale soil heterogeneity for land surface models [J]. *Advances in Water Resources*, 2001, (24): 1173 - 1193.
- [20] Xie Zhenghui, Su Fengge, Xu Liang, et al. Applications of a Surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, (2): 165 - 172.
- [21] Lohmann D, Nolte - Holube R. A large - scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes [J]. *Tellus*, 1996, 48(5): 708 - 721.
- [22] Lohmann D, Raschke E, Nijssen B. Regional Scale Hydrology: I. Formulation of the VIC - 2L Model Coupled to a Routing Model [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, 43(1): 131 - 141.
- [23] Lohmann D, Raschke E, Nijssen B. Regional Scale Hydrology: II. Application of the VIC - 2L Model to the Weser River, Germany [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, 43(1): 143 - 157.
- [24] Christopher D, Ronald P, Gibson. A Statistical - Topographic Model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain [J]. *Journal of applied meteorology*, 1994, (33): 140 - 158.
- [25] 赵登忠, 张万昌, 刘三超, 等. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究 [J]. *地理科学*, 2004, (2): 205 - 211.
- [26] Cosby B J, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soil [J]. *Water Resources Research*, 1984, (20): 682.
- [27] Rawls W J, Ahuja L R, Brakensiek D L. Infiltration and soil water movement. [C] // *Handbook of hydrology*. chapter 5, D. R. Maidment (ed). [s. l.]: McGraw Hill, 1993.
- [28] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1 A discussion of principles [J]. *J. Hydrology*, 1970, (10): 282 - 290.

(编辑:徐诗银)

Study and simulation of runoff in upper Heihe River Basin based on VIC - 3L

ZHAO Dengzhong^{1,2}, ZHANG Wanchang², CHENG Xuejun¹

(1. *Spatial Information Technology Application Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*;

2. *School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: In order to solve the problems of scarcity and uneven distribution of meteorological and hydrological stations in west China and express the spatial difference of meteorological element, the mountainous river basin of upper Heihe River is simulated using VIC - 3L model to check the applicability of the model with fine grid scale in arid region, and the parameter transportability and the possibility of modification of the model. The soil parameters and vegetation parameters required by the model are obtained through field measurement, general survey of soil and related reference papers. The simulation result show that except for 2 or 3 days' delay, the simulated variation trend of runoff is consistent with the measured runoff in scale of day and month, and in this scale, the simulation precision in wet year is better than that in dry year. It's verified that the model is applicable to some extent, however it still needs to be further modified.

Key words: VIC - 3L distributed hydrological model; PRISM spatial interpolation model; surface runoff; mountainous river basin of upper Heihe River