

文章编号: 1008-2786-(2014)2-154-09

基于河链结构和 LUCC 的分布式流域水文模型 及径流响应

谢平¹ 李析男^{1*} 朱勇² 雷旭¹ 张波¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072; 2. 上海勘测设计研究院 上海 200000)

摘 要: 为了定量评估土地利用/覆被变化的水文水资源效应,并考虑流域水文效应的空间差异,提出考虑土地利用/覆被变化的分布式流域水文模型。该模型基于 Shreve 河链概念对流域河网进行单元划分,基于中国科学院土地资源分类系统的一级类型,将流域划分为 6 种不同土地利用及覆被变化类型;在每一类土地利用及覆被变化面积上,分别考虑蒸发和下渗的差异,并利用蓄满-超渗耦合产流模型计算该面积上的地表径流量和地面以下径流量;利用地貌汇流模型和线性水库模型将每类面积上的地表径流量和地面以下径流量演算至流域出口断面,从而得到流域的水文过程。模型参数包括流域地貌特征参数、产流参数和汇流参数,前者可以根据地理信息系统技术和遥感技术获得,而后者则需要根据流域的水文资料通过最优化方法求得。利用大理河流域 1981—1990 年的逐日降雨、蒸发及流量资料对该模型进行了参数率定和检验,率定期 1981—1987 年的水量平衡系数为 0.993,年径流深合格率为 100.0%;检验期 1988—1990 年的水量平衡系数为 1.230,径流深合格率为 66.667%,计算结果表明该模型在大理河流域具有良好的适应性。并以 2000 年大理河流域的土地利用/覆被状况为基准,计算得到流域的基准径流深为 30.36 mm,并对大理河流域未来土地利用情况进行情景分析,为充分发挥小流域(或单元)水土保持措施带来的各种效益提供参考依据。

关键词: 水资源;土地利用/覆被变化;分布式水文模型;水文水资源效应;情景分析;大理河流域

中图分类号: P343 P901

文献标志码: A

土地是人工系统和自然系统交互作用的场所,其中人工系统对自然系统作用的结果(如农业化、城市化等),必然会在不同程度上改变土地的覆被状态(如水旱农作物、林草、建设用地等),进而影响到以土地为下垫面的水文循环和水资源形成过程,通常把这种影响称为土地利用/覆被变化带来的水文水资源效应^[1-2]。

土地利用/覆被变化(LUCC, Land use and land cover change)是全球变化研究的热点,“国际地球-生物圈计划”(IGBP)的核心项目(GAIM、BAHC、GCTE、LUCC)就是把土地利用/覆被变化的水文水

资源效应作为全球变化的重要研究内容之一^[3]。目前,有关土地利用/覆被变化的研究方法有对比分析和水文模型法^[4]。前者只关注了土地利用/覆被变化造成的结果,后者则重在揭示土地利用/覆被变化对水文水资源影响的过程和机理。随着计算机技术的不断发展,对比分析法的局限性可以通过数学模型模拟的手段得以克服,采用模型模拟手段来定量评估、预测土地覆被变化对水循环各个环节的影响,在近年来备受关注^[1]。

流域水文模型可分为集总式模型、半分布式模型和分布式模型。集总式水文模型将整个流域作为

收稿日期(Received date): 2013-07-11; 改回日期(Accepted): 2013-11-05。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51179131, 50979075, 50839005, 51190094)。[The project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51179131; 50979075; 50839005; 51190094).]

作者简介(Biography): 谢平(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向为变化环境下的水文水资源。[Xie Ping, Ph.D. Doctoral Supervisor, mainly engaged in hydrology and water resources in changing environment.]E-mail: pxie@whu.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 李析男(1985-),男,博士研究生,研究方向为变化环境下的水文水资源。[Li Xianan, Ph.D., mainly engaged in hydrology and water resources in changing environment.]E-mail: lixianan1985@126.com

一个单元体,能表现出流域整体对输入条件的平均响应,但其明显的缺陷是只考虑水流在单元体内的纵向运动,不能处理不同的土地利用类型和水文过程的区域差异以及流域参数的变异性;半分布式水文模型是介于集总式模型与分布式模型之间的水文模型,其典型代表是以地形为水文过程空间变异性基础的 TOPMODEL 模型^[5],其优势在于弥补了集总式模型将整个流域作为一个单元而造成均匀分布的不足,且结构简单,优选参数少,物理概念明确,在集总式和分布式流域水文模型之间起到了承上启下的作用^[6];分布式水文模型的代表有分布式水文物理模型 SHE 模型^[7]、SWAT 模型^[8]、大尺度陆面水文模型 VIC 模型^[9]、分布式降雨-径流模型 TOPKAPI 模型^[10]、我国的新安江模型^[11]、以及具有物理机制的 PDTank 模型^[12],其特点在于分布式模型根据流域各处地形、土壤、植被、土地利用和降水等的不同,将流域划分为若干不同类型的小单元,在每个小单元上,既考虑了水流在其内部的纵向运动,也考虑了各个小单元之间水量的横向交换^[13]。分布式水文模型可以对流域内部的地理因素(如地貌信息)和地理过程(如径流过程)在不同的时空尺度上进行反馈,可以合理地描述和体现流域内部的时空变异,因此,利用分布式水文模型对流域土地利用/覆被变化进行研究具有更大的优势。

本文结合谢平^[1]等提出的集总式模型 LWHM - LUCC (Lumped Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change),建立一个考虑土地利用/覆被变化的分布式流域水文模型 DWHM - LUCC (Distributed Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change),结合大理河流域的水文资料对 DWHM - LUCC 模型的参数进行率定与检验,并基于该模型对大理河流域的土地利用/覆被变化进行情景假设和分析,以便进一步利用 DWHM - LUCC 模型定量评估大理河流域土地利用/覆被变化的水文水资源效应,为制定大理河流域水土保持规划和水资源规划等提供科学依据。

1 DWHM - LUCC 模型的建立

1.1 单元划分

单元划分是流域水文模型研究河系结构的基础,本文采用 Shreve 河链概念^[14]对流域单元进行划

分和计算,认为流域内的河系是由大小不同的支流交汇而成的树枝状结构(图1),在结构中包括结点集和界线集,分别为河源、节点、河口、(内、外)链。单元划分步骤如下:

1. 以外链的汇水面积(自然分水线所包围的面积)为“外单元”,其上可以进行地表径流和地下径流的汇流计算。两个“外单元”汇合之后,流入下游的内链河段;

2. 以直接流入内链的汇水面积(区间面积)为“内单元”,其上除了进行区间面积上地表径流和地下径流的汇流计算外,还要进行内链上游节点至下游节点之间的河道流量演算;

3. 一个河源数目为 N 的河系共有 $2N - 1$ 个单元,其中外单元 N 个,内单元 $N - 1$ 个。这种单元划分方法是唯一的;

4. 从外单元向内单元依次进行流域产汇流计算和河道流量演算,直至求出流域各个节点以及出口断面的流量过程。

如图2所示,该流域是一个大小为 $N = 4$ 的河系,共有7个单元,其中外单元4个,内单元3个。

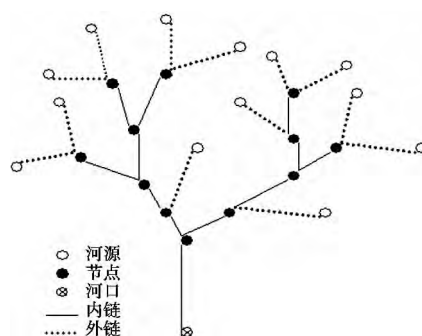


图1 河系结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of river system

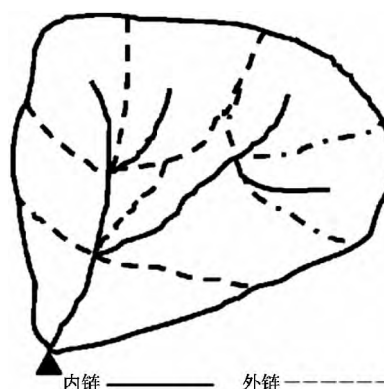


图2 单元划分示意图

Fig. 2 The diagram of unit division

1.2 土地分类

为了反映流域土地利用/覆被变化类型,同时考虑到流域水文模型的参数太多而造成参数确定困难,本文根据中国科学院土地资源分类系统^[15]的一级类型,将土地利用/覆被变化分为耕地、林地、草地、水域、城乡和工矿及居民用地、未利用土地6个类型。

1.3 流域水文结构

分布式流域水文模型将整个流域划分成若干个子流域(或单元),每一个子流域(或单元)在一定的离散尺度下可以认为其内部影响因子的属性是相对均一的,即地理过程响应具有相似性。对每一个子流域(或单元)从水平方向上可分为不同类型的土地利用面积,其上分别进行产流计算;从垂直方向上可分为地表径流和地面以下径流两种成分,对其分别进行汇流计算。模型结构框架如图3所示,计算流程如下:1. 根据土地资源分类系统的一级类型将每个子流域(或单元)划分为不同的土地利用变化类型;2. 在每一类土地利用面积上分别考虑蒸发和下渗等产流要素的差异,采用蓄满-超渗耦合产流模型^[9]计算不同土地利用面积上的地表径流量和地面以下径流量;3. 每个子流域(或单元)地表径流量

等于不同土地利用面积上地表径流量之和,流域地面以下径流量等于不同土地利用面积上地面以下径流量之和;4. 假设不同土地利用面积上地表径流的汇流机理相同,地面以下径流的汇流机理也相同,并采用汇流模型对子流域(或单元)地表径流量进行演算至流域出口断面,采用线性水库模型对整个流域地面以下径流量演算至流域出口断面,从而得到流域的水文过程。

1.4 单元产流模型

单元的产流模型是采用武汉大学锥文生^[16]等提出的蓄满-超渗兼容模型(简称兼容模型),其特点在于同时考虑蓄满产流模式和超渗产流模式的共同作用,将蓄水容量曲线和下渗能力曲线有机地结合起来,其结构见图4。

1.5 单元汇流模型

选用逆高斯分布地貌汇流模型^[17]模拟流域地面径流中坡面和河道的水流运动过程,采用线性水库模型模拟地面以下径流的水流运动过程。

逆高斯分布导出于在给定瞬时点输入后独立单一方向颗粒(或质点)移动的到达时间,这种颗粒的运动起因于微小独立随机增量,而且增量的分布与颗粒位置无关。逆高斯分布地貌汇流模型的瞬时单

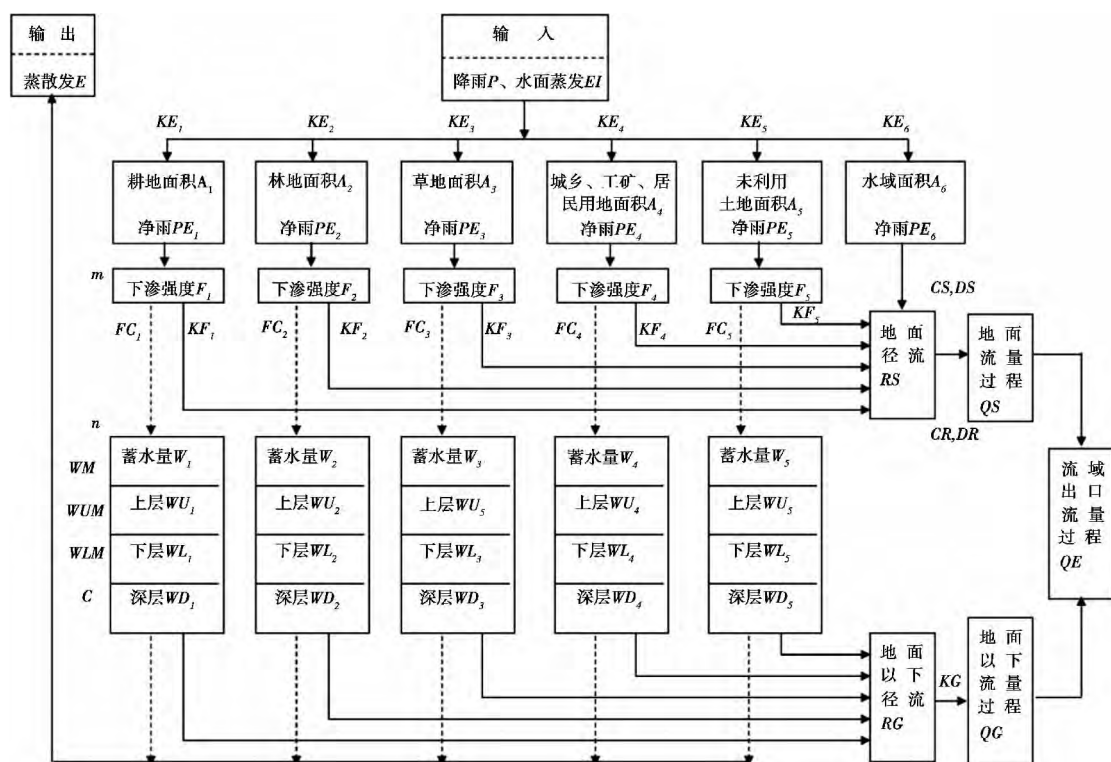


图3 流域水文单元结构

Fig. 3 Frame diagram of the unit

位线为

$$f(t) = \left[\frac{\mu\varphi}{2\pi t^3} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{\mu\varphi}{2t} + \varphi - \frac{\varphi t}{2\mu} \right] \quad (1)$$

式中 π 为圆周率, t 为时间变量, $\exp(\cdot)$ 为指数函数, μ 、 φ 为参数, 且满足^[17] $\mu = L/C$ 和 $\varphi = CL/(2D)$, 其中 C 为洪水波的波速, D 为洪水波的扩散系数, L 为洪水波在坡面或河道的传播距离。在处理坡面汇流时, 其传播距离近似地取为 $L_{\text{坡地}} = F/(2L_{\text{河道}})$, 其中 F 为流域的面积, $L_{\text{河道}}$ 为流域主河道的长度, 即传播距离。

结合全国瞬时单位线参数地区综合理论与公式, 建立单元汇流参数 C 、 D 的地区综合公式如下

$$C_{i,1} = \alpha_1 \left(\frac{F_i}{J_i} \right)^{\beta_1} \left(\frac{F_i}{2L_i} \right)^{\gamma_1} \quad (2)$$

$$D_{i,1} = \varepsilon_1 \left(\frac{F_i}{J_i} \right)^{\varphi_1} \left(\frac{F_i}{2L_i} \right)^{\eta_1} \quad (3)$$

$$C_{i,2} = \alpha_2 \left(\frac{F_i}{J_i} \right)^{\beta_2} \left(\frac{F_i}{2L_i} \right)^{\gamma_2} \quad (4)$$

$$D_{i,2} = \varepsilon_2 \left(\frac{F_i}{J_i} \right)^{\varphi_2} \left(\frac{F_i}{2L_i} \right)^{\eta_2} \quad (5)$$

式中 $C_{i,1}$ 、 $D_{i,1}$ 分别为单元的坡面汇流洪水波波速与扩散系数; $C_{i,2}$ 、 $D_{i,2}$ 分别为单元的河道汇流洪水波波速与扩散系数; i 表示划分的单元数; F_i 、 J_i 、 L_i 分别为单元的面积、主河道坡降或者单元坡降、主河道长度。

1.6 DWHM-LUCC 模型参数

模型参数由流域地貌特征参数、流域产流参数和流域汇流参数三类组成。其中, 流域地貌特征参数包括反映流域特征的流域面积、坡地或河道的长

度和坡度、河网水系结构等, 以及不同土地覆被类型及面积等。流域产流参数包括反映全流域平均情况的参数 WM 、 N 、 M 、 C , 以及反映不同土地覆被类型的蒸发和下渗参数 KE_i 、 FC_i 、 KF_i ($i = 1 \sim 6$), 其中建设用地可看作是不透水面, 其上的降雨全部产生地表径流; 水域不考虑下渗。流域汇流参数包括坡地、河道和地下不同水流路径的汇流参数 $C_{i,1}$ 、 $D_{i,1}$ 、 $C_{i,2}$ 、 $D_{i,2}$ 、 KG 。流域地貌特征参数可以根据地理信息系统技术和遥感技术获得; 而模型产汇流参数则需要根据流域的降雨、蒸发和流量资料通过最优化方法推求。

表1 DWHM-LUCC 模型参数表

Table 1 The parameters of DWHM-LUCC

序号	参数名	参数值	参数含义
1	WM	94.690 2	流域平均蓄水容量 (mm)
2	N	1.269 7	蓄水容量分布曲线的指数
3	M	1.141 3	下渗容量分布曲线的指数
4	C	0.191 5	深层蒸发系数
5	KE_1	1.474 2	林地蒸发皿折算系数
6	FC_1	1.519 9	林地流域稳定下渗率 (mm/h)
7	KF_1	0.430 2	林地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
8	KE_2	0.361 1	草地蒸发皿折算系数
9	FC_2	2.165 5	草地流域稳定下渗率 (mm/h)
10	KF_2	0.289 3	草地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
11	KE_3	1.658 3	耕地蒸发皿折算系数
12	FC_3	2.364 2	耕地流域稳定下渗率 (mm/h)
13	KF_3	0.350 8	耕地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
14	KG	0.960 4	地面以下径流日消退系数
15	α_1 、 α_2	4.89、4.69	
16	β_1 、 β_2	0.27、0.79	
17	γ_1 、 γ_2	1.56、0.43	
18	ε_1 、 ε_2	2.32、5.12	
19	φ_1 、 φ_2	0.48、0.25	
20	η_1 、 η_2	0.81、1.75	

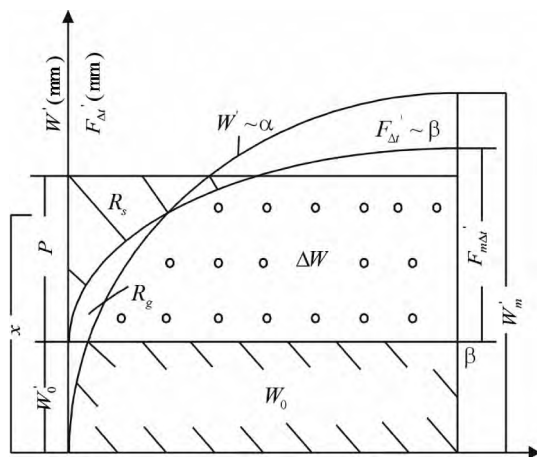


图4 兼容模型结构示意图

Fig. 4 The schematic figure of volume curve in runoff yield model coupling of excess infiltration and excess storage

2 DWHM-LUCC 模型应用

2.1 大理河流域概况

大理河是无定河的最大支流, 全长 170 km, 流域面积 3 906 km², 其出口控制站为绥德站。该流域地处黄土丘陵沟壑区, 地形破碎, 植被稀疏, 水土流失严重。1970 年以后, 由于流域综合治理, 径流泥沙发生了很大变化, 是研究黄河流域生态环境建设等人类活动影响比较典型的代表性流域。大理河上最大的支流是小理河流域, 其控制站为李家河站, 控

制面积 807 km²。据统计资料显示,1960—1970 年流域多年平均降水量为 478 mm,年径流量为 $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3$,年输沙量 $6\,540 \times 10^4 \text{ t}$,平均年侵蚀模数为 $1.68 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,局部地区高达 $3 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。该流域 1954 年开始水文观测,1959—1969 年在流域内开展过大面积的径流实验,为分析流域治理的减水减沙效益提供了科学依据。

数据来源:土地利用资料以中国科学院地理科学与资源研究所资源数据中心的 1990 年、1995 年和 2000 年 3 期 1:10 万土地利用数据为基础;DEM 数据来自于国家基础地理信息中心 1:100 万地形数据;降雨、径流、蒸发数据分别来自于大理河流域各水文测站的实测日资料。

2.2 大理河流域信息提取

大理河子流域地貌信息提取主要有如下 3 个步骤:1. 流域 DEM 导入(1 km × 1 km)及坐标系定义;2. 流域边界及数字化河流的导入;3. 子流域的划分。

利用 AVSWAT 工具对大理河子流域进行划分(图 5),得到各单元的面积、主河道长度、主河道坡降以及单元之间的拓扑关系,如表 1 所示。

在 AVSWAT 平台下,将提取的子流域栅格数据与土地利用栅格数据相叠加,进一步提取出大理河流域 1990 年各单元的土地利用信息,如表 2 所示。由于大理河流域内水域、建设用地、未利用土地所占比例很小,因此只考虑林地、草地、耕地 3 种主要的土地利用类型。

2.3 参数率定与检验

2.3.1 参数率定方法

本文采用单纯形法来率定模型的产汇流参数,其目标函数为

$$\min F(\text{产汇流参数}) = \sum_{j=1}^n (R_{j\text{实}} - R_{j\text{计}})^2 \quad (6)$$

式中 $R_{j\text{实}}$ 为第 j 年的实测径流量; $R_{j\text{计}}$ 为第 j 年的计算径流量。

模型的模拟精度采用多年径流量平衡系数 R 和多年径流深合格率 $DR(\%)$ 来评定。水量平衡系数 R 定义为多年计算总径流量与实测总径流量的比值,表达式为

$$R = \sum_{i=1}^n R_{j\text{计}} / \sum_{i=1}^n R_{j\text{实}} \quad (7)$$

优选的模型参数,应使水量平衡系数 R 尽量等于或接近于 1。径流深合格率 $DR(\%)$ 定义为

$$DR(\%) = N_{\text{合格}} / N \times 100\% \quad (8)$$

式中 $N_{\text{合格}}$ 为计算径流深与实测径流深的相对误差中小于等于 20% 的年数; N 为模拟计算的总年数。

2.3.2 参数率定结果

结合表 1 中的参数率定结果,对大理河流域 1981—1990 年的径流资料进行模拟和校核检验,检验结果如表 3 和图 6 所示,率定期 1981—1987 年的水量平衡系数为 0.933,径流深合格率为 100%;校核期 1988—1990 年的水量平衡系数为 1.230,径流深合格率为 66.67%。根据校核检验的结果,可认为将 DWHM-LUCC 用于预测大理河流域地表水资源量是可行的。



图 5 大理河子流域划分结果

Fig. 5 The result of sub-watershed partitioning in the study area

表 2 大理河流域 1990 年各单元土地利用信息

Table 2 The information of land use in 1990 in the study area /%

单元序号	林地	草地	耕地	单元序号	林地	草地	耕地
1	0.0	45.6	54.4	15	9.3	39.8	50.9
2	3.9	51.0	45.1	16	3.3	43.5	53.2
3	1.7	43.6	54.7	17	6.1	41.3	52.6
4	3.3	37.7	59.0	18	15.6	44.4	40.0
5	1.1	40.8	58.1	19	8.2	45.9	45.9
6	5.7	38.5	55.8	20	5.7	39.6	54.7
7	11.0	35.4	53.6	21	10.0	27.5	62.5
8	0.7	55.7	43.6	22	25.0	62.5	12.5
9	7.8	49.0	43.2	23	6.1	48.5	45.4
10	11.2	33.1	55.7	24	4.1	43.8	52.1
11	12.3	42.5	45.2	25	0.0	50.9	49.1
12	11.5	38.5	50.0	26	12.3	29.6	58.1
13	15.1	28.0	56.9	27	1.1	56.4	42.5
14	2.3	55.3	42.4	28	12.4	24.2	63.4

表 3 DWHM - LUCC 在率定期和检验期的年径流深模拟结果

Table 3 The results of calibration and validation

年份	实测径流深 /mm	计算径流深 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
1981	33.1	31.8	-1.3	-3.93
1982	36.5	34.7	-1.8	-4.93
1983	26.7	29	2.3	8.61
1984	30.2	30.4	0.2	0.66
1985	38.7	35.1	-3.6	-9.30
1986	26.4	28.6	2.2	8.33
1987	29.3	29.6	0.3	1.02
率定期	水量平衡 系数	0.993	径流深 合格率/%	100.00
1988	41.2	42.5	1.3	3.16
1989	26.7	43.4	16.7	62.55
1990	35.8	41.7	5.9	16.48
校核期	水量平衡 系数	1.230	径流深 合格率/%	66.667

2.3.3 节点验证

节点验证是指利用模型率定的参数来验证流域中间若干单元出口处的年径流量(未参加率定),以检验模型是否能真实反映出流域空间的水文过程。

对有实测资料的流域内单元出口控制站进行节点验证,本文选取青阳岔控制站为代表站(如图 5

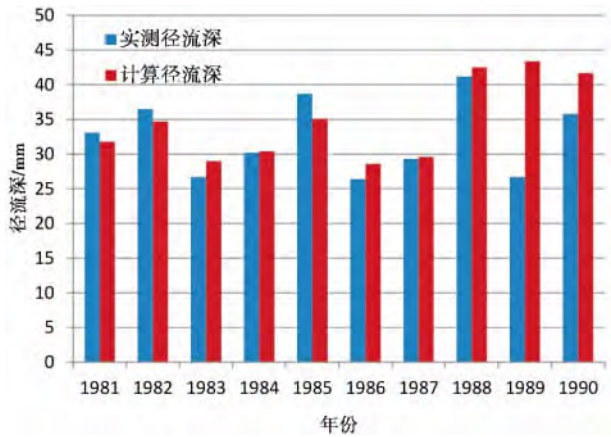


图 6 DWHM - LUCC 年径流深模拟结果比较图

Fig. 6 The comparison with annual runoff depth with observed and simulation value in the study area

所示)。利用已率定的参数进一步计算出青阳岔站的年径流深,将其与实测年径流深进行比较,如表 4 所示。由计算结果可见,1981—1990 年期间模拟的水量平衡系数为 0.980,径流深合格率达 80%,这说明 DWHM - LUCC 模型应用于大理河流域的年径流量预测是适宜的。

表 4 青阳岔站年径流深检验结果

Table 4 The result of annual runoff depth in the validation station

年份	实测径流深 /mm	计算径流深 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
1981	34.98	32.59	-2.39	-6.83
1982	37.36	32.50	-4.86	-13.01
1983	31.12	32.00	0.88	2.83
1984	32.18	32.20	0.02	0.06
1985	41.88	32.30	-9.58	-22.87
1986	36.30	31.90	-4.4	-12.12
1987	35.25	32.54	-2.71	-7.69
1988	41.81	48.94	7.13	17.05
1989	22.28	40.9	18.62	83.57
1990	42.99	47.5	4.51	10.49
合格率	水量平衡 系数	0.980	径流深 合格率/%	80.00

2.4 基于 DWHM - LUCC 的土地利用/覆被变化情景分析

2.4.1 情景设计

小流域是水土流失的基本单元,以小流域为单元的综合治理,是水土保持工作的成功经验。在情

景设计时,充分考虑流域地理过程和地理特征参数的空间变异性,针对不同的小流域(或子流域)来设计不同的土地覆被情景,从而发挥分布式流域水文模型的优势。如图5所示,以黑色粗线为界,黑线左侧区域为河源涧沟壑区,出口控制站为青阳岔;黑线右侧区域为丘陵区,控制站为绥德,为大理河流域的出口控制站。结合流域的水土保持方略^[18],河源涧区的水土保持措施和生态环境建设应以固沟保涧为主,基本农田建设应与造林种草同时进行,走农、林、牧并举的发展道路;丘陵区的水土保持措施应以植被建设和坡面、沟道水土保持工程建设为主,尽量将洪水泥沙就地拦蓄。由此可见,大理河流域中无论是河源涧区、还是丘陵区,合理的实施退耕还林还草政策是比较有效的水土保持措施。以典型年2000年的土地利用状况为基准,提取出大理河流域各单元在基准年的土地利用状况。作为示例,此处仅挑选出比较典型的几个单元来设置合理的土地覆被组合(表5),运用DWHM-LUCC模型计算出在不同情景下大理河流域的情景径流量(表6、图7)。

2.4.2 结果讨论

以2000年大理河流域的土地利用/覆被状况为基准,计算得到流域的基准径流深为30.36 mm,相应的径流量为 $11\,820.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。设计的12种土地覆被情景中,情景1~情景4是对河源涧区的单

表5 大理河流域各情景下不同土地利用类型面积占全流域面积的比例

Table 5 The information of land use in 2000 in the study area about different scenario /%

情景序号	林地	草地	耕地	备注
1	10.56	39.66	49.78	单元20退耕还林
2	6.84	43.38	49.78	单元20退耕还草
3	15.63	39.66	44.71	20、22、23、25、26、27退耕还林
4	6.84	48.45	44.71	20、22、23、25、26、27退耕还草
5	8.26	39.66	52.08	单元1退耕还林
6	6.84	41.08	52.08	单元1退耕还草
7	10.30	39.66	50.04	单元16退耕还林
8	6.84	41.97	51.19	单元16退耕还草
9	9.39	39.66	50.95	单元28退耕还林
10	6.84	42.21	50.95	单元28退耕还草
11	60.34	39.66	0.00	所有单元退耕还林
12	6.84	93.16	0.00	所有单元退耕还草
基准年	6.84	39.66	53.50	基准年为2000年

表6 大理河流域基准年与各情景下的年径流变化对照表

Table 6 Comparison with annual runoff and base year in the study area

情景序号	基准径流		情景径流		绝对变化		相对变化	
	/mm	/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	/mm	/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	/mm	/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	/%	
1	30.36	11 820.8	30.45	11 853.3	0.09	32.5	0.30	
2	30.36	11 820.8	31.62	12 311.1	1.26	490.3	4.15	
3	30.36	11 820.8	30.56	11 897.5	0.20	76.7	0.66	
4	30.36	11 820.8	33.34	12 979.2	2.98	1 158.4	9.82	
5	30.36	11 820.8	30.40	11 833.2	0.04	12.4	0.13	
6	30.36	11 820.8	30.84	12 008	0.48	187.2	1.58	
7	30.36	11 820.8	30.44	11 851	0.08	30.2	0.26	
8	30.36	11 820.8	31.15	12 125.2	0.79	304.4	2.60	
9	30.36	11 820.8	30.42	11 843.1	0.06	22.3	0.20	
10	30.36	11 820.8	31.23	12 156.9	0.87	336.1	2.87	
11	30.36	11 820.8	31.56	12 287.5	1.20	466.7	3.95	
12	30.36	11 820.8	48.48	18 871.3	18.12	7 050.5	59.68	

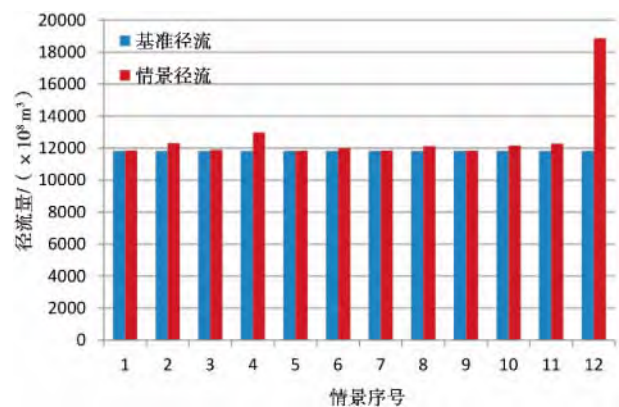


图7 大理河流域基准年与各情景下的年径流量比较图

Fig. 7 The diagram of annual runoff depth comparison with base year in the study area about different scenario

元(或小流域)实施合理的水土保持治理措施,情景径流量相比基准径流量分别增加0.3%、4.1%、0.6%、9.8%。谢平等^[1]已经论证了无定河流域下垫面的蒸发规律,应用到大理河流域则是耕地>林地>草地。所以实行退耕还林、退耕还草政策(情景1~情景4)增加了全流域的径流量,起到涵养水源的作用。情景5~情景10是对丘陵区的单元(或小流域)实施水土保持治理措施,情景径流量相对增加了0.1%、1.6%、0.3%、2.6%、0.2%、2.8%。情景11、情景12是针对大理河流域所有单元来实施的,即所有单元同时实施退耕还林或退耕还草措施,这是一种临界状况下的情景设计,其情景径流量相对增加了3.9%、59.6%。由此可见,对大理河流

域各单元(或小流域)实施退耕还林、退耕还草政策,均会使流域的径流量增加,但是退耕还草措施使流域水量增加的幅度大于退耕还林措施。因此,在不同单元实施不同的水土保持措施,一方面起到涵养水源的作用,另一方面可以改变流域的产业布局,走农、林、牧共同发展的道路,充分发挥水土保持措施带来的各种效益。

3 结语

1. DWHM-LUCC模型采用Shreve河链概念进行单元划分,在结构中考虑了土地利用及覆被变化的类型,结合中国科学院土地资源分类系统,便于定量评估土地利用及覆被变化的水文水资源效应。

2. 模型采用蓄满-超渗耦合产流模型进行产流计算,结合逆高斯分布地貌汇流模型和全国瞬时单位线参数地区综合理论与公式建立地表径流汇流模型,并采用线性水库模型进行地下径流汇流计算,适用于半湿润半干旱地区的水文模拟。

3. 模型直接利用GIS技术提取河网、坡度、河长、面积等地貌参数,利用遥感技术提取土地利用及覆被变化等地貌参数,可以充分考虑流域下垫面因素对水文过程的影响。根据流域的降雨、蒸发和流量资料通过最优化方法推求模型产汇流参数,可以保证模型的计算精度。

4. 利用大理河流域1981—1990年的逐日降雨、蒸发及流量资料对该模型进行了参数率定和检验,率定期1981—1987年的水量平衡系数为0.993,年径流深合格率为100.0%;检验期1988—1990年的水量平衡系数为1.230,径流深合格率为66.667%,计算结果表明该模型在大理河流域具有良好的适用性。

5. 模型在大理河流域开展应用研究,不仅可以模拟流域出口的径流量,而且每个单元出口的径流过程也可以模拟出来。其设计的情景组合也是针对每个子流域的,即每个子流域实施水土保持措施后,不仅改变本单元的径流量,而且对整个大理河流域出口的径流量也有影响。

6. 以2000年大理河流域的土地利用/覆被状况为基准,对大理河流域设计12种土地覆被情景,为制定流域水土保持规划和水资源规划等提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] Xie Ping, Zhu Yong, Chen Guangcai, et al. A lumped watershed hydrological model considering land use and land cover change and its application [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3): 257-264 [谢平,朱勇,陈广才,等.考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用[J].山地学报,2007,25(3):257-264]
- [2] Ou Chunping, Xia Jun, Wang Zhonggen, et al. LUCC influence on SWAT hydrological simulation—a case study of Haihe river basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 124-129 [欧春平,夏军,王中根,等.土地利用/覆被变化对SWAT模型水循环模拟结果的影响研究——以海河流域为例[J].水力发电学报,2009,28(4):124-129]
- [3] Roland E Schulze. Modeling hydrological responses to land use and climate change: a southern African perspective [J]. Ambio, 2000, 29(1): 13-17
- [4] Xie Ping, Dou Ming, Zhu Yong, et al. Watershed hydrological model: hydrology and water resources effect of climate change and land use and land cover changes (LUCC) [M]. Beijing: Science Press, 2010. [谢平,窦明,朱勇,等.流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应[M].北京:科学出版社,2010.]
- [5] Beven K J, Lamb R, Quinn P, Romanowicz R, Freer J. TOPMODEL [G]//V P Singh: Computer Models of Watershed Hydrology, Chapter 18, 627-668. Water Resources Publications, 1995.
- [6] Hu Caihong, Wang Jinxing. Watershed runoff yield and runoff and hydrology model [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Press, 2009. [胡彩虹,王金星.流域产汇流模型及水文模型[M].郑州:黄河水利出版社,2009.]
- [7] Refsgaard J C, Seth S M. Application of the SHE to catchments in India Part 1, General results [J]. Journal of Hydrology, 1992, 140(1-4): 1-23
- [8] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parameterization: a case study in the Thyle catchment, Belgium [J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27-39
- [9] Xie Z H, Su F G, Liang X, et al. Application of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC [J]. Advances in Atmospheric Science, 2003, 20(2): 165-172
- [10] Todini E, Ciarapica L. The TOPKAPI model. In Singh V P. Mathematical Model of large Watershed Hydrology (Chapter 12) [M]. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 2001: 471-506
- [11] Li Zhijia, Yao Cheng, Wang Zhonghua. Development and application of grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(2): 131-134 [李致家,姚成,汪中华.基于栅格的新安江模型的构建和应用[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):131-134]
- [12] Chen R S, Pi L C. Diffusive tank model application in rainfall-runoff analysis of upland fields in Taiwan [J]. Agricultural Water Management, 2004, 70(1): 39-50
- [13] Xiong Lihua, Guo Shenglian. Distributed Watershed Hydrological

- Model [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2004 [熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.]
- [14] Shreve, R. L. Infinite topologically random channel networks [J]. *Journal of Geology*. 1967, 75: 175–186
- [15] Xiao Pengfeng, Liu Shunxi, Feng Xuezhi, et al. Appraisal and Code Conversion of Land Use/Cover Classification Systems Based on Re-motely Sensed Data [J]. *Remote Sensing Information*, 2003, (4): 54–58 [肖鹏峰, 刘顺喜, 冯学智, 林广发. 基于遥感的土地利用与覆被分类系统评述及代码转换 [J]. 遥感信息, 2003, (4): 54–58]
- [16] Luo Wensheng, Hu Chunqi, Han Jiatian. Research on a model of run-off yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, (4): 6–13 [雒文生, 胡春歧, 韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究 [J]. 水土保持学报, 1992, (4): 6–13]
- [17] Xie Ping, Liang Ruiju. An inverse Gaussian distribution geomorphologic instantaneous unit hydrograph [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, (3): 9–15 [谢平, 梁瑞驹. 逆高斯分布地貌瞬时单位线 [J]. 水利学报, 1997, (3): 9–15]
- [18] Hao Fenghua, Ai Shaozhou, Liu Lifeng, et al. Discussion on treatment measures of soil and water conservation in Wuding river basin [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004, (6): 7–8 [郝凤华, 艾绍周, 刘立峰. 无定河流域水土保持治理措施布局探讨 [J]. 中国水土保持, 2004, (6): 7–8]

Runoff Response with Distributed Hydrological Model Based on River Structure and LUCC

XIE Ping¹, LI Xi'nan¹, ZHU Yong², LEI Xu¹, ZHANG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shanghai Investigation Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to evaluate quantitatively the hydrology and water resources effects of land use and land cover change (LUCC), a distributed watershed hydrological model considering land use and land cover change (ZWHM-LUCC) is developed. In ZWHM-LUCC, divided basin into the units based on Shreve river chain concept, and based on the first-order type of land resources classifying system of Chinese Academy of Sciences, a basin is divided into six different types of LUCC. On the area of each type of LUCC, considering the difference of evaporation and infiltration respectively, the surface runoff and the runoff below surface are calculated by using runoff yield model coupling of excess infiltration and excess storage. The surface runoff discharge and the runoff below surface discharge of each area are routed to the outlet section of basin by using geomorphology concentration model and linear reservoir model, thus the basin hydrology discharge process is obtained. The model parameters include watershed geomorphologic characteristic parameters, runoff yield parameters and concentration parameters. The former can be obtained by geography information system technology and remote sensing technology, but the latter need to be derived by the optimization method according to watershed hydrological data. According to the daily rainfall, evaporation and discharge data of Dali River Basin during 1980–2000, the parameters of the model were calibrated and verified. The coefficient of water balance (R) is 0.993 and the qualified rate of annual runoff depth (DR) is 100% during calibration period 1986–2000, and the R is 1.230 and the DR is 66.67% during calibration verification 1980–1985. The calculated results indicate that this model has good adaptability in Dali River Basin. Based on the land use/cover situation of Dali river basin, calculated the benchmark runoff depth was 30.36 mm, and divided the scenarios about for future land utilization in Dali river basin, to the benefit of exert kinds of benefits on the unit (or small basin) water and soil conservation planning and water resources planning.

Key words: water resource; land use and land cover change; distributed watershed hydrological model; hydrology and water resources effects; scenario analysis; Dali River Basin