

考虑土地利用/覆被变化的集总式 流域水文模型及应用

谢平,朱勇,陈广才,雷红富,李晶

(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)

摘要: 为了定量评估土地利用/覆被变化的水文水资源效应,提出考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型。该模型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。利用无定河流域1980~2000年的逐日降雨、蒸发及流量资料对该模型进行了参数率定与检验,率定期1986~2000年的水量平衡系数为0.999,年径流深合格率为100.0%;检验期1980~1985年的水量平衡系数为0.953,径流深合格率为83.3%,计算结果表明该模型在无定河流域具有良好的适应性。对模型产汇流参数进行合理性分析,得出无定河流域不同土地利用类型蒸发能力的相对大小关系为耕地>林地>草地>未利用土地。

关键词: 土地利用/覆被变化;集总式流域水文模型;水文水资源效应;无定河流域;参数率定与检验

中图分类号: F301.24 P343

文献标识码: 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(LUCC)带来的水文水资源效应。

自1970年以来,一些国际组织先后开展了土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究,如国际地球-生物圈计划(IGBP)的核心项目(GAM、BAHC、GCTE、IUCC)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^[1]。其研究方法也发生了较大的转变,由传统的试验流域法、统计分析方法转向水文模型方法,由只关注土

地利用/覆被变化造成的结果转向揭示土地利用/覆被变化对水文水资源影响的过程与机理。就水文模型方法而言,研究流域水文过程的数学模型,自1960年代以来,随着计算机技术的发展,有了长足的进步,但目前利用流域水文模型模拟土地覆被变化影响的研究仍处在起步阶段,尤其是应用遥感信息获取技术和地理信息系统技术建立流域水文模型模拟气候与LUCC水文水资源效应的研究工作仍显得薄弱^[2]。

地表覆被的变化通过对蒸发和下渗的影响直接作用于水文过程,如何在流域水文模型的结构和参数中直接反映这方面的影响,是当前全球变化研究中的热点和难点问题之一。本文将基于中国科学院土地资源分类系统^[3]、蓄满-超渗耦合产流模

收稿日期(Received date): 2007-03-12; 改回日期(Accepted): 2007-04-15.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(50579052) [Project (50579052) supported by National Natural Science Foundation of China]

作者简介(Biography): 谢平(1963-),男,汉族,湖北省松滋市人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事水文水资源及水环境研究。 [Xie Ping (1963-), male Han nationality, born in Songzi Hubei professor PH. Doctor, mainly engaged in hydrology, water resources and water environment. E-mail: xiepi@whu.edu.cn]

型^[4]、地貌汇流模型^[5]和线性水库模型, 建立一个考虑土地利用 / 覆被变化的集总式流域水文模型 LWHM - LUCC (Lumped Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change), 并结合无定河流域的水文资料对 LWHM - LUCC 模型的参数进行率定与检验, 以便进一步利用 LWHM - LUCC 模型定量评估无定河流域土地利用 / 覆被变化的水文水资源效应, 为制定无定河流域水土保持规划和水资源规划等提供科学依据。

1 LWHM - LUCC 模型建立

1.1 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^[3]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, 见表 1。

表 1 土地资源分类系统一级类型

Table 1 The first-order type of land resources classifying system

编号	名称	备注
1	耕地	包括水田、旱地、其他种植农作物的土地
2	林地	包括有林地、灌木林、疏林地、其他林地及林业用地
3	草地	包括高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、其他草地
4	水域	包括河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地及其他水域
5	城乡、工矿、居民用地	包括城镇用地、农村居民点、建设用地及其他用地
6	未利用土地	包括沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地及其他未利用土地

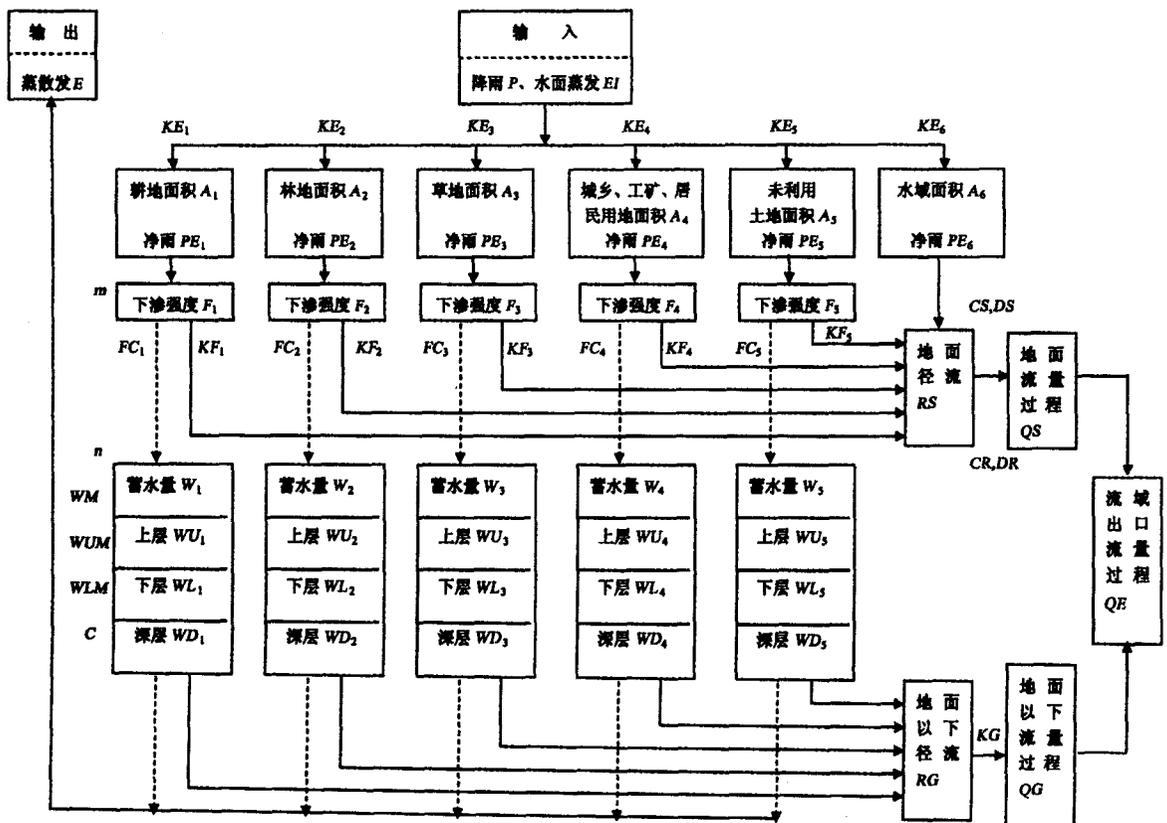


图 1 LWHM - LUCC 模型结构框图

Fig. 1. Framed diagram of LWHM - LUCC model

上述分类并不是唯一的, 有时为了研究目标的需要, 可以结合研究区域的实际土地覆被类型, 将一级类型进一步细分。例如, 如果流域内耕地中的水田和旱地比重均较大, 考虑到水田和旱地的蒸发下渗差异, 可将耕地分为旱地和水田两类; 又如, 如果研究区域沼泽地比重较大, 可以把沼泽地单独提取出来归为一类等。

1.2 流域水文结构

流域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, 其水文结构如图 1 所示, 图中方框内为水文常数和变量, 方框外为水文模型的参数。计算流程如下:

1. 根据土地资源分类系统的一级类型将流域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^[4]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. 流域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作用相同, 地面以下径流的汇流作用也相同, 并分别采用逆高斯分布地貌汇流模型^[5]和线性水库模型将流域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。

1.3 蓄满 - 超渗耦合产流模型

针对半湿润半干旱地区的产流特点, 雒文生等 (1992) 提出了蓄满 - 超渗耦合产流模型^[4], 其核心是两条曲线, 一条是流域下渗能力曲线, 另一条是流域蓄水容量曲线, 见图 2。流域下渗能力曲线主要用来分析降雨空间分布均匀情况下超渗产流面积变化问题, 计算由于降雨强度超过下渗能力而产生的地面净雨过程; 流域蓄水容量曲线主要用来分析降雨空间分布均匀情况下蓄满产流面积变化问题, 计算由于土壤含水量达到田间持水量后超蓄而产生的地下净雨过程。

流域下渗能力曲线采用霍顿 (R. E. Horton) 下渗公式, 即

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (1)$$

式中 f 为 t 时刻的下渗能力 (mm/h); f_c 为稳渗串

(mm/h); f_0 为初始下渗能力 (mm/h); k 为与土壤透水特性有关的下渗能力曲线指数 (h^{-1})。

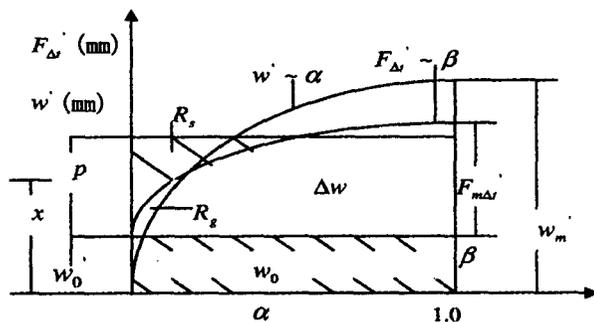


图 2 蓄满 - 超渗耦合产流模型容量曲线示意图
Fig. 2 The schematic figure of volume curve in runoff yield model coupling of excess infiltration and excess storage

流域时段下渗容量分配曲线采用 m 次抛物线型

$$\beta = 1 - \left(1 - \frac{F'_{\Delta t}}{F'_{m\Delta t}}\right)^m \quad (2)$$

式中 $F'_{\Delta t}$ 为某点的下渗容量 (mm); $F'_{m\Delta t}$ 为流域时段下渗容量 $F'_{m\Delta t}$ 下流域最大的点时段下渗容量 (mm); β 为相对面积, $\leq F'_{\Delta t}$ 表示的面积占流域面积的比值; m 为经验性指数。

流域蓄水容量分配曲线采用 n 次抛物线型, 即

$$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{w'}{w'_m}\right)^n \quad (3)$$

式中 w' 为点蓄水容量 (mm); w'_m 为流域的最大点蓄水容量 (mm); α 为相对面积, 表示 $\leq w'$ 面积占流域面积的比值; n 为经验性指数。

1.4 地貌汇流模型

选用逆高斯分布地貌汇流模型^[5]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位线为

$$f(t) = \left[\frac{\mu\varphi}{2\pi t}\right]^{1/2} \cdot \exp\left[-\frac{\mu\varphi}{2t} + \varphi - \frac{\varphi^2}{2t}\right] \quad (4)$$

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^[5] $\mu = \frac{L}{C}$ 和 $\varphi = \frac{CL}{2D}$, 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。

“线性水库”的瞬时单位线为

$$h(t) = \frac{1}{k} \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (5)$$

式中 k 为蓄泄系数(或称滞时), $\exp(\cdot)$ 为指数函数。

1.5 LWHM - LUCC 模型参数

模型参数可分为三类: 流域地貌特征参数、流域产流参数以及流域汇流参数。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。如表 2 所示, 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 ($i=1\sim 6$),

表 2 LWHM - LUCC 模型参数表

Table 2 Parameters of LWHM - LUCC model

序号	参数名	参数值	参数含义
1	WM	94.797 120	流域平均蓄水量 (mm)
2	N	0.265 860	蓄水量分布曲线的指数
3	M	0.251 499	下渗容量分布曲线的指数
4	C	0.254 115	深层蒸发系数
5	KE_1	0.486 413	林地蒸发皿折算系数
6	FC_1	2.120 189	林地流域稳定下渗率 (mm/h)
7	KF_1	0.212 062	林地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
8	KE_2	0.219 165	草地蒸发皿折算系数
9	FC_2	2.157 161	草地流域稳定下渗率 (mm/h)
10	KF_2	0.364 585	草地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
11	KE_3	0.945 598	耕地蒸发皿折算系数
12	FC_3	2.409 135	耕地流域稳定下渗率 (mm/h)
13	KF_3	0.335 035	耕地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
14	KE_4	0.088 838	未用地蒸发皿折算系数
15	FC_4	2.479 794	未用地流域稳定下渗率 (mm/h)
16	KF_4	0.350 508	未用地 Horton 下渗曲线的指数 (1/h)
17	KE	1.050 314	水域蒸发皿折算系数
18	CS	0.468 437	坡面洪水波波速 (km/h)
19	DS	3.709 722	坡面洪水波扩散系数 (km ² /h)
20	CR	1.750 729	河道洪水波波速 (km/h)
21	DR	2.703 446	河道洪水波扩散系数 (km ² /h)
22	KG	0.998 847	地面以下径流日消退系数

注: 建设用地可看作是不透水面积, 其上的降雨全部产生地表径流。

其中建设用地可看作是不透水面积, 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 CS 、 DS 、 CR 、 DR 、 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。

2 LWHM - LUCC 模型应用

2.1 无定河流域概况

无定河流域位于 $37^\circ\sim 39^\circ\text{N}$, $108^\circ\sim 111^\circ\text{E}$, 流域面积 $30\ 261\ \text{km}^2$, 是黄河中游较大的一级支流, 地处毛乌素沙漠与黄土高原的交接地带。流域内沟壑纵横, 土壤沙化, 气候干旱, 植被稀少, 是黄河中游水土流失最为严重的地区之一, 也是我国四大沙尘暴发源地之一, 1982 年被列为全国水土保持 8 重点治理的区域之一。

2.2 无定河流域测站说明及地貌信息提取

流域内现布设有一个蒸发气象站, 90 多个雨量站, 其中一半是 1975 年以来设立的, 1967 年前设立的雨量站有 42 个, 流域水沙出口控制站为百家川水文站。

根据流域数值高程模型 DEM 提取出无定河流域及其河网, 如图 3 所示。百家川站以上控制面积为 $29\ 662\ \text{km}^2$ 、主河道长度约 $491.1\ \text{km}$ 。

降雨、蒸发及流量资料采用与土地利用资料对应的 1980~2000 年逐日资料, 其中流域面平均降雨量系列是根据流域内 90 多个雨量站采用泰森多边形法计算求得; 流量资料采用出口百家川站的实测资料; 蒸发资料采用绥德站的日蒸发实测资料。选取计算时段长为日, 并以年为单位统计出口断面的径流量。

2.3 无定河流域土地利用信息提取

以中国科学院地理科学与资源研究所资源数据中心提供的 1990 年、1995 年和 2000 年三期 1:10 万土地利用数据为基础, 在地理信息系统平台上, 对三期土地信息利用图 4 的数据进行空间叠置分析, 获得土地利用变化的空间与属性数据, 并采用土地分类系统中的一级类型, 即耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地, 共 6 类统计各类土地利用面积占百家川以上流域面积的比例, 见表 3。

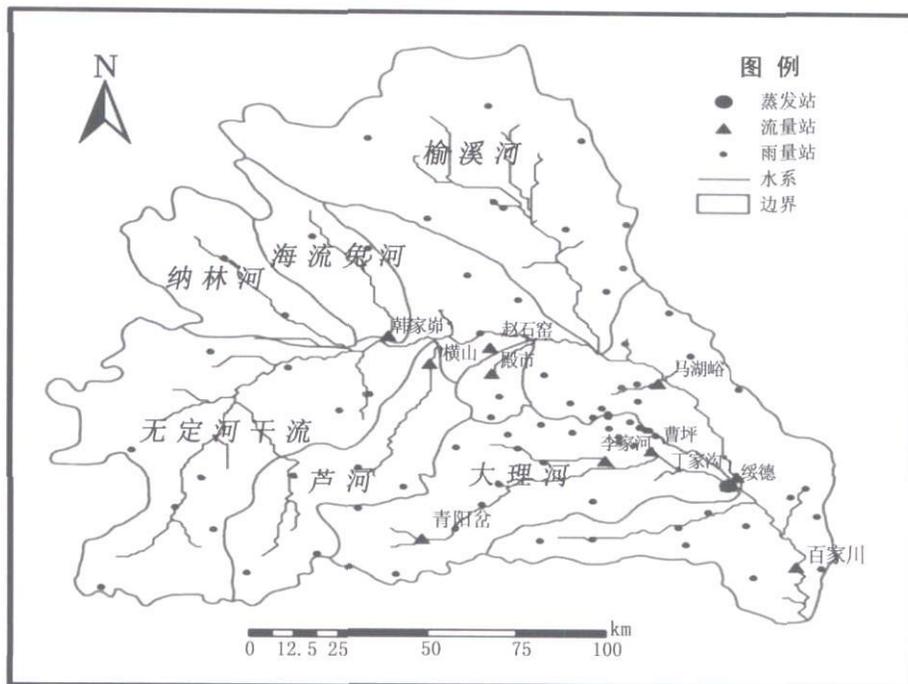


图 3 无定河流域概况图

Fig 3 The general situation map of Wuding River Basin

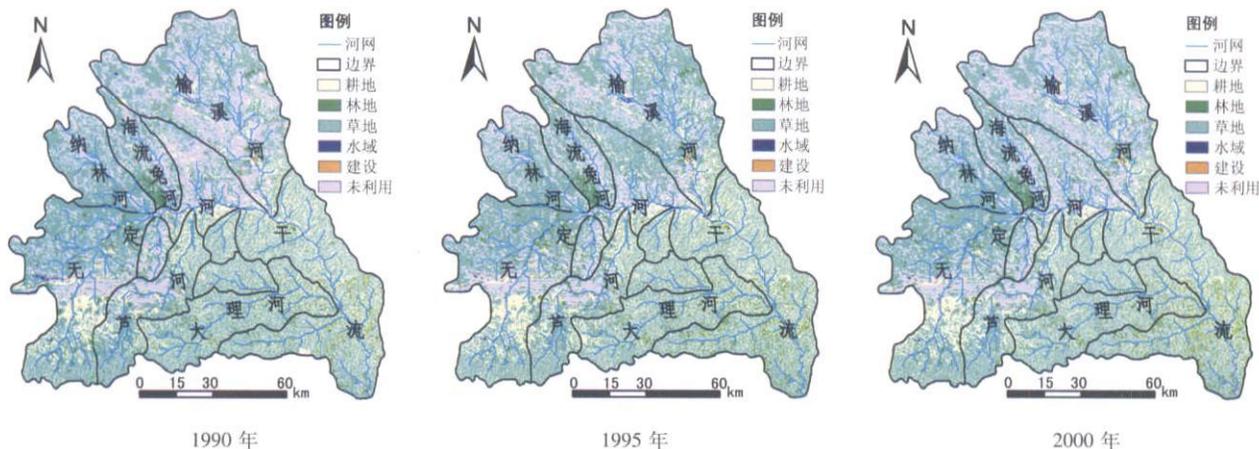


图 4 无定河流域三期土地利用图

Fig. 4 The land use maps at three periods in Wuding river basin

表 3 无定河流域三期不同土地利用类型面积及百分比

Table 3 Area and percentage of different land use types at three periods in Wuding River Basin

土地利用类型	1990年		1995年		2000年	
	面积 (hm ²)	百分比 (%)	面积 (hm ²)	百分比 (%)	面积 (hm ²)	百分比 (%)
耕地	889 176	29.293	881 012	29.024	887 369	29.234
林地	127 336	4.195	120 091	3.956	136 618	4.501
草地	1 295 368	42.675	1 421 300	46.824	1 349 148	44.447
水域	22 048	0.726	22 258	0.733	21 269	0.701
建设	11 669	0.384	11 147	0.367	11 842	0.390
未利用土地	689 822	22.726	579 611	19.095	629 172	20.728

2.4 参数率定与检验

LWHM - LUCC 模型参数包括流域地貌特征参数(如面积、河长等)、土地利用覆被类型及不同年代在全流域所占比例系数或权重参数、流域产汇流参数等三类。前两类参数可以根据流域 DEM 和土地利用遥感图,在地理信息系统平台上,利用 GIS 的空间分析方法获得,而流域产汇流参数通常需要采用最优化方法通过参数率定求得。

本文采用单纯形法率定模型产汇流参数(见表 2),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 年实测径流量; $R_{j\text{计}}$ 为第 j 年计算径流量。

模型模拟的精度采用多年径流水量平衡系数(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,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,其表达式为

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

径流深合格率 $DR(\%)$ 定义为

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

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

选取与无定河流域三期土地利用图匹配最接近的 1986~2000 年作为率定期,其参数率定结果见表 2 精度评定见表 4 中的 1986~2000 年径流模拟结果,其中率定期的水量平衡系数为 0.999,径流深合格率为 100.0%。

选取与无定河流域三期土地利用图匹配比较远的 1980~1985 年作为检验期,并根据参数率定结果对模型进行参数检验,其精度评定见表 4 中的 1980~1985 年径流模拟结果,其中检验期的水量平衡系数为 0.953,径流深合格率为 83.3%。

2.5 参数合理性分析

模型参数是否合理,主要是看不同土地利用类型的蒸发和下渗参数是否合理地反映了流域下垫面的实际状况。李品芳^[6]等通过对毛乌素沙地和草地蒸发的比较研究得出毛乌素沙地蒸发远小于草地蒸发的结论。流域土地利用类型变化,如将坡地改梯田、植树造林、蓄水工程建设等将增加水的滞留时间,从而增大下渗量。土壤特征是影响下渗能力最为重要的因素之一,流域土地利用类型变化通过对

土壤性质的改变而间接影响下渗,如耕作土壤将导致下渗量比自然态土壤高数倍^[7]。刘贤赵等^[8]研究了渭北旱塬主要土地利用类型的土壤下渗率的大小关系,杨苏龙、王秀英、胡彩虹^[9-11]等对土壤的下渗规律也做过类似的研究。综合以上研究成果不难得到不同土地利用类型蒸发能力的相对大小。如果土地资源二级分类系统^[3]中林地包含蒸腾能力大的植被(长绿阔叶林,落叶阔叶林等),则有林地 > 耕地 > 草地 > 未利用土地等;如果林地中主要植被类型包括灌木等,而耕地上农作物是耗水量较大的植被(玉米、冬小麦等),则耕地 > 林地 > 草地 > 未利用土地;如果耕地中农作物耗水量较小,则有林地 > 草地 > 耕地 > 未利用土地等。

表 4 无定河流域年径流深模拟结果

Table 4 Results of annual runoff simulation in Wuding River Basin

年份	实测径流深 (mm)	计算径流深 (mm)	绝对误差 (mm)	相对误差 (%)
1980	32.90	24.79	8.1	24.7
1981	37.06	35.95	1.1	3.0
1982	34.55	32.51	2.0	5.9
1983	31.92	27.99	3.9	12.3
1984	34.16	36.46	-2.3	-6.7
1985	39.35	42.47	-3.1	-7.9
检验	水量平衡系数	0.953	径流深合格率(%)	83.3
1986	32.62	30.38	2.2	6.9
1987	32.13	28.51	3.6	11.3
1988	42.07	40.45	1.6	3.9
1989	31.89	28.01	3.9	12.2
1990	33.12	34.03	-0.9	-2.7
1991	31.68	30.05	1.6	5.2
1992	34.44	37.92	-3.5	-10.1
1993	24.12	26.84	-2.7	-11.3
1994	39.05	33.97	5.1	13.0
1995	36.75	36.39	0.4	1.0
1996	36.29	34.52	1.8	4.9
1997	25.34	29.37	-4.0	-15.9
1998	28.63	32.75	-4.1	-14.4
1999	24.66	25.11	-0.4	-1.8
2000	22.70	26.65	-3.9	-17.4
率定	水量平衡系数	0.999	径流深合格率(%)	100.0

无定河流域地处我国西北毛乌素沙漠与黄土高原的交接地带,属于温带大陆性干旱、半干旱气候类型,耕地上植被主要是耗水量大的冬小麦和玉米,而林地和草地主要以草原植被,特别是荒漠草原植被

为主,参照上述分析结论可见不同土地利用类型蒸发能力的相对大小关系为耕地 > 林地 > 草地 > 未利用土地。从表 2 可以看出模型优选的不同土地利用类型的蒸发参数比较合理地反映了流域的实际下垫面情况。

3 结 语

1. 根据中国科学院土地资源分类系统,在 LWHM - LUCC 模型结构中显式地考虑了土地利用及覆被变化的类型,并通过蒸发和下渗参数的影响直接作用于水文过程,便于定量评估土地利用及覆被变化的水文水资源效应。

2. LWHM - LUCC 模型采用蓄满 - 超渗耦合产流模型进行产流计算,采用逆高斯分布地貌汇流模型和线性水库模型进行汇流计算,适用于半湿润半干旱地区的水文模拟。

3. 模型直接利用地理信息系统技术提取河网、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. 利用无定河流域 1980 ~ 2000 年的逐日降雨、蒸发及流量资料对 LWHM - LUCC 模型进行了产汇流参数的率定与检验,率定期 1986 ~ 2000 年的水量平衡系数为 0.999,年径流深合格率为 100.0%; 检验期 1980 ~ 1985 年的水量平衡系数为 0.953,径流深合格率为 83.3%,计算结果表明该模型在无定河流域具有良好的适应性。

5. 对模型产汇流参数进行了合理性分析,得出无定河流域不同土地利用类型蒸发能力的相对大小关系为耕地 > 林地 > 草地 > 未利用土地。

参考文献 (References)

[1] Roland E. Schulze. Modeling Hydrological Responses to Land Use and Climate Change: A Southern African Perspective [J]. *Ambio*, 2000, 29(1): 13~17

[2] Li Xiubin. Research on the effect of land cover change on hydrology and water resources / social demand and scientific problem [A]. In: The Physical Geography Specialty Committee of China Geography

Association. Land-Cover Change and Its Environment Effects [C]. Beijing: PlanetMap Press, 2002: 1~6 [李秀彬. 土地覆被变化的水文水资源效应研究 - 社会需求与科学问题 [A]. 见: 中国地理学会自然地理专业委员会. 土地覆被变化及其环境效应论文集 [C]. 北京: 星球地图出版社, 2002: 1~6]

- [3] Xiao Pengfeng, Liu Shunxi, Feng Xuezhong et al. Appraisal and Code Conversion of Land Use/Cover Classification Systems Based on Remotely 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]
- [4] Luo Wensheng, Hu Chunqi, Han Jiatian. Research on a model of runoff 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]
- [5] Xie Ping, Liang Ruiji. 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]
- [6] Li Pingfang, Li Baoguo. Study on some characteristics of evaporation of sand dune and evapotranspiration of grassland in Mu Us desert [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000 (3): 24~28 [李品芳, 李保国等. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究 [J]. 水利学报, 2000 (3): 24~28]
- [7] Krause P. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchment using the 2000 model [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 663~673
- [8] Liu Xianzhao, Huang Mingbin. Status of soil water environment in apple orchards located in the area of Loess Plateau [J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(2): 75~78 [刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应 [J]. 果树学报, 2002, 19(2): 75~78]
- [9] Yang Suibing, Shi Yuejin, Shi Jundong. A study on the regular pattern of natural rain fall seeping into soil and runoff [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2000, 28(2): 3~6 [杨苏冰, 石跃进, 史俊东等. 自然降雨下渗与径流规律的研究 [J]. 山西农业科学, 2000, 28(2): 3~6]
- [10] Wang Xiuying, Cao Wenhong. Study on infiltration of soil in action of soil and water conservation measures and surface runoff yield in one storm [J]. *Journal of Sediment Research*, 1999 (6): 79~83 [王秀英, 曹文洪. 水土保持措施下的土壤入渗研究及次暴雨地表产流计算方法 [J]. 泥沙研究, 1999 (6): 79~83]
- [11] Hu Caifeng, Zhang Wenhua. Some aspects of rainfall infiltration processes in Arid and Semi-arid region [J]. *Water Resources and Power*, 2004, 22(4): 9~11 [胡彩虹, 张文华. 干旱半干旱地区降雨下渗过程的若干问题探讨 [J]. 水电能源科学, 2004, 22(4): 9~11]

A Lumped Watershed Hydrological Model Considering Land Use and Land Cover Change and Its Application

XIE Ping, ZHU Yong, CHN Guancai, LEIHongfu, LI Jing

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

Abstract In order to evaluate quantitatively the hydrology and water resources effects of land use and land cover change (LUCC), a lumped watershed hydrological model considering land use and land cover change (LWHM-LUCC) is developed. In LWHM-LUCC, 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 Wuding River Basin during 1980~2000, the parameters of the model were calibrated and verified. The coefficient of water balance (R) is 0.999 and the qualified rate of annual runoff depth (DR) is 100% during calibration period 1986~2000, and the R is 0.953 and the DR is 83.3% during calibration verification 1980~1985. The calculated results indicate that this model has good adaptability in Wuding River Basin. By the rationality analysis of the model runoff yield and concentration parameters, the conclusion is that the relative value relationship of evaporation ability of different land use types in Wuding River Basin is cultivated land > forest land > rangeland > unused land.

Key words land use and land cover change, lumped watershed hydrological model, hydrology and water resources effects, Wuding River Basin, parameter calibration and verification