

岩溶地区土地利用变化的水文响应研究 ——以贵州后寨河流域为例

蒙海花,王腊春

(南京大学地理与海洋科学学院,江苏南京 210093)

摘要:以贵州普定后寨地下河流域为研究区,在分析流域生态环境特征以及岩溶水形成机制的基础上,通过野外调查、资料收集并结合现代空间技术、地理信息系统和遥感技术,研制开发了适合我国后寨河流域的基于落水洞的岩溶半分布式水文模型,分析了土地利用/覆被变化对流域径流的影响以及流域产汇流参数对比关系。结果表明:生态建设后除最大土壤蓄水量增大外,其它产流参数变化不大;汇流参数基本小于生态建设前,但相差不大;在降雨条件不变的情况下,生态建设后的产流量小于生态建设前的产流量,生态建设前土地覆被下的流量在低水位时比生态建设后的流量稍高,而在高水位时生态建设前流量比生态建设后的流量稍低。

关键词:土地利用/覆被变化;岩溶;水文响应;半分布式水文模型;落水洞

中图分类号:P334.92

文献标识码:A

我国西南岩溶地区的生态环境具有特殊性,由于岩溶地区特有的自然地理环境,加之人地关系矛盾尖锐,其生态环境更为脆弱^[1~3]。西南岩溶地区最主要的生态环境问题是水土流失严重、石漠化现象普遍、生态环境系统退化严重^[4,5]。有鉴于此,我国自“九五”以来就开始了西南岩溶地区的生态环境恢复重建和综合治理的示范研究。通过治理,部分地区的生态环境已得到一定的恢复或改善。由于生态环境好转,这些地区的下垫面条件相应地发生了改变,其水文过程也必然会发生变化。因此,有必要对这些生态建设前后的水文过程进行比较研究,探讨西南岩溶地区生态环境恢复重建对岩溶水文过程的影响,这对西南其他岩溶地区的生态环境恢复重建有一定的指导意义和实用价值。目前对岩溶生态水文问题的研究还处于起步阶段,国内现有研究也仅对天然岩溶生态系统的水文效应进行了初步探讨,国外有关岩溶生态水文的研究也多从岩溶水化学和岩溶水文过程演化及岩溶地

貌水文与石漠化的关系^[6~11]开展研究,而对生态建设前后岩溶水文过程的比较研究还较少。

本文应用建立的基于落水洞的岩溶半分布式水文模型,模拟后寨河流域不同土地覆盖情景下的产流量及水文过程的变化,旨在定量评估土地覆被变化对流域水循环要素的影响。

1 研究区概况

贵州省普定县后寨河流域位于普定县城以南,面积80.65 km²。流域内地势东南高西北低,峰丛、峰林耸立,洼地、盆地广泛分布,地势平坦开阔。上游为峰丛、洼地、漏斗地貌组合类型,中游为峰林、槽谷类型,下游为丘陵、谷地、盆地类型。

研究区属亚热带季风气候区,全年温湿多雨,冬温夏暖,春干秋雨。区内雨量丰沛,但时空分布不均。根据试验场内观测资料(1980—1995年),多年平均

基金项目:国家自然科学基金资助(40571024)、国家“973”基础研究计划(2006CB403208)

第一作者简介:蒙海花(1983—),女,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: haihuameng@gmail.com。

收稿日期:2009-04-14

降雨量为 1 314.6 mm, 丰水年为 1 433.1 mm, 枯水年为 909.0 mm, 雨季集中在 6、7、8 三个月, 其雨量占全年的 62% 左右。

研究区地表、地下河发育。后寨河源头为母猪洞

地下河出口, 沿程有中坝小河、灯盏河汇入, 经青山水库后至后寨水文站流出试验场, 汇入波玉河。场内还发育了后寨(冒水坑)地下河系, 地下水经老黑潭、六谷至后寨、冒水坑处流出地表, 汇入后寨河, 如图 1。

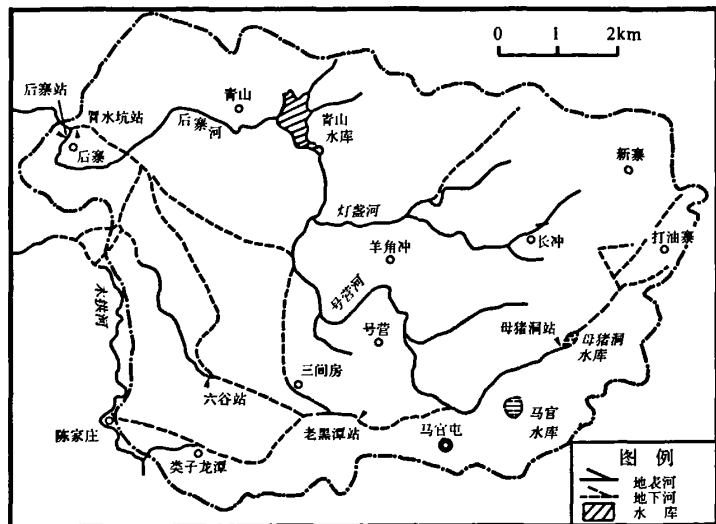


图 1 后寨流域水系图

Fig. 1 Map of the Houzhai basin

2 基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的构建

2.1 数据收集和处理

2.1.1 基础数据

收集的水文气象数据: 流域内所有监测站建站以来至 2002 年的降雨、蒸发、水位、流量资料; 流域土地利用图和 TM 影像图 (2 张, 1993 年和 1999 年); 流域 1: 10000 地形图。本次雨量按单元流域, 采用算术平均法分别计算出母猪洞单元流域, 母猪洞至老黑潭区间, 老黑潭至冒水坑区间的面平均逐日雨量。蒸发量统一采用老黑潭站的蒸发量。

2.1.2 落水洞提取和填注

落水洞(包括漏斗)是承接坡面流、裂隙流的场所和排泄地下径流的主要通道。提取落水洞需要计算洼地深度, 与地形资料对比分析, 确定哪些洼地是由误差产生, 哪些洼地是真实的地表形态, 从而根据洼地深度确定合理的填充阈值, 保留真洼地, 真洼地即为落水洞或天窗, 结合人工实地调查, 确定落水洞(包括漏斗)。结合基于 DEM 提取的子流域和地下河的发育状况, 研究区可分为母猪洞、老黑潭、青山水库和后寨流域四个单元流域。落水洞在各单元流域的分布如

图 2。

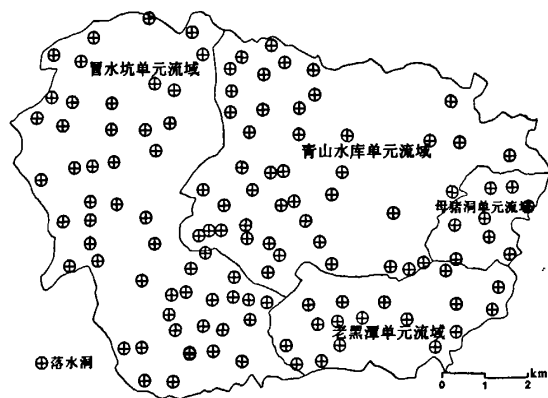


图 2 研究区落水洞和单元流域图

Fig. 2 Sinkhole and drainage unit of the Houzhai catchment

2.1.3 土地利用分类

根据流域地形资料、1993 和 1999 年份的 TM 图像资料, 结合流域下垫面现状调查, 建立 1993 和 1999 年研究区数字流域土地利用图, 如图 3 和图 4。流域各类土地利用变化见表 1。

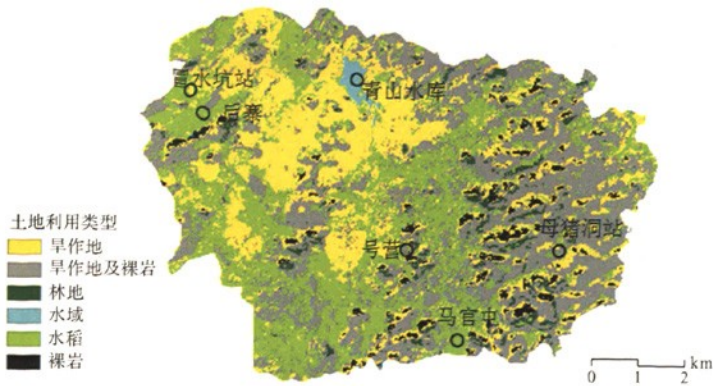


图3 1993年12月后寨河流域土地利用分类图

Fig. 3 Land-use type classification of the Houzhai catchment in December 1993

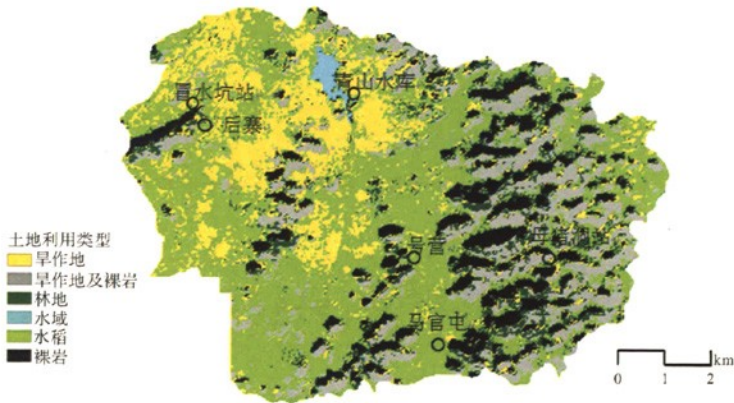


图4 1999年12月后寨河流域土地利用分类图

Fig. 4 Land-use type classification of the Houzhai catchment in December 1999

表1 后寨河流域1993、1999年土地利用类型面积百分比

Tab.1 Percentages of land-use types in the Houzhai catchment in 1993 and 1999

土地利用类型	1993年 面积百分比	1999年 面积百分比
水田	13.19	23.27
旱作地	25.53	16.90
林地	0.71	7.19
水域	0.55	0.63
裸岩	0.64	1.18
旱作地加裸岩	59.38	50.83

可以看出,研究区主要的土地利用类型为旱作地+裸岩(指裸岩和旱作地混杂),占50%以上;从1993—1999年,林地、水田呈上升趋势,分别增加6.48%和10.08%;旱作地+裸岩减少了8.55%,主要是夹杂在旱作地中的裸岩减少;而裸岩+道路增加了

0.54%,主要是道路和建设用地的增加。可见,在后寨河流域,生态重建后土地利用结构得到了较好的调整,但人类活动对流域生态系统的影响却逐年增强。

2.2 模型构建

基于落水洞的岩溶半分布式水文模型就是构建在DEM基础上的一种水文模型,因为模型产流计算是基于每一个栅格的,而汇流计算是基于单元流域的,且模型中引入了落水洞汇流计算,因此本文构建的是基于落水洞的岩溶半分布式水文模型。本文将研究区划分为大小相等、地表状况相对均一的栅格,栅格数据形式采用ESRI GRID,横纵坐标的分辨率均为30 m。在此基础上对每个栅格进行产流计算,再对整个流域从远到近的进行汇流,最终获得流域出口断面的水文过程,其基本结构框架见图5。模型对各单元流域均采用统一模型结构,但模型参数值不同,以表示不同单元流域结构对岩溶水形成的影响。

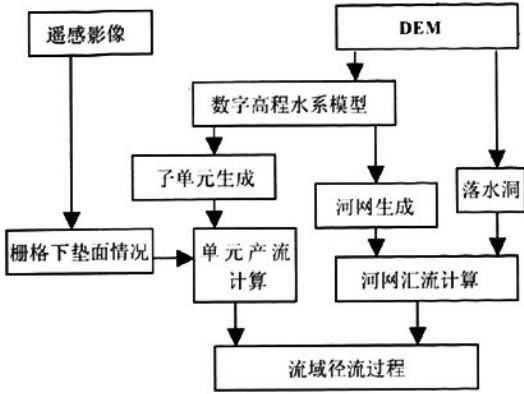


图 5 基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的基本框架

Fig. 5 Frame of semi-distributed karst hydrologic model based on sinkhole

2.2.1 流域产流计算

不同下垫面(即土地利用类型)具有不同的产流规律,各单元格产流计算分别如下:

(1) 水域产流模拟

逐日水面产流(净雨深)为日降雨量与蒸发量之差,即:

$$R_{*} = P - \beta E \quad (1)$$

式中 R_{*} 为日净雨量(mm), P 为日雨量(mm), E 为 E601 蒸发皿蒸发量(mm), β 为蒸发皿折算系数,本次研究取 $\beta=1$ 。

(2) 水田产流模拟

根据作物生长期的需水过程及水稻田适宜水深上、下限,耐淹水深等因素,逐日进行水量调节计算,推求水田产流过程,具体算法参阅文献^[12]。当水稻的生长期结束的时候,水稻田成为旱地,按旱地计算其产流深。

(3) 旱地林地产流模拟

旱地林地产流模型采用单层蓄满产流模型来计算流量,具体算法参阅文献^[13]。

(4) 裸岩产流模拟

裸岩的特点是透水性较差的无下垫面覆盖,降雨产流可简单地表示为:

$$R_{\text{裸}} = \varphi P \quad (2)$$

式中: $R_{\text{裸}}$ 为裸岩的日净雨深; φ 为径流系数。

2.2.2 汇流计算

依据研究区地形地貌特征和水文特征,引入落水洞汇流计算,判断落水洞汇流路径。落水洞的汇流路径是根据从落水洞入口(最低栅格)到地下河或单元流域出口最短路径原则确定的。汇流模型由水箱子模

型、Nash 瞬时单位线数学模型、越流子模型组成。

(1) 水箱子模型

单元流域之间汇流用两个串联水箱分别模拟地表水、地下水的汇流过程;落水洞注入汇流采用单层水箱模型模拟,分有覆盖和无覆盖两类。

用水箱模型作单元流域调蓄计算时,概化为各水源补给量形成的出流与相应贮存量间的蓄泄关系,成线性或非线性函数关系。即^[14]:

$$Q_i = A_j \times H_i^{B_j} \times U \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

式中: Q_i 为水箱出流量(m^3/s); H_i 为水箱蓄水量(mm); i 为时段序号, $i=1, 2, \dots, n$; j 为水源成份序号; A_j 为水箱边孔出流系数; B_j 为指数; U 为单位换算系数。

(2) Nash 瞬时单位线数学模型

采用 Nash 瞬时单位线法模拟地下管道和河道汇流过程。考虑到流域较小,概化为一级线性水库进行调蓄计算,即采用瞬时单位线^[15],取时段长为 1 天,转化为时段单位线为:

$$u(\Delta t, t) = \int_0^\infty \frac{e^{\frac{t-\tau}{k}}}{k} d\tau - \int_0^\infty \frac{e^{\frac{t-1-\tau}{k}}}{k} d\tau = e^{\frac{t-1}{k}} - e^{\frac{t}{k}} \quad (4)$$

根据实测资料分析,母猪洞到流域出口间河长 14.463 km,滞时 3 天,故每一条河网滞时 $\tau=3 \times L/14.463$,其中 L 为河段单位线,通过 ArcGIS 计算河道河长;水库调蓄参数 K 利用河网地貌参数(河长和河道坡度)经水文模拟优选获得。

(3) 越流子模型

上述流域总出流过程,是后寨河地表河和冒水坑地下河的总过程,按单元流域计算补给量和调蓄时,为满足水量平衡要求,必须用越流模型把二者区分开^[9]。因此,必须画出越流点流量和单元流域长观站流量相关图,并选配其数学方程。越流站与测站流量相关方程见文献^[14]。

部分喀斯特水,经多极河网调蓄后注入青山水库,该水库为地表水库,没有闸门控制,仅大洪水时有溢流,大部分蓄水由渗漏补给冒水坑,其补给量为 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[14]。

3 典型年份模型参数及土地利用变化的岩溶水文过程的对比

3.1 模型参数的对比

本文采用扰动分析法,对影响径流模拟结果的参数进行敏感性分析。辨析出影响模拟精度的重要参数为:流域平均最大蓄水量 W_m ;降雨开始时流域平均

实际蓄水量 W_0 ;水箱初始蓄水深和退水系数。考虑到模型的率定应基于实际的物理过程,所以通过敏感性分析所确定的敏感参数仅作为参考,在实际率定中并非都进行调整。需要调试的参数主要是1994年和1999年两组参数(表2—表7),因参数较多,故采用试错法并与实测值对比来确定模型参数。

表2 1994年产流参数
Tab.2 Runoff yield parameter in 1994

单元流域名称	母猪洞	老黑潭	青山水库	冒水坑
流域平均最大蓄水容量 W_m/mm	23	30	35	35
降雨开始时流域平均实际蓄水量 W_0	10	12	10	10
蒸发折算系数 C	0.95	0.95	0.95	0.95
指数 B	0.25	0.25	0.25	0.25

表3 1999年产流参数
Tab.3 Runoff yield parameter in 1999

单元流域名称	母猪洞	老黑潭	青山水库	冒水坑
流域平均最大蓄水容量 W_m/mm	35	45	55	55
降雨开始时流域平均实际蓄水量 W_0	25	30	40	45
蒸发折算系数 C	0.85	0.85	0.85	0.85
指数 B	0.20	0.20	0.20	0.20

表4 1994年落水洞汇流参数表
Tab.4 Table of confluence flow parameters of different sinkhole in 1994

植被覆盖情况	无覆盖	有覆盖
落水洞边孔出流系数 A	0.8	0.45
落水洞退水系数 B	1.1	1.1

表5 1994年各站汇流参数表
Tab.5 Table of confluence flow parameters of different stations in 1994

单元流域名	母猪洞	老黑潭	青山水库	冒水坑
水箱初始蓄水深	15	30	30	30
单元流域出流系数 $A_上$	0.65	0.55	0.3	0.3
单元流域出流系数 $A_下$	0.4	0.2	0.015	0.03
单元流域退水系数 $B_上$	1.2	1.1	1.1	1.1
单元流域退水系数 $B_下$	1.0	1.0	0.9	0.9

表6 1999年落水洞汇流参数表
Tab.6 Table of confluence flow parameters of different sinkhole in 1999

落水洞覆盖情况	无覆盖	有覆盖
落水洞边孔出流系数 A	0.8	0.4
落水洞退水系数 B	1.1	1.1

表7 1999年各站汇流参数表
Tab.7 Table of confluence flow parameters of different stations in 1999

单元流域名	母猪洞	老黑潭	青山水库	冒水坑
水箱初始蓄水深	25	30	40	45
单元流域出流系数 $A_上$	0.6	0.3	0.2	0.2
单元流域出流系数 $A_下$	0.4	0.2	0.05	0.05
单元流域退水系数 $B_上$	1.2	1.2	1.1	1.1
单元流域退水系数 $B_下$	1.2	1.1	1.0	1.0

(1)旱地林地产流采用单层蓄满产流模型,需要提取的参数为:流域平均最大蓄水量 W_m ,降雨开始时流域平均实际蓄水量 W_0 ;流域蓄水容量分布曲线指数 B ;蒸发折散系数 C 。

(2)汇流模型采用了改进的水箱模型,在单元流域上采用了二个水箱串联,分别模拟地表水和地下水;在落水洞上分有覆盖和无覆盖。因此汇流参数为:落水洞水箱出流系数和落水洞退水系数;子单元流域出流系数和退水系数。出流系数 A_i 可近似地由综合退水曲线相应退水段的退水系数 B_i 确定。

表中的 $A_上,A_下,B_上,B_下$ 分别表示上层水箱的出流系数,下层水箱的出流系数,上层水箱的退水系数,下层水箱的退水系数。

根据上述率定得到的产汇流参数,生态建设后各

子流域的最大蓄水深和初始蓄水深都大于生态建设前的最大蓄水深和初始蓄水深;生态建设前和生态建设后的落水洞出流系数无覆盖时基本相同,有覆盖时生态建设前出流系数稍大于生态建设后;生态建设后的单元流域出流系数基本小于生态建设前的单元流域出流系数,但相差不是很大。

造成这种差异的原因是生态建设后林地面积增大,裸岩面积减少。

3.2 生态恢复建设对岩溶水资源的影响分析

采取分别固定降水因子与土地利用/覆被变化因子的方法,将模拟情景输入前述建立的水文模型,定量区分土地利用/覆被变化对流域径流的影响方式和程度。模拟生态建设前1994年降雨条件下和生态建设后1999年土地利用情况下研究区水文过程,以及生态建设后的1999年降雨情况下和生态建设前1994年土地利用情况下研究区的水文过程,从而定量区分降水和土地利用/覆被变化对流域径流的影响。得到结果如表8。

表8 后寨河流域不同土地利用和降雨条件下的径流模拟结果
Tab. 8 Simulated runoff under different rainfall conditions and different land-use types

情景设定	实际情景1	模拟情景1	模拟情景2	实际情景2
气候	生态建设前	生态建设前	生态建设后	生态建设后
土地利用	生态建设前	生态建设后	生态建设前	生态建设后
母猪洞径流/万 m ³	400.12	365.87	373.89	342.48
老黑潭径流/万 m ³	747.15	665.96	776.43	727.77
冒水坑径流/万 m ³	270.59	259.46	326.26	317.74

由上表可以看出,在相同的降雨条件下,生态建设前土地利用情况下产流比生态建设后土地利用情况下产流大。可见随着研究区生态建设,林地面积的扩大,产流在不断减少。模拟情景1:在1994年气候条件保持不变的情况下,土地利用/覆被从生态建设前到生态建设后引起的后寨河流域母猪洞、老黑潭和冒水坑多年径流分别减少34.25、81.19和11.13万m³;模拟情景2:在1999年气候条件保持不变的情况下,土地利用/覆被从生态建设前到生态建设后引起的后寨河流域母猪洞、老黑潭和冒水坑多年径流分别减少31.41、48.66和8.52万m³。

流量过程比较:在气候条件保持不变的情况下,生态建设前的土地利用/覆被的产流量在低水位时比生态建设后的土地利用/覆被的流量稍高,而在高水位时生态建设前土地利用/覆被下的流量比生态建设后的稍低,各单元流域流量过程见图6—8。形成上述差别的原因主要是林地面积增加,即在高水位时土壤蓄水量增加,减少产流量。林地有蓄水的作用,到了枯水季节,降水减少,河川径流主要靠流域蓄水补给,森林土壤含蓄的水分可以增加流域的枯水径流量,使河流径流量保持均匀、稳定。

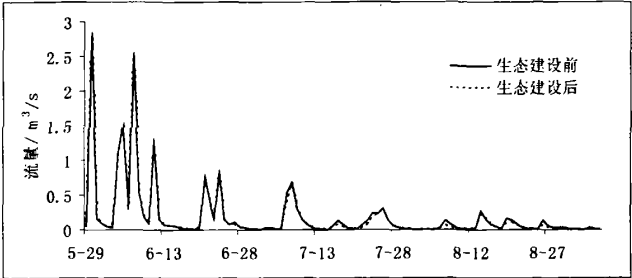


图6 母猪洞站1994年气候条件下生态建设前后流量对比

Fig. 6 Comparison of runoffs before and after the eco-construction under the climate in 1994 at Muzhudong station

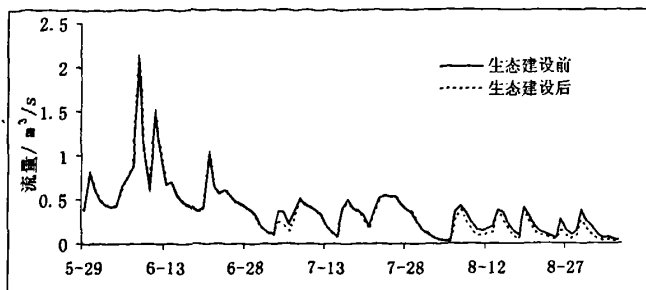


图7 老黑潭站1994年气候条件下生态建设前后流量对比

Fig. 7 Comparison of runoffs before and after the eco-construction under the climate in 1994 at Laoheitan station

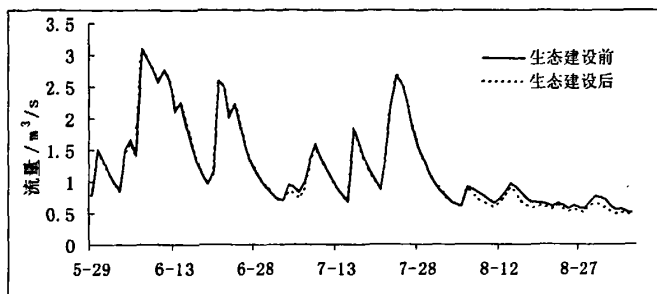


图8 雷水坑站1994年气候条件下生态建设前后流量对比

Fig. 8 Comparison of runoffs before and after the eco-construction under the climate in 1994 at Maoshuikeng station

4 结论与讨论

本研究以贵州省普定县后寨河典型喀斯特区域为研究对象,在GIS技术的支持下建立了研究流域的基础空间数据库和属性数据库,同时基于DEM提取了流域数字水系和落水洞分布图,基于1994,1999年的土地利用图以及后寨河流域的气候、水文资料,建立了基于落水洞的岩溶半分布式水文模型。但是也存在一些不确定性,本文主要体现在三个方面:(1)模拟中没有考虑降雨分布的不均匀性对流域产汇流的影响,仅利用面平均雨量作为降雨输入;(2)由于对所研究的模型参数的先验分布不是很了解,只是简单地用均匀分布来生成模型参数;(3)模型结构如落水洞途径的概化等存在不确定性,这些都会引起预测结果的不确定性。然而本研究通过对选择的各典型年进行模拟与调试,经过参数率定和模型验证,证明该模型在后寨河流域具有良好的适用性。尤其是在模型运转过程中采取分别固定降水因子与土地利用/覆被变化因子的方法,将模拟情景输入模型,定量区分生态建设

前后流域的水文响应,揭示出了由于生态建设使流域土地利用/覆被产生了变化,从而导致流域的蒸散发、截留、下渗等特性发生变化,改变了流域产汇流过程,从而对流域水量产生了影响;在气候相同的条件下,流量总量上生态建设前大于生态建设后,低水位时生态建设前的流量高于生态建设后,高水位时生态建设前的流量低于生态建设后的流量。

参考文献

- [1] 袁道先. 论岩溶环境关系[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 179-186.
- [2] 苏维词. 岩溶地区生态环境敏感度评价研究[J]. 中国岩溶, 1997, 16(1): 57-65.
- [3] 陈刚才, 甘露. 贵州岩溶地区的生态环境现实与可持续发展对策[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(2): 108-111.
- [4] 屠玉麟. 贵州喀斯特生态环境划分研究[J]. 贵州科学, 2000, 18(1-2): 139-143.
- [5] 何才华. 中国地貌与贵州岩溶生态环境[J]. 贵州师范大学学报, 2000, 18(3): 1-7.
- [6] Reynaud A, Guglielmi Y, Mudry J. Hydrochemical approach to the alterations of the recharge of a karst aquifer consecutive to a long pumping period: Example taken from pinchinade graben

- (Mouans — Sartoux, French Riviera) [J]. *Ground Water*, 1999, 37(3): 414—417.
- [7] Hamilton J, Ford D. Karst geomorphology and hydrogeology of the Bear Rock Formation—A remarkable dolostone and gypsum megabreccia in the continuous permafrost zone of Northwest Territories[J]. *Canada. Carbonate Evaporite*, 2002, 17(2): 114—115.
- [8] Georg Kaufmann. A model comparison of karst aquifer evolution for different matrix—flow formulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2003(283): 281—289.
- [9] Grasso D A, Jeannin P Y. Erratum to "A deterministic approach to the coupled analysis of karst springs' hydrographs and chemographs"[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 279—291.
- [10] Tumas R. Lithuanian karst region river water ecology, hydrochemical and hydrobiological evaluation [J]. *Nord hydrol*, 2004, 35(1): 61—72.
- [11] Danièle Valdes, Jean—Paul Dupont, Benoît Laignel. A spatial analysis of structural controls on karst groundwater geochemistry at a regional scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, (340): 2441—255.
- [12] 韩丽. 流域土地利用变化及水文效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 57—58.
- [13] 史运良, 王腊春. 岩溶水概念性分布模型[J]. *南京大学学报*, 1992, 13: 136—149.
- [14] 王腊春, 史运良. 非闭合流域岩溶水文模型[J]. *水科学进展*, 1995, 6(4): 318—3214.
- [15] 王腊春, 杨晓轩. 喀斯特流域空间结构与地貌瞬态单位线应用——以贵州后寨地下河流域为例[J]. *南京大学学报*, 1995, 31(4): 649—656.

Hydrological responses to land-use changes in karst area — A case study in Houzhai river, Guizhou province

MENG Hai-hua, WANG La-chun

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Selecting Houzhai underground river basin as a study area, a sinkhole-based semi-distributed karst hydrologic model, which is based on the analysis of ecological environment features and karst water formation mechanism, was proposed and the impact of land-use and vegetation cover changes on the catchment runoff and the relationship between yield flow parameter and confluence flow parameter in Houzhai catchment, Guizhou province was discussed by means of field investigation, data collection and modern spatial technology as well as geography information system and remote sensing technology in this paper. It is proved that, after the eco-construction, flow yield parameters change little except the maximum soil moisture storage, confluence flow parameter change little too and get less than that before eco-construction basically. It is also proved that, under the constant rainfall, flow yield decrease and the runoff which is under the vegetation coverage becomes smaller at low water level and becomes larger at high water level after the eco-construction.

Key words: land-use/vegetation cover; karst; hydrologic response; semi-distributed hydrologic model; sinkhole