

# 东江流域土地利用变化对径流的影响分析\*

刘洁<sup>1,2</sup>, 陈晓宏<sup>1</sup>, 肖志峰<sup>3</sup>, 魏清伟<sup>2</sup>, 吴根义<sup>2,4</sup>, 许振成<sup>2</sup>

- (1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655;
3. 华南农业大学地理信息系, 广东 广州 510642;
4. 湖南农业大学环境科学与工程系, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 将流域水文模型 HSPF 与元胞自动机 - 马尔科夫 (CA-Markov) 土地利用预测模型结合, 定量评价了东江流域未来土地利用变化的径流响应; 并且模拟分析了不同降雨情景下土地利用变化的水文响应。结果表明: HSPF 模型可以较好的模拟东江流域的月径流过程, 可用于东江流域长期水文变化的评价与研究; 未来土地利用变化引起的总径流的改变较小但是地表径流的变化较显著; 未来土地利用变化情景下高、低流量值都有所增长, 随着城镇建设用地面积比例的进一步增加高流量值随之增长而低流量减少; 随着降雨量的增加, 径流对于未来土地利用变化的响应程度减弱, 降雨量减少, 未来土地利用变化的水文效应增强; 总的来说, 4 种降雨情景下未来土地利用变化对总径流的影响都不大, 但是对地表径流有较显著的影响。研究过程和结果可为东江流域水资源规划及相关管理决策提供参考。

**关键词:** 径流; 土地利用; 降雨; HSPF; 东江流域

**中图分类号:** P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 02-0150-09

## Assessing Hydrological Impact of Land Use Change in the Dongjiang River Basin

LIU Jie<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1</sup>, XIAO Zhifeng<sup>3</sup>, GUO Qingwei<sup>2</sup>, WU Genyi<sup>2,4</sup>, XU Zhencheng<sup>2</sup>

- (1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China;
3. Department of Geo-Informatics & Survey Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
4. Department of Environmental Science and Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** A comprehensive watershed model—the Hydrological Simulation Program FORTRAN (HSPF) was set up and calibrated for the Dongjiang River basin, which was used to quantitatively predict runoff in response to possible future land use change, combining with a land use projection model (CA-Markov) and a daily rainfall stochastic simulation model. The calibration and validation of the HSPF showed a good fit and the calibrated model was applicable to simulating the monthly runoff in the Dongjiang River Basin. The future land use scenarios generated by CA-Markov model result in little change in total runoff but some noticeable changes in surface flow. Both high flow and low flow increase under the future land use scenarios, and high flow increases with the growth of urban construction land

\* 收稿日期: 2014-04-08

基金项目: 科技部重大专项基金资助项目 (2012ZX07206, 2014ZX07602004)

作者简介: 刘洁 (1980 年生), 女; 研究方向: 流域水资源与水环境变化; 通讯作者: 陈晓宏, 许振成;

E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn; xuzhencheng@scies.org

while low flow decreases. The run-off effects of land use change decreases with increasing rainfall, and increases with decreasing rainfall. The changes of total runoff due to land use changes are little under four rainfall scenarios, but while the changes of surface flow are significant. Simulation hydrological change by connecting a land use prediction model and a semi-distributed hydrological model can be a good decision support tool for water management at a basin scale and capable of long-term scenario-based assessments.

**Key words:** runoff; land use; rainfall; HSPF; the Dongjiang river basin

在流域尺度上, 土地利用变化对水文过程的影响将直接导致水资源供需关系发生变化, 并造成河流水质发生变化。流域通常代表了水与自然特征、人类社会与水土资源利用相关的自然空间综合体, 是与水有关的区域尺度研究的最佳单元<sup>[1-3]</sup>。对于土地利用变化对流域水资源的影响, 国外已有一些相关研究<sup>[4-9]</sup>, 如 Albek 等<sup>[6]</sup>研究了深根植物覆盖率的变化对流域总径流的影响; Nie 等<sup>[8]</sup>对 San Pedro 流域的研究表明城市化是导致流域地表径流增加的主要原因。在国内, 2000 年以后, 土地利用结构对于流域水文水质的影响研究逐渐受到重视。主要研究手段可以归纳为野外采样分析<sup>[10-11]</sup>、多年实测数据的统计分析<sup>[12-14]</sup>、水文模型模拟<sup>[15-19]</sup>等, 如张晓明等<sup>[14]</sup>利用实测降雨、径流和泥沙资料, 建立了 1986-1994 和 1995-2004 年两个时期降水量、径流量和输沙量的回归方程并分析两个时期土地利用变化对流域输沙的影响; 美国农业部开发的 SWAT 模型被应用在我国香溪河流域的径流量与非点源污染负荷的模拟中<sup>[17]</sup>; 林凯荣等<sup>[18]</sup>运用改进的 SCS 模型对东江流域中 3 个子流域的气候变化和人类活动的径流影响贡献进行分解。

从研究尺度来看, 国内的研究主要集中在典型小流域的水文和产污过程研究、不同小流域的土地利用类型对产流产污过程影响的对比研究, 研究尺度较小。2010 年后针对大中型流域的相关研究成果开始更多的见诸于报道<sup>[19-21]</sup>, L-THIA 水文模型和 SWAT 等分布式水文模型被应用在我国湖北四湖流域<sup>[20]</sup>、三峡库区流域<sup>[19]</sup>等的研究中, 分布式水文模型可模拟研究气候和土地利用的长期变化对流域水文水质时空变异的影响, 适用于空间差异较大的流域的研究。

总体上来看, 我国对于大中尺度流域土地利用变化对于水文水质的影响研究还较少, 对于土地利用变化对径流的影响研究也基本只是对流域总径流量的变化进行讨论分析。本文利用国外较成熟的半分布式水文模型 HSPF, 构建了东江流域水文模拟模型, 并以此为基础, 模拟分析未来东江流域土地利用变化对于径流量以及径流组成的影响。通过对

未来土地利用变化情景进行预测, 模拟分析了 2030 年土地利用变化情景以及流域不同城镇建设用地发展情景对于径流的影响, 并且为了进一步分析在不同降雨情景下径流对于土地利用变化的响应情况, 建立了东江流域日降雨随机模拟模型并生成不同降雨情景下的日降雨序列数据, 以研究降雨量对于土地利用变化的水文效应的影响。

## 1 研究区域与基础资料

### 1.1 研究区域

东江是珠江流域的主要河流之一, 是广州、惠州、东莞、深圳等地市的重要供水水源地, 同时还担负着对香港特别行政区的供水任务。东江发源于江西省寻乌县桎髻钵, 上游称寻乌水, 南流入广东境内, 至龙川合安远水后称东江, 干流由东北向西南流, 河道长度至石龙为 520 km, 至狮子洋为 562 km, 石龙以上流域总面积约 2.7 万 km<sup>2</sup> (图 1)。

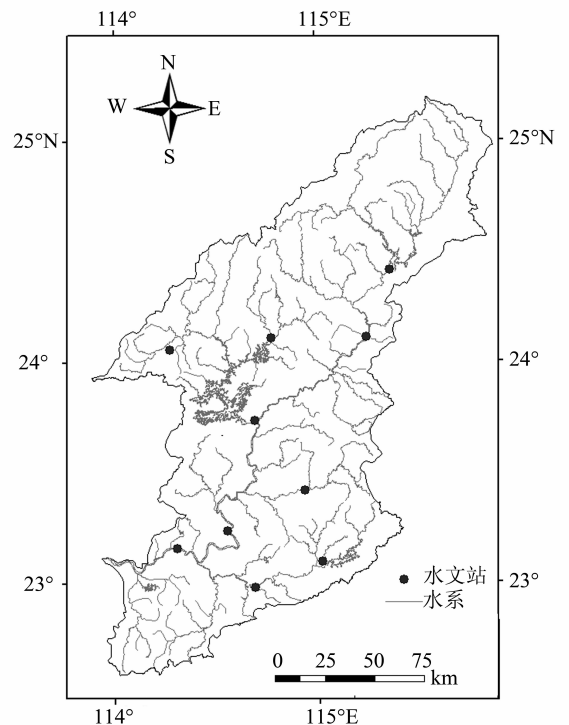


图 1 东江流域水系图

Fig. 1 Reaches of the Dongjiang River basin

## 1.2 基础资料

地形数据是由国家基础地理信息中心提供的 1:25 万海拔等值线矢量数据栅格化后形成的东江流域地形栅格数据; 土壤数据根据 1:25 万广东土壤类型图对东江流域部分进行矢量化; 土地利用/覆被数据来自于两期 Landsat MSS/TM/ETM+ 遥感影像经过校准和解译的资料, 成像时间分别为 1982-1984 年和 1999-2001 年; 气象数据采用 1980-2010 年降雨、最高最低气温等气象因子日值数据, 来源于中国气象数据共享服务网提供的中国地面气候资料日值数据集和中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集; 水文资料主要来自于广东省水文局。

## 2 半分布式水文模型 (HSPF)

### 2.1 HSPF 模型简介

HSPF 模型是由美国环境保护署开发的水文模型, 用于较大流域范围内自然和人工条件下的水系中水文水质过程的连续模拟<sup>[22]</sup>。HSPF 属于半分布式水文模型, 使用时首先要将研究区域划分为不同的子流域, 子流域划分的主要依据是河流水库所控制的自然流域范围。HSPF 水文响应单元 (HRU) 的建立是基于将流域划分为均质的水文和水质响应单元, 土壤层在每个 HRU 上被垂直划分为 3 层 (上储水层、下储水层和地下水储水层), 每层径流量由每个区域蓄水量的非线性函数求得。HSPF 模型在国内应用较少, 但在国外有广泛的应用, 至今已发展到 HSPF12.0, 并内嵌于美国环保署开发的基于 GIS 技术的整合式平台 BASINS 系统中。

### 2.2 数据预处理

2.2.1 气象数据预处理 降雨空间分辨率的变化对径流模拟结果有重要的影响<sup>[22-27]</sup>。为了降低气象数据的空间分辨率对东江流域水文模型建模的影响, 研究工作中加工处理了中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据, 作为气象观测站点数据的补充。利用 BASIN4.0 系统中 WDMutil 工具编辑生成模型运行必需的东江流域气象数据的时间序列文件 (WDM 文件)。

2.2.2 下垫面数据预处理 对土地利用/覆被数据进行加工处理, 将东江流域土地利用类型统一为 7 种类型: 耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地。为了充分考虑流域的空间异质性, 除考虑土地利用的差异性还需考虑土壤类型的差异性和坡度等下垫面因素。因此将 1982-1984 年和 1999-2001 年东江流域的土地利用数据与土壤分

布、坡度数据分别进行叠置得到新的下垫面类型数据。每种不同的下垫面类型对应不同的相关水文参数。

2.2.3 子流域和水文响应单元划分 HSPF 的空间异质性主要考虑每个离散单元的降雨、土壤类型、土地利用类型等。土壤类型、土地利用类型、坡度的空间异质性通过叠加下垫面类型数据体现, 气象数据的空间异质性则通过流域再分割实现。在子流域划分的基础上, 根据气象数据的空间分布, 进行水文响应单元的分割处理。东江流域水文响应单元的气象站点分配根据泰森多边形方法分割。

## 3 HSPF 模型校准

### 3.1 模型模拟效果评估的基本方法

采用标准偏差法 ( $D_v$ )<sup>[28]</sup> 与 NASH-Sutcliffe 相关系数法 (ENS)<sup>[29]</sup> 评估模型的模拟效果。理想情况下, 模型中的 ENS 接近于 1,  $D_v$  接近于 0。根据 Donigan<sup>[30-31]</sup> 的标准, 认为  $D_v$  在观测值的 10% 范围内的模拟已经达到了“非常好”的标准。NASH 系数取值在 0~1 之间, 并认为 0.9 以上为甲等, 0.7~0.9 为乙等, 0.5~0.7 为丙等。

### 3.2 模型率定的基本过程

HSPF 的 RCHRES 模块模拟开放性河道中的某一河段或者一个完全混合湖中发生的水流过程, 水流运动通过运动波方程模拟, 一个河段全部的入流量假定全由上游的某一点流入, 在这种假定条件下, 运用线性波的原理模拟水体的运动<sup>[22]</sup>。采用 1984-2005 年东江流域博罗水文站月平均天然径流量资料进行径流模拟的率定与校验, 其中 1984-1992 年天然径流数据用于模型率定, 1993-2005 年数据用于模型验证。与之对应, 1984-1992 年的径流模拟过程采用 1984-1992 年的气象数据、1982-1984 年下垫面数据作为模型的输入数据; 1993-2005 年的径流模拟过程采用 1993-2005 年的气象数据、1999-2001 年下垫面数据作为模型的输入数据。采用以下基本步骤进行水文过程模拟的参数调整<sup>[32]</sup>: ① 年度总径流量偏差纠正; ② 季节总径流量偏差纠正; ③ 高流量与低流量部分偏差纠正。

### 3.3 模拟结果

模拟的月径流过程在模型校正期和验证期都取得了较好的模拟精度 (表 1, 图 2)。在径流校正和验证中  $D_v$  分别为 0.53% 和 -5%,  $D_v$  绝对值小于 10%; ENS 分别为 0.93 和 0.89, 大于 0.7。

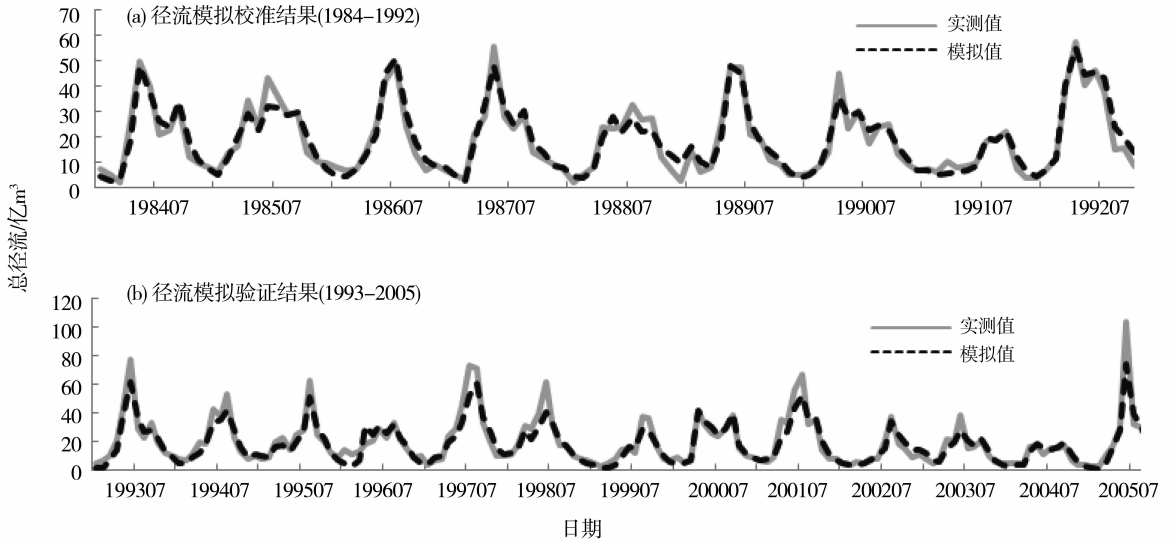


图 2 博罗水文站径流模拟结果（博罗水文站）

Fig. 2 Results of runoff simulation at Boluo hydrologic station (1984 - 2005)

表 1 博罗站径流模拟结果<sup>1)</sup>

Table 1 The simulation results of runoff at Boluo station

时段	年均径流量/(亿 m <sup>3</sup> )		D <sub>v</sub> /%	ENS
	观测值	模拟值		
校正期	223	224	0.527	0.926
验证期	237	225	-4.996	0.894

1) 校正期为 1984 - 1992 年, 验证期为 1993 - 2005 年

## 4 模拟过程

### 4.1 未来土地利用变化情景下的径流模拟

4.1.1 未来土地利用情景预测 CA-Markov 模型发挥了 CA 模型模拟复杂系统空间变化和 Markov 模型长期预测的能力, 既提高了土地利用类型转化的预测精度, 又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化, 可以很好地从时间和空间上模拟土地利用的变化情况<sup>[33]</sup>。在本文中应用 CA-Markov 模型预测东江流域未来的土地利用状况, 并依据不同的城镇建设用地增长速度设计生成不同的土地利用变化状态及土地利用类型空间分布格局。CA-Markov 模型由 Markov 链、多准则评估 (MCE) 和 CA 组成<sup>[34-36]</sup>。模型构建过程分为: ①确定转换规则; ②适宜性图集创建; ③构造 CA 滤波器; ④确定起始时刻和 CA 循环次数。

本文首先以 1980 年土地利用图为基准, 模拟出 2000 年东江流域土地利用仿真图并与实际解译的 2000 年土地利用图进行对比作栅格的差值运算, 获取模拟精度。采用全数检验法<sup>[37]</sup>对模拟精度进行检验, 对 2000 年流域总体的模拟精确率为 0.777, 反映出模拟结果与实际情况较吻合, 模拟

结果精度较高, 接下来可进一步进行东江流域未来土地利用格局的模拟预测。

在此基础上以 2000 年土地利用格局为起始时刻, 模拟预测 2030 年东江流域的土地利用空间格局。在模拟预测的过程中依据 2005 年东江流域土地利用统计数据、东江流域发展现状、社会经济发展与退耕还林、生态公益林建设等流域生态保护政策对模型预测过程进行调整。同时, 为了研究不同土地利用发展格局对东江流域径流的影响, 研究过程中根据不同的城镇建设用地增长速度, 设计了三种不同的发展情景, 分别为平稳发展情景 (情景 a)、高速发展情景 (情景 b) 和极速发展情景 (情景 c)。

三种发展情景的各类型土地面积对比见图 3。东江流域建设用地增长的主要来源是耕地, 因此三种情景中, 林地、草地、园地、水域和未利用地面积基本持平, 主要是建设用地面积和耕地面积分别呈线性增长和线性减少。

4.1.2 未来土地利用变化情景下的径流模拟 将 2000 年东江流域土地利用状况作为基准情况, 利用 CA-Markov 模型模拟得到的 2030 年不同土地利用情景分别作为平稳发展情景 (情景 a)、高速发展情景 (情景 b) 与极速发展情景 (情景 c), 利用已经建立好的基于 HSPF 的东江流域水文模型, 分别对各种情景下东江流域径流进行模拟 (采用 1995 - 2005 年的气象数据)。每种土地利用情景生成的下垫面数据被分别用来生成 HSPF 模型运行所需的 UCI 文件, 采用模型构建阶段校准好的参数

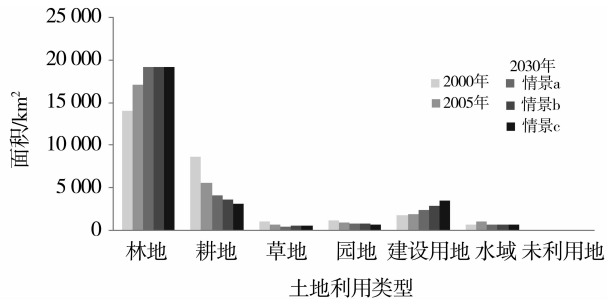


图3 不同发展情景下各类型土地利用面积

Fig. 3 Projected land use changes under different scenarios by 2030

系统以及相同的气象数据 WDM 文件, 在不同的土地利用情况下 HSPF 模型被运行 3 次, 得到不同土地利用情景下的东江流域径流模拟结果。

#### 4.2 模拟不同降雨情况下土地利用变化对径流的影响

有研究成果表明, 降雨量的大小对于径流对土地利用变化的响应程度有影响。如王盛萍等<sup>[38]</sup>通过对黄土高原典型小流域进行研究, 认为随着降雨的增多, 研究流域内土地利用与植被变化对径流的影响效应增强; 李恒鹏等<sup>[39]</sup>的研究表明太湖流域土地利用变化导致的产流量和总氮输出变化与降雨分布和雨情特征有关; 王艳君等<sup>[40]</sup>研究发现在相同的土地利用变化条件下秦淮河流域枯水年的水文

响应最强, 丰水年响应最弱; 陈莹<sup>[16]</sup>研究发现随着暴雨重现期的延长, 太湖上游西苕溪流域土地利用变化对洪水过程的影响逐渐减小; 张晓明等<sup>[14]</sup>对黄土高原典型小流域的研究表明随着年降水量增多, 流域内土地利用/覆被变化的减沙效应更明显。因此本文在 4.1 节的基础上, 进一步模拟不同降雨情况下土地利用变化的水文效应。

4.2.1 建立东江流域日降雨模拟模型 为了进一步分析土地利用变化的径流变化响应在不同降雨条件下的表现, 建立了东江流域的日降雨随机模拟模型, 生成降雨均值变化情况下的日降雨序列, 输入 WDMUTIL 工具生成 HSPF 模型运行所需的气象文件。日降雨随机模拟模型的建立采用的数学方法<sup>[3]</sup>主要有①随机理论, 降雨序列可看作是天气转化情况和降雨量两者随机遭遇组合而成; ② Pearson-III 型分布, P-III 型曲线较常应用于气象水文频率计算; ③马尔科夫链, 马尔科夫链在气象研究中有着广泛的应用<sup>[41]</sup>。

首先采用泰森多边形面积权重法计算东江流域的面平均降雨量。根据对东江流域多年降雨数据的统计分析结果, 东江流域 1983 - 1985 年间可能存在年降雨量的突变, 因此采用东江流域 1986 - 2010 年 25 a 的降雨数据进行现状条件下降雨的模拟。

模拟结果与实测数据的对比如表 2 所示。

表 2 1986 - 2010 年多年平均日降雨随机模拟结果

Table 2 Results of daily rainfall stochastic simulation of every month during 1986 - 2010

月份	月均降雨天数/d		相差天数/d	月均降雨量/mm		绝对差值/mm	相对误差/%
	实测	模拟		实测	模拟		
1	11	12	1	48.23	46.02	-2.20	-4.57
2	15	14	-1	76.28	73.91	-2.37	-3.11
3	21	20	-1	139.01	119.41	-19.60	-14.10
4	22	20	-2	209.12	181.49	-27.63	-13.21
5	23	22	-1	246.21	236.07	-10.14	-4.12
6	26	24	-2	344.98	343.76	-1.22	-0.35
7	24	23	-1	221.93	222.67	0.74	0.33
8	25	24	-1	229.39	217.55	-11.84	-5.16
9	19	18	-1	147.19	141.03	-6.15	-4.18
10	10	8	-2	39.18	40.98	1.80	4.59
11	9	7	-2	32.90	36.96	4.05	12.32
12	8	8	0	39.84	38.44	-1.41	-3.53
年合计	213	200	-13	1774.28	1698.3	-75.97	-4.28

由表 2 可见各月降雨天数与实测资料最大相差 2 d, 全年相差 13 d。各月模拟值与实测值月均降雨量相对误差都在 15% 以内, 相对误差的绝对值最小 0.33%, 最大 14.1%。降雨模拟序列与实测序列较吻合, 模拟结果具有良好的精度, 建立的东江流域日降雨随机模拟模型适合应用在东江流域的降雨变化的情景模拟及影响分析中。

#### 4.2.2 不同降雨条件下土地利用变化的径流模拟

已建立好的东江流域日降雨模拟模型可生成当降雨量分布函数参数发生变化时的日降雨序列, 其结果可输入 HSPF 模型以模拟分析当降雨条件发生变化时的流域水文效应。

本文分别生成了降雨增加 20%、40% 和减少 20%、40% 的东江流域日降雨数据序列, 并与未来土地利用变化的预测结果结合分析不同降雨条件下土地利用变化引起的径流变化。将不同的下垫面数据与不同降雨量条件下生成的气象数据文件导入模型生成不同的 HSPF 的 UCI 文件模拟径流过程, HSPF 模型共需运行 12 次 (表 3)。为方便对模拟结果进行对比分析, 运行 HSPF 模型所采用的 2001-2010 年降雨数据、模拟生成的降雨条件变化下的日降雨量数据序列均采用流域面平均降雨量。

表 3 模拟情景组合

Table 3 Scenarios for modeling analysis

情景组合	降雨	土地利用
A_ 2000 A_ 2030a A_ 2030c	A: 2001-2010 年 气象数据	2000 年土地利用情景 2030 年土地利用情景 a 2030 年土地利用情景 c
B_ 2000 B_ 2030a B_ 2030c	B: 降雨均值增加 20% 后的气象数据序列	2000 年土地利用情景 2030 年土地利用情景 a 2030 年土地利用情景 c
C_ 2000 C_ 2030a C_ 2030c	C: 降雨均值增加 40% 后的气象数据序列	2000 年土地利用情景 2030 年土地利用情景 a 2030 年土地利用情景 c
D_ 2000 D_ 2030a D_ 2030c	D: 降雨均值减少 20% 后的气象数据序列	2000 年土地利用情景 2030 年土地利用情景 a 2030 年土地利用情景 c
E_ 2000 E_ 2030a E_ 2030c	E: 降雨均值减少 40% 后的气象数据序列	2000 年土地利用情景 2030 年土地利用情景 a 2030 年土地利用情景 c

## 5 结果与讨论

### 5.1 未来土地利用情景下的径流的变化

5.1.1 年均径流的变化 2030 年东江流域土地利用格局变化所引起的径流 (采用流域出口博罗的

模拟结果, 下同) 的变化情况见表 4。从表 4 对模拟结果的统计可见, 各土地利用变化情景所引起的年均径流的变化很小, 即使在极速发展情景下 (情景 c), 到 2030 年模拟得到的年均径流也只增长了 1.21% (与 2000 年土地利用情况作为基准情况相比)。White 等<sup>[42]</sup>对美国加利福尼亚的一个流域的研究得出了类似的结论, 当城镇化率从 9% 发展到 37% 时总径流的改变仍然是不显著的。

与 2000 年相比, 地表径流的增长非常显著。进一步比较 2030 年 3 种不同土地利用变化情景的年均地表径流变化情况, 三种土地利用情景的林地、草地、园地、水域和未利用地面积基本持平, 主要是建设用地面积和耕地面积分别增长和减少, 与由此所带来的年均总径流的变化相比, 地表径流的变化较明显, 高速发展情景 (情景 b) 比平稳发展情景 (情景 a) 年均地表径流模拟值大 7.5%, 极速发展情景 (情景 c) 比高速发展情景 (情景 b) 年均地表径流模拟值大 9.3%。土地利用状况方面城镇化主要表现在耕地转化为建设用地, 情景 a、b、c 中建设用地面积分别占流域面积的 8.6%、10.4% 和 12.4%, 情景 a、b、c 中耕地面积分别占 14.8%、13.1% 和 11.4%, 虽然在东江流域建设用地面积所占比例较小, 但由此所带来的地表径流的改变与总径流的变化相比还是显著的。

以上分析结果与 Kim 等<sup>[43]</sup>的研究结果相近, Kim 等的研究表明: 随着城镇化的发展地表径流会增加而地下径流减少, 即使在 1986-2002 年期间研究区域 (韩国的一个流域) 城镇化率只增长了 5.5%, 由此所带来的地表径流的增长达到了 14.3%。Choi 等<sup>[44]</sup>对美国中西部地区一个流域的研究也表明, 当城镇建设用地面积从 2.9% 增长到 6% 时, 总径流只增长了 1.7% 而地表径流增长了 38.5%。

5.1.2 月均径流的变化 对 2000 年基准情况和 2030 年土地利用变化情景下的每月月均径流模拟结果对比, 结果表明: 总径流每月月均值变化很小, 而月均地表径流变化较明显, 在 4-8 月雨季因建设用地面积比例增加所带来的月均地表径流值的增长较其它月份更明显。

5.1.3 高低流量的变化 表 4 中 Q5 月均流量和 Q95 月均流量分别表示月均流量时间序列中小于其中 5% 和 95% 的月均流量的值。通过分析 Q5 和 Q95 流量值的变化, 分析 2030 年不同土地利用情景所带来的高、低流量的变化。与 2000 年基准情况相比, 2030 年不同土地利用情景模拟得到的 Q5

表 4 模拟预测的由土地利用变化引起的各径流成分的改变

Table 4 HSPF predicted changes in runoff components due to land use change

项目	2000 年下垫面	2030 年下垫面			径流变化率/% <sup>1)</sup>		
		情景 a	情景 b	情景 c	情景 a	情景 b	情景 c
年均径流/(mm · a <sup>-1</sup> )	883.32	889.27	892.11	893.99	0.67	1.00	1.21
年均地表径流/(mm · a <sup>-1</sup> )	571.56	608.10	653.91	714.91	6.39	14.41	25.08
Q5 月流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	1638.18	1655.5	1681.83	1704.11	1.06	2.66	4.02
Q95 月流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	129.99	139	138.23	136.92	6.93	6.34	5.33
流量高于 2370m <sup>3</sup> /s 的天数	95	101	112	119	-	-	-
流量低于 134m <sup>3</sup> /s 的天数	314	312	315	315	-	-	-

1) 径流变化率为相对于基准情况的径流量/流量的变化情况

流量值和 Q95 流量值均有所增长: 情景 a、情景 b 与情景 c 的 Q5 流量值分别比 2000 年基准情况增长了 1.06%、2.66% 和 4.02%, 同时, Q95 流量值分别增长了 6.93%、6.34% 和 5.33%。低流量值部分的增长比高流量值部分的增长更为明显, Choi 等<sup>[44]</sup>的研究得到了相似的结论, 这种模拟结果可能由多种原因造成<sup>[44]</sup>。进一步比较三种情景的模拟结果, 随着建设用地面积的增加模拟得到的 Q5 月均流量值 (高流量) 随之增加; 2030 年 a 情景模拟得到的 Q95 月均流量值 (低流量) 比 2000 年基准情况增加了 6.93%, 但随着建设用地面积的增加 (情景 b、情景 c), Q95 的增加幅度逐渐下降 (情景 b 比 2000 年基准情况增加 6.34%, 情景 c 增加 5.33%)。因此低流量的增长的主要原因可能是由于 2030 年东江流域林地面积 (与 2000 年相比) 的增长引起的, 并且这种增长随着建设用地的继续扩张 (林地面积基本不变, 耕地减少) 而下降; 高流量的增加的主要原因可能是建设用地的扩张引起, 由于东江流域建设用地面积比例较少, 因此这也可能是本文研究得到的高流量的增加幅度

低于低流量的原因。

为了进一步分析高低流量的变化, 对高低流量的天数也进行了统计分析。多年的最高和最低月均流量值能够比最高日均流量和最低日均流量值更好的代表高、低流量事件的出现频率<sup>[44]</sup>。对东江流域实测月均流量进行统计, 由于 20 世纪 90 年代以后东江流域实测流量受水利工程的可能影响较大, 因此对东江博罗水文站 1956 - 1985 年 30 a 的实测月均流量进行了统计, 分别取 2370m<sup>3</sup>/s (经验频率期望公式计算值 2.2%) 和 134 m<sup>3</sup>/s (经验频率期望公式计算值 98.1%) 作为高值和低值流量的代表, 测得日期分别为 1964 年 6 月和 1960 年 1 月。由表 4 可见, 在 2030 年 3 种土地利用情景下, 日均流量高于 2 370 m<sup>3</sup>/s 的天数逐步增加, 日均流量低于 134m<sup>3</sup>/s 的天数变化不明显。

## 5.2 不同降雨情况下土地利用变化的径流响应表现

不同降雨情况下土地利用变化引起的年均径流的变化见表 5。

表 5 不同降雨情况下土地利用变化引起的年均径流改变

Table 5 HSPF predicted changes of mean annual runoff due to land use change under different precipitation

项 目	2000 年下垫面 径流量/(mm · a <sup>-1</sup> )	2030 年下垫面			
		情景 a		情景 c	
		径流量 (mm · a <sup>-1</sup> )	变化率/%	径流量 (mm · a <sup>-1</sup> )	变化率/%
A 降雨情景 (现状降雨情况)	863.00	869.21	0.76	874.31	1.35
B 降雨情景 (降雨均值增加 20%)	1 155.86	1 162.59	0.58	1 168.13	1.06
C 降雨情景 (降雨均值增加 40%)	1 457.08	1 463.8	0.46	1 469.82	0.87
D 降雨情景 (降雨均值减小 20%)	581.46	587.76	1.08	592.2	1.85
E 降雨情景 (降雨均值减小 40%)	319.01	324.52	1.73	328.23	2.89

注: 变化率为相对于 2000 年下垫面的多年平均径流量的变化率

由表 5 可见, 在东江流域, 降雨是径流量改变的主导因素, 当降雨增加时, 2030 年径流显著增长, 当

降雨减少时, 径流显著减少。但由于本节的主要研究目的不是为了模拟出未来土地利用和降雨同时变

化情景下的径流,而是通过模型模拟对比东江流域土地利用变化的径流变化响应在不同降雨情况下的表现,在进行分析时,比较的是不同下垫面在同一降雨情景下的径流模拟值,因此 2000 年下垫面也采用了不同的降雨情景进行了径流模拟。

在同样的土地利用变化情景下,降雨量均值增长 20% 时,土地利用变化所带来的年均径流增长幅度有所减小,当降雨量均值增长 40% 时,年均径流增长幅度进一步减小;而当降雨量均值减小 20% 时,年均径流增长幅度增大,当降雨量均值减小 40% 时,土地利用变化引起的径流增长幅度进一步加大。

降雨量大,东江流域未来土地利用变化引起的径流的变化会减小;降雨量小,这种影响效应会增强。总的来说,在设定的各种降雨情况下(降雨量增加 20%、40%,降雨量减少 20%、40%),未来土地利用变化引起的总径流的变化都不大,但是对地表径流有显著的影响。

## 6 结 论

1) 本文建立的基于 HSPF 的东江流域水文模拟模型能够较好的模拟东江流域长期径流过程,适合应用在气候变化和土地利用变化对于东江流域径流的影响研究中。

2) CA-Markov 模型是对未来土地利用格局进行预测的有力工具,本文利用该模型对东江流域未来土地利用变化进行预测模拟,并基于不同的建设用地面积增长速度设计了不同的发展情景,与 HSPF 模型结合,对未来土地利用变化引起的径流变化进行模拟分析。结果表明,在未来土地利用变化情景下总径流的变化很小,然而地表径流有较显著的改变。这意味着未来土地利用的改变不会对东江流域整体可利用水资源量造成很大影响,但是地表径流的增加可能会对流域泥沙和营养物等物质的产生与输送造成影响。

3) 本文还对高、低流量的改变进行了分析讨论,模拟结果表明未来土地利用变化情景下高、低流量值都有所增长;低流量的增长幅度高于高流量,这可能主要是由于东江流域未来林地面积的增长引起的;进一步对比分析不同城镇用地增长情景下径流模拟结果,随着城镇建设用地面积比例的进一步增加(林地面积不变)高流量值随之增长而低流量减少。

4) 为了进一步分析不同降雨情景下土地利用变化引起的水文效应,建立了东江流域日降雨模拟模型,将随机模拟生成的日降雨序列与实测数据对比,模拟效果良好,在此基础上生成降雨量均值分别

增加 20%、40% 和减少 20%、40% 的降雨情景。HSPF 模型模拟结果表明,降雨量大,径流对于未来土地利用变化的响应程度减弱;降雨量小,未来土地利用变化的水文效应增强。总的来说,四种降雨情景下未来土地利用变化对总径流的影响都不大,但是对地表径流有较显著的影响。

## 参考文献:

- [1] LAHMER W, PFUTZNER B, BECKER A. Assessment of land use and climate change impacts on the Mesoscale [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26(7/8): 565-575.
- [2] 万荣幸,杨桂山. 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3): 259-264.
- [3] 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: 3-16.
- [4] JORGE R. Land use change in tropical hillsides: the influence of pattern on process[J]. *Advances in Environmental Monitoring and Modeling*, 2000, 1(1): 61-79.
- [5] DE ROO A, ODIJK M, SCHMUCK G, et al. Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26(7/8): 593-599.
- [6] ALBEK M, OGUTVEREN U B, ALBEK E. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1/2/3/4): 260-271.
- [7] GHAFFARI G, KEESSTRA S, GHODOUSI J, et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(7): 892-903.
- [8] NIE W, YUAN Y, KEPNER W, et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/2/3/4): 105-114.
- [9] AKTER A, BABEL M S. Hydrological modeling of the Mun River basin in Thailand [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453: 232-246.
- [10] 于兴修, 杨桂山, 梁涛. 西苜蓿流域土地利用对氮素径流流失过程的影响 [J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 424-427.
- [11] 杨金玲, 张甘霖, 张华. 亚热带丘陵区流域不同土地利用系统磷素径流输出特征 [J]. *环境科学*, 2002, 23(5): 36-41.
- [12] 张蕾娜, 李秀彬. 云州水库流域土地利用变化水文效应的特征参数分析 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 10.
- [13] 陈雅琳, 常学礼, 崔步礼. 山东半岛典型流域土地利用变化对径流的影响分析 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 104-107.
- [14] 张晓明, 曹文洪, 余新晓, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域径流输沙对土地利用/覆被变化的影响 [J]. *应用*

- 生态学报, 2009, 20(1): 121 - 127.
- [15] 王渺林, 夏军. 土地利用变化和气候波动对东江流域水循环的影响[J]. 人民珠江, 2004(2): 4 - 6.
- [16] 陈莹, 许有鹏, 尹义星. 土地利用/覆被变化下的暴雨径流过程模拟分析—以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 117 - 123.
- [17] 王秀娟, 刘瑞民, 宫永伟, 等. 香溪河流域土地利用格局演变对非点源污染的影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 1194 - 1200.
- [18] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312 - 1321.
- [19] 陈媛, 郭秀锐, 程水源, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 798 - 806.
- [20] YOU Y Y, JIN W B, XIONG Q X, et al. Simulation and validation of non-point source nitrogen and phosphorus loads under different land uses in Sihuan Basin, Hubei Province, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012(13): 1781 - 1797.
- [21] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 5 - 10.
- [22] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 261 - 280.
- [23] 郝振纯, 李丽, 王加虎, 等. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 161 - 177.
- [24] DAWDY D R, BERGMAN J M. Effect of rainoff variability on streamflow simulation [J]. Water Resources Research, 1991, 5(5): 958 - 966.
- [25] SELIGA T A, AROU G, AYDIN K, et al. Storm runoff simulation using radar-estimated rainfall rates and a unit hydrograph model (SYN-HYD) applied to the Greve watershed [C] // 25th Int Conf on Radar Meteorol, Amer Meteorol Soc. Paris, France, 1991: 587 - 590.
- [26] ARNAUD P, BOUVIER C, CISNEROS L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction [J]. Journal of Hydrology, 2002, 260(1/2/3/4): 216 - 230.
- [27] LEE S, NI-MESISTER W, TOLL D. Assessing the hydrologic performance of the EPA's nonpoint source water quality assessment decision support tool using North American Land Data Assimilation System (NLDAS) products [J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3/4): 212 - 220.
- [28] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282 - 290.
- [29] American Society of Civil Engineers. Criteria for evaluation of watershed models (ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee Irrigation and Drainage Division) [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, 1993, 119(3): 429 - 442.
- [30] DONIGAN A S, IMHOF J C, BICKNELL B R, et al. Application Guide for Hydrological Simulation Program: FORTRAN (HSPF) [S]. EPA - 600/3 - 84 - 065, Environmental Research Laboratory, Athens, GA, 1984: 177.
- [31] 林诚二, 村上正吾, 渡边正孝, 等. 基于全球降水数据估计值的地表径流模拟—以长江上游地区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 125 - 135.
- [32] 董延军, 李杰, 郑江丽, 等. 流域水文水质模拟软件 (HSPF) 应用指南 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 111 - 125.
- [33] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007(5): 414 - 418.
- [34] 肖明, 吴季秋, 陈秋波, 等. 基于 CA-Markov 模型的昌化江流域土地利用动态变化 [J]. 农业工程学报, 2012(10): 231 - 238.
- [35] 刘淑燕, 余新晓, 李庆云, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土丘陵区土地利用变化 [J]. 农业工程学报, 2010(11): 297 - 303.
- [36] 龚文峰, 袁力, 范文义. 基于 CA-Markov 的哈尔滨市土地利用变化及预测 [J]. 农业工程学报, 2012(14): 216 - 222.
- [37] KAMUSOKO C, ANIVA M, ADI B, et al. Rural sustainability under threat in Zimbabwe-simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model [J]. Applied Geography, 2009, 29(3): 435 - 447.
- [38] 王盛萍, 张志强, 孙阁, 等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应—以甘肃天水吕二沟流域为例 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 48 - 54.
- [39] 李恒鹏, 杨桂山, 李燕. 太湖流域土地利用变化的营养盐输出响应模拟 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 179 - 182.
- [40] 王艳君, 吕宏军, 施雅风, 等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响—以秦淮河流域为例 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 30 - 36.
- [41] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 335 - 348.
- [42] WHITE M D, GREER K A. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 74(2): 125 - 138.
- [43] KIM S J, KWON H J, PARK G A, et al. Assessment of land-use impact on streamflow via a grid-based modeling approach including paddy fields [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(19): 3801 - 3817.
- [44] CHOI W, DEAL B M. Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA) [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1119 - 1130.