

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.03.07

# 土地利用变化对东江流域产流过程影响的定量评估

吕乐婷<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 江源<sup>2,3</sup>, 郑德凤<sup>1</sup>, 王晓蕊<sup>1</sup>

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁大连 116029; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;  
3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 基于 SWAT(soil and water assessment tool) 模型, 对东江流域的水文过程进行了模拟, 并分别采用 1990 年、2000 年、2009 年土地利用数据驱动模型, 定量评价东江流域 1990—2009 年土地利用变化对流域水文过程产生的影响。结果表明: ①流域出口月径流模拟率定期确定性系数  $R^2$  为 0.89, Nash-Sutcliffe 效率系数  $E_{NS}$  为 0.87; 验证期  $R^2$  为 0.88,  $E_{NS}$  为 0.87, 东江流域 SWAT 模型径流模拟精度较高; 近年来流域林地、草地面积减少, 园地、城镇用地、水域面积增加。②在此影响下, 东江流域单位面积侧向流降低了 9.66 mm、基流降低了 4.86 mm, 地表径流增加了 8.26 mm、实际蒸发增加了 6.40 mm、潜在蒸发增加了 4.40 mm; 径流总量共减少了 6.38 mm。③地表径流、侧向流对土地利用变化的响应在雨季更为敏感, 实际蒸发、潜在蒸发及径流总量对土地利用变化的响应在旱季更为敏感。

**关键词:** 土地利用变化; 水文响应; SWAT 模型; 东江流域

中图分类号: P339 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2018)03-0045-07

## Quantitative assessment on influence of land use change on process of runoff production in Dongjiang River Basin

LYU Leting<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, JIANG Yuan<sup>2,3</sup>, ZHENG Defeng<sup>1</sup>, WANG Xiaorui<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;  
2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The runoff process of Dongjiang River Basin was simulated based on SWAT(soil and water assessment tool), and the model was droved using different land use data of the year of 1990、2000 and 2009 to evaluated quantitatively the influence of land use change on the process of runoff production in Dongjiang River Basin. The results showed that (1)  $R^2$  and  $E_{NS}$  of calibration and validation were (0.89, 0.87) and (0.88, 0.87), respectively. SWAT model performed well in Dongjiang River basin. In recent years, the area of forest and grassland has reduced, while the area of garden land, urban land and water has increased. (2) Under the influence of this, sideward flow and base flow was decreased by 9.66 mm and 4.86 mm, respectively. The surface runoff, actual evaporation and potential evapotranspiration were increased by 8.26 mm, 6.4 mm and 4.4 mm, respectively. The total runoff was decreased by 6.38 mm. (3) Surface runoff, sideward flow were more sensitive to land use change during rainy seasons, and actual evaporation, potential evapotranspiration and total runoff were more sensitive to land use change during dry seasons.

**Key words:** land use change; hydrological response; SWAT model; Dongjiang River Basin

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501002-04); 国家自然科学基金(41701208)

作者简介: 吕乐婷(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水资源评估及水文生态系统保护研究。E-mail: lvleting@lnu.edu.cn

通信作者: 江源, 教授, 博士生导师。E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

土地利用变化是短期内影响流域水文循环的主要驱动因素之一。它通过改变下垫面特征进而改变产流过程时空特性,对流域水文循环产生作用<sup>[1]</sup>。水文过程及特点的变化又会反作用于土地利用方式,两者之间相互影响,错综复杂。开展流域土地利用变化的水文响应研究有利于流域水资源合理开发与管理,可为流域社会经济可持续发展提供科学的决策支持,已成为当前全球变化和水科学研究的热点<sup>[2]</sup>。

目前,国内外学者多采用模型模拟的方法定量分析流域土地利用变化对径流的影响,分布式水文模型 SWAT(soil and water assessment tool)在该项研究上的应用尤为广泛<sup>[2-5]</sup>,其中以情景模拟较为多见<sup>[6]</sup>,对于地表径流的关注度较高。如 Zhou 等<sup>[7]</sup>耦合了 CLUE-S 算法和 SWAT 模型,对长江三角洲西苕溪流域城市化发展的时空尺度水文响应进行了定量分析,结果发现,城市扩张对年径流和实际蒸散的影响较为显著,洪峰流量和洪水总量均有增加; Baker 等<sup>[5]</sup>对肯尼亚 Njoro 河流域土地利用变化对水资源的影响做了定量评估,认为该区域土地利用变化使地表径流增加,基流减少;Wagner 等<sup>[8]</sup>也利用不同土地利用情景建立了多个 SWAT 模型,对印度 Mula 和 Mutha 流域的水资源变化进行了模拟,发现该流域城市化使得雨季径流增加,而农业用地的增加则加剧了旱季水资源的缺乏。国内亦有多位学者基于 SWAT 模型,对不同流域土地利用变化给水资源带来的影响进行了评估<sup>[9-11]</sup>,成果颇丰。然而,相关研究大多是分析流域土地利用情景变化对年、月径流或洪枯径流的影响,缺少关于流域实际土地利用变化对地表径流、蒸散发、土壤水等水文过程影响的研究,在揭示土地利用变化对水文过程的影响机制方面有所欠缺<sup>[12]</sup>。

东江流域是我国东南沿海水资源承载负荷最重的流域之一,是香港、深圳、东莞等重要城市的饮用水源地,其水资源变化会对区域生态环境和经济发展产生重大的影响。1978 年以来,流域城市化过程显著,自然植被减少突出,目前有学者已开展了东江流域土地利用变化对年、月径流的影响研究<sup>[13]</sup>。东江流域经济发达,河道的人为干扰程度较高,相对于水库闸坝的人工干预,流域下垫面的变化对水文过程带来的影响可控性低,恢复难,需要引起格外重视。笔者利用前期建立的东江流域 SWAT 模型<sup>[14]</sup>及多期流域土地利用数据,定量分析了 1999—2009 年土地利用变化对东江流域水文过程的影响,以期优化土地利用结构、实现流域水资源科学管理提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

东江为珠江四大水系之一,位于东经 113°25′—115°52′,北纬 22°26′—25°12′,发源于江西省寻乌县,地跨江西、广东两省,沿途主要流经龙川、河源、惠州、东莞、深圳等地。东江干流全长 562 km,流域总面积 35 340 km<sup>2</sup>。东江流域地处亚热带季风气候区,气温较高,雨量充沛。流域多年平均气温约 21℃,年总降雨量 1 600~2 200 mm。流域地势东北高,西南低,上游以低中山、丘陵地貌为主,中游以丘陵和平原为主,下游以平原地貌为主。本研究选择博罗水文站作为流域出口<sup>[15-16]</sup>。博罗水文站是东江干流下游的主要控制站,其汇水面积达 25 325 km<sup>2</sup>,占东江流域总面积的 71.7% (图 1)。下文中提及东江流域均指东江流域博罗站集水区。

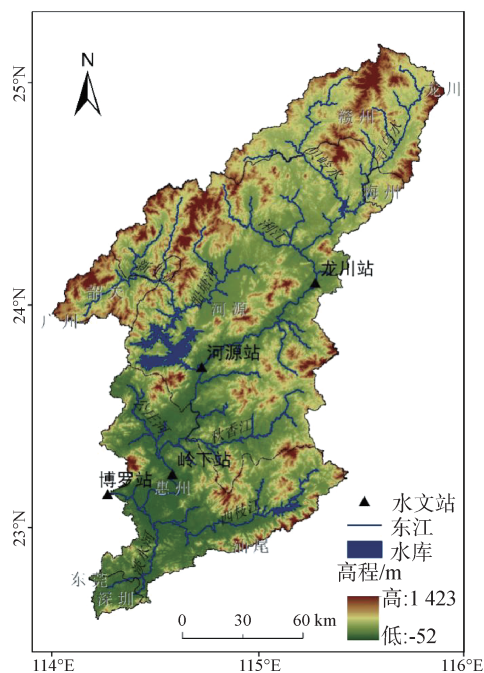


图 1 东江流域概况

### 1.2 数据来源

气象数据包括降雨、气温、太阳辐射、风速、相对湿度,来源于中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.cma.gov.cn/>。水文数据来源于中国水文年鉴,包括东江干流 4 个水文站点(龙川站、河源站、岭下站和博罗站)的长序列径流数据。本文所采用的 1990 年、2000 年和 2009 年 3 期东江流域土地利用图来源于任斐鹏等<sup>[17]</sup>的研究成果。这 3 期土地利用图由 TM/ETM 数据解译而得,分类方法参照了中国科学院资源环境数据中心的土地分类系统,首先对 TM/ETM 数据进行了几何校正、去云等预处理,并进行大气校正和辐射定标,统一分辨率至 30 m,

然后采用人机交互目视解译的方式,选用最大似然法对目标影像进行监督分类,最终得到流域3期土地利用图。分类结果的检验采用随机采样方法,依据广东、江西两省土地利用专题图件及流域实地采样进行人机交互验证,验证结果皆达到了最低允许判别精度(Kappa 不小于0.70)的要求<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法与模型建立

### 2.1 研究方法

SWAT模型基于水量平衡方程原理,将流域水文循环分为陆地阶段和汇流阶段两部分。陆地阶段描述了子流域内水流、泥沙、营养物等向主河道汇入的过程;汇流阶段则描述了流域河网中水流、泥沙等的输移过程<sup>[19]</sup>。模型可输出子流域蒸散发量、地表径流量、土壤渗漏量以及地下径流量。

为了定量区分土地利用变化对东江流域水文循环的影响,本文基于前期研究所建立的东江流域SWAT模型(模型中土地利用数据年份为1990年)<sup>[14]</sup>,模拟了1990—2010年气象条件下,东江流域水文循环过程。在相同的气象条件下,分别将模型中土地利用数据替换为2000年、2009年,模拟当土地利用发生变化时流域的水文循环过程。在此基础上,以子流域为统计尺度,对3种土地利用情况下各水文通量<sup>[7]</sup>的月均值、年均值及变化情况进行了统计,分析1990—2009年土地利用变化对东江流域水文过程的影响。

### 2.2 SWAT模型的建立与参数化

为了进一步细化流域水文过程在空间上的差异,基于前期建立的东江流域SWAT模型<sup>[14]</sup>,将东江流域划分为46个子流域,468个水文响应单元,并利用流域内4个水文站点在人类活动影响极小时期(1953—1974年,其中1956年数据缺失)径流数据用于模型的率定和验证,尽量还原天然状态下流域降雨—产流过程。在水文参数的率定方面,本文亦

进行了改进。由于径流曲线数、土壤层有效持水量等参数与土地利用及土壤类型密切相关,因此在率定时将不同土地利用及土壤类型的参数分开率定。同时为了简化计算,选择了土地利用比例最大的林地、果园、草地以及占土壤类型比例最大的赤红壤、红壤、水稻土,对其径流曲线数、土壤层有效持水量这2个参数分开率定<sup>[20]</sup>。参数的率定与验证皆利用SWAT-CUP提供的SUFI-2算法进行<sup>[21-24]</sup>。结果显示:流域出口博罗站月径流模拟率定期确定性系数 $R^2$ 为0.89, Nash-Sutcliffe效率系数 $E_{NS}$ 为0.87;验证期 $R^2$ 为0.88,  $E_{NS}$ 为0.87(图2)。可见,东江流域SWAT模型径流模拟精度高,水文参数概化效果较好<sup>[25-26]</sup>,可基本准确地描述流域的水文过程,并可用于后续土地利用对于水循环影响的研究。

## 3 结果与分析

### 3.1 1990—2009年东江土地利用变化分析

东江流域林地分布广泛,森林林冠可拦截降水,林下枯落物、腐殖质和土壤层能积蓄降水,减少土壤侵蚀,对水土保持十分有利。耕地、园地多分布于山谷及中下游平原区域,城镇用地主要分布于三角洲及沿海地区。将3期土地利用数据作为SWAT模型的输入数据,并根据模型提供的土地利用类型数据库对其进行重新分类。如,研究区原土地利用数据中林地分为高密度林地、中密度林地和低密度林地,而SWAT模型数据库林地则分为常绿林、混交林及落叶林。东江流域林地多为常绿阔叶林,因此将高、中、低密度林地合并为同一种类型,对应模型中的常绿林类。原土地利用数据中滩涂重新分类为模型中“湿地(wetlands-non-soressted)”。最终,研究区土地利用类型被重新分类为农田、园地、林地等8类(图3)。土地利用类型、面积、所占比例及变化趋势见表1,土地利用转移矩阵见表2。

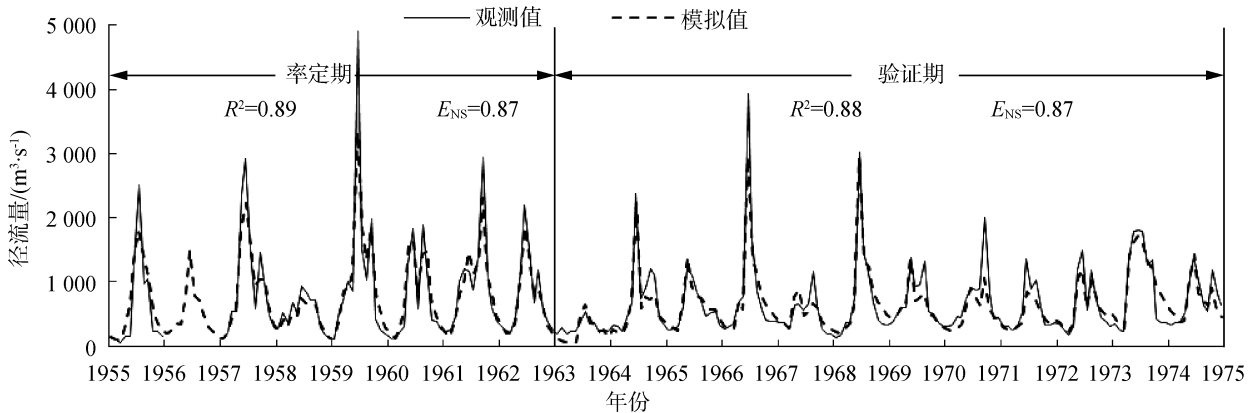


图2 博罗站月径流率定期(1953—1963年)和验证期(1964—1974年)模拟结果

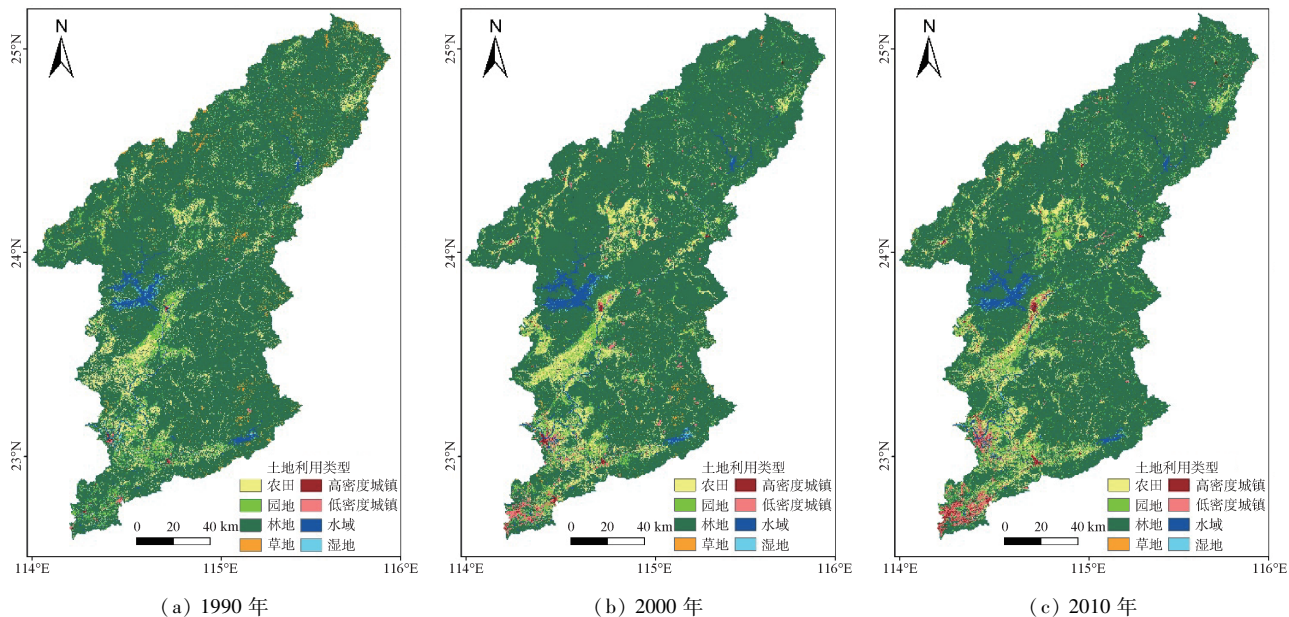


图3 土地利用重分类结果

表1 土地利用类型、面积、所占比例及变化趋势

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>			面积所占比例/%			变化面积/km <sup>2</sup>			1990—2009年变化率/%
	1990年	2000年	2009年	1990年	2000年	2009年	1990—2000年	2000—2009年	1990—2009年	
农田	2 163.91	2 220.48	2 108.01	8.65	8.88	8.43	56.57	-112.47	-55.91	-2.58
园地	874.66	1 135.31	1 351.96	3.50	4.54	5.40	260.65	216.65	477.30	54.57
林地	20 537.18	20 033.27	19 796.28	82.10	80.08	79.13	-503.91	-236.99	-740.90	-3.61
草地	694.14	251.39	195.39	2.77	1.00	0.78	-442.75	-56.00	-498.75	-71.85
高密度城镇	17.58	76.48	230.81	0.07	0.31	0.92	58.90	154.33	213.23	1 212.91
低密度城镇	123.58	591.35	634.80	0.49	2.36	2.54	467.77	43.45	511.22	412.94
水域	511.76	648.82	647.62	2.05	2.59	2.59	137.05	-1.20	135.86	26.55
湿地	93.09	58.84	51.03	0.37	0.24	0.20	-34.25	-7.81	-42.06	-45.18

表2 1990—2009年土地利用转移矩阵

土地利用类型	农田	园地	林地	草地	高密度城镇	低密度城镇	水域	湿地
农田	1030	374	576	6	44	94	34	7
园地	152	248	319	6	31	88	24	6
林地	884	665	18 212	166	105	351	136	15
草地	22	26	599	15	1	28	2	
高密度城镇		0	1		11	6		
低密度城镇	1	2	40	1	26	48	5	1
水域	16	29	39		11	12	394	9
湿地	3	7	8		2	8	52	12

### 3.1.1 土地利用类型变化分析

由表1可见:①林地为东江流域的主要土地利用类型,其面积占比分别为82.10%(1990年)、80.08%(2000年)和79.13%(2009年),1990—2009年林地共减少了740.90 km<sup>2</sup>,变化率为-3.61%。其中后10年变化量较前10年降低了约50%。②农田占流域总面积约8.65%(3个时期均值),1990—2009年呈现先增加后减少的变化趋势,整体减少了55.91 km<sup>2</sup>,变化率为-2.58%。③园地

占流域总面积平均约4.48%,1990—2009年呈持续增长,共增加了477.30 km<sup>2</sup>,增长率为54.57%,后10年较前10年增长量稍有降低。④城镇用地占流域总面积约2.23%,1990—2009年高密度城镇用地共增长了213.23 km<sup>2</sup>,增长率1212.91%,是流域内变化幅度最大,增长最为迅速的土地利用类型;低密度城镇用地共增长了511.22 km<sup>2</sup>,是流域内增长量最大的土地利用类型,增长率412.94%;后10年较前10年,高密度城镇用地增长量大幅增加,而低密

度城镇用地增长量大大幅度降低。⑤草地、湿地面积皆有所减少,水域面积有所增加。总体而言,1990—2009年东江流域林地、草地面积减少量最高,园地、城镇用地、水域皆有所增加。尽管林地面积占比有所降低,但仍为流域土地利用主体。

### 3.1.2 土地利用转移矩阵分析

由表2可见:①减少的林地主要转化成为农田、园地和低密度城镇用地;此外,林地向其他用地类型如草地、高密度城镇用地等也发生了不同程度转化;②减少的农田主要转向了园地及林地,增加的园地主要源于林地和农田;③增加的高、低密度城镇用地主要源于农田、园地及林地,并且两个时段内低密度城镇用地向高密度城镇用地发生了一定的转换。

### 3.2 土地利用变化对年径流各水文通量的影响

本文所统计的水文通量包括地表径流、侧向流、基流、潜在蒸发、实际蒸发以及径流总量。径流总量为地表径流、侧向流以及基流之和。东江流域土地利用变化对水文通量的影响见图4。

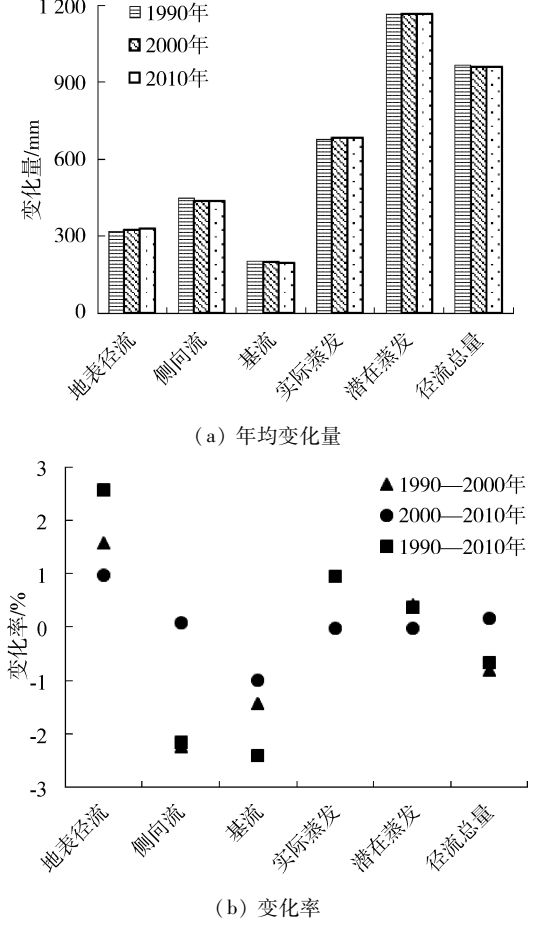


图4 东江流域土地利用变化对水文通量的影响

1990—2009年,在流域土地利用的变化驱动下,东江流域地表径流由320.42 mm增加至328.68 mm,共增加了8.26 mm,变化率为2.58%。侧向流由447.84 mm减少至438.18 mm,共减少了9.96 mm,变化率为-2.16%。基流由201.33 mm减少至

196.47 mm,共减少了4.86 mm,变化率为-2.41%。实际蒸发由676.2 mm增加至682.6 mm,共增加了6.40 mm,变化率为0.95%。潜在蒸发由1163 mm增加至1167.4 mm,共增加了4.40 mm,变化率0.38%。径流总量由966.72 mm减少至960.34 mm,共减少了6.38 mm,变化率为-0.66%。可见,地表径流对土地利用变化的响应最为敏感,其次为基流与侧向流,对土地利用变化最不敏感的是潜在蒸发量,这与Zhou等<sup>[7]</sup>在西苕溪的研究结果相类似。2000年以后各水文通量的变化程度明显小于20世纪90年代,说明流域土地利用变化有减慢的趋势,这与东江流域的现实情况相符<sup>[27]</sup>。结合流域同时段土地利用变化情况,认为城镇面积和水域面积的增加造成了流域潜在蒸发和实际蒸发皆有所增加;而地表径流的增加可能由林地的减少引起,基流和侧向流的减少可能由园地及城镇面积的增加引起。

### 3.3 土地利用变化对月径流各水文通量的影响

为了探索土地利用变化对各水文通量影响的年内分配情况,对2009年土地利用状态下各水文通量的月均值及相对于1990年的变化情况进行了统计,结果如图5所示。

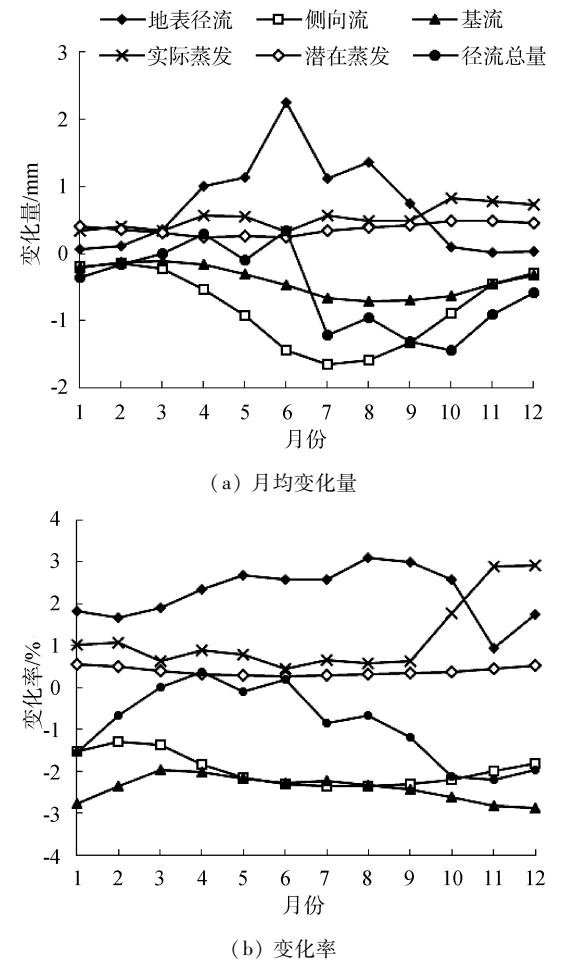


图5 东江流域土地利用变化对水文通量影响的年内分布状况

在土地利用变化的影响下,地表径流全年呈增大趋势,在雨季增幅较大,而旱季增幅较小;其中6月最大,11月最小;从变化比例上来说,8月增幅最大,11月增幅最小。侧向流全年呈减少趋势,在雨季减幅较大,而旱季减幅较小;其中7月减少量最大,2月最小;从变化比例上来说,7、8月侧向流减幅最大,2月最小。基流全年呈减少趋势,在后雨季及10月减幅较大;其中8月减少量最大,1月、2月最小;从变化比例上来说,12月基流降幅最大,3月最小。实际蒸发量全年呈增大趋势,在雨季增幅较小,而旱季增幅较大;其中10月增加量最大,6月最小;从变化比例上来说,11月增幅最大,6月最小。潜在蒸发全年呈增大趋势,在旱季增幅较大,而雨季增幅稍小;其中10月最大,6月最小;从变化比例上来说,1月增幅最大,6月增幅最小。径流总量为地表径流、侧向流与基流之和,土地利用变化使4月、6月径流增加,其余月份均减少。从变化比例上来说,旱季平均减少1.42%,雨季平均减少0.37%。总体而言,地表径流、侧向流对土地利用变化的响应在雨季更为敏感。实际蒸发、潜在蒸发与径流总量对土地利用变化的响应在旱季更为敏感。基流对土地利用变化的响应在雨季、旱季几乎相同,区别不显著。

## 4 结 论

a. 流域出口博罗站月径流模拟率定期  $R^2$  为 0.89,  $E_{NS}$  为 0.87; 验证期  $R^2$  为 0.88,  $E_{NS}$  为 0.87。东江流域 SWAT 模型径流模拟精度较高。

b. 1990—2009 年,东江流域林地、草地面积减少,而园地、城镇用地、水域皆有所增加。在土地利用变化的影响下,东江流域单位面积侧向流降低了 9.66 mm、基流降低了 4.86 mm,地表径流增加了 8.26 mm、实际蒸发增加了 6.40 mm、潜在蒸发增加了 4.40 mm;径流总量共减少了 6.38 mm。

c. 不同水文通量对土地利用变化的响应有所不同。地表径流对土地利用变化的响应最为敏感,1990—2009 年共增加了 2.58%,其次为基流与侧向流,分别减少了 2.41% 与 2.16%。对土地利用变化最不敏感的是潜在蒸发量,1990—2009 年共增加了 0.38%。

d. 各水文通量对土地利用变化的响应在不同季节有所不同。地表径流、侧向流对土地利用变化的响应在雨季更为敏感。实际蒸发、潜在蒸发与径流总量对土地利用变化的响应在旱季更为敏感。基流对土地利用变化的响应在雨季、旱季几乎相同,区别不显著。

## 参考文献:

- [1] 谢贤群,王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报,2007,22(5):683-691. (XIE Xianqun, WANG Ling. Changes of potential evaporation in northern China over the past 50 years [J]. Journal of Natural Resources,2007,22(5):683-691. (in Chinese))
- [2] 陈芸芸,宋耘,李琼芳,等. 淮河上游土地利用变化对次洪的影响[J]. 水资源保护,2016,32(5):24-28. (CHEN Yunyun, SONG Yun, LI Qiongfang, et al. Effects of land use change on flood events in upper reaches of Huaihe Basin [J]. Water Resources Protection,2016,32(5):24-28. (in Chinese))
- [3] 吕乐婷,王晓蕊,江源,等. 基于 SWAT 模型的东江流域蓝水、绿水时空分布特征研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):53-60. (LYU Leting, WANG Xiaorui, JIANG Yuan et al. Research on spatial and temporal distribution features of green and blue water in Dongjiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2017,33(5):53-60. (in Chinese))
- [4] 刘柏君,权锦,杨超慧,等. 基于 SWAT 模型的青海省主要流域径流模拟[J]. 水资源保护,2016,32(6):39-44. (LIU Bojun, QUAN Jin, YANG Chaohui, et al. Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):39-44. (in Chinese))
- [5] BAKER T J, MILLER S N. Using the soil and water assessment tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed [J]. Journal of Hydrology,2013,486(8):100-111.
- [6] 李铸衡,刘淼,李春林,等. 土地利用变化情景下浑河-太子河流域的非点源污染模拟[J]. 应用生态学报,2016,27(9):2891-2898. (LI Zhuheng, LIU Miao, LI Chunlin, et al. Non-point source pollution simulation of Hunhe River-Taizihe River Basin under land use change scenario [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(9):2891-2898. (in Chinese))
- [7] ZHOU F, XU Y, CHEN Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region [J]. Journal of Hydrology, 2013,485:113-125.
- [8] WAGNER P D, KUMAR S, SCHNEIDER K. An assessment of land use change impacts on the water resources of the Mula and Mutha Rivers catchment upstream of Pune, India [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2013,10(2):1943-1985.
- [9] 张利平,李凌程,夏军,等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报,2015(4):664-672. (ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun, et al. Quantitative effects of climate fluctuation and human activities on runoff variation in Luanhe River Basin

- [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015(4):664-672. (in Chinese))
- [10] 孙丽娜, 梁冬梅. 东辽河流域未来土地利用变化对水文影响的研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5):164-168. (SUN Lina, LIANG Dongmei. Study on the impact of land use change on hydrology in the East Liaohe River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):164-168. (in Chinese))
- [11] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(4):571-579. (ZHAO Anzhou, ZHAO Yuling, LIU Xianfeng, et al. Effects of climate change and human activities on blue water green water in Weihe River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4):571-579. (in Chinese))
- [12] 欧阳钦从, 林炳青, 陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江流域土地利用变化对水文过程影响分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(1):65-70. (OUYANG Qincong, LIN Bingqing, CHEN Xingwei. Effects of land use change on hydrological processes in Jinjiang River Basin based on SWAT model [J]. *Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(1):65-70. (in Chinese))
- [13] 陈晓宏, 王兆礼. 东江流域土地利用变化对水资源的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3):311-316. (CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli. Effects of land use change on water resources in Dongjiang River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2010, 46(3):311-316. (in Chinese))
- [14] 吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. *自然资源学报*, 2014(10):1746-1757. (LYU Leting, PENG Qiuzhi, GUO Yuanyuan, et al. Runoff simulation of Dongjiang River Basin based on SWAT model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014(10):1746-1757. (in Chinese))
- [15] WU Y, CHEN J. Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: a case study of the Xinfengjiang Reservoir in southern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116:110-121.
- [16] CHEN J, WU Y. Advancing representation of hydrologic processes in the soil and water assessment tool (SWAT) through integration of the TOPographic model (TOPMODEL) features [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420(7):319-328.
- [17] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 等. 东江流域近 20 年土地利用变化的时空差异特征分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(1):143-152. (REN Feipeng, JIANG Yuan, XIONG Xing, et al. Spatial and temporal differences of land use change in Dongjiang River Basin in recent 20 years [J]. *Journal of Resources Science*, 2011, 33(1):143-152. (in Chinese))
- [18] 任斐鹏. 东江流域水生态功能分区研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
- [19] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1):79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(1):79-86. (in Chinese))
- [20] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1/2):30-49.
- [21] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5):490-496. (ZUO Depeng, XU Zongxue. Distribution simulation of annual runoff in Weihe River basin Based on SWAT model and SUFI-2 Algorithm [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2012, 48(5):490-496. (in Chinese))
- [22] AZIMI M, HESHMATI G A, FARAHPOUR M, et al. Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 250:1-14.
- [23] VAGHEFI S A, MOUSAVI S J, ABBASPOUR K C, et al. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 28(4):2018-2032.
- [24] 魏丹, 刘智勇, 李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(6):200-206. (WEI Dan, LIU Zhiyong, LI Xiaobing. The application of SWAT and SUFI-2 to runoff simulation in Tuweihe (upper) watershed [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6):200-206. (in Chinese))
- [25] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3):885-900.
- [26] 潘登, 任理. 分布式水文模型在徒骇马颊河流域灌溉管理中的应用 I: 参数率定和模拟验证 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(3):471-479. (PAN Deng, REN Li. Application of distributed hydrological model in irrigation management of Tuhai-Majia River Basin I: parameter calibration and validation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(3):471-479. (in Chinese))
- [27] 彭资, 谷成燕, 刘智勇, 等. 东江流域 1989—2009 年土地利用变化对生态承载力的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(7):675-686. (PENG Zi, GU Chengyan, LIU Zhiyong, et al. Effects of land use change on ecological carrying capacity in Dongjiang River basin from 1989 to 2009 [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(7):675-686. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-15 编辑: 徐娟)