

# 基于 SWAT 模型的浏阳河流域径流对土地利用和气候变化的协同响应

YACHONGTOU Bounheuang<sup>1,2</sup>, 梁婕<sup>1,2</sup>, 曾光明<sup>1,2</sup>, 李晓东<sup>1,2</sup>, 雷曼琴<sup>1,2</sup>, 刘强<sup>1,2</sup>,

(1. 湖南大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 环境生物与控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 气候和土地利用同时作用于流域径流,影响着流域水资源的量和质。以浏阳河流域为例,基于 SWAT 模型和情景分析方法定量评估未来流域内土地利用和气候变化对径流的作用。首先采用元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)模型模拟浏阳河流域 2020 和 2050 年的土地利用空间格局,其次在 WorldClim 数据库中获得未来流域内气候变化数据,最后采用 SWAT 模型定量评估未来不同情境下土地利用和气候变化对径流的影响。研究结果表明:未来浏阳河流域林地比例下降、城市建设用地和耕地比例增加;气候呈暖干趋势;2020 和 2050 年,土地利用变化时,浏阳河榔梨站模拟径流将分别减少 2.42 和 0.96 m<sup>3</sup>/s;气候变化时,榔梨站模拟径流将分别减少 3.02 和 1.13 m<sup>3</sup>;土地利用和气候变化综合影响下,榔梨站模拟径流将分别减少 8.54 和 4.27 m<sup>3</sup>/s;说明浏阳河流域径流的变化对气候响应更加敏感,土地利用和气候变化对径流的影响呈非线性协同作用。

**关键词:** 径流;土地利用;气候变化;协同响应;SWAT 模型;CA-Markov 模型;浏阳河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)02-0088-07

## Synergistic effect of land use and climate change on Liuyang River Basin runoff assessed by SWAT model

YACHONGTOU Bounheuang<sup>1,2</sup>, LIANG Jie<sup>1,2</sup>, ZENG Guangming<sup>1,2</sup>,

LI Xiaodong<sup>1,2</sup>, LEI Manqin<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Climate change and land use tend to affect watershed runoff simultaneously, which could potentially have a strong effect on the quantity and quality of water resources. This paper takes Liuyang River Basin as an example, to quantitatively assessing the synergistic impacts of runoff caused by land use and climate change in the future by applying SWAT model and scenario analysis. Firstly, the CA-Markov model was utilized to simulate spatial land use patterns of the study area in the years 2020 and 2050. Secondly, the weather data from WorldClim were obtained to represent the future climate change in study area. Lastly, SWAT model was established in Liuyang River Basin to simulate the runoff and thus quantitatively evaluate the effects of land use and climate change on runoff in the future. Results showed the area of forest would decrease, but the urban constructions and cultivated land would increase in the future. The future weather in Liuyang River Basin tends to be warmer and drier. The runoff of the Langli Station in the basin was anticipated to decline to 2.42 m<sup>3</sup>/s in 2020 and 0.96 m<sup>3</sup>/s in 2050 under the land use change scenarios. The runoff was declined to 3.02 m<sup>3</sup>/s in 2020 and 1.13 m<sup>3</sup>/s in 2050 under the climate change scenarios. Under the land use and climate change scenarios, the runoff was predicted to be decreased to 8.54 m<sup>3</sup>/s and 4.27 m<sup>3</sup>/s in 2020 and 2050, respectively. It revealed that the runoff in Li-

收稿日期:2018-08-30; 修回日期:2018-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51479072、51679082);湖南省科技创新项目(2018RS3037);湖南省自然科学基金项目(2019JJ20002);湖南省水利科技项目(2017-230-20)

作者简介:YACHONGTOU Bounheuang(1986-),男,老挝人,硕士研究生,从事水资源管理方面研究。

通讯作者:梁婕(1982-),女,安徽芜湖人,博士,副教授,博士生导师,主要从事生态水文和水资源管理方面的研究。

uyang River Basin tends to be more sensitive to climate change. In addition, the synthesized impacts of land use change and climate change to Liuyang River basin is nonlinear.

**Key words:** runoff; land use change; climate change; synergistic effect; SWAT model; CA – Markov model; Liuyang River Basin

### 1 研究背景

土地利用与气候变化对流域水文水资源的影响是流域水量与水质管理的基础<sup>[1]</sup>。已有研究表明气候变化,特别是降水和温度的变化,长期影响着水循环及水资源<sup>[2]</sup>。短期内,土地利用/覆被变化通过影响流域截留、蒸散、入渗等关键水文循环的环节,影响着流域水资源的量与质<sup>[3-4]</sup>。因此,定量评估气候变化、土地利用/覆被变化对流域径流的影响对未来水资源规划和开发利用具有重要意义<sup>[5]</sup>。

SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部(USDA)农业研究中心开发的分布式流域水文模型<sup>[6-7]</sup>。SWAT 模型能够模拟地表的自然地理过程<sup>[8-11]</sup>,如流域土壤物理过程、水文循环过程以及土地利用/覆被变化过程等,在国内外得到了广泛应用<sup>[12]</sup>。许多研究分析了气候变化或土地利用/覆被变化对径流的影响<sup>[13-14]</sup>,但定量评估土地利用/覆被变化和气候变化的影响的研究较少,且二者相互作用过程尚不清楚<sup>[15-16]</sup>。

本文以中国南方湖南典型小流域——浏阳河流域为例<sup>[17]</sup>,采用 SWAT 模型和情景分析的方法<sup>[18]</sup>定量评估了气候变化和土地利用变化对流域径流量的综合影响,并初步分析二者相互作用的机理。本文的主要研究目的包括:(1)利用历史资料建立和验证浏阳河流域 SWAT 模型;(2)分析浏阳河流域土地利用和气候变化的趋势;(3)分别评估土地利用变化和气候变化对浏阳河流域径流量的影响,初步分析二者对径流影响的过程。

### 2 研究区域概况

浏阳河(112°58' ~ 114°15'E、27°5' ~ 28°34'N)位于湖南省东部,是湘江的一级支流,有大溪河和小溪河两个源流,发源于罗霄山脉大围山北麓,全长 234.8 km,流域面积 3 869.7 km<sup>2</sup>,流经浏阳市、长沙县和长沙市城区<sup>[19]</sup>。浏阳河流域属于亚热带湿润季风气候,年降水量 1 550 mm,年平均气候 17.5℃。地形标高为 35 ~ 1 600 m。土地利用类型主要是林地、农田、城市建设用地、草地和水域。土壤类型共 9 种,主要为红壤<sup>[20]</sup>。在流域出口榔梨设置有榔梨水文站。研究区流域概况见图 1。

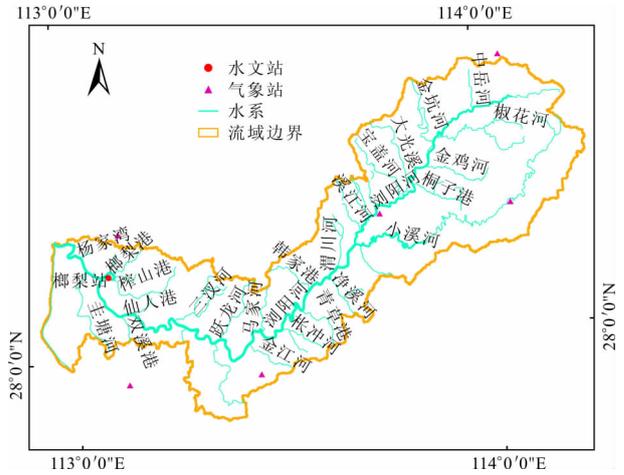


图 1 浏阳河流域示意图

### 3 研究方法

本文分别模拟浏阳河流域土地利用/覆被变化和气候变化对榔梨站月径流的影响,研究路线见图 2。

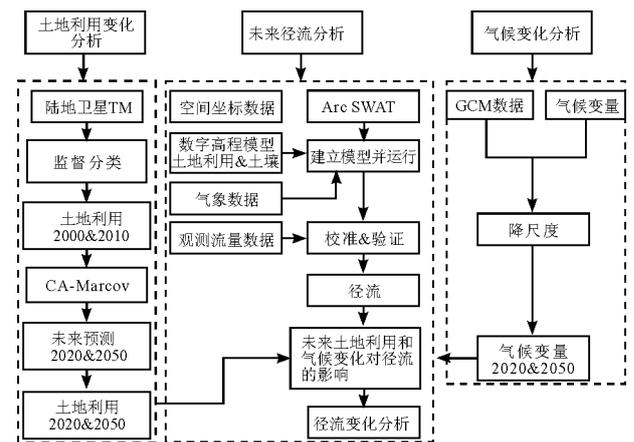


图 2 技术路线图

#### 3.1 流域土地利用/覆被变化模拟

在浏阳河流域 TM 图像(2000、2006 和 2010 年)的基础上,采用最大似然分类(MLC)法提取流域土地利用数据,将其划分为林地、水域、耕地、建设用地和草地 5 大类。采用元胞自动机(CA)模型与马尔科夫(Markov)模型相结合的元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)模型预测流域未来土地利用空间格局<sup>[21-23]</sup>。CA 模型在模拟复杂系统的时空特性方面能力优良,可以模拟难以用特定方程表示的复杂系统不可预测行为;Markov 模型可以预测事件发生概率,

常用于具有“无后效性”的特征地理事件预测;CA - Markov 模型利用 Markov 模型对未来土地利用数量结构进行预测,在此基础上,通过 CA 模型的领域关系分析加强土地利用空间格局的模拟能力<sup>[24]</sup>。本文利用 IDRISI 17.0 软件中的 CA - Markov 模块模拟 2020 和 2050 年间未来土地利用的变化。

### 3.2 流域径流变化模拟

本文采用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型模拟浏阳河流域的径流<sup>[25-26]</sup>。SWAT 是一种半分布式水文模型,用于评估土地利用和气候变化对流域尺度径流的影响<sup>[27-29]</sup>。SWAT 中,研究流域被划分为具有相同特征的水文响应单元 (HRU),在 HRU 中进行如下计算:

$$SW_i = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中:  $SW_i$  为土壤最终含水量, mm;  $SW_0$  为土壤前期含水量, mm;  $t$  为时间步长, d;  $R_{day}$  为第  $i$  天的降水量, mm;  $Q_{surf}$  为第  $i$  天的地表径流, mm;  $E_a$  为第  $i$  天的蒸发量, mm;  $W_{seep}$  为第  $i$  天存在于土壤剖面底层的渗透量和侧流量, mm;  $Q_{gw}$  为第  $i$  天的基流量, mm<sup>[30-31]</sup>。

### 3.3 数据来源

本文收集了浏阳河流域的土壤图、数字高程模型 (DEM)、土地利用、气象、水文和气候资料。根据粮食及农业组织 (FAO) 提供的世界土壤数据库 (HWSD) 对浏阳河流域土壤特性进行分类<sup>[32]</sup>。从美国地质调查局 (USGS) 获得的 DEM 数据被用于提取流域水系和流向,利用 DEM 提取地形坡度、河道坡度等地形参数<sup>[33]</sup>。土地利用数据来源于 2000 和 2010 年的陆地卫星专题 (TM) 图像 (30 m × 30 m)。土地利用类型分为林地、水域、耕地、城市建设和草地五大类<sup>[34]</sup>。气象数据 (包括日降水量、最低和最高气温、风速、相对湿度和太阳) 来自国家环境预报中心 (NCEP) 气候预报系统再分析 (CFSR)。水文

数据来源于浏阳河流域榔梨站的日观测数据<sup>[35]</sup>。2020 和 2050 年的气候数据从 WorldClim<sup>[36]</sup> (<http://www.worldclim.org/>, 全球气候数据库) 获得,该数据库包含了采用 GCM 模式预测的 IPCC5 中典型浓度路径的气象数据预测成果。

## 4 结果与分析

### 4.1 浏阳河流域土地利用格局

利用 CA - Markov 模型模拟了浏阳河流域 2020 年和 2050 年间的土地利用/覆被空间格局。CA - Markov 模型的运行结果表明,2010 年观测的土地利用数据与模拟的土地利用数据之间的 Kappa 等于 0.7,表明历史和预测的土地利用数据之间存在良好的一致性。因此,本研究建立的 CA - Markov 模型可以用来模拟未来浏阳河流域的土地利用空间格局。

本研究中 2000 - 2050 年浏阳河流域土地利用/覆被数据见表 1 和图 3。建模期间,2000 - 2010 年林地面积减少了 209.93 km<sup>2</sup> (5.42%),草地面积减少了 78.75 km<sup>2</sup> (2.03%)。同时,建设用地和耕地分别增加 108.74 km<sup>2</sup> 和 198.54 km<sup>2</sup> (2.81% 和 5.14%)。CA - Markov 模型的预测结果表明,浏阳河流域 2010 - 2050 年建设用地和农田面积将迅速增加,林地面积将大幅减少。与 2010 年相比,到 2020 年浏阳河流域林地将从 2 624.34 km<sup>2</sup> 减少到 2 242.91 km<sup>2</sup>,到 2050 年将减少到 2 179.82 km<sup>2</sup>,下降比例达 11.49%。同时,建设用地将增加 7.66% (2010 - 2020 年增加 5.34%,2020 - 2050 年增加 2.32%),耕地将增加 2.55% (2010 - 2020 年增加 1.72%,2020 - 2050 年增加 0.83%)。图 3 显示了 2020 - 2050 年浏阳河流域土地利用的空间格局。

### 4.2 浏阳流域气候变化

气候变化参数选择降水量和温度。根据 WorldClim 中的未来气象数据预测成果,浏阳河流域 2020 年年均降水量下降 1.02%,2050 年下降 0.76%。相反,浏阳河流域气温将持续上升,2020 年的年均

表 1 土地利用类型的面积统计 (2000、2010 年为观测值,2020、2050 年为模拟值)

序号	类型	2000 年		2010 年		2020 年		2050 年	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%						
1	林地	2834.27	73.24	2624.34	67.82	2242.91	57.96	2179.82	56.33
2	水域	63.36	1.64	44.77	1.16	44.15	1.14	43.56	1.13
3	耕地	622.83	16.09	821.37	21.23	888.05	22.95	920.06	23.78
4	建设用地	171.56	4.43	280.30	7.24	486.77	12.58	576.68	14.90
5	草地	177.69	4.59	98.94	2.56	207.78	5.37	149.59	3.87

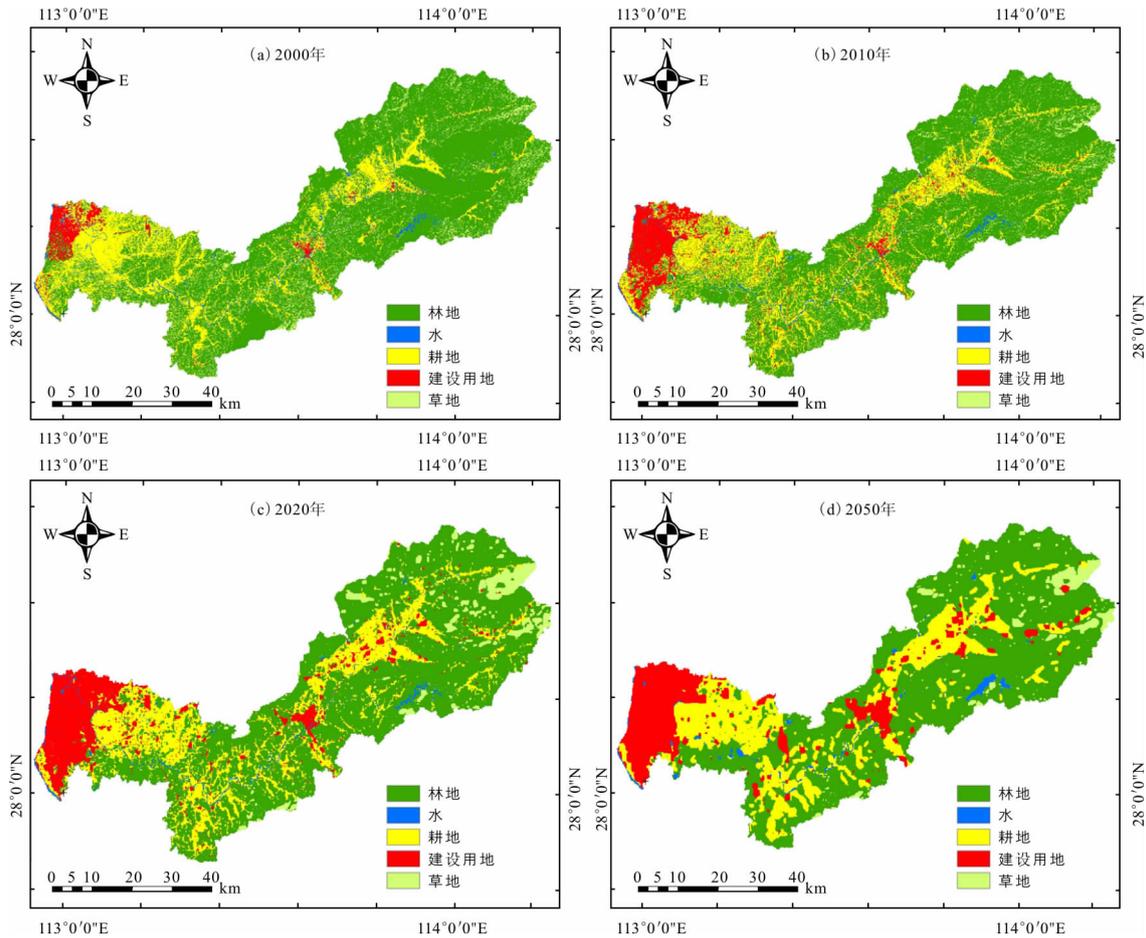


图 3 历史与模拟的浏阳河流域土地利用空间格局

气温将上升 0.43℃, 2050 年年均气温将上升 0.38℃。总的来说, 浏阳河流域气候未来呈暖干趋势。这一结果与中国南方地区“气候变暖和干燥”现象保持一致。

### 4.3 SWAT 模型的校准和验证

本研究将浏阳河流域划分为 21 个子流域、221 个水文响应单元(HRU)。基准期 2010 年模拟月径流量根据榔梨站的月径流量进行校准。2001 - 2005 年的月均流量用于校准, 2006 - 2010 年的月均流量分别用于验证 1999 - 2000 年和 2004 - 2005 年两年预热期的模型。使用 SUFI - 2 在 SWAT - CUP 中的自动校准方法来校准和验证参数。本文建立的模型性能评价见表 2, 校准期和验证期月平均径流量模拟值与实测值见图 4。校准期  $R^2$  达到 0.87, Nash - Sutcliffe 模拟系数  $Ens$  为 0.77;  $PBIAS$  为  $\pm 2.9\%$ ;  $P$  - factor 和  $R$  - factor 分为 88% 和 1.21, 表明每月模拟值与校准周期内的观测值之间有很好的 consistency。验证期  $R^2$  达到 0.83; Nash - Sutcliffe 模拟系数  $Ens$  为 0.76;  $PBIAS$  为  $\pm 6.3\%$ ;  $P$  - factor 和  $R$  - factor 分为 75% 和 0.9。基于统计评估结果, 月时间尺度

的径流模拟精度较高, 说明所建立的 SWAT 模型在浏阳河流域具有较好适用性。

### 4.4 土地利用和气候变化对浏阳河流域径流的综合影响

本研究建立 7 种情景量化浏阳河流域土地利用变化与气候变化对径流的个体和综合效应, 具体见表 3。情景 1 为基准线情景, 采用榔梨站实测的径流资料。情景 2 和情景 5 分别代表 2020 和 2050 年仅土地利用变化时榔梨站的模拟月均径流量。情景 3 和情景 6 分别代表 2020 和 2050 年仅气候变化时榔梨站的模拟月均径流的影响。情景 4 和情景 7 分别代表 2020 和 2050 年土地利用与气候变化同时发生变化时榔梨站的模拟月均径流量。

表 2 模型性能: 每月径流的校准和验证结果

指数	校准 (2001 - 2005 年)	验证 (2006 - 2010 年)	性能评价
$Ens$	0.77	0.76	很好
$PBIAS/\%$	2.90	6.30	很好
$R^2$	0.87	0.83	很好

根据表3中情景2和情景5的模拟结果分析2020和2050年土地利用变化对径流的影响,结果表明,2010年至2020年榔梨站径流将减少2.42 m<sup>3</sup>/s,这主要与林地、农田和建设用地的变化有关,2010年至2020年间,林地面积将减少9.86%,而

农田和建设用地面积分别会增加1.72%和5.34%;2020至2050年间,土地利用变化的幅度减缓,耕地面积和建设用地面积分别仅增长0.83%和2.32%,榔梨站径流的变化也将减缓,仅减少0.96 m<sup>3</sup>/s。

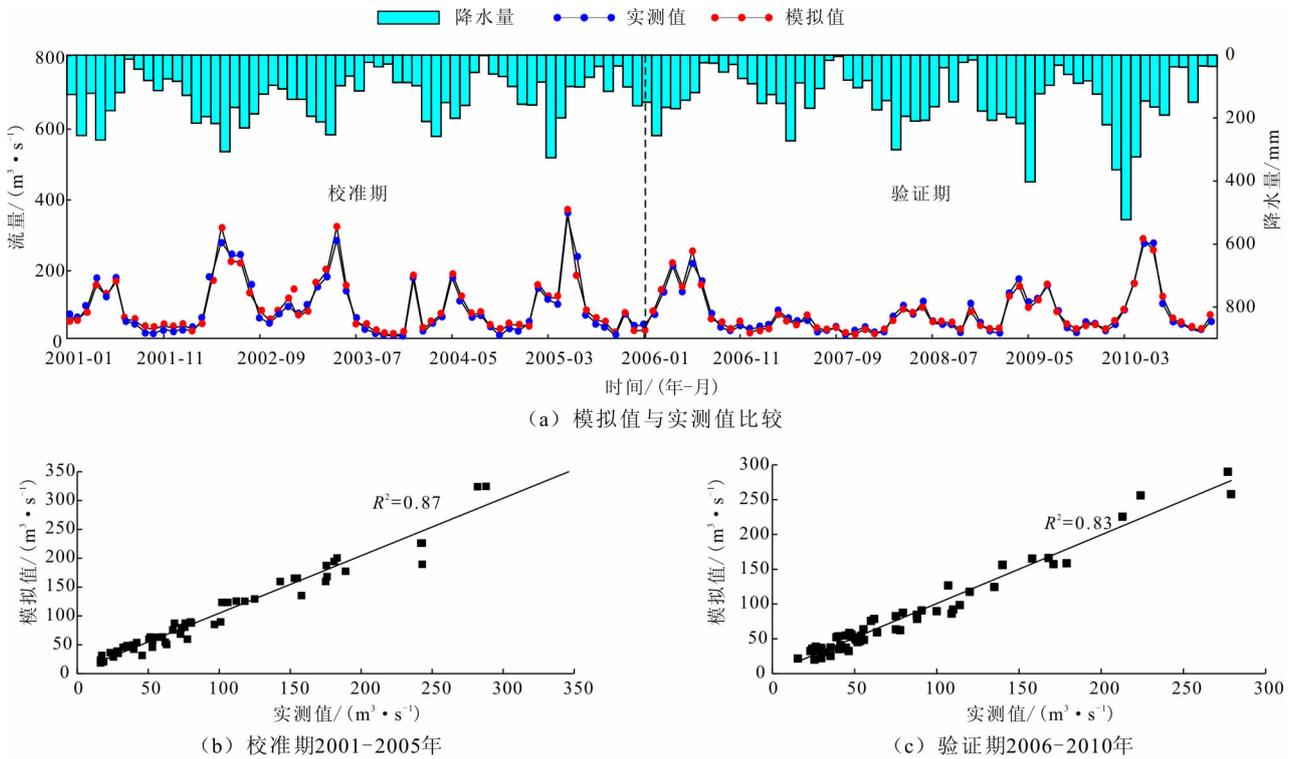


图4 校准期和验证期月平均径流量模拟值与实测值

表3 不同情境土地利用和气候变化下的浏阳河流域榔梨站径流和径流变化

情景	说明	气候年份	土地利用年份	模拟径流值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流变化/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
情景1	土地利用和气候数据 2010	2010	2010	57.56	
情景2	土地利用变化同时保持气候不变	2010	2020	55.14	-2.42
情景3	气候变化同时保土地利用不变	2020	2010	54.54	-3.02
情景4	土地利用和气候数据 2020	2020	2020	49.02	-8.54
情景5	土地利用变化同时保持气候不变	2020	2050	48.06	-0.96
情景6	气候变化同时保土地利用不变	2050	2020	47.89	-1.13
情景7	土地利用和气候数据 2050	2050	2050	44.75	-4.27

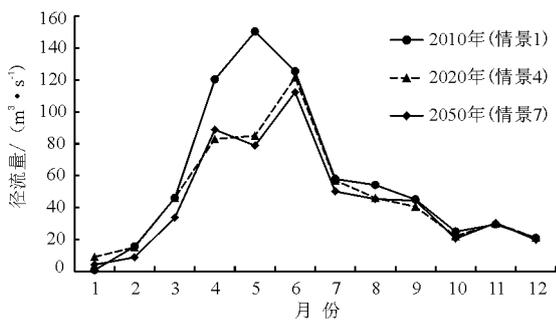


图5 土地利用变化和气候变化综合作用下浏阳河流域

榔梨站2010、2020和2050年的月径流量

根据情景3和情景6的模拟结果分析气候变化对径流的影响。结果表明,2010-2020年,榔梨站径流量将减少3.02 m<sup>3</sup>/s,这是因为期间降水量减少1.02%,温度增加0.43℃;2020-2050年,榔梨站径流量减少1.13 m<sup>3</sup>/s,径流减少的趋势较之前减缓,这与这段时间内降水量减少幅度(0.76%)和温度增加幅度(0.38℃)降低的趋势保持一致。

根据情景4和情景7的模拟结果分析土地利用

变化和气候变化对流域径流的综合影响(见表 3 和图 5)。结果表明,两种因素综合作用下,2010 - 2020 年榔梨站径流量将减少  $8.54 \text{ m}^3/\text{s}$ ,2020 - 2050 年榔梨站径流量将减少  $4.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,后期径流量的变化幅度比前期趋缓;与土地利用变化和气候变化对径流的单个效应相比,综合二者因素的径流的影响更强。此外,本研究还揭示出浏阳河流域气候变化对径流的影响大于土地利用变化对径流的影响。

## 5 结 论

本文以我国中南地区浏阳河流域为例,基于 SWAT 模型和情景分析定量评估了浏阳河流域土地利用和气候变化对径流的影响。研究结果表明:

(1)城市快速扩张和农业活动过程中浏阳河流域土地利用空间格局将发生较大变化。2010 - 2050 年林地的比例将下降 11.49%,而建设用地和农田分别增长 7.66% 和 2.55%。

(2)未来浏阳河流域气候呈暖干趋势。根据 WorldClim 数据库的预测成果,浏阳河流域 2020 和 2050 年年均降水量将分别下降 1.02% 和 0.76%;同时,浏阳河流域气温将持续上升,2020 和 2050 年将分别上升 0.43 和 0.38℃。

(3)2020 和 2050 年,土地利用变化时浏阳河榔梨站模拟径流将分别减少  $2.42$  和  $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$ ;气候变化时,榔梨站模拟径流将分别减少  $3.02$  和  $1.13 \text{ m}^3$ ;土地利用和气候变化综合影响下,榔梨站模拟径流将分别减少  $8.54$  和  $4.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。未来浏阳河流域土地利用空间格局和气候变化协同作用于流域径流量,气候变化的影响要强于土地利用的影响。

(4)本文通过情景分析建立了 7 种土地利用和气候变化情景,通过 SWAT 模型定量各种情景下浏阳河流域榔梨站径流的变化,从而将土地利用和气候变化对流域径流的影响区分开来,方法具有一定的合理性。

### 参考文献:

[1] KINGSTON D G, TAYLOR R, TODD M, et al. Impact of climate change on freshwater resources: an inter-basin comparison using a consistent set of climate and development scenarios [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts,2009,11:619.

[2] NEUPANE R P, KUNMAR S. Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed[J]. Journal

of Hydrology,2015,529:418 - 429.

[3] LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHANG Xunchang, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology,2009,377 (1 - 2):35 - 42.

[4] LIANG Jie, FENG Chunting, ZENG Guangming, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. Environmental Pollution,2017,225:681 - 690.

[5] MEAURIO M, ZABALETA A, URIARTE J A, et al. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin: the case of a small forested watershed [J]. Journal of Hydrology,2015,525:326 - 334.

[6] MENG Yaobin, ZHOU Lingfeng, et al. A heavy metal module coupled with the SWAT model and its preliminary application in a mine-impacted watershed in China [J]. Science of the Total Environment,2017,613:1207 - 1219.

[7] 庞力驰,李洪建,高宗强. 基于 SWAT 模型的潇河流域地表径流模拟研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),2016,39(1):158 - 164.

[8] DIXON B, EARLS J. Effects of urbanization on streamflow using SWAT with real and simulated meteorological data[J]. Applied Geography,2012,35(1 - 2):174 - 190.

[9] GHORABA S M. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model[J]. Alexandria Engineering Journal,2015,54(3):583 - 594.

[10] 袁军营,苏保林,李卉,等. 基于 SWAT 模型的柴河水库流域径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):361 - 365.

[11] 曾思栋,夏军,杜鸿,等. 气候变化、土地利用/覆被变化及 CO<sub>2</sub> 浓度升高对滦河流域径流的影响[J]. 水科学进展,2014,25(1):10 - 20.

[12] 金晓明. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化对地表径流影响的研究——以龙江流域为例[D]. 昆明:云南大学,2009.

[13] SETEGN S G, SRINIVASAN R, et al. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia[J]. Hydrological Processes,2010,24(3):357 - 367.

[14] SAMAL D R, GEDAM S S. Assessing the impact of land use change on stream flow in a semi - urban river basin, Maharashtra, India[J]. International Journal of Hydrology Science & Technology,2013,3 (4):351 - 363.

[15] 胡安邦. 湖南红壤丘陵区小流域土壤侵蚀规律研究——以祁东县紫云村为例[D]. 长沙:湖南农业大学,2003.

[16] LIANG Jie, HE Xinyue, ZENG Guangming, et al. Integrating priority areas and ecological corridors into nation-

- al network for conservation planning in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626:22 – 29.
- [17] 罗巧. 基于SWAT模型的湘江流域径流模拟及其对土地利用变化情景的响应[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.
- [18] 杜鹃, 徐伟, 赵智国, 等. 湘江流域近30年径流量与水位的长期变化规律研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(3):369 – 378.
- [19] LIANG Jie, ZHONG Minzhou, ZENG Guangming, et al. Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: A case study in Changsha, Middle China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 579:1675 – 1682.
- [20] HUA Shanshan, LIANG Jie, ZENG Guangming, et al. How to manage future groundwater resource of China under climate change and urbanization: An optimal stage investment design from modern portfolio theory[J]. *Water Research*, 2015, 85:31 – 37.
- [21] HALMY M W, GESSLER P E, HICKE J A, et al. Land use/cover change detection and prediction in the north – western coastal of Egypt using Markov – CA[J]. *Applied Geography*, 2015, 63:101 – 112.
- [22] SUBEDI P, SUBEDI K, THAPA B. Application of a hybrid Cellular Automaton – Markov (CA – Markov) model in land-use change Prediction: a case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florid[J]. *Science & Education*, 2013, 1(6):126 – 132.
- [23] YIN Jing, HE Fan, JIU Xiong Yu, QIU Guo Yu. Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in northwest China[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21(1):183 – 196.
- [24] 曾红春, 杨奇勇, 李文军, 等. 湖南省相对水资源承载力时空变化分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3):69 – 74 + 79.
- [25] HUANG Lu, ZENG Guangming, LIANG, Jie, et al. Combined impacts of land use and climate change in the modeling of future groundwater vulnerability[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22(7):15 – 28.
- [26] FADIL A, RHINANE H, et al. Hydrologic modeling of the bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model [J]. *Journal of Geographic Information System*, 2011, 3(4):279 – 289.
- [27] LIANG Jie, LIU Junfeng, YUAN Xingzhong, et al. Facile synthesis of alumina-decorated multi-walled carbon nanotubes for simultaneous adsorption of cadmium ion and trichloroethylene[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273:101 – 110.
- [28] ERINIA A, HUANG J, ZHANG Z. Land-use changes reinforce the impacts of climate change on annual runoff dynamics in a southeast China coastal watershed [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2015, 12(6):6305 – 6325.
- [29] MENG Yaobin, ZHOU Lingfeng, et al. A heavy metal module coupled with the SWAT model and its preliminary application in a mine-impacted watershed in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613:1207 – 1219.
- [30] 杨沫霞, 马文林, 张质明, 等. 土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(3):72 – 78.
- [31] WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, Xu Yueping, et al. Estimation of future water resources of Xiangjiang River Basin with VIC model under multiple climate scenarios [J]. *Water Science and Engineering*, 2017, 10(2):87 – 96.
- [32] 荆海晓, 李小宝, 房怀阳, 等. 基于线性规划模型的河流水环境容量分配研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3):35 – 38 + 44.
- [33] MEARIO M, ZABALETA A, et al. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525:326 – 334.
- [34] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用SWAT模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6):1559 – 1567.
- [35] LIANG Jie, Yu Xun, ZENG Guangming, et al. Hydrologic index based method for determining ecologically acceptable water – level range of Dongting Lake [J]. *Journal of Limnology*, 2015, 74:75 – 84.
- [36] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1 - km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. *International journal of climatology*, 2017, 37(12):4302 – 4315.