

# 古浪河流域气候变化与土地利用变化的水文效应

张兰影, 庞博, 徐宗学, 何睿

(北京师范大学水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** SWAT模型是流域尺度的分布式水文模型,可以在流域尺度上定量评估气候变化和土地利用/覆被变化的水文效应。利用率定的SWAT模型,结合情景分析方法,定量分析了古浪河流域气候变化和土地利用/覆被变化对蒸散发、地表径流等水循环要素的影响。结果表明:降水和气温的改变是引起蒸散发和地表径流变化的重要因素,降水对地表径流的影响更大,气温对蒸散发的影响更大,且均表现出明显的季节性差异;土地利用/覆被变化也会引起蒸散发和地表径流的变化,林地和草地的增加会增加蒸散发和减少地表径流,耕地的增加则会减少蒸散发、增加地表径流,农村居民点或裸地的增加将会显著增加蒸散发和地表径流。

**关键词:** 气候变化;土地利用/覆被变化;情景分析;水文效应;SWAT;古浪河流域

**中图分类号:** P343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0042-05

## Impacts of Climate Change and LUCC on Hydrological Processes in the Gulang River Basin

ZHANG Lan ying, PANG Bo, XU Zong xue, HE Rui

(Key Laboratory of Water and Sediment Science, Ministry of Education,  
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Assessment of climate change and land use/cover changes (LUCC) on hydrological processes is essential for the sustainable development of water resources, especially in the arid/semi-arid regions with limited water supplies. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used as a distributed hydrological model to quantify the effects of climate change and LUCC on seasonal variation of surface runoff and evapotranspiration in the Gulang River basin. The results suggested that the variation of precipitation and temperature is the major reason for the variation of evapotranspiration and surface runoff. Surface runoff is more sensitive to precipitation than temperature whereas temperature has a greater impact on evapotranspiration with an obvious seasonal variation. Moreover, LUCC can result in the variation of evapotranspiration and surface runoff as well. The increasing of forest or grass land can increase evapotranspiration but decrease surface runoff, the increasing of agricultural land can decrease evapotranspiration and surface runoff, and the increasing of rural residential area or bare land can increase both evapotranspiration and surface runoff significantly.

**Key words:** climate change; LUCC; scenario analysis; hydrological response; SWAT; Gulang River basin

流域水循环是一个复杂的过程,主要受气候、流域物理特性和人类活动的影响<sup>[1]</sup>。全球气候变化将引起气温变化和人文循环强度改变,人类活动主通过改变土地利用/覆被变化,从而影响水文循环过程。在气候变化的水文响应方面,冯夏清等<sup>[2]</sup>应用SWAT模型研究了嫩江水系乌裕尔河流域气候变化的水文响应,说明气候变化对径流量影响较为显著;夏智宏等<sup>[3]</sup>在汉江流域水资源气候变化响应的研究中指出,气候变化情景下径流变化较实际蒸散发的变化明显;于磊等<sup>[4]</sup>以漳卫南运河流域为研究对象,以流域径流量、腾

发量和产水量三个指标探究了不同降水和气温交互作用情景下气候变化对中尺度流域水循环的影响。在土地利用/覆被变化的水文响应方面,Wenming Nie等<sup>[5]</sup>基于分布式水文模型SWAT在子流域尺度上运用回归分析的方法量化了不同土地利用/覆被方式对水文要素的影响;李恒鹏等<sup>[6]</sup>定量评估了土地利用变化对产流量的影响,并分析了产流量增加的区域差异。以上这些研究在探索气候变化和土地利用/覆被变化的水文效应时,主要以年为时间尺度,很少涉及水文效应的季节特征,且研究范围局限于湿润气候地区。

收稿日期: 2013-07-12 修回日期: 2013-11-12 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01040.html>

基金项目: 北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费和中央高校基本科研业务费专项资金(2009SC-5)

作者简介: 张兰影(1989),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事水文模型方面的研究。E-mail: zhanglanying@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 庞博(1979),男,河南潢川人,副教授,博士,主要从事洪水预报、洪水风险、城市水文等方面研究。E-mail: pb@bnu.edu.cn

然而,全球气候变化和土地利用/覆被变化对局部地区水文循环的影响随着区域地理条件、气候条件等的不同而有很大不同:在湿润地区,即使是极端的土地利用变化对局部水量平衡也只引起相对较小的变化<sup>[7]</sup>,而在干旱半干旱且人类活动十分剧烈的生态脆弱地区,局部水文循环对气候变化和土地利用覆被变化则更为敏感。另一方面,干旱半干旱地区气候变化和土地利用/覆被变化(LUCC)的水文效应在年内分配也是极不均匀的。因此,在不同的时间和空间尺度上定量评估干旱半干旱地区土地利用方式和气候变化的水文效应,并分析其年内年际变化规律,对于流域水资源管理和利用具有十分重要的现实意义。

## 1 研究区概况

石羊河是我国西北干旱半干旱地区的主要内陆河之一,发源于祁连山,消失于民勤盆地,包含的行政区主要有4市9县(区):白银市的景泰县,武威市的凉州区、民勤县、古浪县、天祝县,金昌市的金川区、永昌县以及张掖市的山丹县、肃南县。石羊河有八大支流:古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河于武威城附近汇成石羊河干流,经红崖山水库后消失于民勤盆地;西大河及东大河部分汇成金川河,经过金川峡水库后进入金昌盆地,大靖河主要分布在古浪县境内。在社会状况上,石羊河流域是我国西北内陆河流域灌溉农业发展最早、社会经济发达、人口密度最大、水资源开发利用程度最高、水资源供需矛盾最突出、生态问题十分严重的区域<sup>[8]</sup>。气候条件上,石羊河流域深居西北内陆,属大陆性温带干旱气候,太阳辐射强、日照充足、温差较大、降水少、蒸发强烈<sup>[9]</sup>。古浪河流域南部在天祝藏族自治县境内,是开发较少的天然林地;北部则位于古浪县境内,人类活动较为剧烈,是石羊河流域的典型流域。因此,本文选择古浪河流域作为研究对象。

古浪河共有黄羊川河、萱麻河等7条支流,通过红水河流入石羊河干流,进入民勤盆地,流域面积约876 km<sup>2</sup>。古浪河流域的气候特征具有石羊河流域的典型特征,干旱少雨,蒸发强烈。

## 2 SWAT 模型构建

本文选择分布式水文模型SWAT来研究气候变化和土地利用变化的水文效应。SWAT模型是由美国农业部研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度的分布式水文模型,其主要作用是模拟和预测农业、土地管理等对水量、泥沙、水质等的影响。SWAT模型是连续的基于物理机制的日尺度模型,可以直接输出各水文要素的数量及空间分布,因此,在研究气候变化和土地利用/覆被变化的水文效应上具有独特的优势。在SWAT模型中,一个流域被分为多个子流域,每个子流域又根据特定的土地利用、土壤特性和坡度组合划分为多个水文响应单元(HRU),同一个HRU内部水文特性被认为是相同的。HRU是SWAT水文计算的基本单元,每个HRU满足水量平衡,子流域的产流为各HRU产流之和,每个子流域的产流又遵循一定的规律汇流至流域出口<sup>[10]</sup>。

SWAT模型所需要的数据主要有流域的数字高程模型(DEM)、土壤分布及土壤属性数据、土地利用数据、日雨量数

据及相对湿度、日最高气温等气象数据。本文所用DEM来自Aster Gdem 30 m分辨率数据,经过影像校正和裁切;基准期土地利用数据通过2002年Landsat TM遥感影像数据解译得到,并认为在模拟期土地利用/覆被的状况不发生变化;土壤数据来自中国科学院南京土壤研究所1:100万全国土壤数据库,土壤属性数据由SPAW等软件计算得到<sup>[11]</sup>;降水数据来源于流域内8个雨量站2000年-2005年的降水数据(见图1),其中牛圈沟、崖头、头道沟、天祝、马家台、张家墩、古浪为月降水量,乌鞘岭为日降水量。因为SWAT模型要求输入的降水数据为日降水数据,因此,本文认为其它7个雨量站具有和乌鞘岭站相同的月内降水分布,从而生成日降水数据;气温、平均风速、最高最低气温、平均湿度数据来自于乌鞘岭气象站日观测数据,太阳辐射参考相关文献计算得到<sup>[12]</sup>。

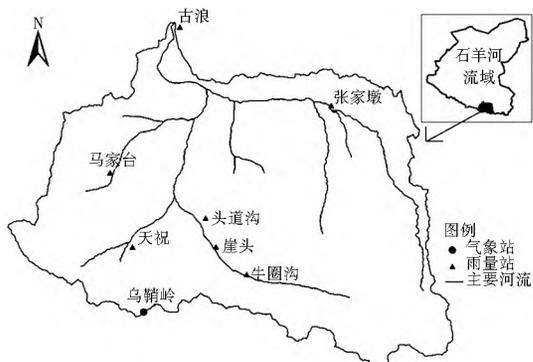


图1 古浪河流域站点及其在石羊河流域位置

Fig. 1 Location of gauge and meteorological stations in the Gulang River basin

本文以Nash Sutcliffe模型效率系数( $E_{ns}$ )和反映模拟与预测相对误差的水量平衡系数( $I_{VF}$ )作为评价指标,定量评估模型的模拟效果。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2} \quad (1)$$

$$I_{VF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (2)$$

其中: $Q_{obs}$ 为观测流量值; $Q_{sim}$ 为模拟流量值; $Q_{avg}$ 为实测流量平均值; $n$ 为流量序列的个数。

模型以曹家湖水库实测径流数据率定,2000年1月1日-2003年12月31日为率定期,2004年1月1日-2005年12月31日为验证期。率定期和验证期的Nash Sutcliffe模型效率系数分别为0.615和0.745,水量平衡系数分别为1.264和0.999,基本可以描述该流域的水文循环情况,适用于该流域。

## 3 情景模拟结果分析

### 3.1 情景设置

根据IPCC评估报告,预计到2100年,地表温度相对于1900年将升高1.1℃~6.4℃,降水的强度和降水量也会有所变化<sup>[13]</sup>。由于研究区域范围较小,与通过降尺度获取的气温降水等资料尺度相差较大,且Global Climate Model(GCM,全球气候模型)本身也具有很大的不确定性<sup>[14]</sup>。因此,在情景设置时没有采用降尺度数据,而是设定特定情景

(表 1)。基准期情景为现状气温、降水情景。气候变化共设置八种情景,即降水分别增加/减少 10%、20%,温度分别升高/降低 1℃、2℃,其它条件保持不变,表 1 详细表示了各气候变化情景下气候要素的变化情况。

表 1 气候变化情景设置

Table 1 The set up of climate change scenarios

情景	降水(%)	气温(℃)	情景	降水(%)	温度(℃)
情景 12	+ 10	-	情景 22	-	1
情景 13	+ 20	-	情景 23	-	2
情景 14	- 10	-	情景 24	-	- 1
情景 15	- 20	-	情景 25	-	- 2

对于土地利用/覆被变化的水文效应,常用的情景分析方法有参照对比法、历史反演法、模型预测法、极端土地利用法和土地利用空间配置法<sup>[15]</sup>。本文将综合极端土地利用法和模型预测法,对研究区域土地利用/覆被变化的水文效应进行探讨。土地利用变化情景的设计主要考虑三种情况:退耕还林/还草、继续开垦耕地、极限土地利用(即某一种土地利用方式为主体),共设置八种土地利用情景:情景 1 是现状土地利用,即 2002 年的土地利用状况;情景 2 是退耕还林,即将坡度大于等于 25% 的耕地全部退为有林地;情景 3 是将坡度大于等于 25% 的耕地退为草地;情景 4 是人口增加,继续开垦耕地,将坡度小于 25% 的草地和林地都开垦为耕地;情景 5 认为流域内除了水域、农村居民点及裸地之外都是林地;情景 6 设置为流域内除了水域、农村居民点及裸地之外都是草地;情景 7 则是流域内除了水域、农村居民点及裸地之外都是耕地;情景 8 设置为流域内除了水域就是农村居民点和裸地。设计情景下各种土地利用所占比重见表 2。

表 2 土地利用变化情景设置

Table 2 The set up of land use change scenarios

情景	耕地 (%)	林地 (%)	草地 (%)	农村居民点裸地 (%)	水域 (%)
情景 1	33.77	29.60	29.85	2.90	3.88
情景 2	19.51	43.86	29.85	2.90	3.88
情景 3	19.51	29.60	44.11	2.90	3.88
情景 4	47.61	24.34	21.27	2.90	3.88
情景 5	0.00	93.22	0.00	2.90	3.88
情景 6	0.00	0.00	93.22	2.90	3.88
情景 7	93.22	0.00	0.00	2.90	3.88
情景 8	0.00	0.00	0.00	96.12	3.88

### 3.2 结果分析

在分析各水文要素的年内变化规律时,水文要素变化量主要采用两种表达方式,变化量或变化比例,其计算公式为:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (3)$$

$$\Delta V' = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (4)$$

式中:ΔV 表示变量(本文中蒸散发或地表径流)的变化量(mm);ΔV' 表示变量变化的比例;V<sub>1</sub> 和 V<sub>2</sub> 分别表示基准期和变化情景下变量的值(mm)。

利用已率定的 SWAT 模型,输入设置情景,其它变量及参数保持不变,然后参照基准期情景分别计算各水文要素的变化量和变化百分比。为克服随机误差,取模型计算期(2000 年-2005 年)六年间水文变量的平均值进行分析。

#### 3.2.1 降水量变化对蒸散发和地表径流的影响分析

由图 2(a)可知,降水量增加对月平均蒸散发的影响表现出了强烈的季节特征:5 月份至 9 月份,降水量的增加会增加月平均蒸散发,最大增加量出现在 7 月份,增加 20% 降水量的情况下,蒸散发增加值为 7.1%;10 月至次年 4 月干旱月份,降水的增加反而减少月平均蒸散发,最大减小量发生在 2 月-4 月份,减少 20% 降水的情况下,蒸散发的减小量是 5.1%。降水量的减少对月平均蒸散发的影响和降水量增加具有相反的趋势:干旱月份增加蒸散发,湿润月份减少蒸散发。初步分析其原因,可能是由于降水的增加在夏季增加了可用于蒸散发的水量,从而增大蒸散发量;而在冬季则增大了空气湿度,且冬季气温低,空气更容易达到饱和状态,进而减少了蒸散发量。将各月变化值平均可以得出,降水量增加或减少的比例和月平均蒸散发增加或减少的比例是不相同的,20% 降水量的变化量最多引起 7.1% 平均蒸散发的变化量,而 10% 降水量的变化最多引起 3.5% 平均蒸散发的变化量,平均蒸散发的变化远小于降水的变化。

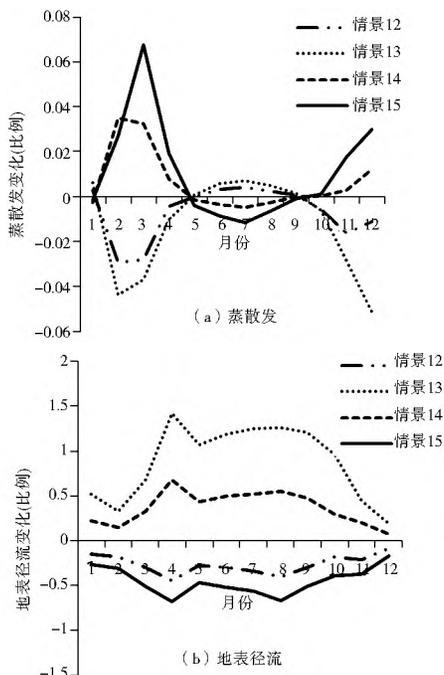


图 2 不同降水情景下月平均蒸散发及月平均地表径流模拟结果

Fig. 2 The simulated results of mean evapotranspiration and surface runoff under different precipitation scenarios: (a) evapotranspiration; (b) surface runoff

由图 2(b)可知,降水量的变化引起地表径流的变化则相对简单:降水量增加或减少引起地表径流量相应地增加或减少,增加或减少的幅度和降水增加或减少的幅度呈正相关关系。相对于对蒸散发的影响,降水量变化引起的地表径流的变化更大:降水量增加 20% 最大可能产生 141.9% 的地表径

流增加,降水量增加10%最大可能引起的地表径流增加量为67.7%,二者都发生在4月份。降水量减少引起的地表径流变化相对于降水量增加的情景较小:降水量减少20%最多可能引起4月份44.6%和8月份39.8%地表径流的减少,与降水增加20%情景下变化幅度相差很大;降水量减少10%最多可能引起4月份67.4%和8月份67.0%地表径流的减少,与降水增加10%的变化幅度基本一致。

由此可知,与蒸散发相比,地表径流对降水量的变化更为敏感,降水是影响地表径流的主要因素之一。

### 3.2.2 气温变化对蒸散发和地表径流的影响分析

由图3(a)可知,气温增加(降低),蒸散发增加(减少),并且变化趋势也表现出了很强的季节特征,温度增加(降低)引起的蒸散发量的增加(降低)在湿润月份高于干旱月份,3月、4月份有明显峰值。气温增加对蒸散发的影响十分强烈,温度增加1℃,最高可引起蒸散发量增加0.59 mm,温度增加2℃则最高可引起蒸散发量增加1.16 mm。温度降低引起蒸散发的降低与温度增加的效应与幅度基本一致。

由图3(b)可知,一般情况下,地表径流随温度升高(降低)而减少(增加),但是同样表现出了明显的季节特征,即变化主要集中在3月-5月,这期间蒸散发量变化较大可能是其中一个原因。

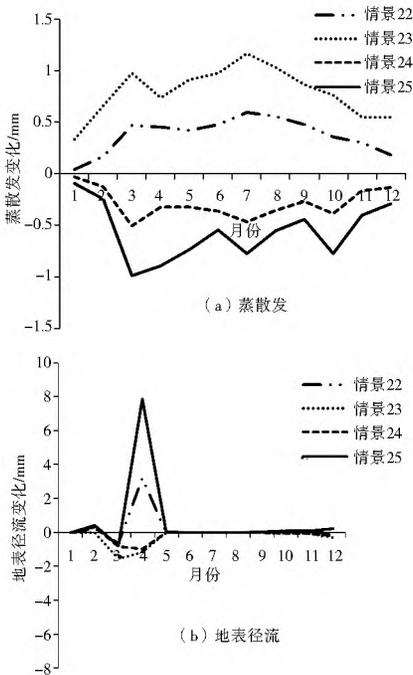


图3 不同气温情景下月平均蒸散发及月平均地表径流模拟结果

Fig. 3 The simulated results of mean evapotranspiration and surface runoff under different temperature scenarios:

(a) evapotranspiration; (b) surface runoff

### 3.2.3 土地利用变化对蒸散发和地表径流的影响分析

图4、图5分别反映了不同土地利用情景下蒸散发与地表径流的变化量和变化比例。各种土地利用情景的蒸发量变化表现出极强的季节性,变化最大的时间集中在湿润月份,

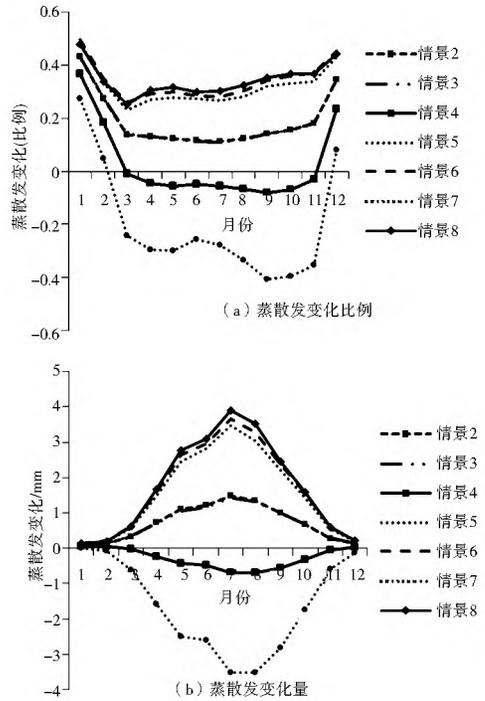


图4 不同土地利用情景下月平均蒸散发模拟结果

Fig. 4 The simulated results of mean evapotranspiration under different land use scenarios:

(a) ratio of change; (b) amount of change

但是干旱月份蒸发量变化的百分率更大,说明干旱月份蒸散发对土地利用的敏感性更高。对比情景2和情景3,退耕还林或者退耕还草均使蒸散发有一定程度的增加,但其影响相差不多;退耕还林或者退耕还草都使地表径流有一定程度的减少,但是退耕还林情景下径流减少的幅度略大于退耕还草情景。在情景4继续开垦耕地的情况下,蒸散发基本呈现减少的趋势,但是地表径流则呈现增加的趋势,基本和情景2和情景3的效应相反,只在12月至次年2月降水极少的月份会导致蒸散发部分增加。

### 3.2.4 不同土地利用方式的水文效应分析

情景5-情景8属于极端情况,有助于分析不同土地利用方式对水文循环的影响。由情景5(林地为主)可知,林地对该地区水文循环的影响主要表现为增大蒸散发、减少地表径流,且湿润月份蒸散发的增加量远高于干旱月份,但是增加百分率年内变化不大,地表径流的变化百分率较大的也集中在湿润月份,变化量较大的集中在3月、4月份和8月、9月份。情景6(草地为主)中,草地对该地区水文循环的影响与林地趋势一致,只是增加蒸散发的能力略强于林地,但是减少地表径流的能力远低于林地。情景7中(耕地为主),蒸散发量大幅下降,湿润月份的下降量大于干旱月份;地表径流大幅增加,变化较大的月份也集中在湿季。情景8(裸地或居民点为主),对于蒸散发和地表径流的增加效应是所有情景中最大的,也是湿润月份的影响大于干旱月份的影响,这对于生态脆弱的西部干旱半干旱地区的环境保护具有十分消极的影响。

## 4 结论

本文主要探讨了气候变化和土地利用/覆被变化对干旱

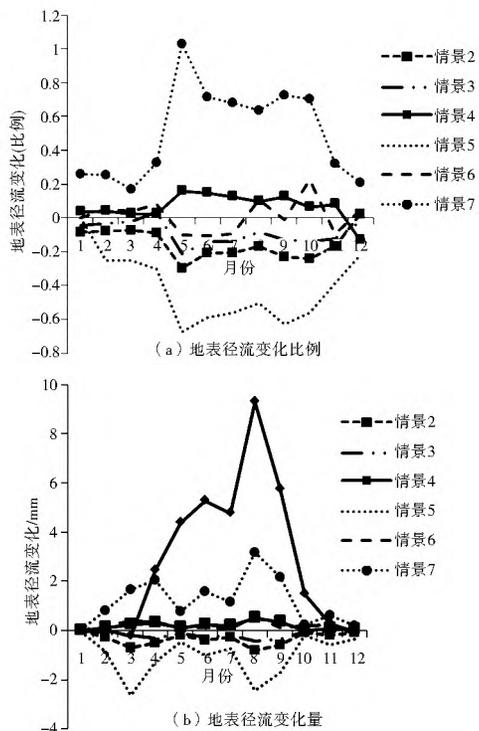


图 5 不同土地利用情景下月平均地表径流模拟结果

Fig. 5 The simulated results of mean surface runoff under different land use scenarios: (a) ratio of change; (b) amount of change

半干旱地区蒸散发和地表径流的影响,并分析了该影响的年内变化规律。结果表明,气候变化和土地利用/覆被变化对蒸散发和地表径流的影响具有很强的季节特征,夏秋两季的变化幅度相对于冬春更大一些。降水增加(减少)将使得夏季的蒸散发量增加(减少),冬季蒸散发量减少(增加),降水增加(减少)会引起地表径流相应地增加(减少);温度升高则会引起蒸散发增加,地表径流减少,且地表径流的减少集中在 4 月、5 月份;林地和草地的增加都具有增加蒸散发、减少地表径流的作用,且林地的影响幅度更大一些;耕地增加则导致蒸散发减少,径流增加;农村居民点或裸地增加则会大幅增加蒸散发和地表径流。

参考文献(References):

[1] Z Ma, S Kang, L Zhang, et al. Analysis of Impacts of Climate Variability and Human Activity on Streamflow for a River Basin in Arid Region of Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 139-249.

[2] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 827-832. (FENG Xiaqing, ZHANG Guangxin, YIN Xiongrui. Study on the Hydrological Response to Climate Change in Wuyur River Basin Based on the SWAT Model[J]. Progress in Geography, 2010, 29(7): 827-832. (in Chinese))

[3] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 158-163. (XIA Zhihong, ZHOU Yuehua, XU Hongmei. Water Resources Responses to Climate Change in Hanjiang River Basin Based on SWAT Model[J]. Resources and Environment

in the Yangtze Basin, 2010, 19(2): 158-163. (in Chinese))

[4] 于磊, 顾彦, 李建新等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 152-154, 201. (YU Lei, GU Yan, LI Jianxin et al. A Study of Hydrologic Responses to Climate Change in Medium Scale Basin Based on SWAT [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(4): 152-154, 201. (in Chinese))

[5] W Nie, Y Yuan, W Kepner, et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover Changes on Hydrology for the Upper San Pedro Watershed[J]. Journal of Hydrology, 2011, 407: 105-114.

[6] 李恒鹏, 杨桂山, 金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 537-543. (LI Hengpeng, YANG Guishan, JIN Yang. Simulation of Hydrological Response of Land Use Change in Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5): 537-543. (in Chinese))

[7] H Guo, Q Hu, T Jiang. Annual and Seasonal Streamflow Responses to Climate Change and Land cover Changes in the Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hydrology, 2008, 355: 106-122.

[8] 马岚, 魏晓妹. 石羊河下游年径流序列的变异点分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 174-177. (MA Lan, WEI Xiaomei. Analysis on Aberrance Point of Annual Runoff Serials in the Downstream of Shiyang River [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 174-177. (in Chinese))

[9] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zongxue, LI Zhanling, SHI Xiaokun. Long Term Trends of Major Climatic Variables and Runoff in the Shiyang River Basin [J]. Resources Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese))

[10] S L Neitsch, J G Arnold, J R Kiniry, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005[M]. College Station, TX, Texas Water Resorse Institute, 2005.

[11] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18. (WEI Huabin, ZHANG Zhanpang, YANG Jinpeng. Establishing Method for Soil Database of SWAT Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 15-18. (in Chinese))

[12] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证[J]. 水文, 2007, 27(5): 25-30. (PANG Jingpeng, XU Zongxue, LIU Changming. Weather Generator and Database in the SWAT Model [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(5): 25-30. (in Chinese))

[13] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

[14] D L Ficklin, Y Luo, E Luedeling, et al. Climate Change Sensitivity Assessment of Highly Agricultural Watershed Using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374: 16-29.

[15] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33. (WAN Rongrong, YANG Guishan. Discussion on Some Issues of Hydrological Effects of Watershed Land Use and Land Cover Change[J]. Progress In Geography, 2005, 24(3): 25-33. (in Chinese))