

基于 SWAT 模型的金华江上游土地利用变化对径流影响的研究

黄沛然 汤玲英

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

【摘要】 流域内土地利用变化对水文循环有着重要影响。本文通过在金华江上游建立 SWAT 模型,模拟了不同土地利用情景下流域径流的变化特点,结果表明:SWAT 模型模拟精度高,其中验证期 $Ens = 0.85$, $R^2 = 0.85$, $Re = 0.07$, 可以模拟及分析流域水文对土地利用变化的响应;在该流域内,林地有减少径流量的作用而草地和耕地相反;保护耕地使流域内农业产量增加但也使径流量增加,且增加量集中在雨季。

【关键词】 土地利用; SWAT; 水文循环; 径流

中图分类号: TV11

文献标志码: A

文章编号: 2096-0131(2017)04-0064-06

Research on the influence of land utilization change in upstream area of Jinhua River on runoff based on SWAT model

HUANG Peiran, TANG Lingying

(Hunan Normal University Resources and Environmental Science College, Changsha 410081, China)

Abstract: Land utilization change in the river basin has important influence on hydrological cycle. In the paper, a SWAT model is established in upstream area of Jinhua River. Results show that SWAT model has high simulation precision, wherein $Ens = 0.85$, $R^2 = 0.85$ and $Re = 0.07$ during validation period. The response of river basin hydrology on land utilization change can be simulated and analyzed. Forest has the function of reducing runoff, whereas grassland and arable land has reverse effects in the river basin. Arable land can be protected for increasing agricultural yield within the river basin. However, the runoff is also increased, especially in rainy season.

Keywords: land utilization; SWAT; hydrologic cycle; runoff

1 引言

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)是“国际地圈生物圈计划”(IGBP)和“全球变化人文计划”(IHDP)两大国际项目于 1995 年提出并合作进行的纲领性交叉科学研究课题^[1]。LUCC 与全球气候波动、生态系统演变、生物多样性变化等密切相关,会导致一系列大气、土壤、水以及生态环境效应产

生^[2-3],如:温室效应加剧、土壤退化、水资源短缺等^[4]。随着全球环境变化研究的不断深入,人们认识到 LUCC 是造成全球环境变化的重要因素之一^[5]。政府间气候变化工作委员会(IPCC)、联合国粮农组织(FAO)、联合国环境署亚太地区环境评价计划(UNEP/EAP-AP)以及世界其他一些国家、地区和研究机构,都确立了与“LUCC 科学研究计划”相应的研究项目^[6]。

近些年来,随着社会文明的快速发展进步,人口数

量急剧上升,人类的各种活动对水资源产生了巨大的影响^[7]。世界许多国家和地区都出现了不同程度的水资源问题,如:洪水频发、水资源短缺、水质下降、湿地退化、荒漠化、水土流失等^[8-12]。相关国际组织实施了 IHP、WCRP、IGBP 和 GWSP 等一系列水科学计划,其目的是探讨环境变化影响下的水循环及其相关的资源与环境问题,变化环境下的水文循环研究已成为当今水科学研究的热点之一^[13]。气候变化在较长时期内对水资源的影响较为明显,而短期内,LUCC 是水文变化的重要驱动因素之一^[14]。LUCC 通过改变地表植被截留量、土壤水分含量以及地表蒸发等因素,从而影响流域的水文情况和产汇流机制。如何采取有效方法揭示 LUCC 对流域水文过程的影响,已成为目前迫切需要解决的问题^[15]。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)开发的具有物理机制的模型^[16],可对流域尺度内的水文过程如地表径流、基流进行长时期连续模拟,还可长期预测如土地管理措施和气候变化等因素对具有多种土地利用类型、

土壤类型以及各种管理措施的大面积复杂流域的水文过程、产沙量以及污染物产量的影响^[17]。

2 研究区与研究方法

2.1 研究区概况

金华江上游位于东经 120° 1' ~ 120° 16',北纬 29° 12' ~ 29° 20'之间(见图 1),发源于磐安县,向西流入兰溪。其中干流长 72km,流域面积约 2672km²,地形呈东北高,西南低。研究区靠近我国东部沿海,为典型的亚热带季风气候,温和湿润,四季分明,年平均气温在 17℃左右,平均气温以 7 月最高,为 29.3℃,1 月最低,为 4.2℃。年平均无霜期为 243 天左右,年平均降水量为 1100 ~ 1600mm。土地利用类型主要为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及裸地。由于经济的发展,近 30 年流域内土地利用变化较大,主要表现为城市及建设用地不断扩大,占用周边耕地。而耕地为满足其生产需要又不断占用林地草地,甚至在坡度较大的地区仍有开垦耕地的现象。

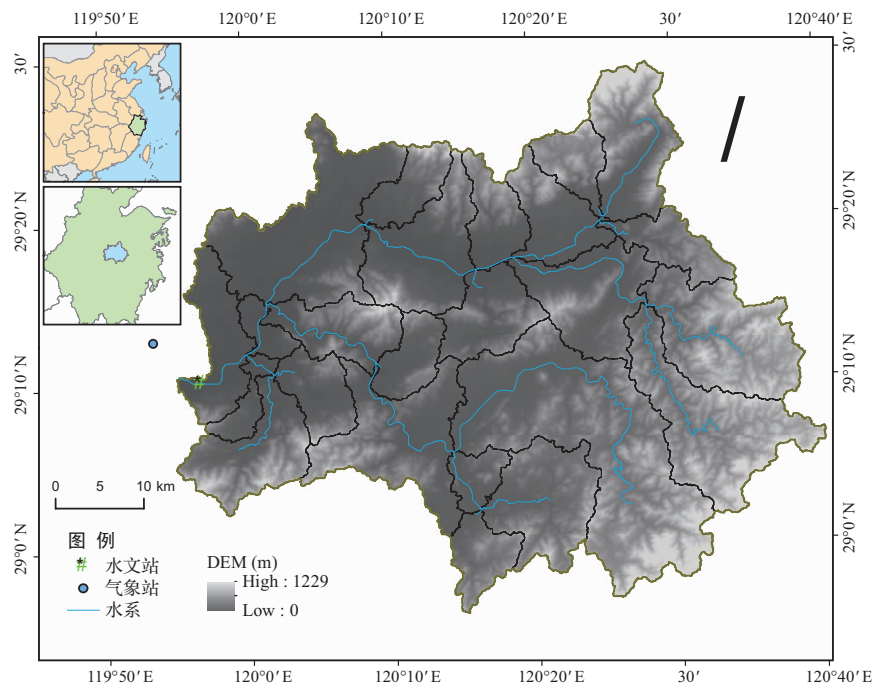


图1 金华江上游区位

2.2 研究方法

2.2.1 数据来源和处理

本研究采用 ArcGIS10.1 环境下的 ArcSWAT2012

版本。模型所需数据包括数字高程数据、土壤数据、土地利用数据、气象数据以及实测水文数据。数字高程模型数据(DEM)来源于地理空间数据云平台,分辨率

30m。土地利用数据来源于地球系统科学数据共享平台,分为1985年和2005年两期,比例尺为1:5万。土壤数据来自联合国粮农组织(FAO)提供的和谐世界土壤数据库(HWSD),其中土壤容重(SOL_BD)、土壤有效持水量(SOL_AWC)、饱和水力传导系数(SOL_K)参数HWSD未提供,可从SPAW(Soil-Plant-Atmosphere-Water)^[18]中获取。利用ArcGIS将土地利用图和土壤图进行坐标转换,使之与DEM相同,并将三者设为相同投影。SWAT会根据DEM像元确定水流流向,并定义河道最小集水面积,然后生成河网,最后根据河网密度划分亚流域。河道最小集水面积的阈值设定越小,生成的河网就越密集精细,随之划分的亚流域数量也将增多。本文通过研究最终设定最小集水面积阈值5000hm²,划分25个亚流域。将佛堂水文站下游距离最近的河网点设为流域总出口,最后计算流域参数。合理划分亚流域后,SWAT将在每个亚流域内生成水文响应单元(hydrological response unit, HRU)。HRU指流域内具有相同土地利用类型,土壤类型和坡度的区域,是在划分亚流域基础上进一步分出的最小单元。导入土地利用图和土壤图,并重新进行分类,土地利用类型化为8类,土壤类型化为6类。坡度分为(0°~20°,20°~100°)两级。定义HRU时,划分的阈值设为5%,最终生成260个HRU。实测水文数据来源于佛堂水文站,包括1954—1993年逐日径流量。气象数据由金华气象站提供,包括1959—2013年逐日最高气温、最低气温、降水、风速、气压、日照时长、相对湿度和蒸发量。模型中需要建立天气发生器(WXGEN),用于生成气候数据并弥补缺失的气象数据。本文利用SWAT官网提供的pcpSTAT和dewSWAT软件,通过输入50年的日气象资料,统计得到模型所需月数据,包括月日均最高最低气温、月日均降水量、月日均露点温度、月日均太阳辐射总量、月日均风速等。将以上数据导入SWAT气象数据库,建立天气发生器。

2.2.2 模型校准和验证

本文选用流域总出口的佛堂水文站实测径流数据,以月为时间步长,对1970—1993年的径流量进行模拟矫正。其中1970—1971两年设为预热期以减小

误差,1972—1988年设为矫正期,1989—1993年设为验证期。模型模拟完成后,采用LH-OAT方法^[19]进行参数敏感性分析。利用模型自带的敏感性分析模块,添加所有与径流有关的参数,总共26个,进行500次迭代分析,最终选出敏感性前10的参数。利用SWATCUP软件对参数进行率定,采用SUFI-2算法,对各参数赋予初始值,然后进行迭代运算。本文选取Nash-Sutcliffe效率系数(*Ens*)、线性拟合度(*R*²)、相对误差(*Re*)三个指标评价模型在金华江上游径流模拟的效果。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_{avg})^2}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})(P_i - P_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})^2 (P_i - P_{avg})^2}}$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

式中 *P_i*——模拟值;
Q_i——实测值;
P_{avg}——模拟平均值;
Q_{avg}——实测平均值。

2.2.3 情景设置与分析

当模型校准完成并验证达到精度要求后,通过设置两类情景分析金华江上游径流对于不同土地利用的响应。第一类情景模拟极端情况,排除其他因素干扰。将2005年实际土地利用情况设为基准,保留流域内的水域和建设用地,将其他的土地利用类型依次设为草地、耕地和林地,模拟极端土地利用情况下流域产流的响应;第二类情景以《金华市土地利用总体规划(2006—2020年)》为依据,探讨基于未来实际情况下,土地利用变化对径流的影响。其中以“优先保护对生态环境保护有重要作用的土地,对生态敏感区域土地的利用进行严格的限制”为依据设置退耕还林情景,将流域内坡度大于20°的耕地设为林地,其他保持不变。以“农业生产布局在生态环境相对适宜,自然生产力高的区域,优先用于农业生产,农用地保护,重点保护耕

地,特别是基本农田和标准农田”为依据设置保护耕地情景,将流域内坡度小于 20° 的林地设为耕地,市区内的耕地设为建设用地,其他保持不变。

3 结果与分析

3.1 模型的校准和验证

模型率定的结果如图 2 和图 3 所示。经计算,率

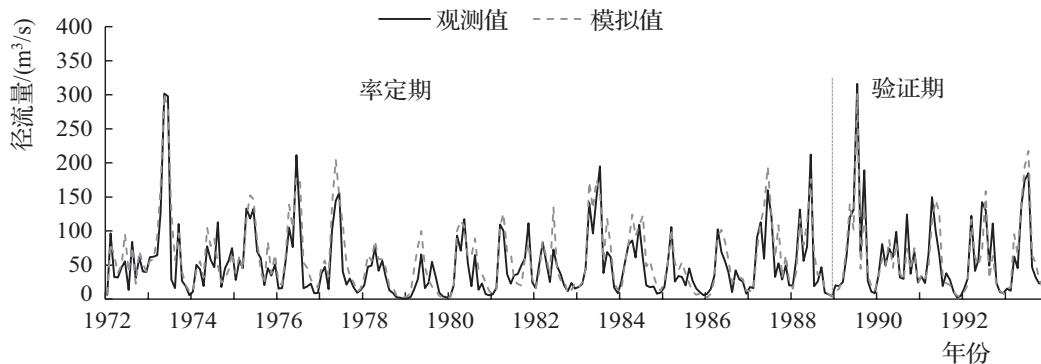


图 2 率定期和验证期径流量曲线

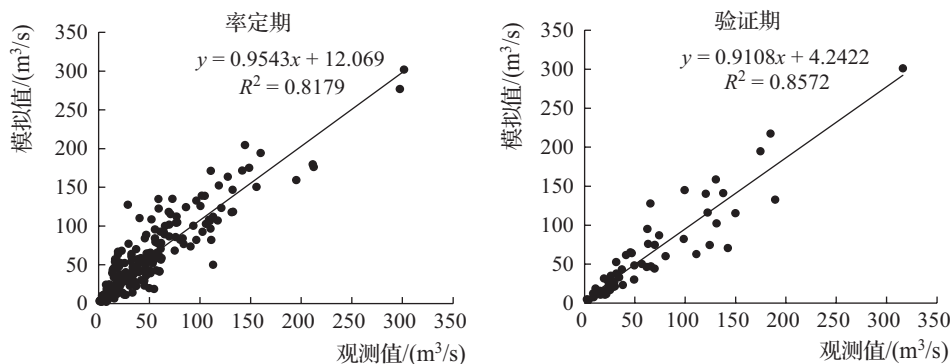


图 3 率定期和验证期径流量散点

3.2 情景模拟与分析

第一类情景模拟了 2003—2013 年金华江上游流域的年径流深,结果如图 4 和表 1 所示。就总体而言,径流量有逐年增多的趋势,2010 年达到最大。相较于基准情景,草地和耕地情景都有增加径流量的作用,其中草地情景年均径流深 368.4mm,较基准增加了 45.7mm;而耕地情景年均径流深达到 411.9mm,较基准增加了 89.2mm。只有林地情景下,年均径流深明显减少,为 259mm,相较于基准减少了 63.7mm。从第一类情景即极端土地利用情景的模拟结果可以看出,在排除其他干扰因素,仅探讨某一种土地利用类型对水文循环的影响时,草地和耕地都有使径流量增加的作用,

而耕地的增加作用更明显;林地则有截留的作用,可使年净流量明显减少。

用,而耕地的增加作用更明显;林地则有截留的作用,可使年净流量明显减少。

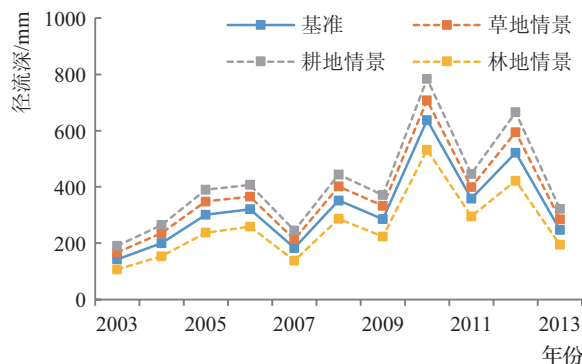


图 4 极端土地利用情景下各情景曲线

表1 极端土地利用情景年径流深

单位:mm

年份	基准	草地情景	耕地情景	林地情景
2003	142.6	168.0	190.8	106.8
2004	200.4	235.6	264.8	154.0
2005	301.5	348.3	389.8	237.5
2006	320.5	365.5	407.6	259.2
2007	182.7	214.1	244.9	138.3
2008	351.4	401.9	444.2	287.0
2009	285.8	332.4	371.2	223.7
2010	637.2	707.4	783.4	532.0
2011	358.8	399.7	446.8	295.2
2012	522.0	594.5	665.2	421.7
2013	247.0	284.9	322.0	194.0
年均	322.7	368.4	411.9	259.0

第二类情景讨论了在以《金华市土地利用总体规划(2006—2020年)》为依据的前提下,分别设置退耕还林和耕地保护情景,其土地利用变化见表2。主要变化表现在耕地和林地的面积上,其他土地利用类型仅有微小变化或无变化。在退耕还林情境下,179.3km²的耕地转化为林地,其余土地利用类型无变化。在耕地保护情境下,1051.9km²的林地转化为耕地,城镇面积少量增加,仅1.1km²,草地面积少量减少1.8km²。水文变化结果如图5和表3所示。在退耕还林情境下,由于耕地转化为林地,地表截留作用增加,径流量明显减少,其年均径流深较基准减少36.2mm;在耕地保护情境下,由于大量林地和草地转化为耕地,径流量明显增加,年均径流深较基准增加了64.2mm。

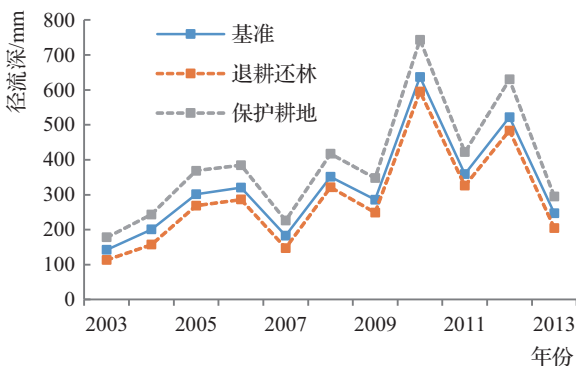


图5 退耕还林和保护耕地情景年径流曲线

表2 各土地利用情景下土地面积变化

单位:km²

项目	基准		退耕还林		耕地保护	
	面积	%	面积	%	面积	%
耕地	742.7	27.8	563.4	21.1	1795.2	67.2
林地	1601.7	59.9	1781.0	66.6	549.8	20.6
草地	70.9	2.7	70.9	2.7	69.1	2.6
城镇用地	224.3	8.4	224.3	8.4	225.4	8.4
水域	32.4	1.2	32.4	1.2	32.4	1.2

表3 退耕还林和保护耕地情景下年径流深

单位:mm

年份	基准	退耕还林	保护耕地
2003	142.6	112.9	177.8
2004	200.4	157.1	243.5
2005	301.5	268.4	368.9
2006	320.5	286.0	384.7
2007	182.7	147.4	225.9
2008	351.4	321.6	417.0
2009	285.8	248.6	347.8
2010	637.2	595.6	743.2
2011	358.8	325.9	421.6
2012	522.0	483.6	629.8
2013	247.0	204.7	295.4
年均	322.7	286.5	386.9

退耕还林和保护耕地情景下多年月均径流深见图6。由图6可知,退耕还林情景使年均径流量减少,保护耕地情景使径流量增加,而径流的变化主要发生在3—8月,即雨季。而9月至翌年2月的径流变化相对较少。这说明,土地利用变化不仅影响径流量的多少,

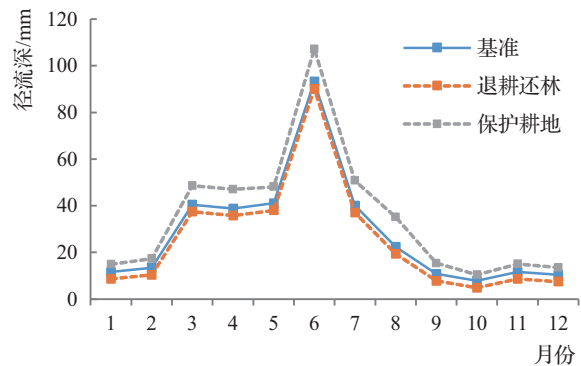


图6 退耕还林和保护耕地情景下多年月均径流深

对其时间上的分布亦有影响。如:保护耕地情境下,大量林地草地转化为耕地使年均径流量增多,而其增加量集中在雨季。虽然增加耕地的面积可以提高产量,促进经济的发展,但这一措施也大大减少了地表的截留作用,土壤下渗量减少,大部分雨水直接转化为地表径流,使流域内发生洪水的可能性增加。

4 结论和讨论

本文通过建立 SWAT 模型,定量模拟分析了金华江上游土地利用变化对水文循环的影响,结果表明:

a. SWAT 模型模拟精度较高,其中率定期(1972—1988年)Nash-Sutcliffe 效率系数达到 0.83,线性拟合度达到 0.82,相对误差 $Re = 0.18$;验证期(1989—1993) $Ens = 0.85$, $R^2 = 0.85$, $Re = 0.07$ 。

b. 通过模拟极端土地利用情景得知,林地有减少径流量的作用,而草地和耕地都有增加径流的作用,其中林地情景下年均径流量减少 63.7mm,草地情景增加 45.7mm,耕地情景增加 89.2mm。

c. 通过设定实际情景得知,退耕还林使年均径流量减少 36.2mm,而保护耕地使年均径流量增加 64.2mm,且径流变化量主要发生在 3—8 月,即雨季。

金华江上游流域径流对土地利用变化较敏感,尤其是在林地大量减少的情况下,径流增加量显著。因此在土地利用中,不能因扩大农业生产所带来经济效益增加而大量地增加耕地占用林地,同时也应兼顾流域水文循环的规律性和合理性,否则不合理的土地利用方式会造成流域内部的生态功能紊乱,旱涝灾害频发,这将不利于农业粮食产量的提高以及城市的可持续发展。◆

参考文献

- [1] TURNER B L, SKOLE D, SANDERSON S. Land use and land cover change[J]. *Ambio*, 2006, 32(23): 308-324.
- [2] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展[J]. *土壤*, 2011(3): 350-360.
- [3] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014(12): 2013-2021.
- [4] 陈志军, 李森. 中国土地利用和土地覆被变化研究进展[J]. *资源开发与市场*, 2007(10): 898-902.
- [5] 摆万奇, 柏书琴. 土地利用和覆盖变化在全球变化研究中的地位与作用[J]. *地域研究与开发*, 1999(4): 13-16.
- [6] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. *地理学报*, 1996(6): 553-558.
- [7] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. *中国水利*, 2008(2): 20-27.
- [8] 程琳琳, 杨开宇, 杜鹃, 等. 河北省河流水质时空变化特征及受人类活动的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015(1): 1-7.
- [9] 段建军, 王彦国, 王晓风, 等. 1957—2006年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2009(5): 781-791.
- [10] 顾西辉, 张强, 陈晓宏, 等. 气候变化与人类活动联合影响下东江流域非一致性洪水频率[J]. *热带地理*, 2014(6): 746-757.
- [11] 路洪海, 章程. 济南泉域岩溶水质演变及其对人类活动的响应[J]. *水土保持研究*, 2007(6): 238-240.
- [12] 苏志珠, 卢琦, 吴波, 等. 气候变化和人类活动对我国荒漠化的可能影响[J]. *中国沙漠*, 2006(3): 329-335.
- [13] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. *资源科学*, 2002(3): 1-7.
- [14] 李昌峰, 高俊峰, 曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. *土壤*, 2002(4): 191-196 + 205.
- [15] 刘贤赵, 康绍忠, 刘德林, 等. 基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨-径流关系中的应用[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(6): 93-97.
- [16] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development 1 [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 91-101.
- [17] 郝芳华. 非点源污染模型[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [18] 姜晓峰, 王立, 马放, 等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. *中国给水排水*, 2014(11): 135-138.
- [19] CHEN Qiang, GOU Si, QIN Dayong, et al. Analysis of SWAT 2005 Parameter Sensitivity with LH-OAT Method [J]. *Hkic Transactions*, 2010, 17(3): 1-7.
- [20] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 463-471.