

# 基于 SWAT 的西苕溪流域降雨—径流关系及水量平衡分析

李丽娇<sup>1,2</sup>, 薛丽娟<sup>1</sup>, 张奇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以 SWAT 模型为工具, 对太湖西苕溪流域进行了径流模拟, 采用 1988—2001 年范家村水文站逐日、逐月实测径流资料对模型进行了参数率定和模型验证, 效率系数均大于 0.88, 径流相对误差均小于 4%。在此基础上, 重点分析了西苕溪流域的降雨—径流关系和水量平衡。结果表明, 研究时段内西苕溪流域降雨—径流关系变化不明显; 西苕溪流域的降雨年际分布不均匀; 受降雨影响, 雨季月径流量和洪峰值均有缓慢上升的趋势。水量平衡分析表明, 河道径流、蒸散发、地下水补给量分别占降雨量的 54.1%、45.8%、17.3%。

**关键词:** 降雨—径流关系; 水量平衡分析; SWAT; 西苕溪流域

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2008)05-0081-05 中图分类号: P333.1, P334+.92

## SWAT-based Rainfall-runoff Relationship and Water Balance Analysis in Xitiaoqi Catchment

LI Li-jiao<sup>1,2</sup>, XUE Li-juan<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;  
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** SWAT was applied to Xitiaoqi catchment for surface runoff simulation. The model was calibrated and verified using observed data of stream flow at Fanjiacun gauging station in 1988—2001. An efficiency of greater than 0.88 was achieved in quantifying the model's fitness with the observation. A deviation of less than 4% was found in comparison of the predicted volume of stream flow with the observed one. Rainfall-runoff relationship and water balance were analyzed on the basis of the modeling results. The outcomes indicate that rainfall-runoff relationship in Xitiaoqi catchment has no significant alteration in the simulation period. The annual rainfall precipitation varies significantly. The monthly runoff and peak storm flow in wet seasons have a tendency of slow increase, which is affected mainly by rainfall. The water balance analysis indicates that the percentages of stream flow, evapotranspiration, and groundwater recharge over the amount of rainfall are 54.1%, 45.8% and 17.3%, respectively.

**Keywords:** rainfall-runoff relationship; water balance analysis; SWAT; Xitiaoqi catchment

西苕溪是太湖上游的重要支流, 该流域的降雨径流关系及水循环过程对太湖的水量和污染物通量有重要影响, 由于湖泊与其流域有着密切的水文联系, 近年来在该流域开展了不少水文模拟研究。李恒鹏等采用 Geodatabase 技术构建了西苕溪流域水文系统地理数据库, 研究成果可为流域数据库建设及流域决策支持系统信息平台构建提供技术参考<sup>[1]</sup>; 高俊峰等利用 PCRaster 的环境动态模拟语言开发了西苕溪

流域水文过程模拟模型, 用较短时间系列实测资料对模型进行了验证, 表明所建立的水文模型有利于流域物质迁移等方面的研究<sup>[2]</sup>; 徐力刚等利用集总式水文模型 LASCAM 模拟了 1968—1988 年日、年降雨径流过程, 模拟效果较为理想<sup>[3]</sup>。但是基于分布式水文模型分析西苕溪中上游流域长时段降雨—径流关系和水量平衡分析的工作还不多见。流域的降雨—径流过程是水循环的一个重要方面, 也是研究农业非

收稿日期: 2007-12-14

修回日期: 2008-06-23

资助项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金(40471018); 国家 973 计划(2002CB412310)

作者简介: 李丽娇(1985—), 女(汉族), 江西省兴国县人, 硕士生, 主要从事水文过程及模拟研究。E-mail: lilijiao85@163.com。

通信作者: 张奇(1966—), 男(汉族), 江苏省吴江市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水文过程及模拟研究。E-mail: qzhang@niglas.ac.cn。

点源污染的主要途径<sup>[4]</sup>。流域的水循环过程对其水量分配有着重要影响,水量平衡分析是评价区域物质输移的重要手段,同时有助于多层次评价模拟结果的可信度。坡面流和基流是营养盐的重要载体,但已有的水文模拟研究工作中往往只考虑河道总径流量,没有定量评价坡面流和基流所占的比重。因此本文的目的是采用数字滤波技术对流域的实测径流进行分割和处理,在此基础上,利用 SWAT 模型分别对基流和坡面流进行了校准,通过对模拟结果进行分析揭示了自然降雨条件和人为因素影响下西苕溪流域的降雨—径流关系。并对水量平衡进行分析,揭示了流域水循环的水量分配关系,弥补了以往研究中的不足。

## 1 流域概况

西苕溪流域位于浙江省北部的湖州市境内,流域面积为 2 274 km<sup>2</sup>,约占太湖流域总面积的 6%。流域地势西南高,东北低,依次从山地过渡为丘陵平原。西苕溪河长约 143 km,源于天目山脉,向北流于湖州市内杭长桥与东苕溪汇合入湖。流域内土地利用以林地为主,约占土地总面积的 67%,其次为耕地、草地、水域、居民用地。流域内地带性土壤主要为红壤和黄壤,地带性植被属亚热带常绿、落叶阔叶林,植被类型多样,但以竹林为主。西苕溪流域属亚热带季风气候区,多年平均降水量为 1 465.8 mm。降雨主要集中于 4—9 月,降雨空间分布差异较大,年降雨量从西南山区的 1 800 mm 到东北区的 1 200 mm 呈逐渐递减。该流域的蒸发强度呈较为明显的季节变化,夏季蒸发量大,冬季蒸发量小,平均年蒸发量约为 1 200 mm<sup>[5]</sup>,最大蒸发量发生在 5—8 月,占全年的 50%。

## 2 模型及基础数据

SWAT<sup>[6]</sup> (soil and water assessment tool) 是一个具有物理基础的流域分布式水文模型,适用于不同土壤类型,不同土地利用方式和管理条件下的复杂流域。SWAT 模拟的流域水文过程分为陆面部分(即产流和坡面汇流部分)和水面部分(即河道部分)<sup>[7]</sup>。SWAT 模型先将研究流域划分为若干个子流域,考虑土地覆被和土壤类型又将每个子流域划分为若干水文响应单元(HRU)。每个 HRU 都单独计算径流量,然后汇入各子流域河道进行径流演算,最后演算得到流域总径流量。模型计算所需要的水文气象数据主要来源于流域内的 10 个降雨测站 1988—2001 年的日实测数据,以及安吉县气象站 1988—2001 年的气象监测数据,包括逐日降水量、逐日最高最低气温、逐日平均相对湿度监测数据,日辐射量和风速数据由 SWAT 自带的气候

模拟器生成,流域内各水文气象资料测站的地理位置如图 1 所示。采用 1:5 万西苕溪流域地形图构建了栅格单元大小为 25 m × 25 m 的数字高程模型(DEM)。利用 2000 年的 TM/ETM 遥感影像数据获得西苕溪流域土地利用图,并按照 SWAT 模型的输入要求,重新将土地利用类型简化为 4 种:森林、耕地、水域、城镇用地。土壤图来源于 1:10 万土壤普查数据,河道参数来源于当地水利管理部门。

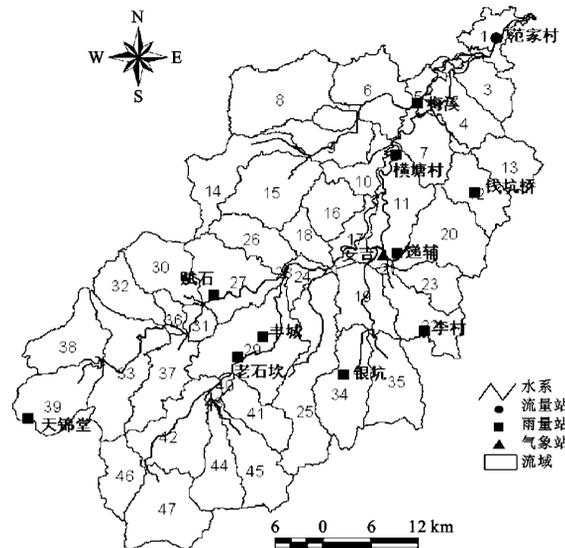


图 1 西苕溪流域水系及雨量站、流量站分布

考虑到西苕溪流域下游属平原河网,水系复杂,本研究选择西苕溪中上游流域为研究区,选取范家村水文站作为控制站点。用 DEM 提取流域河网时,设定上游集水流域的阈值为 26 km<sup>2</sup>,将研究区划分为 47 个子流域(如图 1);采用优势地面覆被/优势土壤类型方法生成 HRU<sup>[8]</sup>,阈值为 10/15,即按照子流域面积 10% 以上的土地覆被及此类土地覆被 15% 以上的土壤类型生成 HRU,将本研究区划分为 180 个 HRU。由于西苕溪流域有完整的十站日降雨数据,所以径流模拟方法选择 SCS 方法,模拟时间步长均以日为单位。潜在蒸散发模拟方法选用 Penman—Monteith 法,河道汇流演算选用马斯京根法。在 SWAT 模型中考虑上游大中型水库(老石坎水库和赋石水库)对控制站点日径流过程的影响,结合水库的调度资料,将水库的下泄流量作为水库出口所在位置的上游流量。

## 3 模型模拟

### 3.1 模型率定与验证

模型率定和模型验证是模型建立过程中的重要工作。参数率定之前首先根据 Lenhart<sup>[9]</sup>提出的简单敏感性分析方法分析得出,CN<sub>2</sub> 是影响径流的高敏感性

参数,与径流量呈正相关关系;土壤有效含水量也是高敏感性参数,与径流量呈负相关关系;土壤蒸发补偿系数属中敏感性参数,与径流量呈正相关关系,同时采用自动数字滤波技术<sup>[10]</sup>(automated digital filter technique)对范家村水文站的实测资料进行坡面流和基流的分割,然后用分割所得数据分别校准 SWAT 中模拟的坡面流和基流<sup>[11-12]</sup>。参数的敏感性分析和实测径流资料的分割处理将大大缩短 SWAT 模拟过程中参数率定的时间,同时使各径流量模拟值更接近真实值。完成对实测径流的分割后,在 SWAT 模型中对各水量进行校准,首先对月径流模拟值进行校准,月径流量与实测资料基本吻合后再对日径流模拟值(包括各径流量)进行校准(表 1)。

参数调整的过程中对高敏感性参数——径流曲线数(CN<sub>2</sub>)和土壤有效含水量(SOL\_AWC),中敏感性参数——土壤蒸发补偿系数(ESCO)进行重点率定,之后调整水力传导度(K)、基流退水系数(ALPHA\_BF)、地下水蒸发系数(GW\_REVAP)、回归流发生的极限深度(GWQMN)等参数,最终使日径流过程拟合达到理想程度。

表 1 模型参数校准取值

参数	参数说明	参数值
CN <sub>2</sub>	正常土壤水分时的径流曲线数	70~96
SOL_AWC	土壤有效含水量(mm/mm)	0.07~0.12
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.60
ALPHA_BF	基流退水系数(d)	0.16
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.02
GWQMN	回归流发生的极限深度(mm)	500

注:不同水文响应单元的 CN<sub>2</sub> 不同,不同土壤的 SOL\_AWC 不同,所以表 1 只给出这两个参数的取值范围。

选择范家村水文站 1988—1995 年的日流量数据作为模型率定的目标值,选用该站 1996—2001 年的日流量数据对率定好的模型进行验证。经率定的参数见表 1,率定时段和验证时段的日径流过程见图 2—3。选用模拟径流量和实测径流量的多年平均相对误差  $R_E$  和效率系数  $e$  来评价模型的模拟效果。

$$\text{平均相对误差 } R_E: R_E = (Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}}) / Q_{\text{obs}}$$

式中: $Q_{\text{obs}}$ ——长系列观测的径流总量; $Q_{\text{sim}}$ ——长系列模拟的径流总量。

$$\text{效率系数 } e: e = 1 - V_r / V_0$$

式中: $V_r$ ——观测值与模拟值的差的方差; $V_0$ ——观测值的方差; $e$  的范围为 - 至 1,分别表示“最差”至“最优”的吻合程度来评价模型的模拟效果。

## 3.2 模拟结果分析

### 3.2.1 降雨—径流关系分析

图 2—3 分别表示范家村水文站日径流量和月径流量模拟值和观测值的模拟结果比较,总体而言,日径流量和月径流量模拟值与观测值都有良好的吻合。在 1988—1995 年率定期和 1996—2001 年验证期日径流模拟效率系数  $e$  均大于 0.88,月径流模拟效率系数  $e$  均大于 0.95。同时,1988—1995 年率定期年均模拟径流为  $1.49 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,年均观测径流为  $1.47 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,多年平均相对误差为 1.3%;1996—2001 年验证期年均模拟径流为  $1.72 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,年均观测径流为  $1.78 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,多年平均相对误差为 - 3.4%。通过模型的参数率定和验证,表明 SWAT 模型能够比较准确地模拟西苕溪范家村水文站以上流域的径流量,为该流域的降雨—径流关系和水量平衡分析奠定基础。

进一步分析得出,1988—1995 年率定期模拟的流域径流系数为 0.45~0.61,平均值为 0.53,1996—2001 年验证期模拟的径流系数为 0.46~0.63,平均值为 0.54,说明西苕溪流域的降雨年际分布不均匀,模拟时段内 1988—2001 年的降雨—径流关系变化不大,但率定期和验证期的径流量呈现缓慢上升的趋势,这与西苕溪流域年均降水量呈现出缓慢上升的趋势相符合,且从 1988—2001 年的月径流分布来看(图 3),雨季的月径流和洪峰值均有增大的趋势,主要是受夏季的强暴雨影响,也可能和土地利用变化有关。流域降雨主要发生在 5—9 月,占年平均降雨量的 61.4%,总量达 917.3 mm,而旱季仅为 576.13 mm,河道径流量与降雨量有极好的季节响应关系,径流量集中在 5—9 月,占全年总径流量的 61.1%。雨季(5—9 月)和旱季(10—翌年 4 月)的径流量(图 4)分析表明,雨季径流量的年际变化趋势与降雨量的年际变化一致,旱季径流量变化较平缓,与年降雨量无明显相关关系。如 1999 年降雨量为 1 989.22 mm,枯期径流深仅为 238.8 mm。当流域遭遇特大暴雨时,洪峰观测值低于模拟值,可能的原因是模拟过程中不能完全考虑西苕溪流域上游大小水库等人为因素在暴雨洪水期对洪峰的削弱作用。

### 3.2.2 水量平衡分析

流域的水循环过程对水质状况产生重要影响,对于生态环境的可持续发展有着重要作用。而区域水量平衡各分量特别是支出项的观测比较困难,探求区域内各水量的分配,需借助模型模拟的研究手段<sup>[13]</sup>。由于范家村水文站能够控制该站流域以上的绝大部分水量,本研究假定该站以上流域为闭合流域。在此基础上,从 3 个方面分析该研究区的水量分配,其水量平衡方程如下。

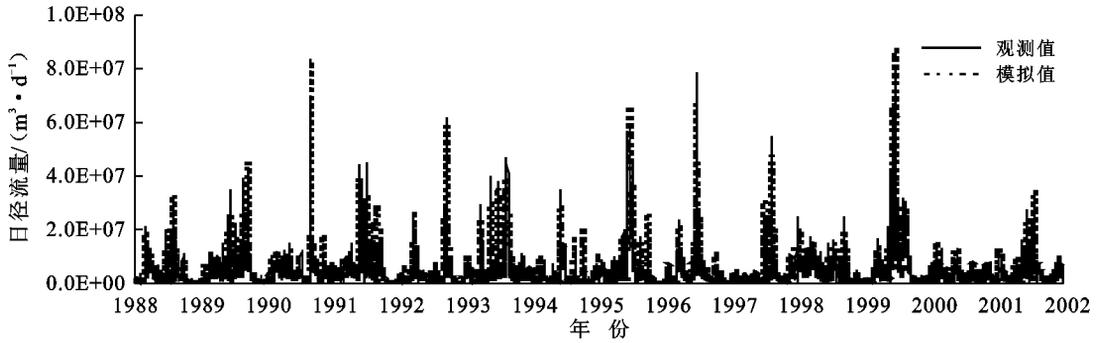


图 2 范家村水文站 1988 — 2001 年日径流模拟值与观测值的比较

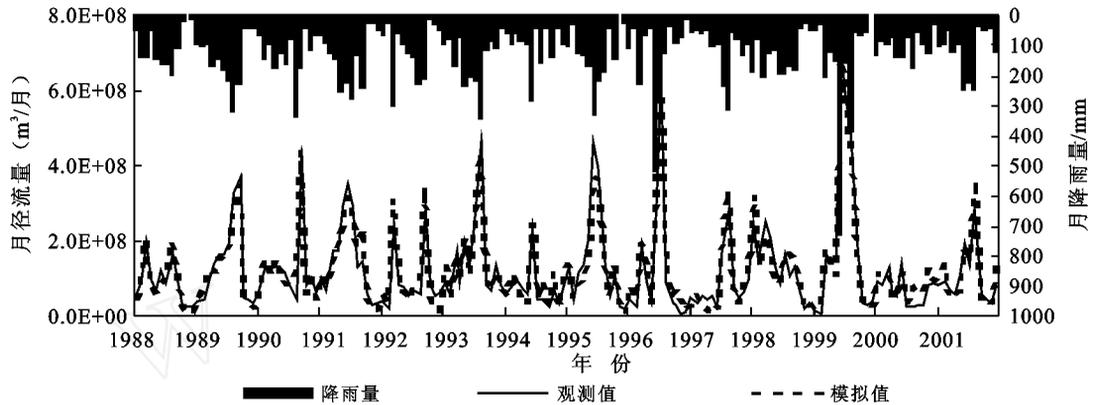


图 3 范家村水文站 1988 — 2001 年月径流模拟值与观测值的比较

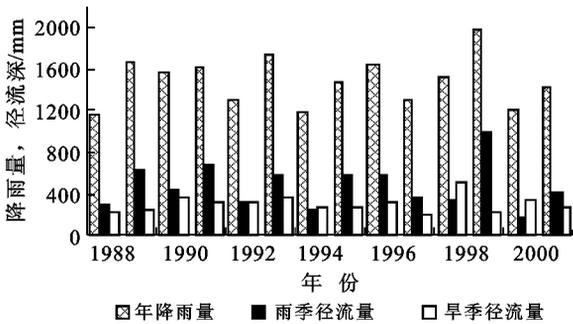


图 4 西苕河流域雨季(5—9月)和旱季(10—翌年4月)径流量比较

- (1) 降雨量  $P = E_s + R_{overf} + R_{perco} + S$
- (2) 地下水补给量  $R_{perco} = R_{bf} + E_g + R_d + S_{gw}$
- (3) 河道径流量  $R_{rivf} = R_{overf} + R_{bf}$

式中： $P$ ——降雨量； $E_s$ ——蒸散发量(地表水蒸发 + 土壤水蒸散发)； $R_{overf}$ ——坡面流(包括壤中流)； $R_{perco}$ ——土壤对地下水补给量； $S$ ——土壤水变化量； $R_{bf}$ ——基流量； $E_g$ ——浅层地下水蒸散发量； $R_d$ ——深层地下水补给量； $S_{gw}$ ——浅层地下水蓄量变化； $R_{rivf}$ ——河道径流量。

根据 1988—2001 年模型模拟结果,对流域进行水量平衡分析(图 5)。(1) 对降雨量作平衡分析,蒸

散发是该地区水量的主要输出项,年均蒸散发量占年均降雨量的 45.8%,但年际变化不大;年均坡面流(包括壤中流)占 36.8%,受降雨影响坡面流年际变化较大;年均土壤对地下水补给量占降雨量的 17.3%,土壤对地下水的补给量与降雨量关系密切,呈正相关关系,并直接影响基流量的大小;年均土壤水变化量仅为 0.1%,符合长时间系列土壤剖面水量变化特征。(2) 对地下水补给量作平衡分析,由于 SWAT 模型中没有单独输出浅层地下水蓄量变化值( $S_{gw}$ ),这里假定多年  $S_{gw}$  为 0,分析得出基流占地下水补给量的 99.7%,表明大部分土壤水入渗补给地下水后以基流的形式重新补给地表水体,深层地下水补给量及浅层地下水蒸散发量仅占 0.3%。(3) 对河道径流量作平衡分析(公式 3),其中坡面流占 68.1%,基流占 31.9%。河道径流量(占年均降雨量的 54.1%)年际变化较大,基流变化不显著;利用自动数字滤波技术分割基流所得的实际基流量占总河道径流的 30%,说明基流模拟值基本符合山区湿润气候下地下水对地表水的补给特征。该项水量平衡分析对认识研究区水循环具有重要意义,随着人类活动影响的加剧,水量平衡关系可能被破坏,这类影响可以通过模型的更新加以定量揭示。

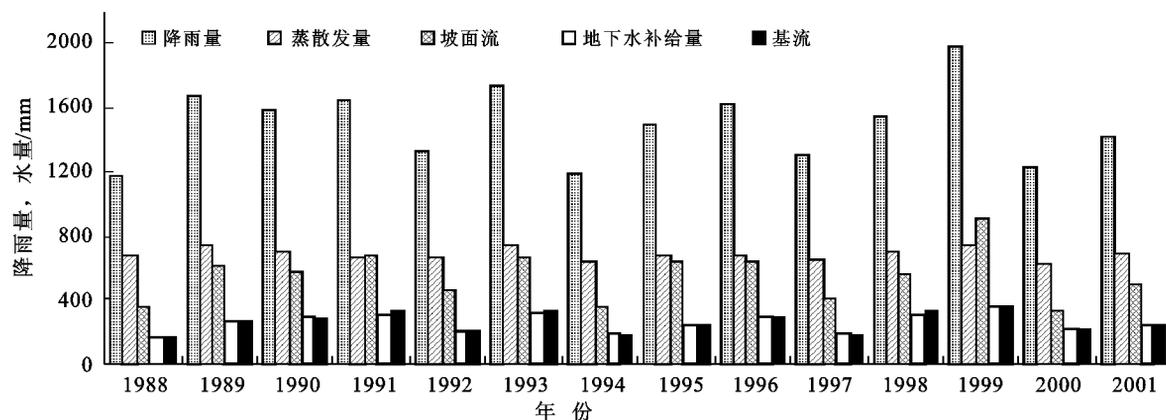


图 5 1988—2001 年年水量平衡柱状图

## 4 结论

本文在考虑西苕溪流域水文特征的基础上,基于 SWAT 对西苕溪流域进行了 14 a(1988—2001 年)径流过程模拟。

(1) 范家村水文站日、月径流量模拟值与观测值都有良好的吻合,在率定期和验证期径流观测值和模拟值的相对误差小于 4%;日、月径流模拟效率系数  $e$  均大于 0.88。模拟期间西苕溪的降雨—径流关系变化不明显,受降雨影响,雨季径流量和洪峰值均有上升的趋势;西苕溪流域降雨的年际分布很不均匀,但河道径流量与降雨量有极好的季节响应关系,个别洪峰观测值低于模拟值,可能是模型中未能完全考虑上游水库等人为因素在暴雨洪水期对洪峰的削弱作用。

(2) 1988—2001 年西苕溪流域水量平衡分析结果表明,蒸散发量占年均降雨量的 45.8%,年际变化较小;年均坡面流(包括壤中流)占年均降雨量的 36.8%,主要受降雨影响年际变化较大;年均土壤对地下水补给量占降雨量的 17.3%,与降雨量呈正相关关系;对河道径流而言,坡面流是主要成分,占河道径流量的 68.1%,基流占 31.9%;年均河道径流量占降雨量的 54.1%,年际径流变化差异较大,基流变化不显著。该水量平衡揭示了河道径流、蒸散发、地下水补给量以及土壤水占降雨量的百分比,为认识该流域的水循环过程提供新的数据依据,并为揭示未来人类活动或自然条件变化对水循环的影响提供数据基础。

**致谢:**感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所李恒鹏副研究员为本次研究提供的帮助。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 李恒鹏,刘晓玫,李金莲.采用 Geodatabase 技术构建流域水文系统地理:以太湖地区西苕溪流域为例[J].湖

泊科学,2005,17(3):275—281.

- [2] 高俊峰,阎国年.基于地图计算的流域水文过程模拟:以太湖流域上游西苕溪流域为例[J].湖泊科学,2005,17(4):305—310.
- [3] Xu Ligang, Zhang Qi, Li Hengpeng, et al. Modeling of surface runoff in Xitiao River catchment, China[J]. Water Resources Management, 2007, 21:1313—1323.
- [4] 景元书,张斌,王明珠,等.鹰潭小流域季节性降雨径流特征研究[J].水土保持学报,2003,17(5):45—47.
- [5] 中国科学院南京地理与湖泊研究所,水利部太湖流域管理局.太湖流域自然资源地图集[M].北京:科学出版社,1991:11—19.
- [6] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation[R]. Texas: Texas GSWRL Report, 2002.
- [7] 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.
- [8] 吴军,张万昌. SWAT 径流模拟及其对流域内地形参数变化的响应研究[J].水土保持通报,2007,27(3):52—58.
- [9] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27:645—654.
- [10] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2):411—424.
- [11] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等.基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J].水土保持研究,2003,10(4):38—42.
- [12] 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—470.
- [13] 代俊峰,陈家宙.不同林草系统对集水区水量平衡的影响研究[J].水科学进展,2006,17(4):435—443.