

基于 SWAT 模型的绍兴城市径流时空演变规律分析

陈成广¹, 李晶晶², 滕凯玲², 徐立红²

(1. 绍兴文理学院元培学院建筑工程系, 浙江 绍兴 312000;

2. 绍兴市环境监测中心站, 浙江 绍兴 312000)

摘要:为克服较大尺度城市径流的定量难题,引入了分布式流域水文模型(SWAT),对绍兴城市径流开展了定量模拟及时空演变规律分析。经 DEM 建模分析,将绍兴城市置于合适尺度的流域内建立 SWAT 模型;在敏感性分析的基础上,利用径流监测数据对模型进行了校准与验证,模型评价结果表明,所有站点校准期与验证期的平均相对误差 Re ($-5.29\%\sim 8.81\%$)、判定系数 R^2 ($0.91\sim 0.96$)和效率系数 Ens ($0.90\sim 0.94$)均满足年水平和月水平径流定量要求。在此基础上,以 1992~2011 年的降雨为驱动模拟得到了子流域的月径流数据;最后利用地统计学方法(GSM)对绍兴城市径流的时空演变规律进行了分析,并得到了关键源区,为绍兴城市水资源保护与利用提供科学依据。

关键词:SWAT 模型;城市径流;校准与验证;时空演变

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)04-0029-06

城市降雨-径流是城市洪涝和面源污染的重要环节,径流过程的定量描述和预测,是城市洪涝和面源污染控制的前提^[1-5]。国内外专家学者针对降雨产流过程开展了大量的研究,并取得了一系列成果。Zare SO 等^[6]运用优化框架的 BMPs 及 NSGA-II(非支配排序遗传算法 II)优化技术应用模拟城市集水区径流,得到了城市径流控制方案;Hernandez 等^[7]选取了美国半干旱地区 Walnut Gulch 试验区,借助 SWAT 模型定量模拟了土地利用变化和降雨空间分布变异特征对过程的影响。国内学者肖海文^[8]在重庆市棕榈湖人工湿地构建了城市径流处理人工湿地的试验模型,并研究了该区域的径流及污染特征。然而,当前研究^[7,9-10]多集中在农业区降雨径流定量技术或城市小型集水区的模拟研究,大尺度城市的行政界线与流域自然边界的差异性会导致大尺度城市径流的定量模拟与控制困难。鉴于此,本文拟引入 SWAT 分布式水文模型,借助其空间分析优势将绍兴城市径流问题转化为流域径流问题,定量模拟和分析绍兴城市径流的时空演变规律,进而识别出径

流关键源区,以期对绍兴城市水资源保护与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

绍兴市(图 1)位于浙西山地丘陵、浙东丘陵山地和浙北平原三大地貌单元的交接地带,东经 $119^{\circ}53'03''\sim 121^{\circ}13'38''$ 、北纬 $29^{\circ}13'35''\sim 30^{\circ}17'30''$ 之间。地貌类型多样,西部、中部、东部属山地丘陵,北部为绍虞平原,地势总趋势由西南向东北倾斜。最高点为海拔 1 194.6 m 的会稽山脉主峰东白山,最低点为海拔仅 3.1 m 的诸暨“湖田”地区,中部多为海拔 500 m 以下的丘陵地和台地,绍虞平原平均海拔为 5~10 m,地表江河纵横,布满小型湖泊。绍兴市位于亚热带季风气候区,季风显著,四季分明,温暖湿润。雨量相对集中,暴雨导致的洪涝灾害频繁。多年平均降水量为 1 438.9 mm,空间分布不均,且降水年际变化较大,最多年降水与最少年相差高达 895.2 mm,平均年降水日数为 156.2 d。

收稿日期:2016-07-08

基金项目:绍兴市科技计划项目(2014B70041, 2014B70049)

作者简介:陈成广(1983-),男,浙江苍南人,硕士,讲师,主要从事环境污染检测与治理研究。E-mail:salen1983@163.com

通讯作者:徐立红(1965-),女,浙江绍兴人,教授级高工,主要从事环境污染检测研究。E-mail:xlh127@163.com

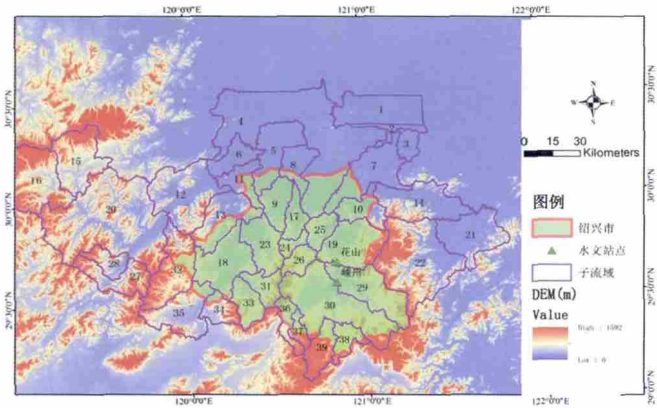


图 1 研究区基本信息

Fig.1 The study area description

1.2 数据来源与前处理

本课题采用历史数据收集、野外监测和室内分析相结合的手段来获取相关数据，包括空间数据和属性数据两部分,其来源及基本信息如表 1 所示。

表1 数据来源及基本信息

Table1 The data source and basic information

数据名称	精度	资料来源	源数据格式/备注
地形图	1:5 万	中国科学院国际科学数据服务平台	30m GDEM 数据
土地利用现状图	250 m	WESTDC 土地覆盖数据	Shape 格式
土壤类型图	1:100 万	HWSD 中国区土壤	250m 栅格图
流域水系图	1:78 万	浙江省水文局	Shape 格式
气象	/	浙江省气象局	日气象数据
径流、泥沙	/	浙江省水利厅	日径流量及含沙率
水质	/	野外监测及实验室分析	浓度(mg/L)
土壤属性	/	土壤志、文献及计算	《浙江土壤志》
土地利用属性	/	文献查询	/

为使数据为 SWAT 模型所利用,需对数据进行前处理。利用地理信息系统 ArcGIS 技术,对 GDEM 数据进行拼接和邻域分析,制成含绍兴城市在内的较大区域数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)、土壤和土地利用分布图(图 2);通过进行投影变换将投影统一转化为 ALBERS 等积圆锥投影,为空间数据叠加分析和模拟计算提供基础。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型

水平衡是 SWAT 模型模拟的首要环节。借助 Ar-

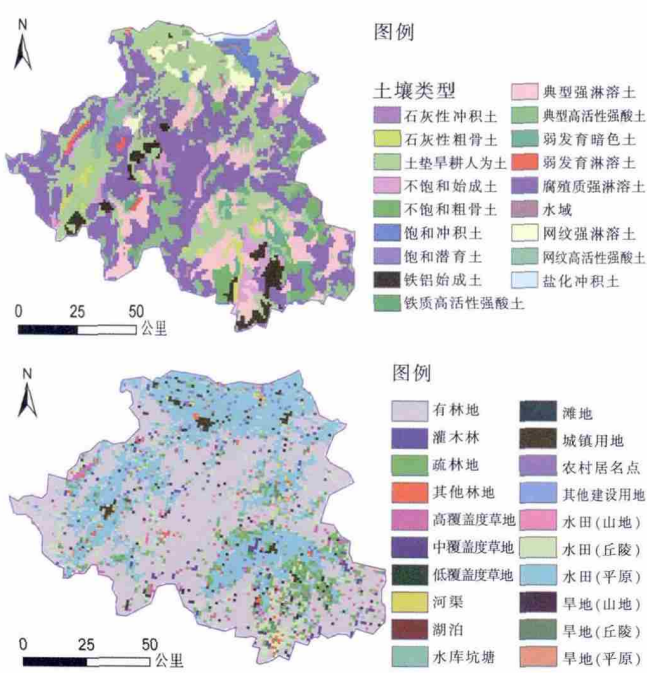


图 2 研究区土壤类型(上)与土地利用(下)空间分布图

Fig.2 The soils (up) and land uses (down) of the study area

cGIS 平台,结合专家判断法,对 DEM 进行集水区信息提取,勾勒出包含绍兴城市在内的较为完整的流域。将该区域作为 SWAT 模型的模拟区域开展分布式模拟,通过统计学分析方法获得绍兴城市径流分布特征。水文模拟包括水文循环的陆地演算阶段与河道演算阶段,在陆地演算阶段,SWAT 模型水文循环主要由气候、径流、泥沙、土壤温度、营养物、杀虫剂、作物生长和农业管理 7 部分组成,其水量平衡方程如公式(1)所示^[11]。在河道演算阶段,利用相关算法对流域河网的负荷进行演算,通过对河道中的化学物质进行转换来实现对物质流的跟踪。

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

式中:SW_t为土壤最终含水量(mm);SW₀为土壤前期含水量(mm);t为时间步长(day);R_{day}为第i天降雨量(mm);Q_{surf}为第i天的地表径流量(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天地下水含量(mm)。

1.3.2 模型适用性评价方法

采用模型适用性评价方法来验证其在研究区径流的模拟效率。本研究选取相对误差 Re,判定系数 R²和效率系数 Ens 三个指标来评价模型的适用性,见公

式(2)。当 $R^2<1$ 时,其值越接近 1,说明模拟精度越高,反之亦然;当 $Q_0=Q_p$ 时, $Ens=1$; Ens 越接近于 1,表明模拟可信度越高。一般来说, $Re<20\%$, $R^2>0.7$, $Ens>0.5$, 认为模型的径流模拟是可靠的^[12]。

$$Re=\frac{Q_p-Q_0}{Q_0}\times 100\%, Ens=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_0-Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_0-\overline{Q_0})^2} \quad (2)$$

式中: Q_p 为模拟径流, mm/s; Q_0 为实测径流, mm; n 为样本个数。

2 结果与讨论

本研究通过地形参数的提取、河网的生成、出口点的添加、土壤及土地利用的加载,以 1992~2011 年共 20 a 的降雨数据为驱动,初步构建了研究区域 SWAT 模型,并将研究区划分为 39 个子流域(图1)和 423 个水文响应单元(Hydrological Response Units, HRUs)。同时,以 1992~2001 年为模型的校准期,以 2002~2011 年为模型的验证期,分别在年和月水平上对径流进行校准和验证。

2.1 模型的校准与验证

在对 SWAT 模型的参数进行校准与验证前,首先采用 Morris 于 1991 提出的 LH-OAT^[13]敏感性分析方法对 SWAT 模型的参数进行敏感性分析,以寻找到对模型结果有重要影响的参数,加以优先调整。设置 LH 抽样间隔数为 10, OAT 变化参数为 0.05, 随机种群为

2003。敏感性分析结果如表 2 所示。

表2 SWAT模型径流参数敏感度序列(以嵊州水文站为例)
Table2 The runoff parameter sensitivity values of SWAT model

参数	参数描述	敏感性排序	LH-OAT 值	灵敏度等级
CN ₂	SCS 径流曲线数	1	2.72	极高
Gwqmn	浅层地下水阈值深度	2	1.11	
rchrg_dp	深蓄水体渗透系数	3	0.80	
ESCO	土壤蒸发补偿系数	4	0.28	高
sol_z	土壤深度	5	0.22	
SLOPE	平均坡度	6	0.17	
SOL_AWC	土壤可利用有效水量	7	0.11	中
sol_k	土壤导水率	8	0.07	
Gwrevap	地下水再蒸发系数	9	0.06	
canmx	最大冠层蓄水量	10	0.04	低
ALPHA_BF	基流 alpha 系数	11	0.02	

以嵊州水文站为例,根据径流敏感性分析结果序列,选取对结果有影响的灵敏度等级为极高和高的 5 个参数,即 CN₂、Gwqmn、rchrg_dp、ESCO 和 sol_z 作为径流校准的主要调整参数,对研究区内嵊州水文站和花山水文站的年水平和月水平径流进行校准与验证。采用相对误差(Re)对年水平径流的模拟情况进行适用性评价,结果见表 3。在年水平径流校准及验证的基础上,微调模型相关参数,对月水平径流进行校验,月水平径流模拟和实测径流对比曲线见图 3 和图 4,适用性评价结果见表 4。

表3 年水平径流模拟结果评价
Table3 Assessment of the calibrated model at year level

站点	时期	校准期									
	年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
嵊州	$Re/\%$	-2.00	0.69	13.70	-7.00	12.30	-2.90	0.50	-8.20	2.01	-1.00
花山	$Re/\%$	6.16	9.31	14.30	-7.60	4.03	5.09	8.42	-3.60	11.20	6.89
站点	时期	验证期									
	年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
嵊州	$Re/\%$	-4.10	2.66	1.53	5.78	3.41	2.50	-7.20	-5.90	8.23	11.60
花山	$Re/\%$	-5.70	11.80	10.10	-5.60	11.10	24.10	23.60	-4.00	16.60	10.40

由表 3~4,图 3~4 可以看出,SWAT 模型适用性评价结果显示,月水平和年水平的径流模拟结果均为 $Re<20\%$, $R^2>0.8$ 且 $Ens>0.8$,满足径流模拟评价的精度要求,故所建立的 SWAT 模型适宜研究区域模拟,为接下来绍兴城市径流的时空演变分析和关键源区识别提供了实用模型。

2.2 径流时空演变规律分析与关键源区识别

2.2.1 时间演变特征

通过对绍兴市 1992~2011 年的降雨数据模拟与统计分析发现,绍兴城市大部分降雨集中在汛期(4~8 月)。根据 SWAT 模型的月模拟输出结果,对绍兴市汛期和全年的径流量输出情况进行统计分析,得到汛期

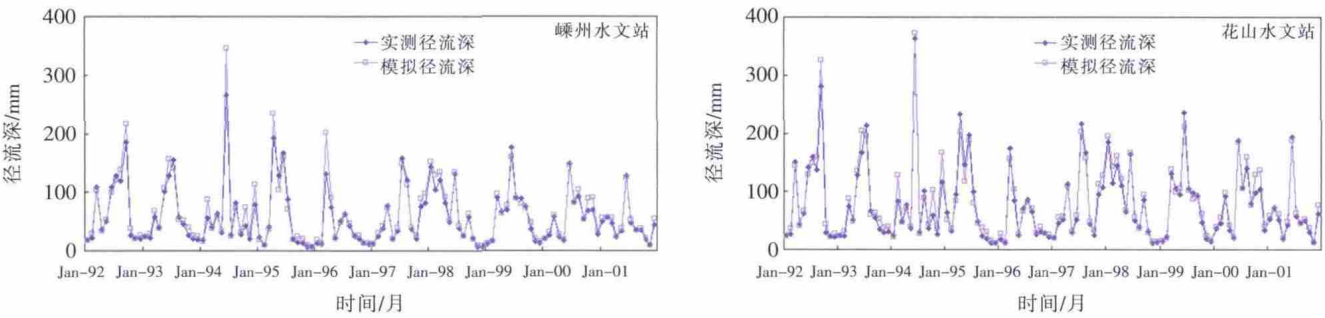


图 3 月径流校准期对比曲线

Fig.3 Comparison between the simulated and observed monthly runoff in calibration period

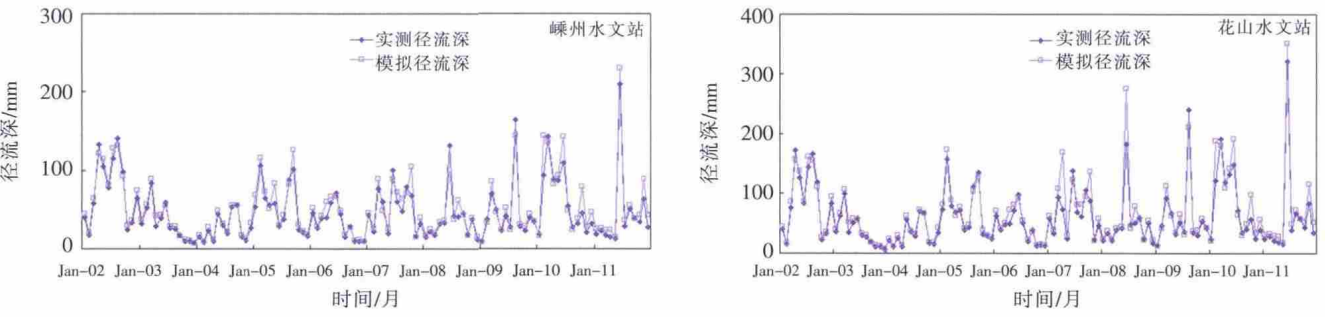


图 4 月径流验证期对比曲线

Fig.4 Comparison between the simulated and observed monthly runoff in validation period

表4 月水平径流模拟结果评价

Table4 Assessment of the calibrated model at monthly level

站点	模拟时段	Re/%	R ²	Ens
嵊州	校准期(1992~2001)	6.06	0.94	0.93
	验证期(2002~2011)	-5.29	0.92	0.92
花山	校准期(1992~2001)	3.47	0.96	0.94
	验证期(2002~2011)	8.81	0.91	0.90

表5 1992~2011年月均降雨及地表径流量

Table5 The average monthly rainfall and surface runoff from 1992 to 2011

月份	月降雨量/mm	月径流量/10 ⁷ m ³
1	49	13.1
2	71.2	16.3
3	142.8	63.2
4	202.9	67.7
5	182.9	73.1
6	249.8	104.1
7	149.3	46.2
8	173.1	47.6
9	84.7	20.3
10	36.3	19.4
11	40.5	22.2
12	33.2	8.5

径流占全年的百分比(图 5)。同时,统计并分析了多年月径流变化情况(表 5)。

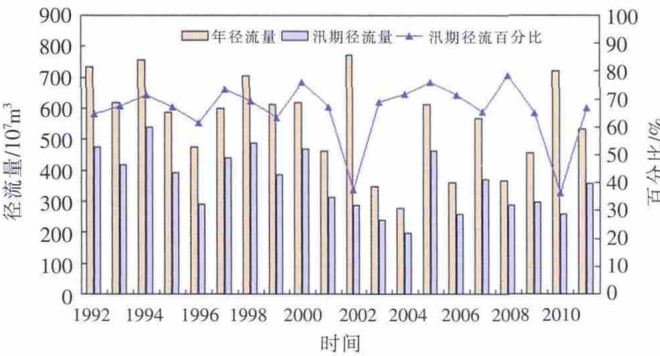


图 5 研究区汛期径流量所占比例

Fig.5 The percentage of the flood season runoff in the study area

由图 5 和表 5 可以看出,1992~2011 的 20 年间,绍兴城市地表径流有显著特点:极端丰水年(2002 年)

的年径流量($794.6 \times 10^7 \text{m}^3$)约为极端枯水年(2004 年, $272.3 \times 10^7 \text{m}^3$)的 3 倍;汛期地表径流占全年的百分比范围分别为 37.12%~78.25%, 多年平均为 66.2%,可见,汛期的地表径流量约占全年的 2/3,说明绍兴城市地表径流主要由汛期降雨引起;并且,汛期的月降雨量与地表径流量的相关系数为 0.94,而其它时期为 0.88,这揭示了汛期降雨与地表径流二者之间的密切

联系,也反映了汛期较其它时期相比,降雨与径流之间的相关性更高;此外,多年月地表径流量在6月达到峰值($104.1 \times 10^7 \text{m}^3$),而12月最低($8.5 \times 10^7 \text{m}^3$),且6月的径流量约为12月的13倍,这说明绍兴城市地表径流年内分布极不均匀。

2.2.2 空间分布特征与关键源区识别

根据 SWAT 在子流域和 HRUs 水平的输出结果,利用 ArcGIS 的地统计分析功能,对绍兴城市的径流按等间隔划分为5个强度等级,等级越高,表示径流流失越严重,等级依次表述为:轻微、适度、中等、严重和很严重,其空间分布如图6所示。

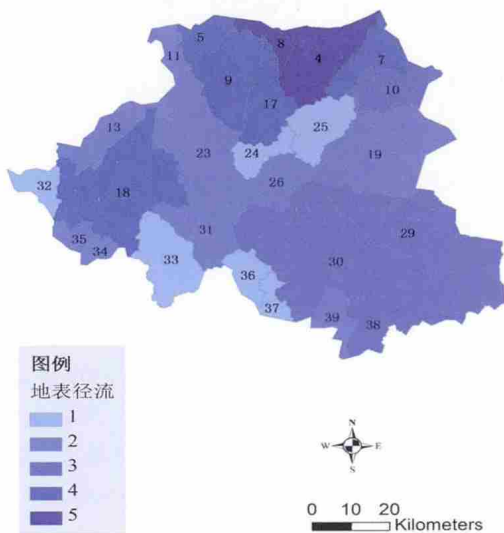


图6 研究区径流深等级空间分布

Fig.6 The spatial distribution of the runoff depth in Shaoxing city

由图6可以看出,绍兴城市径流呈现了较为显著的空间差异性。其中,靠近下游的位置,径流深流失强度多为中等、严重和很严重等级;借助 ArcGIS 的空间叠加与透视功能,结合图2的土地利用情况进行对比分析后可以得出,在下游,绍兴城镇区域和耕地较发达地区,径流流失相对严重,多为4~5级,即严重和很严重的径流流失区域,而其它地类如林地、草地和水域区域,径流流失强度等级较低(多为1~3级),这反映了人文因素是导致绍兴城市径流流失的重要因素之一。因此,改善人类活动的行为方式,采取退耕还林、加大城市绿化以及人工湿地等低影响开发举措,可在较大程度上减小城市地表径流的流失。

3 结论

本研究将 SWAT 模型引入到了绍兴城市径流模

拟定量研究中,借助其空间优势将绍兴城市径流问题置于适合的流域下,克服了以往研究中对较大尺度城市径流量方法的难题,得出以下结论:

(1)运用 LH-OAT 参数敏感性分析方法,得出了敏感性序列,并通过调整灵敏度等级高的参数(CN_2 、 Gwqmn 、 rchrg_dp 、 ESCO 和 sol_z),对 SWAT 模型进行了校准与验证,获得了适宜绍兴城市径流的 SWAT 模型。

(2)研究区 SWAT 模型径流时间尺度的输出结果表明,绍兴城市径流年际和年内的分布极不均衡。1992~2011 的20年间,年际变化显示,极端丰水年(2002年)的年径流量($794.6 \times 10^7 \text{m}^3$)约为极端枯水年(2004年, $272.3 \times 10^7 \text{m}^3$)的3倍;年内变化显示,汛期地表径流量约占全年的2/3,且最丰月(6月)量为最枯月(12月)量的近13倍。

(3)空间尺度的输出结果显示,在城镇和耕地等人类活动相对频繁的区域,径流深流失相对严重,多为4~5级,而林地、草地等其他地类区域,径流流失强度较低,反映了人类活动是影响城市径流的重要因素,为后续绍兴城市水资源的保护与控制措施的研究提供了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 149: 65-76.
- [2] JIA Haifeng, YAO Hairong, Shaw L. Yu. Advances in LID BMPs research and practice for urban runoff control in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 709-720.
- [3] JIA Haifeng, LU Yuwen, Shaw L. Yu, et al. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing olympic village[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 112-119.
- [4] 张建业, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [5] 权全, 罗钊, 沈冰, 等. 城市化土地利用对降雨径流的影响与调控[J]. 水土保持学报, 2013, (1): 46-50. (QUAN Quan, LUO Wan, SHEN Bing, et al. Rainfall-runoff reduction measures by land use patterns of Xi'an [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, (1): 46-50. (in Chinese))
- [6] S. Oraei Zare, B. Saghafian, A. Shamsai. Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16: 4531-4542.

- [7] Mariano Hernandez, Scott N. Miller, David C. Goodrich, et al. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 64(1): 285–298.
- [8] 肖海文. 城市径流特征与人工湿地处理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (XIAO Haiwen. Research on Characteristics of Urban Runoff and Artificial Wetland Treatment Technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [9] Céline Conan, Ghislain de Marsily, Faycal Bouraoui, et al. A long-term hydrological modelling of the upper Guadiana river basin (Spain) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 193–200.
- [10] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 833–836. (CHEN Junfeng, LI Xiubin. Simulation of hydrological response to land-cover changes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 833–836. (in Chinese))
- [11] 张佳, 霍艾迪, 张骏. 基于 SWAT 模型的长江源区巴塘河流域径流模拟[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(5): 18–22, 27. (ZHANG Jia, HUO Aidi, ZHANG Jun. Simulation of runoff in Batang river basin in the source area of Yangtze river using SWAT [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(5): 18–22, 27. (in Chinese))
- [12] 肖军仓, 周文斌, 罗定贵, 等. 非点源污染模型——SWAT 用户应用指南 [M]. 北京: 地质出版社, 2009. (XIAO Juncang, ZHOU Wenbin, LUO Dinggui, et al. Non-point Source Pollution Model: Application Handbool for SWAT Users [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [13] Max D. Morris. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161–174.

Study on Temporal-spatial Changes of Urban Runoff in Shaoxing City

CHEN Chengguang¹, LI Jingjing², TENG Kailing², XU Lihong²

(1. *Department of Architectural Engineering, Shaoxing University Yuanpei College, Shaoxing 312000, China;*

2. *Shaoxing Environmental Monitoring Center, Shaoxing 312000, China*)

Abstract: To solve the quantitative problem of urban runoff at large scale, a distributed watershed hydrological model named soil and water assessment tool (SWAT) was employed to quantitatively simulate the urban runoff and analyze the temporal-spatial changes in Shaoxing City. The SWAT model was established by putting the Shaoxing City in a suitable scale watershed based on DEM analysis. And then the SWAT model was calibrated and validated using monitoring data from hydrological stations based on the parameter sensitivity analysis. The results show that the calibrated SWAT model perform well on modeling the annual and monthly runoff in both calibration and validation periods with an average relative error (from -5.29% to 8.81%), coefficient of determination (from 0.91 to 0.96) and coefficient of efficiency (from 0.90 to 0.94). Meanwhile, monthly runoff data from 1992 to 2011 at sub-watershed scale were obtained using the calibrated model. Besides, temporal-spatial changes of urban runoff was quantitatively analyzed and the critical source areas (CSAs) was finally gained by means of geo-statistic method (GSM), which will provide the scientific basis for water resources protection and utilization.

Key words: SWAT model; urban runoff; calibration and validation; temporal-spatial change

=====

(上接第 76 页)

Application of A High Flow Velocity Measuring Device for Small Rivers

LIU Zhengwei

(*Kunming Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650051, China*)

Abstract: In the flow hydrometry for small rivers or channels, if flow velocity is high, it is inconvenient to use manual bridge measurement or scoopfish ADCP. In order to solve this problem, we developed a flow measuring device composed of orbital base lifting, driving, brake set, hanging rod part, counter and suspension rod holder. The device using suspension rods equipped with flow meter, can horizontally and vertically move, so as to accurately reach the section to be monitored. This device has been used to the end of the Niulanjiang-Dianchi Water-Delivery Project for 2 years. The result shwo that the device operation is stable and reliable when the high flow velocity is 3–5m/s.

Key words: discharge; hydrometry; high-velocity; small river; development; application