

DEM 空间分辨率对流域 水文特征信息提取及径流模拟影响研究

孙 龙^{1,2}, 臧文斌³, 黄诗峰³

(1. 水利部水文局, 北京 100053; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: DEM 是构建分布式水文模型的重要输入。以岷江上游为研究区, 基于 8 种不同空间分辨率 DEM 构建 SWAT 模型, 研究分析 DEM 空间分辨率对流域水文特征提取及径流模拟影响。研究表明, DEM 空间分辨率越低, 洪峰模拟精度越低, 模拟流量与实测流量间的误差越大, 曲线吻合度越低; DEM 空间分辨率由 25m 降低到 200m 时, 径流模拟误差变化不明显, 而 DEM 空间分辨率由 200m 降低到 3 200m 时模拟误差显著增大; 另外, DEM 空间分辨率与径流总量的模拟精度间未表现出显著相关性。

关键词: DEM; SWAT 模型; 流域水文特征信息; 径流模拟

中图分类号: P338

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)06-0021-05

近年来, 分布式水文模型发展迅猛, 但也面临许多问题。Beven^[1]曾将其归纳为: 非线性问题、尺度问题、唯一性问题、等效性问题和不确定性问题 5 个方面。其中, 水文尺度问题是备受水文界关注的焦点问题, 同时也是当今水文科学研究的前沿课题之一^[2]。一般来讲, 尺度问题是指不同尺度信息转换或传递中遇到的问题。分布式水文模型的尺度问题包括空间尺度和时间尺度, 其中空间尺度是指水文过程、水文观测和水文模型中的信息长度。分布式水文模型空间尺度研究主要集中在土地利用/土壤覆被、土壤、数字高程模型 (DEM)、降水等数据和水文模型参数的空间尺度转换上。近些年, 基于 DEM 数据的流域水文特征信息提取技术已趋成熟, 提取结果被广泛应用于分布式水文模型研究中^[3-4]。DEM 的空间分辨率对坡度、河网、河长、流域边界等参数信息的提取影响显著, 进而影响到流域径流模拟。理论上讲, 由于 DEM 数据的精度和分辨率越高, 对下垫面地形的描述越真实, 越能反映下垫面地形空间变异, 模型模拟效果也越好。但是, 现阶段高空间分辨率、高精度的 DEM 数据获取比较困难, 而且

若进行大尺度水文模拟, 选取 DEM 数据的空间分辨率如果过高, 普通计算机的运算能力很难满足模拟运行需求, 会大大降低模型模拟的效率。作为分布式水文模型输入的重要数据, 研究 DEM 空间分辨率对流域水文特征信息提取和径流模拟的影响, 可为构建分布式水文模型进行 DEM 数据选取提供重要参考^[5-7]。鉴此, 本文针对 DEM 空间分辨率变化引起的流域水文特征信息提取和径流模拟影响进行研究。

1 研究区与数据

1.1 研究区

本文以岷江上游为研究区, 主要指岷江河源到紫坪铺水库区域, 其范围与四川省阿坝藏族羌族自治州的汶川县、理县、茂县、黑水和松潘 5 县的行政辖区基本重合。从地理位置而言, 研究区位于四川省西北部, 阿坝自治州东部, 青藏高原东部地区, 东面与北川、安县、绵竹交界, 南接崇庆、大邑, 西连红原、马尔康, 北与南坪、若尔盖县接壤。流域面积约为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地理经纬度范围为: $102^\circ 59' \text{ E} \sim 104^\circ 14' \text{ E}$, $31^\circ 26' \text{ N} \sim 33^\circ 16' \text{ N}$ 。

收稿日期: 2014-07-01

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201001045, 201001078)

作者简介: 孙龙 (1982-), 男, 黑龙江海林人, 工程师, 主要从事水文情报预报研究工作。E-mail: sunlongmwr@163.com

1.2 数据

研究收集了 17 个雨量站 1977~1980 年逐日降水数据,5 个气象站 1977~2008 年逐日气候数据 (降水、最高气温、最低气温、平均风速、相对湿度及太阳辐射),胜利坝、镇江关、黑水、沙坝、杂古脑、桑平、郭家坝、渔子溪 8 个水文站点 1977~1980 年逐日径流数据,测站位置见图 1 所示。研究收集到 ASTER 网站



图 1 水文站网
Fig.1 The hydrological network

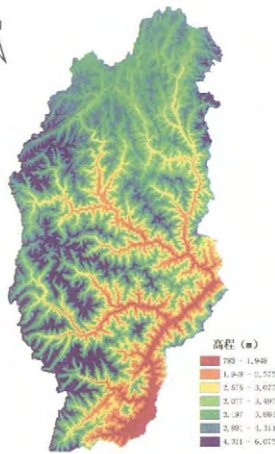


图 2 DEM 数据
Fig.2 Digital elevation model

(<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>) 提供的空间分辨率约为 30m 的 DEM 数据 (图 2),水利部水文局提供的 1:25 万水系数据 (图 1),中国西部环境与生态科学数据中心提供的 2000 年 1:10 万土地利用类型数据 (图 3)和 1:100 万土壤类型数据 (图 4)。所有空间数据均采用统一投影坐标——以 WGS1984 椭球系统为基础的 UTM_Zone_48N 投影坐标系统。



图 3 土地利用数据
Fig.3 The land use data

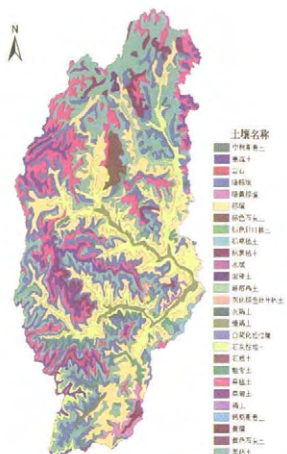


图 4 土壤数据
Fig.4 The soil data

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型是 20 世纪 90 年代由美国农业部农业研究局 (USDA—ARS) 开发的一个基于流域尺度、可长时段模拟的分布式流域水文模型。模型具有很强的物理基础,适用于具有不同土壤类型、不同土地利用方式和管理条件下的复杂大流域,并能在资料缺乏的地区建模;集水量和水质、大尺度和连续时间模拟的流域水文和非点源污染模拟模型于一体,能预测不同土壤类型、土地利用/覆被变化等条件下土地管理措施对大尺度复杂流域径流、泥沙、水质和农业的影响。许多学者^[8-10]认为 SWAT 模型模拟精度较好,是目前国际上较为成熟的水文模型之一,也是应用最为广泛的分布式水文模型之一。

2.2 研究思路

SWAT 模型作为一个具有很强物理机制的长时段的流域分布式水文模型,可以进行不同的地形条件、土地利用/植被覆盖类型、土壤条件、气候条件等因素下的水文过程模拟。SWAT 模型集成了 TOPAZ 软件包 (Topographic Parameterization),利用 TOPAZ 工具可对

研究区 DEM 进行水系、坡度、流域范围等水文要素特征信息的提取及子流域划分,模型基于构建的地形基础进行径流模拟。本文以 Arc Hydro Tools 为辅助,利用 TOPAZ 模块 (Topographic Parameterization) 模型展开不同 DEM 空间分辨率的流域水文特征信息提取影响研究。SWAT 模型提供了多种地表产流、河网汇流、蒸发模拟方式及数据插值算法,被广泛的应用到众多的分布式水文模型研究中,且研究结果具有很强的推广性。鉴此,本文借助 SWAT 模型开展 DEM 空间分辨率对径流模拟影响研究。

针对 8 种不同空间分辨率的 DEM 数据,分别构建月尺度的 SWAT 模型。借助构建的水文模拟评估标准,研究 DEM 的空间分辨率对 SWAT 模型的流域水文特征信息提取与径流模拟影响。

2.3 数据处理方法

本文采用 NEAREST (Nearest Neighbor Assignment) 方法对空间分辨率约为 30 m 的 ASTER DEM 数据进行重采样。为便于研究不同网格大小 DEM 对流域水文特征信息提取及径流模拟的影响,研究采用 25×2^n 指数方式进行重采样, $n=0,1,\dots,7$,重采样获取空间分辨率分别为 25m、50m、100m、200m、400m、

800m、1 600m、3 200m 的数据。

2.4 水文模拟评估标准

评估水文模型模拟效果好坏的指标较多,本文在分析比较的基础上,选用径流过程线、相对误差(D_r)、Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})及确定性系数(R^2)来评估模型模拟效果。径流过程线、相对误差(D_r)常用于评估模拟整体的水量偏差;Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})和确定性系数(R^2)对峰值流量较敏感,常用来评估洪峰模拟的效果。本文构建水文模拟结果评估标准,见表 1 所示。

表1 水文模拟结果评估标准表
Table1 The evaluation criteria for hydrological simulation

效果 指标	较好	令人满意	较差
D_r	$ D_r \leq 10\%$	$10\% < D_r \leq 20\%$	$ D_r > 20\%$
E_{NS}	$E_{NS} > 0.75$	$0.50 \leq E_{NS} \leq 0.75$	$E_{NS} < 0.50$
R^2	$R^2 \geq 0.85$	$0.85 > R^2 \geq 0.50$	$R^2 < 0.50$

3 SWAT 模型构建及率定

3.1 SWAT 模型构建

利用 1977~2008 年 5 个气象站数据构建气象发生器,以 17 个雨量站和 5 个气象站的 1977~1980 年降雨输入作为模型降水输入,以收集的 30mDEM 数据、土地利用类型数据、土壤类型数据作为模型的下垫面输入。SWAT 模型输入数据除 DEM 外均相同,设置河网提取的集水区面积阈值为 100km^2 ;HRU 划分方式选取多种 HRU (Multiple HRUs);设置模拟的土地利用类型、土壤类型、坡度类型面积最小阈值比均定为 10%;模型模拟时降水数据空间插值展布采用 Skewed Normal 方法;蒸发模型选用 Penman/Monteith;产流模型选用 SCS 模型;汇流模型选用马斯京根法。

表3 不同空间分辨率DEM下流域水文特征信息提取汇总表
Table3 The hydrological characteristics in different spatial resolution DEMs

DEM 空间分辨率/m	最低高程/m	最高高程/m	平均高程/m	河网总长/km	河网密度/ km.km^{-2}	子流域数目	流域面积/ km^2
25	743	5976	3446	1678	0.074	107	22573
50	753	5952	3446	1672	0.074	107	22576
100	756	5965	3446	1675	0.074	107	22565
200	762	5754	3446	1663	0.074	107	22566
400	780	5637	3446	1639	0.073	107	22557
800	805	5447	3443	1624	0.072	106	22540
1600	860	5313	3445	1570	0.070	101	22321
3200	998	4983	3442	1498	0.068	85	21903

说明:①最低高程:研究区 DEM 最低值的网格处高程;②最高高程:研究区 DEM 最高值的网格处高程;③平均高程:研究区所有网格的平均高程;④河网总长:基于 DEM 数据提取的流域内河网长度;⑤河网密度:单位流域面积上的河流总长度,反映流域水系分布的密度;⑥子流域数目:基于 DEM 数据进行流域划分生成的子流域个数;⑦流域面积:以同一流域出口提取的整个岷江上游面积。

3.2 SWAT 模型率定

模拟以 1977 年为模型模拟预热期,1978~1979 年为模型率定期,1980 年为验证期。研究对影响径流模拟的模型参数敏感性进行分析,最后利用 SCE(Shuffled Complex Evolution)-UA 优化算法对影响水文模拟敏感性较高的 $Cn2$ 、 $Canmx$ 、 $Gwqmn$ 、 $Alpha_Bf$ 、 $Revapmn$ 、 $Esco$ 6 个参数进行模型的率定。镇江关、黑水、沙坝、胜利坝 4 个代表性水文测站月尺度率定期及验证期模拟结果见表 2。由表 2 可知,月尺度的模拟除镇江关水文站验证期外,其他 E_{NS} 均大于 0.75,4 个水文站率定期和模拟期 R^2 指标全在 0.85 以上, $|D_r|$ 都小于 20%,月尺度的径流模拟效果非常好,SWAT 模型适用于以岷江上游为代表的高山峡谷地区的月尺度水文模拟。

表2 月径流模拟精度汇总表
Table2 The simulation accuracy of monthly runoff

模拟情景	E_{NS}	R^2	$D_r/\%$	
镇江关	率定期	0.78	0.92	4.70
	验证期	0.60	0.94	16.96
胜利坝	率定期	0.77	0.88	5.28
	验证期	0.94	0.96	-7.27
黑水	率定期	0.89	0.91	-0.10
	验证期	0.90	0.93	-0.72
沙坝	率定期	0.87	0.88	-3.79
	验证期	0.91	0.95	-15.06

4 DEM 空间分辨率对流域水文特征信息提取及径流模拟影响分析

4.1 DEM 空间分辨率对流域水文特征信息提取影响研究

研究以 Arc Hydro Tools 工具为辅助,借助 Arc-SWAT 模型软件的 TOPAZ 工具,对 8 种不同空间分辨率的 DEM 进行流域特征信息提取,结果见表 3 所示。

由表 3 可知, ①8 种不同分辨率的 DEM 数据, 研究区平均高程变化很小, 但随着 DEM 空间分辨率的降低, 最低高程逐渐增加, 最高高程逐渐降低, 高程范围缩小, 地形趋于平坦; ②不同分辨率的 DEM 流域特征信息的提取对模拟河流总长的影响较大, 随着 DEM 空间分辨率的降低, 提取的河网总长不断减少, 且河网密度越来越低, 当空间分辨率大于 100m 后变化较显著; ③随着 DEM 空间分辨率降低, 提取的流域面积和子流域数目有均呈现逐渐减少趋势。

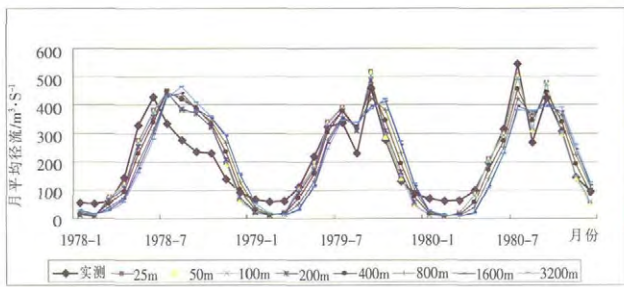


图 5 胜利坝站 8 种空间分辨率 DEM 的模拟径流与实测径流对照图
Fig.5 Comparison of the simulated and measured runoff of the Shengliba station using 8 different spatial resolution DEMs

4.2 DEM 空间分辨率对径流模拟影响研究

在进行参数率定后的 SWAT 模型基础上, 针对 25m、50m、100m、200m、400m、800m、1 600m、3 200m 共 8 种空间分辨率 DEM 数据分别构建了月尺度岷江上游 SWAT 模型进行径流模拟。位于流域出口前岷江干流上的胜利坝水文站 8 种空间分辨率 DEM 模拟径流与实测径流曲线见图 5 所示。选取镇江关、黑水、沙坝、胜利坝 4 个水文测站径流进行模拟精度评价, 借助 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 、确定性系数 R^2 、相对误差 D_v 指标评估模型模拟效果, 评估结果如图 6、7 所示。

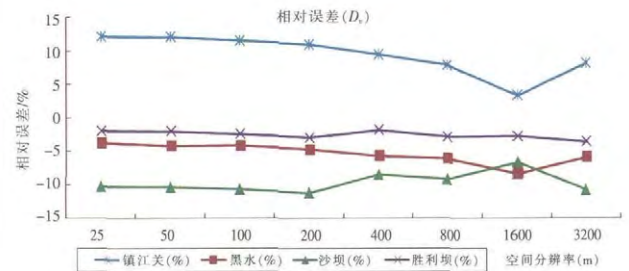


图 7 不同空间分辨率 DEM 径流总量模拟的 D_v 趋势图
Fig.7 D_v trend of the simulated total runoff using different spatial resolution DEMs

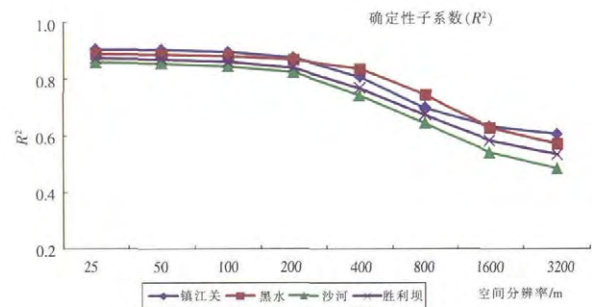
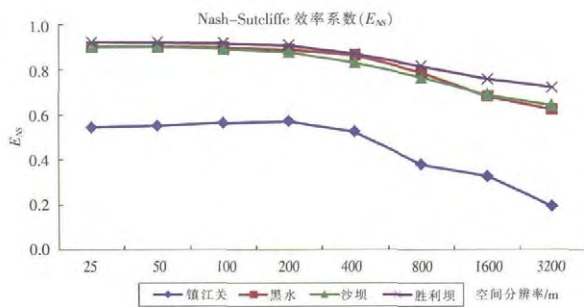


图 6 不同空间分辨率 DEM 径流模拟的 E_{NS} 、 R^2 趋势图
Fig.6 E_{NS} and R^2 trend of the simulated runoff using different spatial resolution DEMs

4.2.1 模拟效率评价

E_{NS} 和 R^2 指标对洪水峰值流量较敏感, 数值的大小反映径流过程吻合程度。从图 6 中可得出: 随 DEM 的空间分辨率降低, 镇江关、黑水、沙坝、胜利坝 4 个站点模拟径流的 E_{NS} 、 R^2 指标均呈现明显降低趋势; 当空间分辨率为 25m、50m、100m、200m 时, 模拟径流的 E_{NS} 、 R^2 指标变化不大; 当空间分辨率为 200m、400m、800m、1 600m、3 200m 时, 模拟径流的 E_{NS} 、 R^2 指标随 DEM 空间分辨率变化很大。分析显示, DEM 空间分辨率越低, 洪峰模拟精度越低, 模拟径流与实测径流的误差越大, 曲线吻合度越低, 且变化越来越

显著。

4.2.2 模拟总量评价

D_v 指标描述模拟径流总量与实测径流总量的误差指标。正值表示模拟值较实测值偏高, 负值偏低, 越接近零, 表明模拟效果越好。由图 7 可知, 镇江关站和黑水站随 DEM 空间分辨率的降低, 模拟径流先是明显减少后又增加, 沙坝站、胜利坝站径流随 DEM 空间分辨率变化不明显。分析显示, DEM 的空间分辨率变化对径流总量的模拟未表现出显著的相关性, 径流模拟总量仅在一定程度上变化, 且径流总量模拟的 D_v 值同正或同负。

5 结论与讨论

本文构建了岷江上游 SWAT 模型,对其应用适用性展开了分析,并基于构建的 SWAT 模型展开了 DEM 空间分辨率变化对流域水文特征信息及径流模拟的影响研究。研究表明:

(1) 岷江上游 SWAT 模型的月尺度径流模拟效果较好,可适用于以岷江上游为代表的高山峡谷地区的月尺度水文模拟。

(2) 不同空间分辨率 DEM 的平均高程变化基本不变,但随着空间分辨率降低,最低高程逐渐增加,最高高程逐渐降低,高程范围缩小,地形越趋于平坦。DEM 空间分辨率对河流总长的影响较大,随着 DEM 空间分辨率降低,提取河网总长不断减少,河网密度也越来越低。随 DEM 空间分辨率降低,设置同一阈值时提取的流域面积和子流域数目均呈现逐渐减少趋势。

(3) DEM 空间分辨率越低,洪峰模拟精度越低,模拟径流与实测径流的误差越大,且变化越来越显著。径流总量模拟的 D_v 值变化不明显,径流模拟总量仅在一定程度上变化,且同正或同负。对于中尺度流域水文模拟,DEM 空间分辨率小于 200m,DEM 数据对径流模拟带来的误差较小。考虑到模拟的精度和效率,建议选用 100~200m 空间分辨率的 DEM 数据进行中尺度流域水文模拟建模。

分布式水文模型空间尺度研究主要集中在土地利用/土壤覆被、土壤、DEM、降水等数据和水文模型参数的空间尺度转换上,本文仅对 DEM 数据空间分辨率对流域水文特征信息提取及径流模拟影响进行研究,其他数据的尺度效应亦是分布式水文模型空间尺度问题的研究方向,也是作者今后努力方向。

参考文献:

[1] Beven K. How far can we go in distributed hydrological modeling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001,5(1):1-12.

- [2] Vijay K. Guttered Waymire. Multiscaling properties of special rainfall and river flow distribution [J]. 1990,95(3):1999-2009.
- [3] 刘昌明,李道峰,田英,等.基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5):437-445. (LIU Changming, LI Daofeng, TIAN Ying, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed [J]. *Progress in Geography*, 2003,22(5):437-445. (in Chinese))
- [4] 郭生练,熊立华,杨井,等.基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. *武汉水利电力大学学报*, 2000,33(6):1-5. (GUO Shenglian, XIONG Lihua, YANG Jin, et al. A DEM and physically based distributed hydrological model [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2000,33(6):1-5. (in Chinese))
- [5] 贾仰文,王浩,倪广恒,等.分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005. (JIANG Yangming, WANG Hao, NI Gangheng, et al. *Theory and Practice of Distributed Watershed Hydrological Model* [M]. Beijing: China WaterPower Press,2005. (in Chinese))
- [6] 王光谦,刘家宏.数字流域模型[M]. 北京:科学出版社,2006:78-80. (WANG Guangqian, LIU Jiahong. *Digital Watershed Model* [M]. Beijing: Science Press,2006:78-80. (in Chinese))
- [7] 舒栋才.基于 DEM 的山地森林流域分布式水文模型研究[D]. 成都:四川大学,2005. (SHU Dongcai. *Study of Mountainous Forest Watershed Distributed Hydrological Model Based on DEM* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese))
- [8] 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. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin [J]. *Progress in Geography*, 2003,22(1):79-86. (in Chinese))
- [9] 梁梨丽,汪献麒,王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2007,5 (2):125-131. (LIANG Lili, WANG Dangxian, WANG Fang. Discussion on SWAT model and its application [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2007,5(2):125-131. (in Chinese))
- [10] 庞靖鹏.非点源污染分布式模拟——以密云水库水源地保护为例 [D]. 北京:北京师范大学,2007. (PANG Jingpeng. *Distributed Simulation of Non-point Source Pollution---A Case Study of Water Source Protection of Miyun Reservoir* [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007. (in Chinese))

Impact of DEM Spatial Resolution on Hydrological Characteristics Information Extraction and Runoff Simulation

SUN Long^{1,2}, ZANG Wenbin³, HUANG Shifeng³

(1. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 2. College of Water Resources and Hydrology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Digital Elevation Model (DEM) is an important parameter to build a distributed hydrological model. In this paper, A SWAT hydrological model for the upstream of the Minjiang River was constructed, and the impact of spatial resolution of DEM on hydrological characteristics extraction and runoff simulation was analyzed. The results show that the lower DEM spatial resolution will lead to lower peak flow simulation accuracy, bigger error between simulated and measured flow. When spatial resolution of DEM decreases from 25m to 200m, the accuracy of simulation will decline a little, and when spatial resolution decreases from 200m to 3200m, the accuracy of simulation will decline significantly. In addition, the impact of DEM spatial resolution on runoff of simulation is not significant.

Key words: DEM; SWAT model; hydrological characteristics information; runoff simulation