

# 不同地形复杂度下的水文尺度效应研究<sup>\*</sup>

徐 静<sup>1</sup>, 任立良<sup>2</sup>, 阮晓红<sup>1</sup>

(1. 南京大学 地球科学与工程学院水科学系, 南京 210093; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘 要:** 分布式水文模型都建立在基于 DEM 的地形分析基础上, 因而 DEM 分辨率对径流模拟的影响十分显著。以资水流域的新宁站集水区为研究对象, 计算了该区域地形复杂度指数空间分布, 分析了降雨和地形空间变化的相互作用对不同 DEM 分辨率下水文模拟的影响。结果表明, DEM 分辨率对流量过程的影响取决于暴雨中心所在区域的地形复杂程度。当暴雨中心所在的区域地形变化剧烈, 复杂程度较高时, 此时 DEM 空间分辨率对径流模拟的影响十分明显, 不同 DEM 分辨率下的洪水过程模拟精度差异显著; 若暴雨中心所在的区域地形变化一致或比较平坦时, 此时径流模拟精度对 DEM 分辨率的变化不敏感。以上结论对于进一步解决水文过程中的尺度问题提供了理论分析基础。

**关键词:** 地形复杂度; TOPMODEL; 水文尺度; DEM 分辨率

**中图分类号:** P333.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2010)01-0035-05

## Hydrologic Responses to Spatial Scale in the Area with Different Terrain Complexity

XU Jing<sup>1</sup>, REN Li-liang<sup>2</sup>, RUAN Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. Department of Hydrosiences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Because the distributed hydrologic models are always developed based on terrain analysis of DEM, the effect of DEM resolution is remarkable on runoff simulation. The contributing area controlled by Xinning station of Zishui watershed is selected for study. The terrain complexity index is computed to describe the complexity and variation of true surface. The influence of the interplay of the precipitation and terrain distribution variation on runoff simulation with different DEM resolution is examined. The results show that the effect of DEM resolution is limited by the terrain complexity of the storm centre. The effect of the DEM resolution on runoff simulation is obvious when the terrain of the storm centre is complex and varied remarkably, vice versa. These conclusions are useful for the further research of the hydrologic scale issue.

**Key words:** terrain complexity; TOPMODEL; scale; DEM resolution

径流是降雨和下垫面相互作用的结果。降雨是径流的来源, 它的空间分布会直接影响径流的产生。DEM 空间分辨率发生变化会改变 DEM 数据对流域地形的描述, 主要表现在山峰被削平, 洼地被填平提升, 高程离散度减小, 整个地形趋于平缓。利用 DEM 提取地形参数和水文特征是建立分布式水文模型的基础, 流域的水文模拟精度依赖于输入数据

对流域特征描述的准确性。已有学者研究了 DEM 空间分辨率对径流模拟的影响, 如 Baxter 对 DEM 分辨率的研究表明低分辨率 DEM 能导致坡度坦化, 洪峰量削弱, 洪峰时间滞后, 且模型响应不敏感<sup>[1]</sup>。魏林宏认为 DEM 分辨率的变化使得径流坡度、水流路径和水文模拟单元发生变化, 从而影响径流的产生以及水流在河网中的运动<sup>[2]</sup>; 张雪松采用

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-07-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (项目编号 2009ZX07210-004-04)

作者简介: 徐静 (1981-), 女, 湖南益阳人, 讲师, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: xujing@nju.edu.cn

SCS 模型对不同 DEM 分辨率下的水文过程进行模拟,发现低分辨率 DEM 较高分辨率 DEM 下的径流量小<sup>[3]</sup>;徐静<sup>[4]</sup>基于 TOPMODEL 研究了不同 DEM 空间分辨率下的水文响应,表明低分辨 DEM 下的洪峰和洪量都偏大。以上这些研究都只是单一地揭露了 DEM 空间分辨率变化对径流模拟的影响,但是这种影响往往还会受制于降雨的空间分布以及 DEM 所表达地区的地形复杂度。本节计算了研究区域的地形复杂度指数,深入分析了它和降雨空间分布的相互作用对不同 DEM 分辨率下 TOPMODEL 径流模拟的影响,为精确确定水文模拟所适宜的 DEM 分辨率提供了理论分析基础。

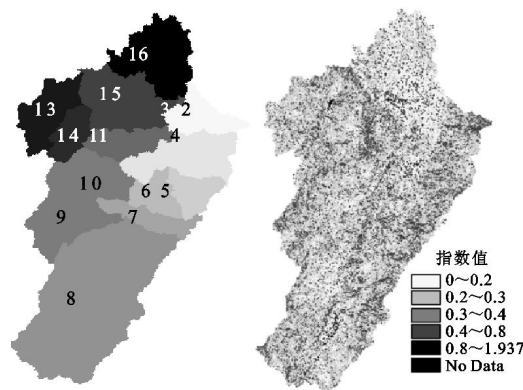
## 1 地形复杂度指数计算

陆地的表面可以看成是无数坡的集合面<sup>[5]</sup>。研究地面形态的变化,首先要分析地表面在哪些部位发生了变化。对于单一坡度的坡面,在其坡面内,地面形态没有发生变化。只有当从一个坡面转移到相邻坡面上的时候,地面的形态才发生了变化。对于相邻 2 个坡面交界的地方,可以利用相邻 2 个坡面的空间二面角来代表地面形态的变化。两相邻空间坡面的夹角为锐角,说明在 2 个空间坡面间地面形态发生了较为显著的变化;两相邻空间平面的夹角为钝角,说明 2 个空间坡面间的变化较小。

根据栅格 DEM 的特点,设计一个 3 行 × 3 列的空间窗口,以中心栅格为坐标原点,按右手系建立一个空间直角坐标系,那么中心栅格与它的 8 个邻域栅格就在这一坐标系中构成了 8 个空间平面,计算每 2 个相邻的空间平面的夹角  $\theta_i$ ,然后求这 8 个二面角的加和  $\sum \theta_i$ ,作为中心栅格的值,用它来反映坡面的转折变化<sup>[6]</sup>。空间二面角为锐角时意味着地表形态变化显著,但弧度值较小;钝角的情况表示地面变化缓和,但角度值较大。为了能够使变化较大的情况得到较大的量值来反映,在计算两相邻空间平面的夹角时作如下规定:对所有计算出的角度  $\theta_i$  取它们的补角  $\theta_i^*$ ,然后再求这些补角的和  $\sum \theta_i^*$  (角度使用弧度值表示),并将该数值定义为地形复杂度指数。地形复杂度能够综合反映 DEM 所能描述的地面变化特征。该指数通过研究一个 3 × 3 栅格窗口内,中心栅格与其 8 个邻域栅格之间所构成的空间平面关系,直接度量地面形态特征与变化。

选取新宁站集水区 1 620 行 × 1 620 列的 100 m 分辨率 DEM 数据作为样区进行计算。该流域东西两边高山林立,中间的地势相对平坦。从计算获得的地形复杂度指数空间分布来看,流域的东、西部,地形由陡峭的山区变化到平坦的平原,坡面发生

显著的转折,地形复杂度指数的值较大;流域的源头区和出口断面处,由于地势平坦,坡面相对均一,所得到的地形复杂度指数值较小。由结果分析可知,地形复杂度指数有效地综合了坡度变率、坡向变率、地面曲率等多项地面起伏变化特征,能有效反映地面起伏的局部变化,只要坡面发生变化,无论是在哪一个方向,计算结果都得以体现。



(a) 子流域划分

(b) 地形复杂度指数分布图

图 1 新宁站集水区子流域划分、地形复杂度指数分布图

## 2 不同 DEM 分辨率下的径流模拟

### 2.1 基于数字流域平台的 TOPMODEL 构建

TOPMODEL 是 Beven 和 Kirkby 于 1979 年提出的基于物理过程的半分布式流域水文模型。该模型遵循山坡水文学基本原理,以地形的空间变化为主要结构,用地形信息(以地形指数  $\ln(1/\tan \alpha)$  或土壤-地形指数  $\ln(1/(T_0 \tan \alpha))$  形式)描述水流趋势和由于重力排水作用径流沿坡向的运动,模拟了径流产生的变动产流面积,在水文领域中获得了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>。

仍以新宁站集水区为研究区域,采用如前所述的 100 m 分辨率的 DEM 数据,利用 DEDNM 提取水文模拟所需的地形参数和流域特征,构建数字流域平台,子流域划分及其空间拓扑关系如图 1(a)所示。基于数字流域平台,利用 TOPMODEL 进行产汇流计算,获得流域出口断面的流量过程。

### 2.2 径流模拟结果

DEM 分辨率对地形因子的影响较显著,栅格尺寸增大,会使得坡度减小,地形指数增大,这些变化会给水文过程模拟带来很大影响。基于不同的间距由原始 100 m DEM 抽样生成 900 m 和 1 800 m 分辨率 DEM 数据。在各自的数字流域平台上,输入相应地形参数以及降水蒸发资料,运行率定好的 TOPMODEL (参数均基于 100 m 的 DEM 数据率定获得)对 18 场次洪进行模拟,各场洪水不同 DEM 分辨率下的模拟精度如表 1 所示。

表 1 原始 100 m、900 m 和 1 800 mDEM 下的洪水过程模拟结果比较

次洪编号	洪峰流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	确定性系数			洪峰流量相对误差/ %		
		原始 100 m	900 m	1800 m	原始 100 m	900 m	1800 m
800504	941	0.910	0.795	0.612	1.6	11.8	16.0
800612	386	0.944	0.864	0.565	0	12.5	38.1
810523	355	0.901	0.804	0.591	- 0.1	5.7	23.3
810622	1480	0.948	0.900	0.870	0	11.1	13.5
820509	226	0.808	0.758	0.701	- 0.2	17.4	24.6
820531	278	0.936	0.850	0.699	0.3	11.3	26.0
820608	763	0.878	0.814	0.683	- 0.3	5.8	10.7
820910	284	0.750	0.456	0.271	- 1.1	38.2	52.0
830502	2050	0.932	0.913	0.867	- 0.1	2.7	8.4
830511	341	0.954	0.861	0.647	- 0.1	16.5	29.1
840416	610	0.936	0.907	0.717	0	3.3	23.5
840511	1740	0.872	0.861	0.727	0	1.0	4.6
840610	652	0.968	0.957	0.827	0	4.5	27.4
840721	234	0.954	0.940	0.860	- 0.1	3.9	14.1
850409	201	0.681	0.616	0.611	1	3.4	23.3
850428	235	0.905	0.874	0.884	0.7	19.6	21.7
850523	2050	0.941	0.935	0.920	- 7.3	- 4.2	- 3.5
850610	666	0.894	0.859	0.822	0	2.5	5.8

比较三种数据下的洪水模拟结果可知(表 1), 原始 100 mDEM 下,各场洪水确定性系数均高于 900 m 和 1 800 m 分辨率下的结果,17 场洪水的洪峰相对误差小于基于 900 m 和 1 800 mDEM 得到的结果,仅 850523 次洪水误差大于低分辨率 DEM 下的模拟结果。按照水文模型参数率定的原则,为了杜绝系统误差,常要求模拟洪水的径流深及洪峰流量偏多和偏少的情况都存在,因而使用 100 mDEM 数据率定参数时,不可避免地使得某些洪水的径流深和洪峰流量偏低,大量的研究表明,基于低分辨率 DEM 计算得到的地形指数一致偏大,在这样的情况下,运用 100 mDEM 下率定好的 TOPMODEL,采用低分辨率下的地形参数输入,进行水文模拟,将会使得径流深和洪峰流量在一定程度上有所增加,因而原本径流深和洪峰流量偏低的洪水在低分辨率 DEM 下误差反而较小。

图 2 展示了不同 DEM 分辨率下的模拟洪水过程线。总体上,低分辨率下得到的洪水过程线与高分辨率下的相比,精度较差。如表 1 中 800612 次洪水,其洪峰流量误差在 1 800 m 分辨率下高达 38.1%,900 m 分辨率下洪峰流量误差为 12.5%,而在 100 m 分辨率下洪峰流量误差降为 0。随着 DEM 分辨率变低,地形指数会相应变大。地形指数值越大,通常表明该点坡面较平缓,坡形辐合,汇水面积较大,但是土壤水力传导性较差,因而土壤容易被蓄满产生径流。使用粗糙的 DEM 来表征地形信息,并将其作为 TOPMODEL 的输入进行径流模

拟,将会导致径流深显著增加,洪峰流量偏大,洪水过程线的确定性系数降低。

3 地形复杂度对径流模拟的影响分析

表 1 和图 2 显示 DEM 空间分辨率对不同场次的洪水过程影响程度不一,可概括为 4 种情况:(1)100 m、900 m和 1 800 mDEM 下的洪水过程之间差异显著,如图 2a 所示;(2)后两者之间的差异很小,与前者有较大差异(图 2b);(3)前两者之间差异很小,与后者相差较大(图 2c);(4)三者差异都很小(图 2d)。这是由于 DEM 空间分辨率对水文过程的模拟除了与 DEM 分辨率有关以外,还受制于地形复杂度和降雨的空间分布。

DEM 是地形曲面的微分模拟,地形参数和流域特征提取的精度取决于它对真实地面描述的准确程度。理论上,DEM 分辨率越高,意味着地面布设越多的高程采样点,地形模拟的精度越高。而在实际中陆地地形千变万化,形成的景观各异,采用 DEM 表达不同的地形所需的分辨率取决于该区域地形的信息含量。如果区域的高程变化显著,坡面转折剧烈,地形的复杂度高,包含的地形信息丰富,此时需采用较小的格网尺度 DEM 去模拟该地形曲面;如果区域的地形平坦或地形变化一致(如斜坡),采用 100 m 与 1 000 m 分辨率的 DEM 描述该地形,两者所表达的地表差异不大。DEM 分辨率对地形参数提取的影响与 DEM 所表达地区的地形复杂度密切相关。刘学军于 2004 年<sup>[9]</sup>研究了 DEM 结构特征

对坡度坡向的影响,发现地形比较复杂时,不同分辨率的 DEM 有不同的坡度、坡向计算结果。2007 年,刘敏和汤国安等<sup>[10]</sup>以陕西省 671 幅 25 m 分辨率的 DEM 数据为信息源,分析了 DEM 分辨率对提取地

形参数的不确定性影响,研究表明地形的复杂性和变异性越大,地形参数对 DEM 分辨率的变化响应越敏感;地形变化均匀或一致,则 DEM 分辨率对地形参数提取的影响较小。

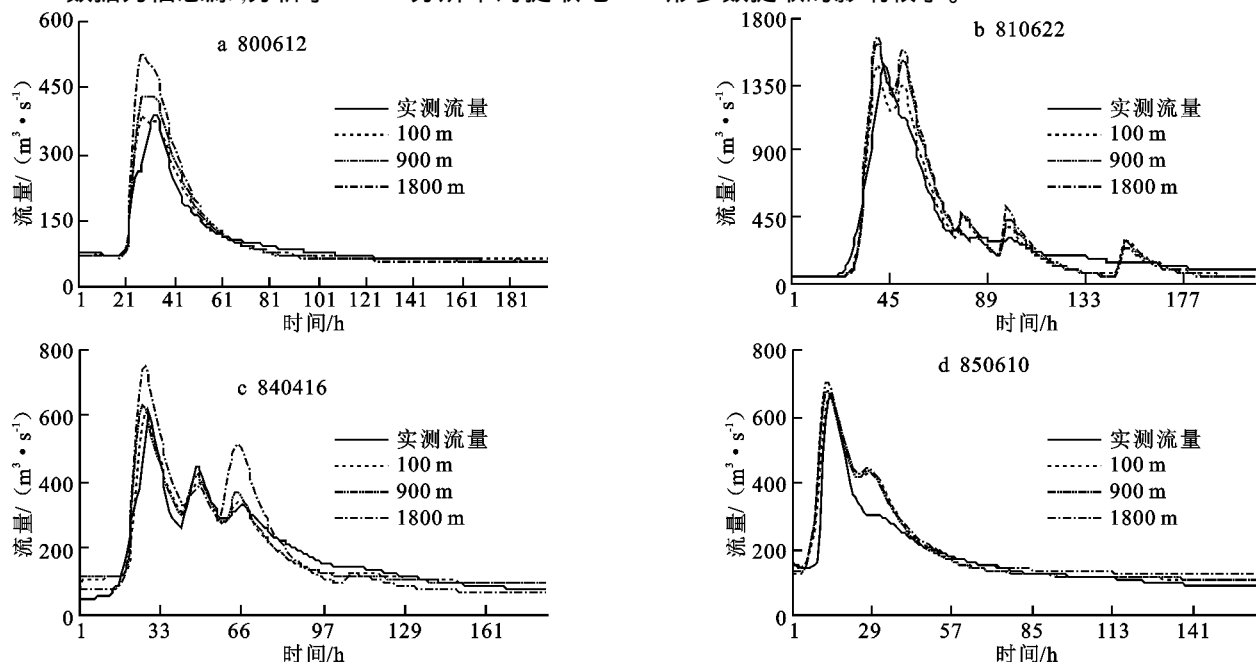


图 2 不同 DEM 分辨率下的洪水过程模拟结果比较

对于研究区域的一场降水,如果暴雨中心发生在地形复杂度较高的子流域上,DEM 分辨率的变化对该子流域地貌形态的描述误差影响较大,地形信息随 DEM 分辨率的降低较大程度损失,DEM 所表达的地形改变明显,计算得到的地形参数差异显著,导致不同 DEM 分辨率下模拟的洪水过程明显不同,如 800612 号洪水,暴雨中心位于 10 号、13 号和 15 号子流域(图 1a,图 3a),三个子流域的平均雨量最大,高达 66.7 mm。它们的平均坡度分别为 0.40、0.37 和 0.40,平均地形复杂度为 0.52、0.54 和 0.55(表 2),这两项指标均表明暴雨中心所处的区域,地形较为复杂,因而由图 2a 可以看出,洪水过程随 DEM 分辨率变化差异显著,与它类似的洪水还包括 810523、820531 和 830511 等 6 场洪水。

如果暴雨中心所在的子流域地形平坦或变化均匀,洪水过程的模拟对 DEM 分辨率的变化就不敏感,如 850610 号洪水(图 2d),由图 1a 和图 3b 可知,该场洪水的暴雨中心位于 8 号子流域,该子流域集中了本次洪水 65% 以上的降水量,而它的平均坡度和平均地形复杂度仅为 0.22 和 0.15(表 2),其地形相对比较平坦,且变化一致,DEM 分辨率对地形参数的提取影响较小,因而不同 DEM 分辨率下模拟的洪水过程相差不大,属于此类的洪水有 830502 号等 4 场。

随着 DEM 分辨率的降低,地形信息含量呈衰

减趋势。该衰减趋势往往会有拐点出现,由文献[11]中可知,整个研究区域的地形信息衰减拐点出现在 600 m 分辨率处。如果暴雨中心发生的局部子流域,其地形信息衰减的转折点小于 900 m,当模拟时采用的 DEM 网格尺寸大于该拐点对应的栅格长度后,此时 DEM 分辨率对地形表达的影响较小,900 m 和 1 800 m 分辨率 DEM 计算得到的地形因子相差不大,此类情形下模拟得到的洪水过程线与 810622 号洪水类似(图 2b),900 m 和 1 800 m 分辨率下的洪水过程差别较小,与 100 m DEM 下的计算结果差异较大,此类洪水有 4 场。

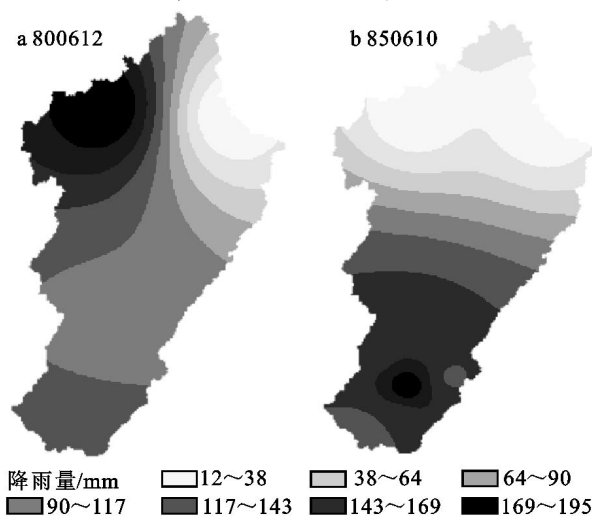


图 3 洪水期的降雨空间展布图

DEM 分辨率要与所表达地区的地形信息量相适应。汤国安等<sup>[12]</sup>研究了栅格分辨率和地形粗糙度对 DEM 所提取的地面平均坡度精度影响,认为对 1:1 万比例尺 DEM,5 m 是保证黄土丘陵沟壑区地形描述精度的理想分辨率。

即对于一定的地形而言,当分辨率高于该地形对应的理想分辨率时,并不会进一步改善 DEM 对

该地形的描述精度,而分辨率低于该理想分辨率后,DEM 所表达的地形误差会显著增加。洪水过程中,如果暴雨中心所在的子流域,其对应的理想分辨率大于 900 m,小于1 800 m,此时基于 100 m 和900 m DEM 模拟得到的流量过程差异较小,而两者与 1 800 m DEM 下计算结果的差距则较大(如图 2c),这样的洪水共有 3 场。

表 2 子流域的地形特征量和降雨量统计表

子流域 编号	面积/ km <sup>2</sup>	平均 坡度	平均地 形复杂度	800612		850610	
				雨量/mm	百分比/%	雨量/mm	百分比/%
2	65.6	0.28	0.29	38.7	2.53	11.9	0.60
3	25.0	0.14	0.22	38.7	0.74	11.9	0.18
4	200.0	0.28	0.30	38.7	5.90	11.9	1.41
5	83.5	0.35	0.33	38.7	2.47	11.9	0.59
6	80.8	0.26	0.29	38.7	2.39	11.9	0.57
7	85.2	0.32	0.32	52.8	3.43	149.0	7.54
8	767.8	0.22	0.15	54.6	31.99	144.4	65.81
9	180.3	0.32	0.30	52.8	7.26	149.0	15.95
10	160.3	0.40	0.52	66.7	8.16	13.4	1.28
11	103.7	0.32	0.32	66.7	5.28	13.4	0.83
12	2.8	0.06	0.23	38.7	0.08	11.9	0.02
13	225.2	0.37	0.54	66.7	11.46	13.4	1.79
14	81.4	0.34	0.32	66.7	4.14	13.4	0.64
15	146.1	0.40	0.55	66.7	7.44	13.4	1.16
16	228.5	0.17	0.23	38.7	6.75	11.9	1.61

4 小 结

DEM 空间分辨率对水文过程的模拟影响是动态变化,它受制于地形复杂度和降雨空间分布的相互作用,不同场次的洪水对 DEM 分辨率变化的响应程度不一。当暴雨中心所在的区域地形变化剧烈,复杂程度较高时,此时 DEM 空间分辨率对径流模拟的影响处于主导地位,不同 DEM 分辨率下的洪水过程模拟精度差异显著;若暴雨中心所在的区域地形变化一致或比较平坦时,此时径流模拟精度对 DEM 分辨率的变化不敏感;如果暴雨中心位于的区域,地形信息随 DEM 分辨率降低而衰减的拐点所对应的栅格边长小于模拟时采用的 DEM 栅格尺寸,DEM 分辨率的继续降低对径流模拟的影响较小;如果暴雨中心所处的区域,地形表达所要求的理想 DEM 分辨率大于水文模拟时采用的 DEM 分辨率,那么在此基础上进一步提高 DEM 数据精度对改善水文模拟精度作用不大。以上研究结果可为进一步解决水文过程中的尺度问题提供理论依据。

参考文献:

[1] Baxter E Vieux. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[2] 魏林宏,郝振纯. DEM 的信息熵评价及其分辨率变化对径流模拟的影响[C]//中国水文科学与技术研究进展-全国水文学术讨论会论文集.南京:河海大学出版社,2004:137-141.

[3] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等. 径流模拟对 DEM 的敏感性分析[J]. 水土保持通报,2004,24(1):32-35.

[4] 徐静,程媛华,任立良,等. DEM 空间分辨率对 TOPMODEL 径流模拟的影响研究[J]. 水文,2007,27(6):27-32.

[5] 邹豹君. 小地貌学原理[M]. 北京:商务印书馆. 1985.

[6] 王雷,汤国安,刘学军,等. DEM 地形复杂度指数及提取方法研究[J]. 水土保持通报,2004,24(4):55-58.

[7] Beven K J, Kirkby M J. Aphysically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Bulletin, 1979,24:43-69.

[8] Wolock D M. Simulating the variable-source-area concept of streamflow generation with the watershed model TOPMODEL [R]. U S Geo l Surv Water Resource Invest Rep,1993:93-124.

[9] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):1-5.

[10] 刘敏,汤国安,王春,等. DEM 提取坡度信息的不确定性分析[J]. 地球信息科学,2007,9(2):65-69.

[11] 徐静. 水文参量空间尺度转换方法及不确定性研究[D]. 南京:河海大学,2008:34-54.

[12] 汤国安,赵牡丹,李天文,等. DEM 提取黄土高原坡度的不确定性[J]. 地理学报,2003,58(6):824-830.