

# SWIM 水文模型的 DEM 尺度效应

高 超<sup>1,2</sup>, 金高洁<sup>3</sup>

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000; 2. 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, 南京 210008; 3. 安徽师范大学图书馆, 芜湖 241000)

**摘要:** 数字高程模型 (DEM) 极大地促进了分布式流域水文模型的快速发展。本文引入 SWIM 水文模型, 以淮河上游长台关地区为研究区, 将 15 种不同分辨率 DEM 数据输入水文模型, 分析 DEM 分辨率对径流模拟的影响, 并探讨最佳 DEM 分辨率选取及 DEM 分辨率对流域地形参数与径流模拟影响等问题。研究表明: (1) 研究区水文模拟效果较理想 DEM 分辨率在 90~120m 之间, 采用栅格面积与流域面积比值 ( $G/A$ ) 小于 0.05 和 “thousandmillion” 经验公式作为 DEM 选取参考等均适用; (2) DEM 分辨率下降, 水文模拟纳希效率系数呈波动下降, 分辨率超过 250m 后, 虽纳希效率系数有所提高, 但此时 DEM 已不能刻画真实流域特征从而造成假象; (3) 15 种分辨率 DEM 在水文极端事件模拟上差异较大, 高纳希效率系数时不能较好地反映水文极端事件, 尤其是峰值, 而在枯水期 15 种 DEM 水文模拟效果均较好, DEM 分辨率降低导致水文模型对降水等反应敏感。

**关 键 词:** 数字高程模型; 水文模型; SWIM; 长台关

**文章编号:** 1000-0585(2012)03-0399-10

## 1 引言

数字高程模型 DEM 是描述地面高程值空间分布的一组有序数组, 是表示流域地表三维特征的有效工具, 可以从栅格高程资料中自动提取流域几何特征值: 如河网密度、坡度以及流向等, 还可方便地为分布式流域水文模型划分计算单元<sup>[1~3]</sup>。DEM 出现后很快被应用到流域水文模型构建等研究中, 如 Moore 等<sup>[4]</sup>将等高线格式的 DEM 应用于水文及生态方面, 后期大量以 DEM 为基础的流域水文模型涌现, 如 SWAT、HBV、TOPMODEL、SWIM 等流域水文模型<sup>[5~7]</sup>, DEM 的出现以及流域水文模型与遥感、GIS 的综合, 极大地促进了分布式流域水文模型的快速发展, 基于 DEM 的分布式流域水文模型代表流域水文模型的发展方向<sup>[8,9]</sup>。

流域水文模型的构建过程受流域特征参数影响大, 而 DEM 分辨率影响诸如坡度、汇流网络、河道长度、流域边界等流域参数的提取, 进而影响流域水文模型的模拟精度。不同分辨率 DEM 对流域特征参数的影响相关学者研究较多<sup>[10~13]</sup>, 但对如何从不同分辨率 DEM 数据中选择最佳尺度, 以最少的数据处理量获得最佳的水文模型模拟效果等此类研究并不多。

收稿日期: 2011-05-09; 修订日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101035); 教育部高校博士学科点专项科研基金 (20113424120002); 湖泊  
与环境国家重点实验室开放课题 (2010SKL015); 安徽省教育厅自然科学重点项目 (KJ2010A154)

作者简介: 高超 (1978-), 男, 安徽全椒人, 博士, 副教授, 主要从事遥感地学应用方面研究。

E-mail: gaoqinchao1@163.com

本文引入德国波茨坦气象影响研究所 (PIK) 研发的 SWIM (Soil and Water Integrated Model) 水文模型, 着重研究 DEM 分辨率对径流模拟的影响, 通过 15 种不同分辨率 DEM 数据输入 SWIM 水文模型, 研究最佳的 DEM 分辨率的选取, 以及不同 DEM 分辨率情况下流域地形参数与径流模拟的相关性等问题。

## 2 研究区概况

本文选择淮河上游的长台关水文站 ( $114^{\circ}31'E$ 、 $32^{\circ}19'N$ ) 以上地区为研究区, 该区地跨湖北、河南两省, 面积约  $3090\text{km}^2$  (图 1), 其地势西高东低, 为岗川相间、形态多样的阶梯地貌, 海拔高度  $69\sim 1113\text{m}$ , 有大小汇入支流 10 余条。长台关水文站是淮河上游重要控制站, 1951 年建站以来, 该站实测最高水位  $75.38\text{m}$ , 最大流量  $7570\text{m}^3/\text{s}$ , 最大流速  $3.09\text{m/s}$ , 最大水深  $9.6\text{m}$ , 最大涨率  $2.84\text{m/h}$ 。

## 3 资料来源与研究方法

### 3.1 资料来源

研究区 DEM 数据选择  $30\text{m}$  分辨率的 ASTER GDEM (V1) 数据和  $90\text{m}$  分辨率的 SRTM 数据 (<http://datamirror.csdn.cn>)。ASTER GDEM (先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型) 数据是由美国航天局 (NASA) 与日本经济产业省 (METI) 共同推出, 该数据是根据 NASA 新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作完成, 其空间分辨率为  $1$  弧度秒 (约  $30\text{m}$ )、垂直精度  $20\text{m}$ , 置信度可达  $95\%$ 。但 ASTER GDEM (V1) 数据使用过程中发

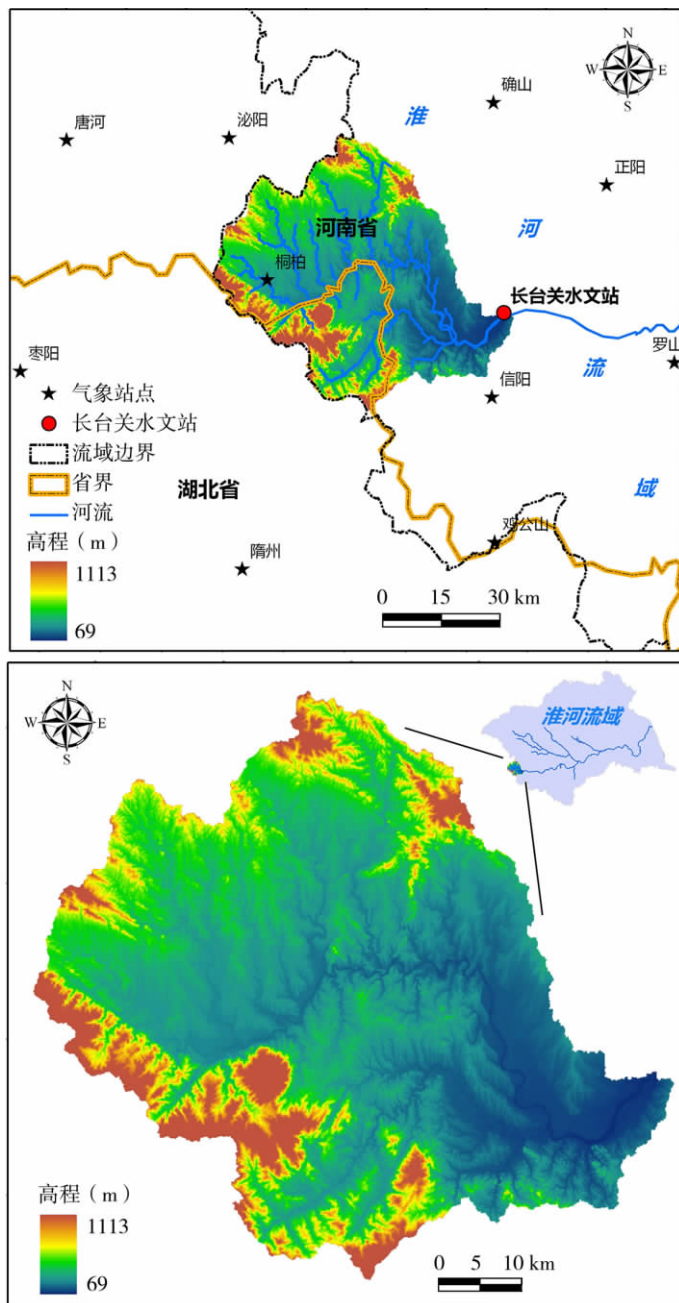


图 1 淮河上游气象水文站点分布及长台关以上区域 DEM 图

Fig. 1 Locations of meteorological and hydrological stations in the upper Huaihe River, and the DEM data above Changtaiguan station

现存在一些异常和缺陷,主要表现为:云的影响,会产生明显的异常值;边界堆叠,会导致 GDEM 数据显示为直线、坑、隆起、大坝或其他异常的几何形状,影响局部地区数据的精度和使用;没有进行内陆水域掩蔽,因此 METI 和 NASA 也认为,第 1 版的 ASTER GDEM 应该更多的被视为“实验”或“研究”性质的数据。研究区长台关地区横跨两幅 ASTGTM 的 DEM 数据 (ASTGTM \_N32E113N 和 ASTGTM \_N32E114O),可能会引起多幅数据平均叠加所带来的数据失真,总体而言, SRTM 数据精度相对较低但质量稳定,为使本文研究结果更具有外延推广性,在研究过程中 90m 及其之后的粗分辨率 DEM 数据均使用 SRTM 数据进行空间重采样获取,而 30m DEM 数据来自 ASTER GDEM (V1), 60mDEM 数据由 30m 数据退化重采样生成。

降水、气温数据选取中国气象局国家气候中心提供的淮河上游长台关水文站以上地区及其周边 10 个加密气象站 (图 1) 1964 年~2008 年逐日实测数据 (包含气温、降水等资料)。长台关水文站水文资料由国家水文年鉴 (1964~2008 年) 提供。土地利用数据选取中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1980 年代、1990 年代、2000 年代三期研究区 1:10 万土地利用数据,并根据遥感图像目视解译更新完善,土壤数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 的全球土壤数据库,空间分辨率为 800m (<http://www.fao.org/>)。

### 3.2 研究方法

使用 ERDAS IMAGE9.1 软件对研究区 DEM 进行不同分辨率退化处理,获取研究区 30~1000m 分辨率的 15 组 DEM 数据;将上述 DEM 数据输入到德国波茨坦气象影响研究所 (PIK) 研发的 SWIM (Soil and Water Integrated Model) 水文模型中的子流域划分模块,划分并提取不同分辨率的流域信息。SWIM 模型是基于 SWAT<sup>[14]</sup> 和 MATSALU<sup>[6]</sup> 模型的基础上进行开发的。该模型可为中大尺度 (从 100~10000km<sup>2</sup>) 的水文水质模拟提供一个基于 GIS 的综合研究工具,模型与土地利用和气候变化的直接联系使其能分析这些变化对水文、农产量和水质造成的影响。

将获取的 15 组 DEM 数据输入 SWIM 水文模型中,以 30m 分辨率 DEM 提取的流域特征信息输入水文模型,结合相关气象、水文数据率定 SWIM 水文模型,再将其余 14 组 DEM 数据输入率定好的 SWIM 水文模型,比较得出的流量过程线,研究模拟结果的差异,寻找适合于研究区的,且以最小数据处理量获得最佳水文模拟效果的 DEM 分辨率,即最佳分辨率,并分析 DEM 分辨率与 SWIM 模型模拟结果的相关性等问题。

## 4 流域信息提取

### 4.1 DEM 分辨率的选择

在基于 DEM 水文模型研究中,一个重要的问题是如何选择合适的空间分辨率,对于中尺度流域的长台关以上地区,DEM 分辨率在水文过程建模中有着根本性意义。很多学者采用栅格面积与河网参考面积 (Network Reference Area) 的比值作为参考值,指出该比值小于 0.05 时提取的流域信息比较可靠<sup>[15]</sup>。由于河网参考面积的计算依赖于最小水道给养面积 (Critical Source Area, CSA) 和最小水道长度 (Minimum Source Channel Length, MSCL) 值的指定,具有不确定性,故本文采用栅格面积与流域面积的比值 (以下用 G/A 表示) 作为参考。

同时, Maidment<sup>[16]</sup> 建议使用 “thousandmillion” 作为一个经验公式来选择一定面积的流域对应的合适分辨率 DEM (表 1), 根据研究区流域面积大小推荐了 DEM 最佳分辨

率和子流域面积等。本文将使用不同 DEM 分辨率数据提取流域特征信息数据, 输入 SWIM 水文模型中, 根据模拟水文过程效果来验证 G/A 比值和“thousandmillion”经验公式等两种方法在本流域的适用性。

表 1 推荐的一些典型应用的 DEM 分辨率<sup>[16]</sup>

Tah 1 Recommended resolutions of DEM for some typical applications

DEM 分辨率/m	单元面积/km <sup>2</sup>	子流域面积 /km <sup>2</sup>	地区或流域面积 /km <sup>2</sup>
30	0.0009	1	1,000
100	0.01	10	10,000
200	0.04	40	40,000
500	0.25	250	250,000
1000	1	1,000	1,000,000

#### 4.2 汇水面积阈值的选择

上游汇水面积是指流入某网格单元的水流流经的所有面积之和。每个单元的汇水面积为该单元的汇流累积单元总数乘以单元面积。只有上游汇水面积达到某一个阈值, 才能形成河网。因此, 在提取河网时, 首先要确定一个网络是不是河道的一部分, 给定一个汇水面积阈值, 凡是汇水面积大于该阈值的网格, 均为河网内的网格, 将这些网格连接起来, 就形成了流域河网<sup>[17]</sup>。

选取不同的汇水面积阈值, 将得到不同的河网, 具有很大的随意性, 随着汇水面积阈值的变化, 生成的河网密度及流域级数、各级河流的长度都将发生较大的变化, 这就需要确定合适的汇水面积。

现行的流域分割采用恒定阈值法, 即依靠个人经验或与精确的水系图反复比对确定阈值, 沿水流方向将上游格网单元的水流累积量大于设定阈值的格网连接起来, 形成流域网络。这种人工率定的阈值具有很大的不确定性。也有学者从坡度和面积指数的关系定量分析流域阈值, 但其精度受实际流域地形地貌、土壤和气候的影响较大<sup>[18]</sup>。因此, 本文采用适度指数法<sup>[19]</sup>, 即通过计算流域水系流向起点的观测值和计算值之间的长度误差来设置合理的阈值。计算表明 30m 分辨率 DEM 划分子流域汇水面积阈值设置为 300 km<sup>2</sup> 最合理, 将该阈值提取的河网与数字水系图进行叠加分析基本吻合, 后续 14 个分辨率 DEM 都按照汇水面积 300 km<sup>2</sup> 的阈值进行划分计算流域信息。

#### 4.3 流域面积

以地形图量测的流域面积 (据刊印的水文年鉴资料) 作为参考, 分析由 DEM 自动划分得出的流域面积与实际流域面积间的差异。不同分辨率 DEM 得出的流域面积的计算值见表 2, 图 2 则直观地反映了差异性。

由计算结果得出:

(1) 与实际地形图量测值 3090km<sup>2</sup> 相比, 分辨率为 300m 的 DEM 划分流域面积最接近实际流域面积, 其它 14 个分辨率 DEM 得出的面积均在 3090km<sup>2</sup> 上下浮动, 但幅度较小, 在 +4.43% ~ -1.32% 之间。产生这种差异的原因, 在于流域界线的确定, DEM 网格在分水岭附近产生一种均化的作用, 而精确的地形图往往能更细致反映分水线附近地形变化, 从而产生二者计算值的差别, 因而合适分辨率的 DEM 选取对于流域特征描述极

其重要。

表 2 不同分辨率 DEM 划分子流域信息

Tab 2 Sub-basins information derived from different resolutions of DEM

栅格 分辨率/m	最大 高程/m	最小 高程/m	平均 高程/m	高程 标准差	栅格数/个	G/A	面积/km <sup>2</sup>	最大 坡度/°	平均 坡度/°	坡度 标准差	Sub-basin/个
30	1112.91	69	589.95	303.12	3386591	0.011	3047.932	86	3.97	8.057	13
60	1112.91	69	589.95	303.12	847016	0.019	3049.258	84	3.62	7.746	13
90	1112.91	69	590.95	303.12	376783	0.029	3051.942	81	3.338	7.394	13
120	1104.94	69	586.97	300.81	212267	0.039	3056.645	78	3.081	7.116	11
150	1105.93	69	587.47	301.1	136001	0.049	3060.023	74	2.867	6.788	13
200	1103.94	69	586.47	300.52	76756	0.065	3070.24	69	2.621	6.346	13
250	1082.03	69	575.51	294.16	49178	0.081	3073.625	65	2.413	5.921	15
300	1067.09	69	568.04	289.82	34297	0.097	3086.73	60	2.251	5.512	15
400	1082.03	69	575.51	294.16	19279	0.129	3084.64	51	2.08	4.896	11
500	1043.18	69	556.09	282.88	12414	0.161	3103.5	45	1.842	4.387	17
600	1019.27	69	544.14	275.93	8710	0.1913	3135.6	38	1.695	3.994	17
700	1082.03	69	575.51	294.16	6385	0.223	3128.65	35	1.547	3.577	15
800	1022.26	69	545.63	276.8	4993	0.250	3195.52	29	1.443	3.296	17
900	1051.15	69	560.07	285.19	3915	0.283	3171.15	29	1.357	3.069	15
1000	965.48	69	517.24	260.31	3227	0.309	3227	24	1.291	2.827	15

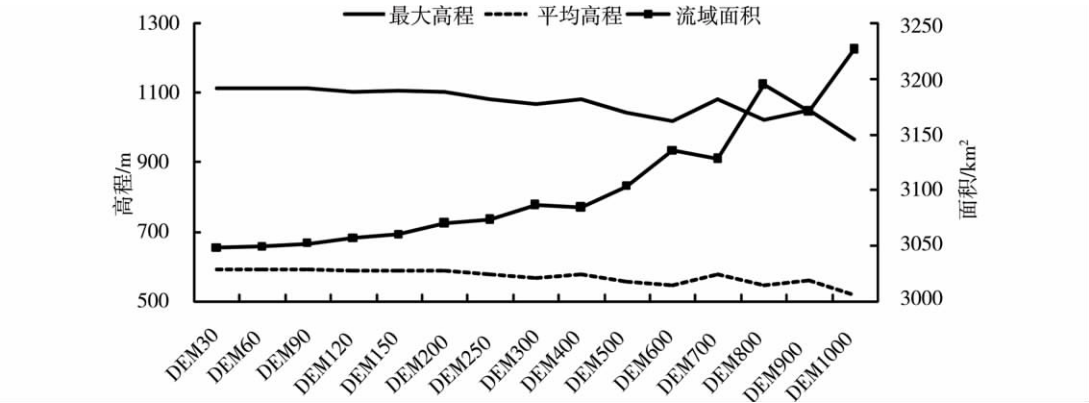


图 2 不同分辨率 DEM 划分子流域高程及面积

Fig. 2 Altitude and area of sub-basins derived from different resolutions of DEM

(2) 不同分辨率 DEM 相互间的比较，取各分辨率划分流域平均值 3102.8 km<sup>2</sup> 作为标准，比较流域面积变化幅度在 +3.87% ~ -1.85% 之间，随着 DEM 栅格分辨率的增大，流域面积有增大趋势，网格 500m 以下 DEM 划分的流域面积均小于平均值，而大于 500m 的 DEM 反之，且在 600m ~ 1000m 的范围，变幅相对较大。从生成的流域图进一步分析，产生这种差异的原因主要在于流域边界处理上。流域边界地形往往变化较大，网格大小的不同就会产生单元网格的不同流向，从而导致汇水面积的差异，总体而言，DEM 栅格越大，产生的误差相应越大。

#### 4.4 高程信息

从图 2 可知,伴随着 DEM 分辨率提高,划分出来的流域面积将会有所波动增加,相应的流域最高高程和平均高程却有所波动降低,首次出现波动的分辨率是 250~300m,反映虽然流域面积有所增加,但流域边界扩展的部分却不是向着高海拔地区扩展,伴随着 DEM 栅格单元大小增加,这种波动幅度加大,流域信息不确定性增加,此刻 DEM 已经不能反映流域特征。而 DEM 分辨率在 30~200m 时,流域最大高程、流域平均高程的变化斜率很小,保持一定的稳定性,流域面积的增速亦很缓慢,但是到 250m 分辨率后开始出现波动,到 700m 分辨率时波动幅度陡然加大,反映流域信息的失真现象明显。

#### 4.5 坡度信息

流域的坡度和河道长度及比降是影响产汇流特性的重要因素。DEM 栅格单元的坡度通常定义为高程相对周围栅格单元的最大变化率,流域平均坡度为所有栅格坡度的平均。理论上,栅格单元大小的扩大,对地形起了相对坦化的作用,坡度会相应的减缓。图 3 是计算不同分辨率 DEM 的流域平均坡度变化趋势,从图 3 可知,不同分辨率 DEM 提取的研究区坡度均随着栅格网格的增大呈指数型下降,计算的 15 组不同分辨率的流域平均最小坡度值只相当于最大坡度值的 35.66%,栅格网格大小对流域的坡度影响显著,栅格网格大小越大流域平均坡度和最大坡度都将出现明显减小。

河道的坡度(比降)是影响河道汇流特性的重要因素,它是高程沿河道长度的变化率。在 SWIM 模型生成河道过程中,引入了集水单元数目阈值和流域最小面积的概念,即超过一定阈值的汇水单元才作为河道的一个节点,这个阈值是单元数目,因此对同一分辨率的 DEM,不同的阈值会产生不同的河道起点,而对不同分辨率的 DEM,因为网格大小的不同,即使阈值相同,也会产生不同的河道起点,因此形成的河道长度和起点就不一样,坡度值就会相应的变化,必将影响流域河流汇流时间等变化。

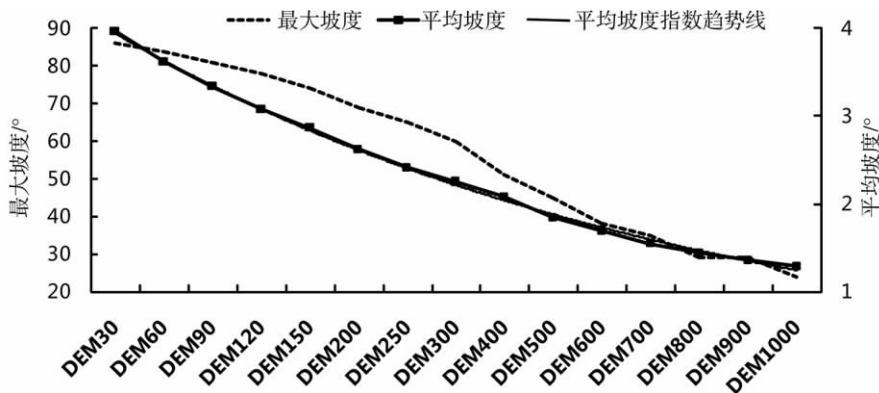


图 3 不同分辨率 DEM 划分子流域坡度信息

Fig. 3 The slope information of different resolutions of DEM

### 5 不同分辨率 DEM 对流量过程线的影响

#### 5.1 纳希效率系数变化

将 15 种分辨率 DEM 得出的流域特征信息数据输入水文模型,计算不同分辨率 DEM

下的流量过程线。以 30mDEM 为基础分辨率,使用 1980~1989 年相关气象、水文数据为模拟期数据,1991~2000 年为模型率定期,率定长台关以上流域 SWIM 水文模型,使用率定的 SWIM 水文模型,输入 15 种 DEM 数据获取 2001~2003 年不同分辨率的流量过程线,比较 DEM 分辨率对水文模型模拟结果的影响,同时与实际观测的 2001~2003 年长台关水文站径流进行对比,分析 DEM 分辨率对水文极端事件等模拟效果的影响等。

随着 DEM 分辨率降低,纳希效率系数总体呈下降趋势(表 3、图 4)。DEM 分辨率从 30m 降低至 120m 时,纳希效率系数降低较少,几乎没有变化;DEM 分辨率低于 500m 后,纳希效率系数降低加快,当 DEM 分辨率达到 600m 时纳希效率系数下降最快。值得注意的是,DEM 分辨率从 150m 降至 250m,纳希效率系数出现小幅上升,同样当 DEM 分辨率由 300m 降低到 500m、900m 降低至 1000m,纳希效率系数也均出现上升现象,且伴随 DEM 栅格网格变大,上升现象比高精度 DEM 时表现明显,但当 DEM 分辨率低于 250m 后,栅格的宽度已经超过了长台关地区河道宽度,DEM 所表现的地形信息已经不能刻画真实地貌,因此较低分辨率时纳希效率系数的上升现象应该视为一种假象,不应作为选择最佳 DEM 分辨率的判断依据。本文研究过程中,后续不同分辨率 DEM 数据的输入不再进行水文模型参数的调整修订,只讨论相同模型参数条件下,DEM 分辨率对模拟结果的影响,但在实际水文模型率定验证过程中,也可能存在通过调整不同的水文模型参数,得到相似的模拟效果等情况,为避免此类现象的产生就需要在选择 DEM 分辨率的时候对流域地形特征有初步的了解,若 DEM 栅格大小已经远远超过研究区内主要河道宽度,不能较好地拟合流域微地貌等特征,则再高的纳希效率系数和模拟效果亦是不真实的。

表 3 不同分辨率 DEM 模拟径流纳希效率系数

Tah 3 The Nash-coefficients of runoff simulation of different resolutions of DEM

	30	60	90	120	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1000
2001	0.56	0.56	0.55	0.55	0.5	0.53	0.56	0.58	0.51	0.55	0.38	0.58	0.57	0.21	0.45
2002	0.77	0.77	0.77	0.77	0.75	0.76	0.77	0.76	0.76	0.77	0.71	0.77	0.77	0.63	0.73
2003	0.5	0.5	0.49	0.48	0.37	0.45	0.51	0.39	0.39	0.47	0.11	0.54	0.52	0.25	0.3
平均	0.67	0.67	0.67	0.66	0.62	0.65	0.67	0.63	0.63	0.66	0.51	0.68	0.68	0.35	0.58

综合以上,结合表 3 中纳希效率系数的变化,可以判断对于流域总面积在 3090km<sup>2</sup> 的长台关水文站以上地区,其水文模拟较为理想的 DEM 分辨率可能在 90~120m 之间,即能满足水文模拟的精度要求又最大程度上减轻了数据的模拟计算量。这个与采用栅格面积与流域面积的比值(G/A)作为参考的结果是一致的,在表 2 中 G/A 比值小于 0.05 的 DEM 分辨率即在 90~150 之间,也反映该经验公式具有一定有效性,同时也验证了“thousandmillion”经验公式在淮河流域的适用性,上述 2 种方法可以用于估算不同流域面积下水文模拟的最粗 DEM 分辨率的选取等问题。

## 5.2 水文极端事件影响

在水文模型调参过程中发现,DEM 分辨率降低,模拟精度下降,相同 DEM 分辨率下,纳希效率系数达到最优时,洪峰误差和径流深误差等指标都比最优洪峰模拟时得到的上述指标误差大,也就是说,同一网格下,峰值模拟和模型纳希效率系数相矛盾,最优的纳希效率系数下峰值误差并不是最小,为了获取较高的纳希效率系数则只能牺牲对于水文



极端峰值的模拟效果,比如 DEM 分辨率 900m 时,水文模拟峰值与实际观测值直接差距较小,但是整体纳希系数较小,只有 0.35 左右(图 5)。

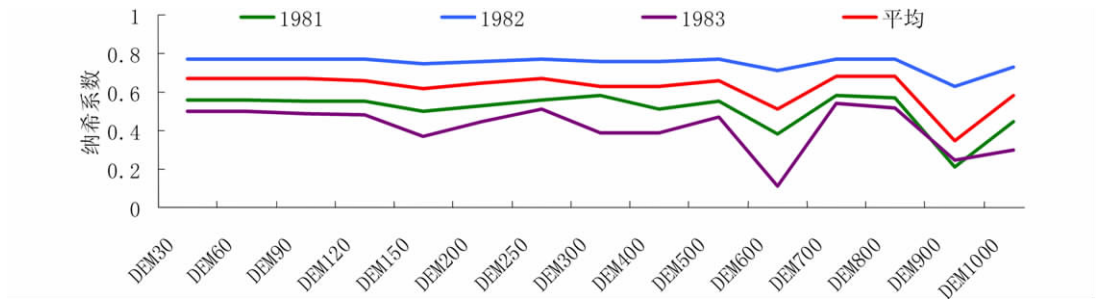


图 4 不同分辨率 DEM 模拟径流纳希效率系数

Fig. 4 the Nash-coefficients of runoff simulation of different resolutions DEM

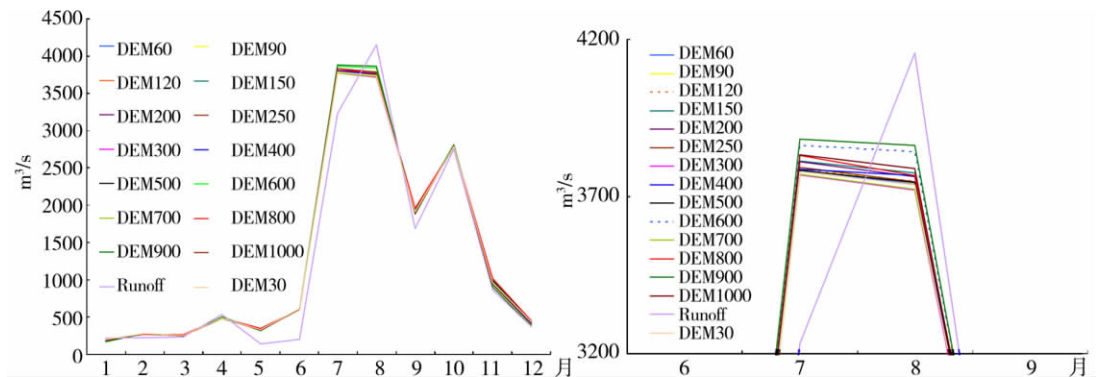


图 5 不同分辨率 DEM 模拟流量过程线 (a. 月平均、b. 丰水期)

Fig. 5 Simulated runoffs of different resolutions of DEM (a. monthly average; b. wet season)

DEM 分辨率降低将使 SWIM 水文模型对降雨反应变得敏感,粗精度 DEM 相对高精度 DEM 会使得流量过程线峰值升高。这是由于 DEM 栅格变大,使研究区地形变缓,从而导致整个流域更容易产生饱和坡面流,进而使洪峰变大,过程线陡涨陡落。选取研究区降水相对较多的 7 月和 8 月进行研究,其降雨径流在不同分辨率的 DEM 下其反应如图 5b 所示,降雨较多时低精度 DEM 对应的流量过程线峰值较大,120m 分辨率 DEM 的流量过程线峰值最小。

在降水稀少时各分辨率对流域水文过程的模拟均较好,尤其是在冬春季节的 11 月至次年 4 月之间,同时纳希效率系数亦较高。总体而言,随着 DEM 分辨率的变化,枯水期水文模拟值的差异不甚明显,纳希效率系数均较高,而在洪水期,分辨率较低 DEM 划分的流域其水文峰值模拟效果要好于高分辨率 DEM 划分的流域。

## 6 结论与讨论

(1) 合理分辨率 DEM 选取。根据不同分辨率 DEM 对于水文流量过程线的影响,确定在淮河上游长台关以上地区适用于水文模型的 DEM 分辨率在 90~120m 之间,这个也



与许多学者采用栅格面积与流域面积的比值 ( $G/A$ ) 小于 0.05 作为参考值的流域划分相一致, 表明该公式在淮河流域也是适用的, 同时 “thousandmillion” 经验公式也可用于估算不同流域面积下水文模拟的最粗 DEM 分辨率选取等。

(2) 合理的 DEM 子流域划分阈值的选取。选取不同的汇水面积阈值, 将得到不同的河网, 具有很大的随意性, 对水文过程影响亦很大。本文采用适度指数法, 即通过计算流域水系流向起点的观测值和计算值之间的长度误差来设置合理的阈值, 发现在长台关地区利用 DEM 划分子流域时, 其汇水面积设定为  $300\text{km}^2$  时较为合适, 能较为真实的反映流域水系信息等。

(3) 不同分辨率 DEM 划分流域过程中获取的流域面积大小、流域最大高程、平均高程、坡度等均不一致, 将这些参数输入 SWIM 水文模型中将导致汇流时间等信息的差异, 从而影响到水文模拟的结果。随着 DEM 分辨率的下降, 水文模拟的纳希效率系数呈现波动下降, 但是在 DEM 分辨率超过 250m 后, 虽然纳希效率系数有所提高, 但是其获取的流域信息不真实, 而是一种假象, 这一点在实际研究中需要尤其注意识别。

(4) 不同分辨率 DEM 对流域水文极端事件的模拟不一致, 常常在高纳希效率系数时不能较好的反映水文极端事件, 尤其是峰值, 而在枯水期水文模拟效果较好, DEM 分辨率降低可使水文模型对降水等反应变的敏感, 相应流量过程线峰值升高。

#### 参考文献:

- [1] Wu S, Li J, Huang G H. Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation. *Environmental Modeling & Software*, 2007, 22(9): 1250 ~ 1260.
- [2] 张旭, 蒋卫国, 周廷刚, 等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例. *地理与地理信息科学*, 2009, 25 (4): 17~22.
- [3] 王艳君, 吕宏军, 施雅风, 等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 30~37.
- [4] Moore R J, Clarke R T. A distribution approach to rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 1981, 17 (5): 1367~1382.
- [5] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model. *Journal of Hydrology*, 2008, 352: 30~49.
- [6] Krysanova V, Hattermann F, Wechsung F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 763~783.
- [7] 雍斌, 张万昌, 陈艳华. TOPMODEL 中地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  的新算法. *地理研究*, 2007, 26(1): 37~46.
- [8] 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. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437~445.
- [9] 许捍卫, 何江, 余远见. 基于 DEM 与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法. *河海大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(4): 443~448.
- [10] 阎国年, 钱亚东, 陈钟明. 流域地形自动分割研究. *遥感学报*, 1998, 2(4): 298~303.
- [11] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 33(6): 1~5.
- [12] 汤国安, 杨勤科, 张勇. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究——以在黄土丘陵沟壑区的实验为例. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 53~56.
- [13] 肖飞, 张百平, 凌峰, 等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法. *地理研究*, 2008, 27(2): 459~467.
- [14] Arnold J G, Engel B A, Srinivasan R. A continuous time, grid cell watershed model. In: *Proceedings of Application of Advanced Information Technologies for the Management of Natural Resources*. Sponsored by ASAE. June 17-19, 1993, Spokane, Washington, 1993. 267~278.
- [15] Garbrecht J, Martz L. Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models. *Computers & Geosciences*

- ees, 1994, 20(1): 85~87.
- [16] Maidment, D R. GIS and hydrologic modeling: An assessment of progress. Int. Conference Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fe, NM, USA, 1996. 21~26.
- [17] 孙崇亮, 王卷乐. 基于 DEM 的水系自动提取与分级研究进展. 地理科学进展, 2008, 27(1): 118~125.
- [18] Dietrich W E, Wilson C T, Montgomery D R, *et al*. Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. Journal of Geology, 1993, 101: 259~278.
- [19] Lin W T, Chou W C, Lin C Y. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. Hydrological Processes, 2006, (20): 289~306.

## Effects of DEM resolution on results of the SWIM hydrological model in the Changtaiguan basin

GAO Chao<sup>1, 2</sup>, JIN Gao-jie<sup>3</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 3. Library of Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China)

**Abstract:** In this paper, the impacts of the Digital Elevation Model (DEM) with different resolutions on the simulation results of the SWIM hydrological model are examined for the Changtaiguan basin in the upper reaches of the Huaihe River basin in East China. Fifteen DEM resolutions (from resolution of 1000x1000 m to resolution of 30x30 m) are analyzed on their impacts on landscape parameters and runoff simulation results. Based on this, it is found that the best fitting DEM resolution in the study area is 90~120 m, and that both the ratio of Grid Area/Basin Area and the 'thousand million' formula are suitable methods. The Nash-Sutcliffe coefficients decline with DEM resolution; yet when DEM resolution is larger than 250 m, the Nash-Sutcliffe coefficients increase, because DEM grid is too coarse to display basin terrains. The simulation results of hydrological extreme events from 15 different DEM resolutions show a high variability. The high Nash-Sutcliffe coefficients do not reflect the hydrological extreme events, especially in the flood period. For the dry season, the simulation results of the 15 DEM resolutions show relatively good results. The results of the SWIM hydrological model are more sensitive to precipitation when the DEM resolution is decreasing.

**Key words:** digital elevation model; hydrological model; SWIM; Changtaiguan Basin