

## 基于数字高程模型的水文模拟对比分析

张行南, 井立阳, 叶丽华, 郭亨波

(河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 本文以GIS为平台, 分析比较了不同类型的地形及网格大小的数字高程模型(DEM)所提取的汇流路径长度、坡度等地形特征值。在新安江模型参数物理意义研究的基础上, 将汇流参数与地形特征值建立相关关系。利用相关关系确定参数, 进行水文模拟, 通过分析比较不同网格大小的DEM对水文模拟的影响, 确定了满足实际洪水预报要求的DEM网格大小。

**关键词:** DEM网格大小; 地形特征值; 流域水文模型; 模型参数

**中图分类号:** P333 **文献标识码:** A

DEM的垂直和水平分辨率对流域特征值的提取有一定的影响。在某一个尺度上人们观测到的性质, 总结出的原理和规律, 在另一个尺度上可能仍然是有效的、可能是近似的、也可能需要修正<sup>[1]</sup>。因此对不同尺度的流域进行水文模拟时, 采用的DEM网格尺寸也应不同, 网格尺寸越小, 越能真实地反映地形特征, 模拟精度越高。但是对大流域, 受到计算机存储的制约, 高分辨率的DEM在应用上非常困难。这样如何选择合适的DEM分辨率, 满足实际洪水预报要求成为一个值得研究的问题。

本文以广东西江流域和三峡区间流域为例, 利用地理信息系统的空间分析功能, 以DEM为基础, 推求不同DEM分辨率下的地理特征值, 并将其与水文模型部分参数建立相关关系, 给出合适的DEM网格大小, 满足实际洪水预报要求, 从而解决无资料地区模型参数的率定问题。

### 1 流域地形特征与汇流参数

广东西江中下游区间流域, 位于北纬 $22^{\circ}15' \sim 25^{\circ}14'$ , 东经 $110^{\circ}41' \sim 112^{\circ}59'$ , 流域面积 $2.54$ 万 $\text{km}^2$ , 河长 $225$ km。西江广东境内流域分为南、北两部分, 北部多高山, 中北部、南部为低山丘陵区, 东部为河谷平原低山丘区, 中部西江沿岸为河谷低水区。

三峡区间一般是指长江干流重庆(寸滩站)至湖北宜昌河段, 全长 $658$ km, 区间面积约为 $5600$ km<sup>2</sup>。奉节站以上和以下地形有较大区别: 奉节站以上属丘陵地区, 河谷、河床地势比较复杂, 起伏较大, 宽谷峡谷相间; 奉节站以下, 西起白帝关, 东至南津关, 这里峭壁深谷, 两岸山峰矗立, 水流湍急, 景势壮观。

本文选取三峡区间的龙河、磨刀溪和西江的罗定江3个有控制站的小流域作为研究流域。研究流域属于亚热带季风湿润气候区, 所以本文采用新安江模型<sup>[2]</sup>。新安江模型为分散型流域水文模型, 需要对流域进行分单元处理。

**1.1 流域地形特征值** 地形决定着水流在重力作用下的运动特性, 如坡面水流的汇流路径, 流域中土壤湿度的空间分布等等。因此, 在流域水文模拟研究中充分考虑地形因素, 可以从物理成因机制上深入地研

收稿日期: 2004-06-30

作者简介: 张行南(1960-), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源、地理信息系统及遥感研究。

E-mail: zxn40@163.com

究水文规律。而数字地面模型(DTM)则为此提供了有力的手段。目前,一般的DTM都是采用栅格数据结构,当给栅格赋予高程属性时,DTM就称为数字高程模型(DEM)<sup>[3]</sup>。作为地球空间框架数据的基本内容和其它各种地理信息的载体,DEM是各种地学分析的最基础的数据,也是GIS的基本内容。由DEM可派生出很多派生数据,这些数据可用来描述不同的地理特征,并用这些地理特征从不同侧面来描述地形。

表1 不同网格大小的DEM下的地形特征值统计

| 流域名称及地形特征值 |                        | DEM网格  |        |        |        |        |        |
|------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            |                        | 50m    | 100m   | 200m   | 400m   | 800m   | 1600m  |
| 龙河流域       | 实际集水面积/km <sup>2</sup> | 898    |        |        |        |        |        |
|            | 平均坡度(%)                | 24.69  | 23.05  | 20.63  | 16.26  | 11.19  | 7.19   |
|            | 地表粗糙度                  | 1.72   | 2.14   | 6.25   | 15.24  | 29.04  | 41.90  |
|            | 高程变异                   | 0.0094 | 0.0106 | 0.0184 | 0.0303 | 0.0444 | 0.0577 |
|            | 平均汇流路径长度/km            | 32.06  | 29.22  | 29.59  | 29.30  | 28.86  | 24.87  |
|            | 最大汇流路径长度/km            | 69.63  | 68.38  | 68.25  | 66.41  | 64.37  | 62.03  |
| 磨刀溪流域      | 实际集水面积/km <sup>2</sup> | 2268   |        |        |        |        |        |
|            | 平均坡度(%)                | 24.59  | 23.20  | 20.67  | 15.89  | 10.43  | 6.36   |
|            | 地表粗糙度                  | 1.47   | 2.14   | 6.26   | 15.33  | 28.20  | 40.04  |
|            | 高程变异                   | 0.0137 | 0.0154 | 0.0267 | 0.0435 | 0.0611 | 0.0748 |
|            | 平均汇流路径长度/km            | 77.26  | 76.90  | 77.13  | 70.86  | 64.85  | 61.00  |
|            | 最大汇流路径长度/km            | 135.11 | 134.27 | 133.42 | 129.32 | 123.37 | 123.17 |
| 罗定江流域      | 实际集水面积/km <sup>2</sup> | 3164   |        |        |        |        |        |
|            | 平均坡度(%)                | 16.45  | 15.13  | 13.31  | 10.25  | 7.14   | 4.55   |
|            | 地表粗糙度                  | 0.93   | 1.34   | 3.88   | 9.56   | 17.61  | 26.08  |
|            | 高程变异                   | 0.0256 | 0.0311 | 0.0548 | 0.0882 | 0.1241 | 0.1589 |
|            | 平均汇流路径长度/km            | 53.46  | 52.99  | 52.43  | 50.21  | 48.60  | 45.99  |
|            | 最大汇流路径长度/km            | 102.85 | 102.11 | 101.74 | 96.89  | 96.37  | 96.25  |

本文在3个研究流域上,分别计算了在不同网格大小的DEM下的流域集水面积、平均坡度、地表粗糙度、高程变异、平均汇流路径长度和最大汇流长度(见表1)。平均坡度、地表粗糙度、高程变异直接在DEM上进行计算。

集水面积和汇流路径长度计算分三步:无洼地DEM生成、水流方向矩阵计算和水流累计矩阵计算。网格方向计算采用单方向模型<sup>[4]</sup>,即网格方向指向其相邻网格中最低的一个。每个网格的方向有8种可能,在计算机中需对这8种可能的方向进行编码。编码方式见图1(a)。

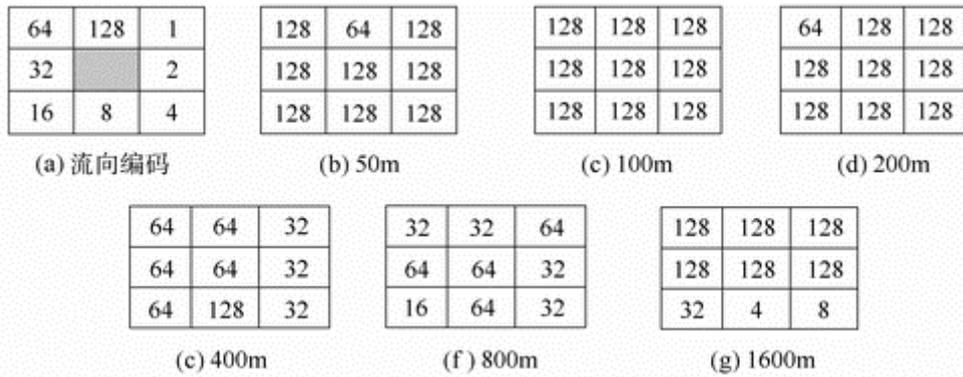


图 1 流向编码及龙河流域同一位置不同 DEM 的网格流向

(1)最大汇流路径长度。流域最大汇流路径长度与流域大小、形状、地形等有关。图2中罗定江流域和龙河流域形状比较接近圆形，磨刀溪流域比较接近长方形，虽然罗定江流域面积大于磨刀溪流域，但是它的最大汇流路径长度却小于磨刀溪流域的最大汇流路径长度。流域面积和地形相同的情况下，流域形状越狭长，汇流路径长度越大。从表1可以看出，流域的最大汇流路径长度随着DEM网格增大而减小。图3以100m DEM和200m DEM为例，说明了流域最大汇流路径长度随着DEM网格增大而减小的原因。

(2)平均汇流路径长度。平均汇流路径长度是流域内每个网格汇流路径长度的均值，与地形关系密切。表2为龙河流域内同一位置(108.2800°，30.1625°)不同DEM的汇流长度，可以看出流域中每个网格的汇流路径长度随着DEM网格变化而改变；流域平均汇流路径长度也随之改变，没有一定的规律。网格和周围网格流向改变(图1)，汇流路径发生变化，所以网格汇流路径长度变化。平均汇流路径长度与流域网格汇流路径总和与网格个数有关。

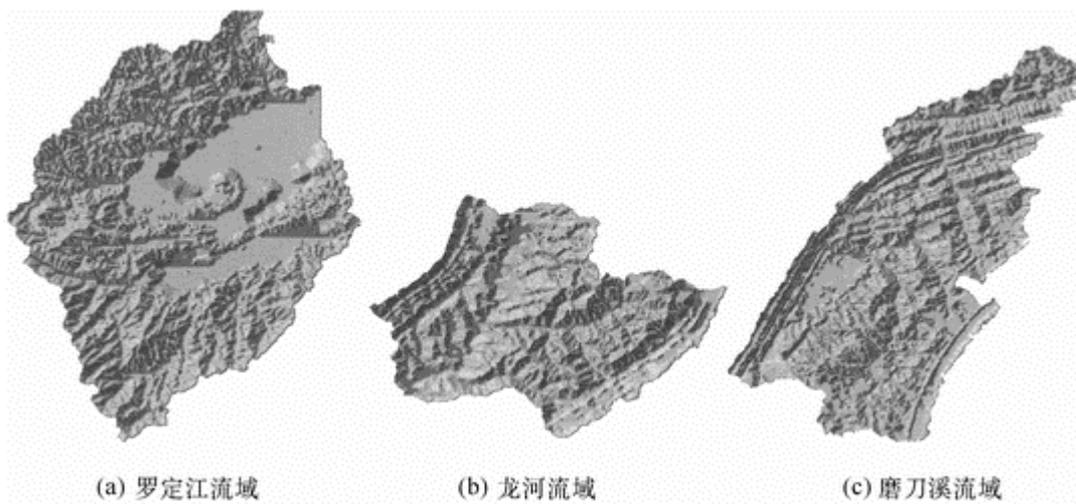


图 2 三个小流域对比

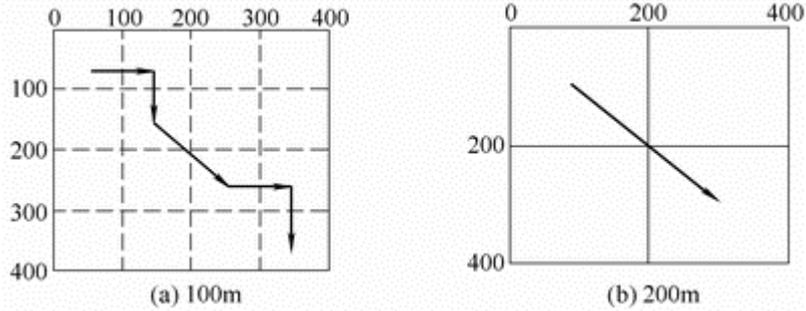


图 3 不同比例尺生成的汇流路径长度示意

(3)流域平均坡度分析。从表1可以看出,3个小流域的计算平均坡度随着DEM网格增大而减小。因为随着DEM网格增大,一些微地貌特征被忽略,流域的地形被坦化,网格坡度因此而变小。不同网格大小的DEM流域平均坡度变化明显,50m时流域平均坡度是1600m时的4倍多;网格大于200m时流域平均坡度变化明显,几乎呈线性变化,不同流域的变化斜率不同(图4)。

表 2 龙河流域内同一位置不同DEM的汇流长度

| DEM网格大小 | 50m     | 100m    | 200m    | 400m    | 800m    | 1600m   |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 汇流长度/km | 34.6239 | 33.4758 | 30.4570 | 30.5077 | 31.3334 | 30.6952 |

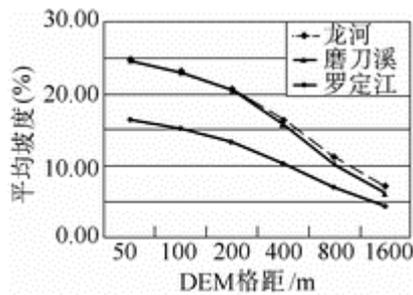


图 4 不同 DEM 流域平均坡度对比

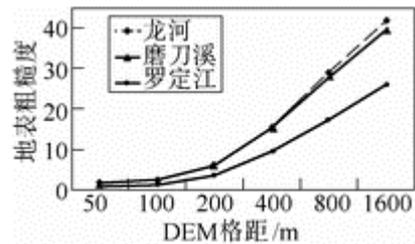


图 5 不同 DEM 流域粗糙度对比

(4)流域地表粗糙度。从表1可以看出,3个小流域的计算地表粗糙度和高程变异值随着DEM网格增大而增大,变化明显;和流域平均坡度一样,网格大于200m时地表粗糙度变化明显,几乎呈线性变化,不同流域的变化斜率不同(图5)。地表粗糙度可以反映地表起伏变化,山区大于丘陵地区,丘陵地区大于平原地区。龙河流域、磨刀溪流域属于山区,罗定江流域属于丘陵地区。同样网格大小的DEM计算的地表粗糙度龙河、磨刀溪流域大于罗定江流域。

1.2 地形特征与部分汇流参数相关关系 地形特征中的坡度决定了径流的汇流速度,与汇流长度一起决定了汇流时间。地形特征与汇流参数之间存在紧密的相关关系<sup>[5]</sup>。汇流参数 $C_s$ 是地面径流的调蓄系数,受流域平均坡度的影响。马斯京根法参数 $X$ 由两部分组成,一是 $X_1$ ,代表水面曲线的形状,反映楔蓄的影响;另一是 $L/l$ ,即按特征河长 $l$ 划分河段时的段数 $n$ ,反映河槽调蓄能力<sup>[6]</sup>。从 $C_s$ 和 $X$ 的物理意义可知,随着DEM网格增大,流域平均坡度变小,地面径流调蓄作用和河槽调蓄能力增大。本文采用相关分析的方法寻找流

域平均坡度与参数 $C_s$ 和 $X$ 的关系。

本文采用多元线性回归模型<sup>[7]</sup>来寻找相关关系，模型的拟合结果见表4。

利用相关关系求得的不同DEM下的 $X$ 值见表5。

**表3 基于100m网格DEM的计算平均坡度与率定的汇流参数**

|              | 龙河流域  | 磨刀溪流域 | 罗定江流域 |
|--------------|-------|-------|-------|
| 平均坡度 $S(\%)$ | 23.05 | 23.20 | 15.13 |
| 坡面汇流参数 $C_s$ | 0.83  | 0.82  | 0.92  |
| 马斯京根参数 $X$   | 0.45  | 0.42  | 0.37  |

**表4 模型参数与地形特征值的回归模型**

| 模型结构        |                           |
|-------------|---------------------------|
| $C_s$ 与 $S$ | $C_s = -1.1897S + 1.1001$ |
| $X$ 与 $S$   | $X = 0.8075S + 0.2481$    |

**表5 基于不同DEM的 $C_s$ 和 $X$**

|       | 龙河流域汇流参数 $X$ |      | 磨刀溪流域汇流参数 $X$ |      | 罗定江流域汇流参数 $X$ |      |
|-------|--------------|------|---------------|------|---------------|------|
|       | $C_s$        | $X$  | $C_s$         | $X$  | $C_s$         | $X$  |
| 50m   | 0.81         | 0.45 | 0.81          | 0.45 | 0.90          | 0.38 |
| 200m  | 0.85         | 0.44 | 0.85          | 0.42 | 0.94          | 0.36 |
| 400m  | 0.91         | 0.40 | 0.91          | 0.38 | 0.98          | 0.33 |
| 800m  | 0.97         | 0.34 | 0.98          | 0.33 | >1            | 0.31 |
| 1600m | >1           | 0.31 | >1            | 0.30 | >1            | 0.28 |

## 2 流域水文模拟

本文在3个小流域上采用新安江模型进行水文模拟，汇流参数 $C_s$ 、 $X$ 采用相关分析计算结果，其余参数采用人工率定的参数。表6为3个小流域次洪模拟误差统计结果，表中DC为确定性系数，CE1为次洪径流深相对误差，CE2为洪峰相对误差， $t$ 为峰现时间差，+代表模拟洪峰提前，-代表滞后。

**表6 不同网格大小DEM下的模拟结果**

|       | 龙河流域780 622次洪水 |        |        |     | 磨刀溪流域850 807次洪水 |        |        |     | 罗定江流域910 703次洪水 |        |        |     |
|-------|----------------|--------|--------|-----|-----------------|--------|--------|-----|-----------------|--------|--------|-----|
|       | DC             | CE1(%) | CE2(%) | T/h | DC              | CE1(%) | CE2(%) | T/h | DC              | CE1(%) | CE2(%) | T/h |
| 50m   | 0.93           | 1.75   | 4.17   | -2  | 0.90            | -2.18  | -22.8  | -3  | 0.87            | 2.25   | 7.25   | -3  |
| 100m  | 0.94           | 1.84   | -0.46  | -2  | 0.91            | -1.94  | -23.8  | -3  | 0.92            | 2.30   | -2.96  | -2  |
| 200m  | 0.94           | 1.97   | -6.02  | -2  | 0.92            | -1.05  | -27.0  | -5  | 0.93            | 2.38   | -16.23 | -2  |
| 400m  | 0.89           | 2.68   | -28.5  | -2  | 0.89            | -2.51  | -26.1  | -6  | 0.60            | 2.66   | -58.7  | 0   |
| 800m  | 0.56           | 6.17   | -64.0  | -4  | 0.48            | 28.54  | -73.9  | -14 | -0.08           | -45.41 |        |     |
| 1600m | -0.06          | -47.43 |        |     | -0.26           | 62.54  |        |     | -0.21           | 2.08   |        |     |

由对比结果可看出，3个小流域随着DEM网格的增大，洪峰流量减小，流量过程线坦化，精度降低。龙河流域、磨刀溪流域是山区，DEM网格为50m、100m、200m、800m时推求的参数计算结果与人工率定参数计算结果相近；罗定江流域是丘陵地区，DEM网格为50m、100m、200m时推求的参数计算结果与人工率定参数

计算结果相近。从表6可以看出,在山区(龙河流域、磨刀溪流域)DEM网格大于等于800m时,丘陵地区(罗定江流域)DEM网格大于等于400m时,模拟结果很差,不能满足实际要求。所以采用本文提出的方法来确定模型参数时,应根据地形高低起伏的不同而采用不同网格大小的DEM。

### 3 结语

本文以三峡区间龙河、磨刀溪和广东西江流域的罗定江3个小流域为例,推求不同网格大小的DEM下的地形特征值,采用相关分析的方法建立了新安江模型参数 $C_s$ 、 $X$ 和地形特征值的相关关系。由相关关系和地形特征值采用反演的方法推求参数 $C_s$ 、 $X$ 的反演值。经小流域模拟验证发现不同网格大小的DEM对模型部分汇流参数确定的精度影响很大,在山区(龙河流域、磨刀溪流域)DEM网格小于800m时,丘陵地区DEM网格小于400m时,模拟结果能满足实际要求。所以通过地形特征值来确定模型部分汇流参数的方法可行。由特征值反演参数的方法可移用于无资料地区,解决此类地区模型参数的率定问题。

### 参考文献:

- [1] 苏理宏,李小文,黄裕霞. 遥感尺度问题研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 544-548.
- [2] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984, 106-109.
- [3] 邬伦,刘瑜,张晶,马修军,韦中亚,田原. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 张行南,齐晶,张丽. 流域流水网推导方法[J]. 河海大学学报, 2002, 28(1): 26-31.
- [5] 胡凤彬. 水文站网规划[M]. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [6] 庄一鹤,林三益. 水文预报[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [7] 王俊德. 水文统计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

## Study of hydrological simulation on the basis of digital elevation model

ZHANG Xing-nan, JING Li-yang, YE Li-hua, GUO Heng-bo

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** On the platform of GIS the topographic characteristics of river basin, including the distance and slope of flood routing and slope for different kinds of landscape and different grid sizes digital elevation model (DEM) were compared. The interrelationships between these characteristics and some parameters of Xinanjiang Hydrological Model were established based on the physical meaning of these parameters, and the parameters were determined consequently. The effect of DEM grid size on parameters and hydrological modeling were analyzed. It is suggested that the appropriate grid size of DEM must be determined according to the required accuracy of flood forecasting.

**Key words:** DEM; topographic characteristics; hydrological model; parameters