

数字高程模型不确定性对地形参数和 TOPMODEL 的影响

王培法¹ 王丽¹

摘要

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是基础数据,数据本身不可避免地存在不确定性.不确定性会随着传播而累积,从而影响 DEM 应用结果的可靠性.从 DEM 不确定性传播的角度,利用蒙特卡罗模拟技术研究了 DEM 不确定性传播对坡度、上坡集水面积、地形指数和 TOPMODEL 模型的影响,发现 DEM 不确定性传播对坡度、上坡集水面积和地形指数有一定的影响,对上坡集水面积影响最大,对地形指数影响最小;但 DEM 不确定性传播对 TOPMODEL 模型影响甚微.

关键词

DEM 不确定性;蒙特卡罗模拟;地形参数;TOPMODEL;皎口流域

中图分类号 P208

文献标志码 A

收稿日期 2010-08-12

资助项目 南京信息工程大学科研基金

作者简介

王培法,男,博士,讲师,现主要从事地理信息系统及高分辨率遥感图像信息提取研究.
wangpeifa1980@163.com

0 引言

Introduction

DEM 是地球表面的数字表达,是各种地学分析的基础数据.从 DEM 可以获得坡度、坡向、山脊线、山谷线、流域边界、河网、地形指数、温度指数和辐射指数等数据,DEM 及其提取的数据可广泛应用于水文学、地貌学、三维可视化、虚拟现实等领域^[1].然而 DEM 含有固有的误差,导致了 DEM 的不确定性^[2].随着 GIS 普及和 DEM 的广泛应用,研究者越来越意识到 DEM 的不确定性对应用的影响并进行了大量的研究.

众多学者已经对 DEM 误差产生的原因、探测方法、可视化和减少误差的方法进行了探讨^[3-9].在 DEM 不确定性的研究中充分利用了 DEM 误差中的研究方法,如用统计方法来量化 DEM 的不确定性,用三维可视化来直观评价 DEM 的不确定性^[10].由于 DEM 不确定性的量化和可视化方法的局限性,其建模的方法开始用于模拟 DEM 的不确定性.蒙特卡罗方法是常用的模拟方法,并已应用于 DEM 不确定性对提取的地形参数、流域特征和模型应用影响等的研究^[2,11-25].

本文将从 DEM 不确定性传播的角度来研究 DEM 不确定性对选定的地形参数和模型的影响.在蒙特卡罗模拟 DEM 不确定性的基础上,定量地评价 DEM 不确定性传播对选定地形参数和 TOPMODEL 模型的影响并探讨其产生原因.

1 研究区与数据

Research area and information

皎口流域位于浙江省宁波市鄞县西部,流域控制面积为 259 km²,最低高程 59 m,最高高程 976 m.在气候上属亚热带季风气候区,气候温和湿润,四季分明.该流域雨量充沛,年平均降水量在 2 000 mm 以上,雨量相对集中于 3—7 月上旬和 8 月下旬—9 月间,雨水以夏秋热带风暴季节为最多,年均径流量达 3.12 亿 m³.

本研究采用约 90 m 水平分辨率的 SRTM(the Shuttle Radar Topographic Mission) DEM,经处理后生成 100 m 水平分辨率的 DEM(图 1),用相应的 1:5 万地形图来评价 SRTM DEM 的精度.皎口流域降雨和实测流量数据有 1979—2001 年的以小时为间隔的 7 场洪水实测数

据. 蒸发资料缺乏,但由于选用的水文模型主要模拟暴雨洪水,因此可以忽略蒸发数据.

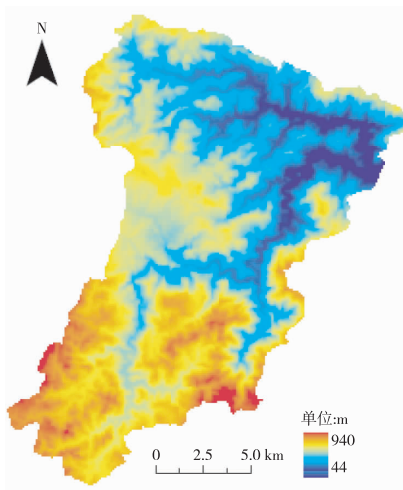


图1 胶口流域 SRTM DEM

Fig.1 SRTM DEM of Jiaokou watershed

2 研究方法

Research method

2.1 地形参数和应用模型简介

从 DEM 可提取的地形参数较多,基于 DEM 和其提取参数的应用模型更为广泛.基于 TOPMODEL 模型的运行需要流域地形指数数据,地形指数的计算则需要从上坡集水面积和坡度两个地形参数的角度来考虑.从 DEM 不确定性传播的角度选取了坡度、上坡集水面积和地形指数 3 个地形参数, TOPMODEL 模型作为选择的应用模型.由于同一地形参数有多种不同的计算方法,DEM 不确定性对不同计算方法获得的地形参数影响不同,因此以下简单说明计算地形参数所采用的方法,同时介绍 TOPMODEL 模型所需的 DEM 地形参数在模型中扮演的角色.

1) 坡度是局部地表高程变化的最大值比率,可以用来计算坡面漫流和地下水水流流速、地表径流流速以及研究土壤水含量等.在栅格 DEM 中一般用 3×3 窗口来计算窗口中心栅格的坡度值.不同坡度计算方法的不同在于计算所使用邻域栅格的数量,中心栅格是否参与运算及参与计算栅格是否有权重.本文中采用 Horn^[26] 提出的方法:邻域栅格都参与运算,并根据距离中心栅格距离平方的倒数来赋予不同的权重,中心栅格不参与运算.

2) 上坡集水面积是指水流可以流到此栅格的

所有上坡栅格的总面积,是确定流域河网的一个重要参数.在计算上坡集水面积前,需对 DEM 进行洼地处理,水流方向栅格生成,水流累积栅格生成操作.目前消除洼地的常用方法有滤波和填洼,本文采用 Tarboton 等^[27] 提出的填洼方法.在此基础上所有的栅格均可以赋予流向,确定流向的方法可分为单流向法和多流向法,在确定流向时采用了 Jensen 等^[28] 的单流向方法.当水流流向栅格确定后,根据流向来确定流域内可以流向每一栅格的栅格数量,从而得到水流累积栅格,对其乘以栅格面积即可获得上坡集水面积栅格.

3) 地形指数是一个水文相似性指标,可以用其的空间分布来近似表达流域中土壤水分含量的空间分布.地形指数可表达为 $\ln(\alpha/\tan \beta)$, α 为流经坡面任一点处单位等高线长度的汇流面积, β 为该点处的坡度.在栅格 DEM 中地形指数的计算时, α 为计算栅格单位等高线长度的上坡集水面积, β 为对应栅格的坡度.一般将计算方法分为单流向算法和多流向算法:单流向法假定地下水只流向最陡坡方向;多流向方法则假定地下水可以流向任何下坡方向.本文采用单流向方法来计算上坡集水面积,则栅格 DEM 中计算地形指数的等高线长度等于栅格长度^[29-30].

4) TOPMODEL 模型选作最后的应用模型,其是一个以地形为基础的半分布式水文模型,主要特征是假定地形指数相同的网格具有相同的水文响应,用地形指数分布来描述水文特性的空间不均匀性.模型产流的计算需确定饱和和源面积,即饱和和缺水量小于等于零的面积.流域内点 i 处的饱和和缺水量的计算公式如下:

$$S_i = \bar{S} - m [\lambda - \ln(\alpha/\tan \beta)]_i. \quad (1)$$

式中, S_i 为流域内点 i 的饱和和缺水量, \bar{S} 为流域内平均饱和和缺水量, m 为指数型导水率函数参数, λ 为地形指数流域平均值, $\ln(\alpha/\tan \beta)$ 为地形指数.

公式(1)是 TOPMODEL 的基本方程,充分考虑了地形对产流区形成和变化的影响,以地形指数的空间分布来反映流域饱和和缺水量的空间分布.

2.2 DEM 不确定性模拟

本文用蒙特卡罗方法来模拟 DEM 的不确定性,具体的模拟步骤如下:

1) 确定原始 DEM 的均方根误差,并作为产生随机场的标准差;

2) 用随机方法产生随机场并叠加到原始 DEM

上,获得 DEM 实现;

3) 重复步骤(2) N 次直到可以获得可靠稳定的模拟结果。

通常用一个均方根误差值用于模拟,也就暗含着 DEM 的不确定性或误差与地貌等其他因素无关。但是 DEM 的误差实际上与地貌类型有着十分紧密的联系,因此在模拟中考虑了地貌因素的影响。将研究流域根据坡度分为平地、丘陵地、山地和高山地,对每种类型分别进行精度评价。4 种类型依次随机选取 45、65、85 和 37 个评价点,参照在地形图上的对应点进行评价,得到各类型的评价值分别为 13.16、14.25、23.34 和 39.67 m。

为了获得可靠的模拟结果应该产生大量的 DEM 实现,但随着模拟数量的增大在增加运算量的同时也会带来工作的冗余。 N 值如何确定,早期的研究者是随意给定一个偏小值(10~50 次),有的研究者(如 Okasnen 等^[24])则给定一个认为足够大的 N 值(如 2 000 次)。而 Wechsler^[2] 和 Raaflaub^[19] 则提出了相近的 N 值确定方法,其出发点是模拟只需要对研究结果有显著影响的 DEM 实现。用此方法确定 N 值的步骤如下:

1) 根据 DEM 的均方根误差估计所需的实现数量 M 个,并产生相应的 M 个实现;

2) 随着循环次数 $i(1 < i < M)$ 的递增,产生 i 个实现。对 i 个实现来说,在同一栅格位置上会有 i 个模拟值,对 i 个模拟值求其标准差,则会产生一个标准差面;

3) 对 1~ M 次循环求其相应标准差面的平均标准差;

4) 作循环次数和标准差面的标准差的散点图;

5) 在散点图上曲线趋于水平且稳定的部分,选择合适的数值作为最终循环次数 N ;

6) 若曲线不能趋于水平或虽趋于水平但不能找到合适的循环次数 N ,则需增加实现的数量,重复 3~6 步,直到发现合适的 N 值。循环次数确定时,尽量在计算机环境条件允许下选择稍大些的数值,以确保评价结果的稳定性。

根据确定的均方根误差初步确定模拟的循环次数为 600 次,作循环次数和标准差面的标准差图(图 2)。由图 2 可以看出,开始时随着循环次数的增加标准差急剧下降,当次数超过 50 次后,曲线趋于水平,变化波动较小,在 300 次后,曲线基本为水平,因此选定 N 为 300 次。

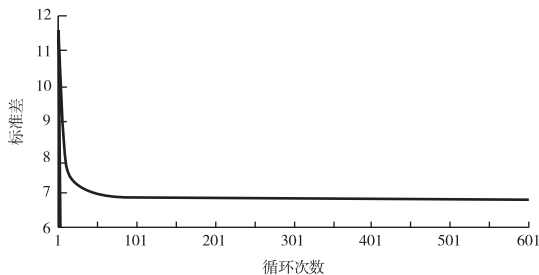


图 2 循环次数的确定

Fig. 2 Determination of the simulation times

2.3 评价 DEM 不确定性对地形参数的影响

对于模拟的结果需要一定的量化指标来评价 DEM 不确定性对地形参数的影响。由于从 DEM 不确定性传播的角度来研究,选择了 3 个量化评价指标。

1) 绝对偏差

$$I_{AB} = \sum_{i=1}^N |(Y_i - y)| / N. \quad (2)$$

(2) 相对绝对偏差

$$I_{ARAD} = \sum_{i=1}^N \left[|(Y_i - y)| / y \right] / N. \quad (3)$$

(3) 均方根误差

$$I_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - y)^2 / N}. \quad (4)$$

式中: y 为提取于真实 DEM 的参数值; Y_i 为相应的模拟参数值; N 为模拟次数。由于真实 DEM 及其参数值是无法得到的,因此一般把原始 DEM 及其提取的参数看作真实数据。

指标的计算是基于栅格的,每一个栅格位置均可以计算相应参数的上述指标,因此得到的是指标栅格,而不是单一数值。利用原始 DEM 提取的参数和扰动的参数即可获得上述指标栅格,对指标栅格进行统计分析便可达到量化评价的目的,具体的流程如图 3。

2.4 评价 DEM 不确定性对 TOPMODEL 的影响

TOPMODEL 除需地形指数作为其输入数据外,还需要从 DEM 提取的距流域出口距离和流域面积数据。由于本文从 DEM 不确定性传播的角度来评价其影响,因此只考虑由地形指数传播而来的不确定性,其他基于 DEM 的模型输入数据采用原始 DEM 提取的参数。对每场降雨通过率定确定一组最优参数,作为选定场次的模拟参数。用从 DEM 实现提取的地形指数作为输入数据,对每场降雨用率定的参

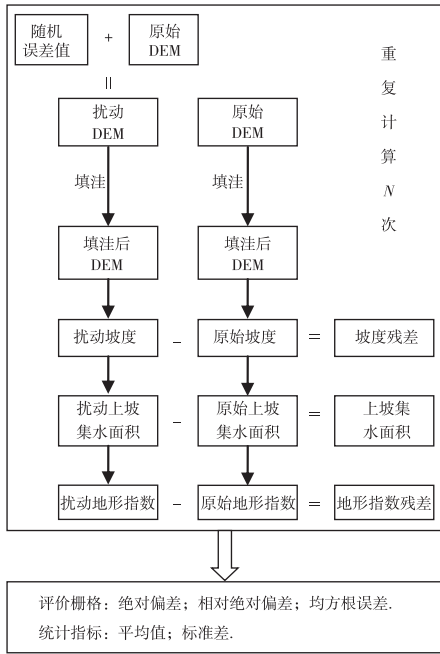


图3 DEM 不确定性对地形参数影响分析流程

Fig. 3 The evaluation flowchart of effect of DEM uncertainty on the topographic parameters

数来模拟水文过程. 将模拟的水文过程及评价指标记录下来用于影响评价, 影响评价从定量角度来分析 DEM 不确定性对模型的影响. 4 个采用的模拟评价指标分别是: EFF (Nash 模型效率系数)、SSE (残差平方和)、SLE (残差对数平方和) 和 SAE (绝对残差和). 当 EFF 值趋近 1, 其他指标趋向 0 时模拟结果较好. 对每场模拟, 记录使用扰动地形指数作为输入数据模拟的指标值, 统计分析记录的指标值来定量分析 DEM 不确定性对模型的影响. 采用的统计指标包括最小值、最大值、值变化范围、标准差和平均值. 定量评价方法流程如图 4 所示.

3 结果分析

Results analysis

基于 DEM 提取的参数直接或间接地利用地表

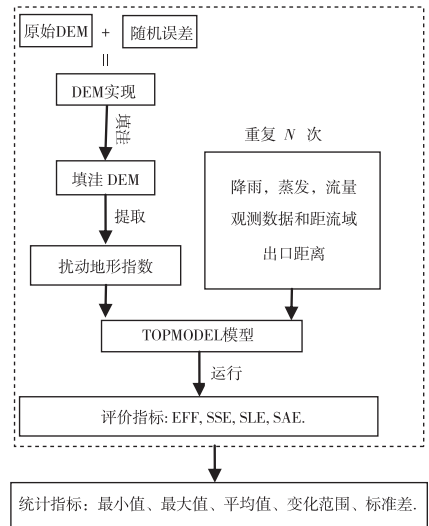


图4 DEM 不确定性对 TOPMODEL 影响的评价流程

Fig. 4 The evaluation flowchart of effect of DEM uncertainty on TOPMODEL

高程数据, 因而 DEM 不确定性的存在影响着从其提取的参数. 有些参数的计算则需要其他基于 DEM 的参数 (如地形指数的计算则需要上坡集水面积和坡度), 因此 DEM 不确定性也随着参数的提取而传播累积. 一般 DEM 不确定性的研究中把原始 DEM 及其提取参数作为真实值, 也就假设了在 DEM 为真实数据的条件下用于提取原始参数的算法可以真实地提取地表数据. 研究中基于原始 DEM 和 DEM 实现的地形参数提取使用了相同的提取算法, 所以可以把参数的不确定性看作是由 DEM 不确定性传播而来.

3.1 DEM 不确定性传播对地形参数的影响

为了研究 DEM 不确定性传播对地形参数的影响, 对选定的地形参数的评价指标进行了统计, 如表 1 所示.

由表 1 可知, 虽然不确定性随着参数提取而不断累积, 但 DEM 不确定性对地形参数的影响并不是随着参数的递进提取而逐渐增加的. 对所选的 3 个

表 1 DEM 不确定性对地形参数的影响评价指标统计

Table 1 The evaluation index statistics of effect of DEM uncertainty on topographic parameters

评价指标栅格	平均值			标准差		
	坡度	上坡集水面积	地形指数	坡度	上坡集水面积	地形指数
绝对偏差	3.474	1 625 679.42	1.183 6	0.834	8 222 689.04	0.829 8
相对绝对偏差	0.397	35.53	0.151 9	0.804	256.32	0.075 6
均方根误差	4.381	2 927 947.3	1.554 7	0.989	12 136 011.6	1.075 8

地形参数而言,影响由坡度到上坡集水面积参数急剧增加,从上坡集水面积到地形指数参数则急剧下降,因此 DEM 不确定性传播对选定参数影响的变化呈倒 V 字形.同时,相同的 DEM 不确定性,对各个参数的影响也是不同的,也不是递增的,这主要是由参数的物理意义不同,计算参数的公式不同引起的.表 1 中数据也显示出不同参数对 DEM 不确定性的敏感程度是不同的:DEM 不确定性对上坡集水面积影响较大,坡度次之,对地形指数的影响最小;从评价指标栅格的标准差可以看出 DEM 不确定性对上坡集水面积影响值变化范围最大,对地形指数的影响值变化范围最小.

表 1 中绝对偏差和均方根误差评价栅格从两个相似的角度来描述 DEM 不确定性对提取参数的影响显示出相似的结果.在本文的不确定性程度下,对坡度平均有 3.474° 的影响,将平均影响 162.6 个栅格的汇流方向,平均产生地形指数 1.18 的变化.相对绝对偏差则从与原始提取参数比较的角度来评价影响,发现整体上 DEM 不确定性会对原始坡度产生 39.7% 的影响,而对上坡集水面积则会发生巨大的变化,变化数值是原始值的 35 倍多,当进一步提取的时候,对地形指数仅产生 15.19% 的影响.

DEM 不确定性对选定地形参数产生上述影响,一方面是由于本文所用数据分辨率比较粗糙,数据的均方根误差比较大导致了影响较大;另一方面选定参数本身特征决定了影响在参数提取中的传播特征.各参数影响产生原因分析如下:1)分析 DEM 不确定性对坡度的影响主要由正扰动值和不至于产生洼地的负扰动值产生.当负扰动值产生洼地后由于

要进行填洼,使得对坡度的影响大大减弱,尤其在平坦地区,影响为零.对相对绝对偏差指标栅格值贡献大的来自于坡度较小地区,尤其是河道,水库和平坦地区,本身其原始坡度值小,当正扰动值叠加上去时,即使是坡度产生很小的变化,相对绝对偏差栅格也会产生很大的值.2)DEM 不确定性对上坡集水面积影响较大地区发生在河道及其附近、水库和下游平坦地区,此类地区上坡集水面积较大,扰动值的叠加会使栅格流向发生改变,从而使上坡集水面积发生数值上的很大变化.相应地,对相对绝对偏差栅格值的变化较大值也来源于上述地区.3)DEM 不确定性对地形指数的影响则来自于 DEM 不确定性对上坡集水面积和坡度影响的叠加,因此其影响较大地区与上述两者相似,分布在河道及其附近,水库和平坦地区.由于此参数本身在计算时取对数,使得此参数影响的各指标相对于坡度和上坡集水面积影响指标偏小.

3.2 DEM 不确定性传播对 TOPMODEL 模型的影响

对每场模拟均可获得一组数据用于评价影响,由于结果相似等原因,本文从 7 场模拟中选取了最好和最差的两场来评价,结果分别列于表 2、表 3.

从表 2、3 中可以看出,模拟指标的变化范围和标准差十分小,平均值接近于原始模拟值,也就表明了 DEM 的不确定性对模型的影响小. DEM 不确定性对 1988 年 7 月 29 日场次模拟的影响大于其他场次,但仍可获得较好的模拟结果,其影响仍然是有限的,如 EFF 指标的平均值与原始值的差值仅为 0.005 2.

表 2 DEM 不确定性对模型影响的评价指标统计——1979 年 8 月 23 日场次

Table 2 The evaluation index statistics of effect of DEM uncertainty on TOPMODEL—simulation on 23 August 1979

指标	最小值	最大值	变化范围	标准差	平均值	原始值
EFF	0.976	0.977	0.001	0.000 5	0.976 3	0.977
SSE	3.67×10^{-5}	3.78×10^{-5}	1.1×10^{-6}	2.72×10^{-7}	3.74×10^{-5}	3.7×10^{-5}
SLE	15.371	16.094	0.723	0.15	15.5970	15.732
SAE	0.033	0.034	0.001	0.000 4	0.033 7	0.034

表 3 DEM 不确定性对模型影响的评价指标统计——1988 年 7 月 29 日场次

Table 3 The evaluation index statistics of effect of DEM uncertainty on TOPMODEL—simulation on 29 July 1988

指标	最小值	最大值	变化范围	标准差	平均值	原始值
EFF	0.888	0.897	0.009	0.001 7	0.892 8	0.898
SSE	1.47×10^{-4}	1.59×10^{-4}	1.2×10^{-5}	2.27×10^{-6}	1.53×10^{-4}	1.46×10^{-4}
SLE	93.388	98.135	4.747	1.000 8	95.37	95.5
SAE	0.046	0.048	0.002	0.000 5	0.046 8	0.046

下面从 DEM 不确定性对地形指数的影响和模型本身对地形指数的敏感性来分析产生上述现象的原因. DEM 不确定性对地形指数的影响见图 5. 图中最小值曲线表示所有 DEM 实现提取的相同地形指数区间内占流域面积百分比的最小值,最大值曲线与最小值曲线意义相似,代表占流域面积百分比的最大值,两条曲线限定了 DEM 不确定性对地形指数影响的范围,直观描述了对其影响的大小. 从图 5 中可以明显看出 DEM 不确定性对地形指数的影响不大,在峰值附近影响稍大. DEM 实现提取的最大地形指数平均值为 7.409,最小平均值为 7.236,所有实现地形指数的平均值为 7.258,原始 DEM 提取的地形指数平均值为 7.393,说明总体上 DEM 不确定性使地形指数变小,但幅度非常小. Franchini 等^[31]分析了 TOPMODEL 对地形指数的敏感性,发现模型对地形指数并不敏感. 因此 DEM 不确定性通过对地形指数的扰动而对模型产生很小的影响可归因于两方面:1)模型本身对地形指数不敏感;2)DEM 不确定性对地形指数的影响有限.

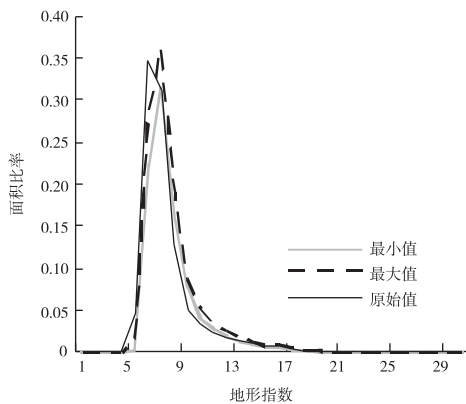


图 5 DEM 不确定性对地形指数的影响

Fig. 5 Effect of DEM uncertainty on the topographic index

4 结论

Conclusion

1) DEM 不确定性传播对坡度、上坡集水面积和地形指数影响的变化呈倒 V 字形,即 DEM 不确定性对三者的影响数值先增加而后减少,对上坡集水面积的影响大,对地形指数的影响小. 由于此特征是由地形参数本身特性决定的,因此具有普适性.

2) DEM 不确定性对上坡集水面积和地形指数的影响在河道及其附近、平坦地区和水库地区显著,影响大于其他地区.

3) DEM 不确定性通过对地形指数的影响而对 TOPMODEL 模型产生影响,但影响有限,在模型使用中可以忽略 DEM 不确定性的影响. 其原因一方面是模型本身对地形指数不敏感,另一方面是 DEM 不确定性对地形指数的影响甚微.

不确定性随着应用的递进是不断累积的,应该引起足够的注意,而不是通常地把 DEM 当作无误差模型来应用,在特定的应用前,须进行相应的评价.

参考文献

References

- [1] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2003:10-11
LI Zhilin, ZHU Qing. Digital elevation model[M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 2003:10-11
- [2] Wechsler S P. Effect of DEM uncertainty on topographic parameters, DEM scale and terrain evaluation [M]. State University of New York College of Environmental Science and Forestry, Syracuse New York, 2000
- [3] Wilson J P, Gallant J C. Terrain analysis: principles and applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000:15-20
- [4] Brown D, Bara T. Recognition and reduction of systematic error in elevation and derivative surfaces from 7.5-minute DEMs [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(2):189-194
- [5] Monckton C. An investigation into the spatial structure of error in digital elevation data [M] // Worboys M. Innovations in GIS. Volume 1. Bristol, PA: Taylor & Francis, 1994:267
- [6] Lopez C. Locating some types of random errors in Digital Terrain Models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(7):677-698
- [7] Hengl T, Gruber S, Shrestha D P. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modeling [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(2):97-112
- [8] 汤国安,赵牡丹,曹茜. DEM 地形描述误差空间结构分析 [J]. 西北大学学报:自然科学版, 2000, 30(4):349-352
TANG Guoan, ZHAO Mudan, CAO Han. An investigation of the spatial structure of DEM errors [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2000, 30(4):349-352
- [9] 王光霞,朱长青,史文中,等. 数字高程模型地形描述精度的研究 [J]. 测绘学报, 2004, 33(2):168-173
WANG Guangxia, ZHU Changqing, SHI Wenzhong, et al. The further study on the accuracy of DEM terrain representation [J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2004, 33(2):168-173
- [10] Wood J D. The geomorphological characterisation of digital elevation models [D]. Leicester: Department of Geography, University of Leicester, 1996
- [11] Fisher P. First experiments in viewshed uncertainty: The accuracy of the viewshed area [J]. Photogrammetric Engineering and Remote sensing, 1991, 57(10):1321-1327
- [12] Lee J, Snyder P K, Fisher P F. Modeling the effect of data errors on feature extraction from digital elevation models [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(10):1461-1467
- [13] Lee J. Digital elevation models: issues of data accuracy and applications [C]. Proceedings of ESRI User Conference, 1996
- [14] Ehlschlaeger C R, Shortridge A. Modeling elevation uncertainty in

- geographical analyses [C]. Proceeding of the International Symposium on Spatial Data Handling, Delft, Netherlands, 1996, 9B. 15-9B. 25
- [15] Hunter G J, Goodchild M F. Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases [J]. Geographical Analysis, 1997, 29(1): 35-49
- [16] Ehlschlaeger C R. The stochastic simulation approach: Tools for representing spatial application uncertainty [D]. University of California, Santa Barbara, 1998
- [17] Holmes K W, Chadwick O A, Kyriakidis P C. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling [J]. Journal of Hydrology, 2000, 233(1/2/3/4): 154-173
- [18] Wechsler S W. A methodology for Digital Elevation Model (DEM) uncertainty evaluation: The effect DEM uncertainty on topographic parameters [C]. URISA 99 Annual Conference Proceedings, 1999
- [19] Raaflaub L D. The effect of error in gridded digital elevation models on topographic analysis and on the distributed hydrological model Topmodel [D]. Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, 2002
- [20] Bishop T F A, Minasny B, McBratney A B. Uncertainty analysis for soil-terrain models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(2): 117-134
- [21] Raaflaub L D, Collins M J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(5): 710-732
- [22] Phillips D L, Marks D G. Spatial uncertainty analysis: propagation of interpolation errors in spatially distributed models [J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1/2/3): 213-229
- [23] Endreny T A, Wood E F. Representing elevation uncertainty in runoff modeling and flowpath mapping [J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 2223-2236
- [24] Oksanen J, Sarjakoski T. Error propagation of DEM-based surface derivatives [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(8): 1015-1027
- [25] Oksanen J, Sarjakoski T. Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(14): 3085-3102
- [26] Horn B K P. Hill shading and the reflectance map [J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(1): 14-47
- [27] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 81-100
- [28] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593-1600
- [29] Quinn P F, Beven K J, Lamb R. The $\ln(\alpha/\tan \beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework [J]. Hydrological Processes, 1995, 9: 161-182
- [30] Wolock D M, McCabe G J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters [J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1315-1324
- [31] Franchini M, Wendling J, Oblad C, et al. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL [J]. Journal of Hydrology, 1996, 175(1/2/3/4): 293-338

Research on effects of DEM uncertainty on topographic parameters and TOPMODEL

WANG Peifa¹ WANG Li¹

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract DEM (Digital Elevation Model) is the digital representation of earth surface, which is used for enormous applications. Generally, DEM is employed without the analyses of its effects of both uncertainty and propagations on specific applications. In this paper, the effects of DEM uncertainty on the selected topographic parameters, such as the slope, upslope contributing area, the topographic index and TOPMODEL hydrological model, are analyzed in terms of the DEM uncertainty propagation. Furthermore, the effects of DEM uncertainty propagation on three topographic parameters are evaluated by using the simulation method of Monte Carlo, and then the effects of DEM uncertainty propagation on TOPMODEL is analyzed in the quantitative and qualitative aspects. This research shows that DEM uncertainty propagation almost certainly affects the slope, upslope contributing area and the topographic index as well. Among all of them, its effect on upslope contributing area is the biggest; while on the topographic index is the smallest. However, the effect of DEM uncertainty propagation on TOPMODEL is trivial and could be ignored in the applications. Further, the reasons can be found that on the one hand, the TOPMODEL is not sensitive to the distribution of topographic index; and on the other hand, the topographic index is affected limitedly by DEM uncertainty propagation.

Key words DEM uncertainty; Monte Carlo simulation; topographic parameters; TOPMODEL; Jiaokou watershed