

# 黄土高原 DEM 分辨率对提取坡度精度的影响

陈楠<sup>①</sup> 王钦敏<sup>①</sup> 汤国安<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002;

<sup>②</sup> 南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097)

**摘要** 在黄土高原选取代表不同地貌类型的延川、绥德、富县 3 个研究样区, 以及 1: 1 万地形图所建立的不同水平分辨率数字高程模型(DEM) 为研究对象, 分别分析每一大样区不同水平分辨率 DEM 所提取坡度的面积误差变化规律. 提出面积百分比加权总体误差和面积百分比平均总体误差的指标, 在每一大样区随机选取 20 个试验样区, 得到两项误差指标与水平分辨率的线性函数关系. 根据线性函数关系, 由已知误差求得所需要的水平分辨率范围, 并在每一大样区的 16 个随机检验样区通过检验. 线性函数关系模型的建立, 可望为实际工作选取适宜的水平分辨率提供依据, 对于在保证精度的条件下节约成本, 减小数据量具有一定意义. 文中最后提出, 所指出的两项指标不适用于风沙黄土过渡区域.

**关键词** 数字高程模型, 坡度, 误差指标, 分辨率, 黄土高原

中图分类号 P 207; P 208(241)

文献标识码 A

地面坡度影响着地表物质运动和能量转换的规模和强度, 也是制约生产力空间布局的重要因子<sup>[1]</sup>. 目前, 许多算法可以自动从数字高程模型(DEM) 中提取坡度, 但是所提取坡度的精度明显受到水平分辨率的制约. 从理论上讲, DEM 分辨率越高, 意味着地面布设越多的高程采样点, 地形模拟的精度就越高. 但是, DEM 的数据量随分辨率的增加而呈几何级数地增加, 选择满足应用精度要求的同时, 应充分考虑计算机容量与处理能力的 DEM 分辨率<sup>[2]</sup>. 文[3~ 12]从不同的角度分析了地面坡度误差的成因, 以及误差随 DEM 分辨率变化而变化的趋势. 但他们均未能提出指标衡量坡度误差随分辨率及地形变化而变化的规律. 汤国安等<sup>[2]</sup>提出利用地面坡度平均误差与沟壑密度计算所需要分辨率的量化方程, 但需先获得本区域沟壑密度数据, 这就使方程的应用受到一定限制, 也影响了计算结果的精度.

## 1 研究样区及技术路线

我们选择了 3 个代表黄土高原典型地貌类型的样区作为研究对象. (1) 延川样区. 位于陕西省延川县, 属典型的黄土梁峁状丘陵沟壑区域. 研究样区是基于 J49G078031, J49G078032, J49G079031, J49G079032 共 4 幅地形图制作的. (2) 绥德样区. 位于陕西省绥德县, 属侵蚀强烈的典型梁峁状黄土丘陵沟壑地区. 研究样区是基于 J49G058037, J49G058038, J49G059037, J49G059038 共 4 幅地形图制作的. (3) 富县样区. 位于陕西省富县, 属黄土高原沟壑区与丘陵沟壑区交错过渡地带, 研究样区是基于 J49G091025, J49G091026, J49G092025, J49G092026 共 4 幅地形图制作的. 采用国家测绘部门编制的 1: 1 万地形图作为基本信息源, 按照国家制定的地形图数字化技术规范标准制作完成上述 3 个样区的分辨率为 5 m 的 DEM. 1: 1 万比例尺地形图制作的 5 m 分辨率 DEM 具有很高的地形描述精度<sup>[2]</sup>, 能较准确地提取坡度, 因此作为真实值. 同时, 分别建立分辨率(m) 为 15, 25, 35, 45, 55, 65 和 75 的 DEM.

研究应用 ARC/ VIEW 软件平台计算坡度<sup>[1, 13]</sup>, 所获得的坡度按照水土保持部门普遍采用的临界坡度分级标准, 并将其作为基本的分级方案. 结合研究特点进行分级延伸, 共分为 9 个等级, 分别(°) 是 0 ~ 3, 3~ 5, 5~ 8, 8~ 15, 15~ 25, 25~ 35, 35~ 45, 45~ 60, 60~ 90, 在以下叙述中, 用 1~ 9 序号分别代表

收稿日期 2005-12-21

作者简介 陈楠(1975), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事地理信息系统的研究. E-mail: fjc99@163.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(40571120, 40301027); 福建省科技计划基金资助项目(2005Q009)

坡度的 9 个分级级别. 研究中还辅以 Matlab, SPSS 等工具软件. 本研究将 3 大样区都等分为 36 块小样区, 分割数目是综合考虑小样区地貌完整性及统计样本数量的足够性, 编号 1~ 36 按照自左向右, 从上到下的顺序进行. 在每个大样区中使用 Matlab 软件中的随机函数随机选取 20 个小样区作为试验样区, 其余 16 块小样区作为检验样区. 在此基础上, 提取不同分辨率的坡度图, 采用相关的分析方法完成数模表达. 在每个大样区研究的技术路线相同, 如图 1 所示. 图中,  $e^r$  和  $e_0^r$  分别是面积百分比加权总体误差和平均总体误差.

2 试验结果及分析

2.1 误差指标

通过分析发现, 随分辨率变化, 各级别坡度的面积相对 5 m 分辨率对应面积在变化. 因此, 提出误差指标, 设 5 m 分辨率坡度面积百分比向量用  $p^5$  表示,  $p^5 = [p_1^5, p_2^5, \dots, p_9^5]$ .  $p_i^5$  数值为 5 m 分辨率第  $i$  级别坡度的面积占总面积百分比,  $i$  表示不同的坡度级别, 其余类推. 如果用  $r(m)$  表示 DEM 分辨率, 则  $e^r = \sum_{i=1}^9 (|p_i^r - p_i^5| p_i^5) \times 100\%$ ,  $e_0^r = \sum_{i=1}^9 (|p_i^r - p_i^5| / 9) \times 100\%$ ,  $r = 15, 25, \dots, 75$ .

2.2 误差指标与分辨率的关系

2.2.1 试验样区 在延川样区, 随机选取的 20 个试验样区, 其编号分别为 2, 4, 7, 8, 10, 15, 16, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 35 和 36, 其余 16 块小样区作为检验样区. 在这 20 个试验样区不同分辨率 DEM 中分别提取坡度, 按照本文的定义计算  $e_0^r$  和  $e^r$ , 结果如图 2 所示. 同样地, 在绥德样区随机选取

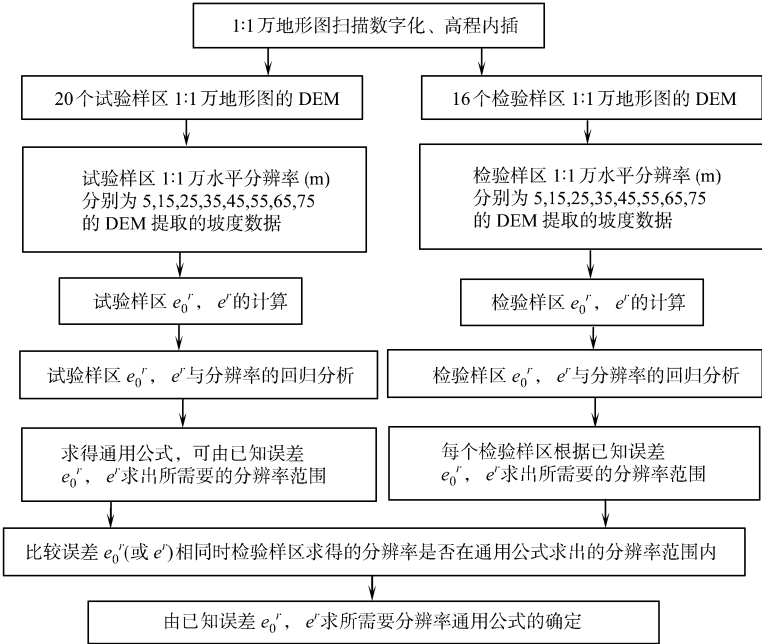


图 1 技术路线图

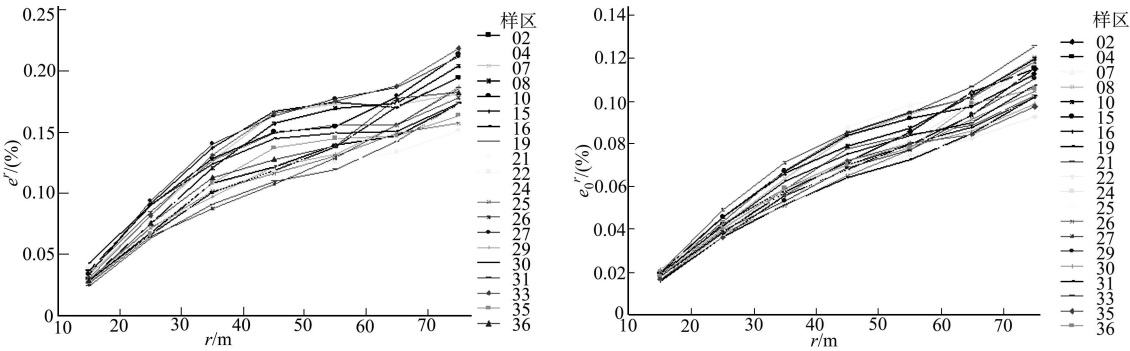


图 2 延川样区误差与分辨率关系图

的 20 个试验样区, 编号分别为 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 13, 16, 17, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 35, 在富县样区 20 个试验样区编号分别为 2, 3, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 31, 32, 33, 34, 36, 其余 16 块小样区作为检验样区. 从图 2 可以发现, 在延川样区  $e_0^r$  和  $e^r$  两项指标随分辨率变化呈现有规律变化, 分辨率数值越大, 两项指标越大, 变动范围也越大. 绥德和富县样区也呈现同样规律, 限于篇幅图略去. 研究还发现在 3 个大样区中, 所有 20 个试验样区的  $e_0^r$  和  $e^r$  都是分辨率  $r$  的线性函数, 可写成  $e^r (e_0^r) = ar + b$  的形式. 对上式通过  $f$  检验 (显著性水平 0.05), 可认为 20 个试验样区  $e^r$  和  $e_0^r$  关于分辨率  $r$  的线性拟合成立. 从图 2 可以发现, 对于相同的分辨率, 虽然存在不同的  $e^r$ , 但其表现为在一个“带状”区域中, 因此, 考虑将所有试验样区的  $e^r$  与对应分辨率组成的点对视为一组数据, 对这组数据进行回归分析

得到  $e'$  与对应分辨率的函数关系  $f$ 。进一步,如果求  $f$  的反函数,则可以由已知  $e'$  求得所需要的分辨率。另外,需要找到“带状”区域的边缘线(分为上、下两条),先求算上部边缘线。计算时,先找出每一分辨率对应的  $e'$  最大值,一共得到 7 个点对,随后对这 7 个点对进行回归分析,得到最大  $e'$  与对应分辨率的函数关系  $f_1$ 。同理,需要找到“带状”区域的下部边缘线,通过回归分析可以得到最小  $e'$  与对应分辨率的函数关系  $f_2$ 。对  $f_1, f_2$  分别求反函数,则可以通过已知  $e'$  求得所需要的分辨率,计算公式如表 1 所示。表中,  $r_0, r_{0, \min}, r_{0, \max}$  分别是最可能、最小可能和最大可能分辨率,  $S_f$  为  $f$  的检验统计值。

表 1 试验样区适宜分辨率计算公式表

样区	分辨率	计算公式	相关系数	$S_f$	计算公式	相关系数	$S_f$
延川样区	$r_0/m$	$419.2967e^r - 6.2746$	0.861	0	$697.5025e_0^r - 2.9560$	0.933	0
	$r_{0, \max}/m$	$504.0565e^r - 4.5032$	0.959	0	$814.0255e_0^r - 3.3049$	0.976	0
	$r_{0, \min}/m$	$370.9775e^r - 9.4551$	0.925	0	$616.3712e_0^r - 4.3025$	0.965	0
绥德样区	$r_0/m$	$421.1676e^r - 8.5574$	0.859	0	$577.0221e_0^r - 8.2821$	0.940	0
	$r_{0, \max}/m$	$594.3092e^r - 8.8032$	0.959	0	$714.8354e_0^r - 3.3049$	0.976	0
	$r_{0, \min}/m$	$353.6672e^r - 9.8238$	0.965	0	$529.2362e_0^r - 10.0546$	0.980	0
富县样区	$r_0/m$	$387.1459e^r - 10.0487$	0.917	0	$699.0174e_0^r - 7.7505$	0.958	0
	$r_{0, \max}/m$	$500.5043e^r - 11.8085$	0.994	0	$803.5718e_0^r - 9.1154$	0.992	0
	$r_{0, \min}/m$	$306.3787e^r - 8.9929$	0.996	0	$587.5099e_0^r - 7.4718$	0.996	0

2.2.2 检验样区 对 3 大样区中的 16 个随机检验样区进行研究,发现 16 个随机检验样区的  $e'$  和  $e_0'$  都是关于分辨率  $r$  的线性函数,都可以写成  $e'(e_0') = ar + b$  的形式。同理,通过求反函数可以获得由已知  $e'$  和  $e_0'$  求算分辨率的方程。根据实际数据,取  $e'$  为 5.0%~22.5%,间距为 1.25%,可以根据回归方程的反函数计算检验样区  $e'$  所对应的分辨率。同时可根据表 1 计算出试验样区  $e'$  所对应的最大、最小、最可能分辨率。通过分析发现,在延川样区的 16 个检验样区中,对应于  $e'$  所需要的分辨率数值大部分处于表 1 公式计算范围之内。当  $e'$  在 5.0%~10.0% 时,有 1 个检验样区的计算出的个别分辨率比表 1 公式计算结果略小一些(限于篇幅图略)。在绥德和富县样区中的检验样区,对应于  $e'$  所需要的分辨率数值都处于表 1 公式计算范围之内。在 3 大样区随  $e'$  增大,对应分辨率所在的范围扩大。如果定义对于相同  $e'$ ,根据表 1 中回归方程的反函数计算出的分辨率,与根据检验样区方程反函数计算出的最可能分辨率之差的绝对值为  $e''$  计算误差,记为  $e''$ 。运用 SPSS 软件对  $e''$  进行统计分析发现,对于正态分布、指数分布、均匀分布、泊松分布等常见分布,  $e''$  均不服从,所以本文目前认为  $e''$  是随机分布的。另外,通过分析我们认为,已知误差  $e'$  较小时,检验样区的对应分辨率更加接近表 1 公式所计算的最小分辨率。另外,若取  $e_0'$  分别为 5.0%~17.5%,间距为 1.25%,可以根据表 1 中公式计算所对应的最大、最小、最可能分辨率。根据检验样区方程函数关系,可求出在 16 个检验样区  $e_0'$  由对应的分辨率。分析发现,在 3 大样区的 16 个检验样区,对应于  $e_0'$  所需要的分辨率数值都处于表 1 相应公式的计算范围之内,并且都围绕最可能分辨率分布。如果定义对于相同  $e_0'$ ,表 1 相应公式计算出的最可能分辨率与根据检验样区方程反函数关系求出的分辨率之差的绝对值为  $e_0''$  计算误差,记为  $e_0''$ 。通过运用 SPSS 软件进行统计分析,目前认为  $e_0''$  是随机分布的。将表 1 中  $e_0'$  和  $e'$  的求算公式正确程度做对比可以发现,在所有检验样区已知  $e_0'$  对应的分辨率都处于表 1 公式求算出来的分辨率范围之内,围绕最可能分辨率分布。综合前面的研究结果,本文认为  $e_0'$  在黄土丘陵沟壑区域可以作为衡量坡度面积百分比误差的总体指标,在试验样区基于统计方法得到的  $e_0'$  计算公式可以推广使用。在所有检验样区已知  $e'$  对应的分辨率大部分处于表 1 相应公式求算出来的分辨率范围之内,围绕最可能分辨率分布,分辨率差的绝对值为随机分布,所以认为  $e'$  指标只能作为辅助评价指标使用。同时由于样区的选择是随机的,所以认为本文所得到的表 1 中通用分辨率计算公式是可信的,可在本地地形区域推广使用。

3 结论

(1) 现有对 DEM 精度评价的指标多是对高程进行评价,形成了检查点法、剖面线法和等高线法等<sup>[14]</sup>。空间分辨率的变化会造成 DEM 提取坡度的不确定性变化<sup>[15]</sup>,所以提出了  $e'$  和  $e_0'$  指标,通过大量统计研究发现在黄土丘陵沟壑区的  $e'$  和  $e_0'$  指标与分辨率具有很好线性关系,可望为实际水土保持工

作部门提供参考. 相对来讲,  $e'_0$  指标的评价可靠性更强,  $e'$  指标可以作为辅助评价指标. (2) 本文提出根据误差  $e'$  和  $e'_0$  计算所需要的分辨率经验公式, 并通过了实际检验. 研究结果可以为实际工作中选定分辨率提供科学依据, 同时对于节约成本具有实际意义. (3) DEM 的比例尺、数据的组织方式、建立的工艺方案对 DEM 提取坡度的面积误差也具有重要影响因此, 研究可以继续深化, 通过扩大研究样区, 考虑更多的因素, 发现更加普遍的规律. (4) 本文还在风沙-黄土过渡区域选取神木样区, 在黄土残塬区选取宜君样区进行研究, 认为  $e'$  和  $e'_0$  随分辨率变化而变化的规律并不明显, 需要提出更加普适的指标.

参 考 文 献

1 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 2002. 235  
2 汤国安, 赵牡丹, 李天问, 等. 提取黄土高原地面坡度的不确定性[ J ]. 地理学报, 2003, 58( 6 ): 824~ 830  
3 Carter J. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs[ J ]. Cartographica, 1992, 29( 1 ): 22~ 34  
4 Chang K, Tsai B. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping[ J ]. Cartography and Geographic Information Systems, 1991, 18( 1 ): 69~ 77  
5 Florinsky I V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation model[ J ]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12( 1 ): 47~ 61  
6 Gao J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro scale[ J ]. Int J Geographical Information Science, 1997, 11( 2 ): 199~ 212  
7 Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil landscape modelling[ J ]. Geoderma, 2001, 100( 1-2 ): 67~ 89  
8 Walker J P, Willgoose G R. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology[ J ]. Water Resources Research, 1999, 35( 7 ): 2 259~ 2 268  
9 陈楠, 汤国安, 刘咏梅, 等. 基于不同比例尺的 DEM 地形信息比较[ J ]. 西北大学学报( 自然科学版 ), 2003, 33( 2 ): 237~ 240  
10 陈楠, 林宗坚, 李成名, 等. 1: 10 000 及 1: 50 000 比例尺 DEM 信息容量的比较[ J ]. 测绘科学, 2004, 29( 3 ): 39~ 41  
11 陈楠, 林宗坚, 李成名, 等. 基于信息论的不同比例尺 DEM 地形信息比较分析[ J ]. 遥感信息, 2004, 75( 3 ): 5~ 9  
12 陈楠, 林宗坚, 汤国安, 等. 数字高程模型的空间信息不确定性分析[ J ]. 测绘通报, 2005, ( 11 ): 14~ 17  
13 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 自 DEM 由不同算法提取坡度的对比分析[ J ]. 测绘工程, 2006, 16( 1 ): 6~ 9  
14 李志林, 朱庆. 数字高程模型[ M ]. 武汉: 测绘科技大学出版社, 2000. 105~ 106  
15 陈楠, 汤国安, 朱江春. 不同空间分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究[ J ]. 水土保持研究, 2006, 13( 3 ): 153~ 156

The Influence of DEM with Different Resolutions on the Precision of the Slope Extracted in the Loess Plateau

Chen Nan<sup>①</sup> Wang Qinmin<sup>①</sup> Tang Guoan<sup>②</sup>

( ① Spatial Information Research Center, Fuzhou University, 350003, Fuzhou, China;

② Geography Information Science Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China)

**Abstract** The author takes Yanchuan, Suide, and Fu County which are different in physiognomy in the Loess Plateau as the sample areas of the study and DEM with different horizontal resolutions is established according to the map scaled at 1 : 10 000 as the object of the research. For each sample area, the variation rules of the area errors of slopes derived from DEM with different horizontal resolutions are analyzed and the indexes of the total error of weighted area percentage and the total error of average area percentage are proposed for the first time. The linear relationship between the two indexes and different resolutions is obtained in 20 test areas. By adopting this model, the needed range of the horizontal resolution can be calculated. The model of the linear relationship has passed the test in 16 randomly selected test areas. The establishment of the model will provide basis for selecting proper horizontal resolutions in practice. It also has significance in decreasing the amount of data and cutting down the cost while ensuring the accuracy of slope information. The above two indexes are not appropriate for the transitional loess regions.

**Keywords** DEM, slope, error, resolution, loess plateau