

不同空间分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究

陈楠¹, 汤国安², 朱红春³

(1. 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福州 350003;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 3. 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要:运用信息论与统计学一些指标及比较分析的方法,以 1:1 万 DEM 为研究对象。定性地分析了在黄土丘陵沟壑区 DEM 空间分辨率对所提取的坡度信息的不确定性影响,并建立了定量的计算公式。研究提出了不同分辨率提取坡度面积的误差评价指标,并找到了一个经验公式,该公式可以根据现有误差计算所需要的分辨率大小,这可以在保证坡度信息精度条件下减小数据量,节约成本。

关键词:数字高程模型;不确定性;坡度;误差

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)03-0153-04

The Study on the Uncertainty of Slope Information Derived from DEM with Different Spatial Resolutions

CHEN Nan¹, TANG Guo an², ZHU Hong chun³

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

2. College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Taking DEM of 1:10000 map scaled as the research object and adopting entropy and some indexes and comparing methods in statistics. A qualitative analysis of the effects of spatial resolutions on the uncertainty of the derived slope in loess hill and gully area information is conducted with the quantitative mathematical formula established. The study proposes the evaluating criteria of the area errors of slope derived from DEM with different spatial resolutions. An experience formula is found that can be used to compute the resolution needed according to current errors, which will decrease the quantity of data and cut down the cost while ensuring the accuracy of slope information.

Key words: DEM; uncertainty; slope; error

数字高程模型 (Digital Elevation Model, 简称 DEM) 是区域地面高程的数学表示,是地理信息系统中赖以进行地形分析的核心数据系统。近年来,随着诸多高新技术的运用,在数字高程模型数据采集与数据精度控制上有了长足的进步,然而,人们在数字高程模型数据不确定性问题的研究却相对落后于应用的要求。各类数字高程模型误差的存在,不同程度地降低了 GIS 分析与应用结果的精确性^[10]。

我国不同比例尺 DEM 大多是以相应比例尺地形图为基本信息源数字化获得的,由于地形图制图综合以及数据组织方式、内差方法等方面的影响,根据不同比例尺与不同空间分辨率的 DEM 获取的地形因子信息无疑存在着明显的差异和较为复杂的不确定性^[2~4]。研究基于前人的研究成果,着重研究空间分辨率对 DEM 提取坡度不确定性影响。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又充分顾及计算机容量与处理能力的 DEM 分辨率,无疑是科学家一直追求的目标^[6]。

在陕北黄土丘陵沟壑区,地面支离破碎,地形变化异常复杂,不同空间分辨率提取坡度信息存在更加典型的不确定性问题^[5],同时在本区域的国家“山川秀美”工程以及水土流失治理工作也迫切需要提供准确的坡度等基础地形因子信息,因此我们在此区域展开研究。汤国安等通过对黄土丘陵沟壑区不同分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究,提出利用坡度转换图谱进行不同分辨率坡度因子纠正方法,并指出对于 1:1 万比例尺 DEM,5 m 是保证该地区地形描述精度的理想分辨率尺度^[5,6]。但是目前对于 DEM 地形因子不确定性程度未提出衡量的指标。而不确定度与置信概率有关,置信概率的选取受主观因素的影响,导致同一问题人们得到的不确定度指标可能不同,这会造成 GIS 中元数据标准的不一致性,而信息论的熵不确定度能够唯一地确定,与置信概率的选取无关^[11],因此本文试图运用信息论中的相关概念做相应的探索。本研究以 1:1 万 DEM 5 m 分辨率所提取的坡度数值为真实值,分析其它空间分辨率下坡度因子的不确定性程度,试图提出不确定性的评价因子同时找到误差指标与分辨率间的数学关系。研究将为黄土丘陵沟壑区实际水土

收稿日期:2005-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40271089)、(40301027);教育部科研基金重点项目(01111)

作者简介:陈楠(1975-),男,福建厦门人,博士,从事地理信息系统方面研究。

保持工作中选取适宜的空间分辨率的提供科学依据。

1 实验样区及信息源

试验样区位于陕西省绥德县韭园沟流域内,位于东经 110°15'00" ~ 110°22'30", 北纬 37°32'30" ~ 37°37'30", 区域内沟壑纵横、地貌破碎,是典型的梁峁状黄土丘陵沟壑区,属于侵蚀强烈的地区。同时韭园沟流域也是黄委会水土保持重点试验区之一,多年来积累了大量有关基础资料,有利于研究工作的开展。我们将样区分为试验样区和检验样区,先在试验样区进行研究总结规律,随后在检验样区进行检验,测试在相同地貌类型区域该规律是否可以推广使用。下图中 1,2 方框内为检验样区,方框内为试验样区。

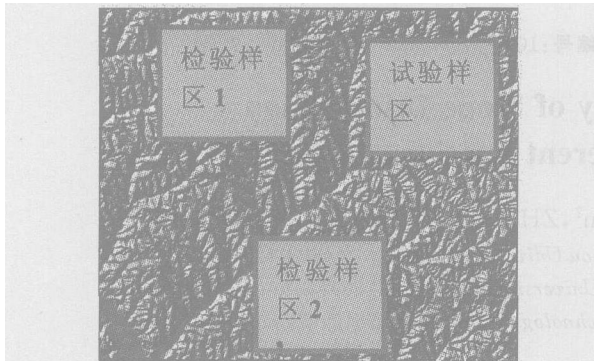


图1 试验样区和检验样区

研究采用国家测绘部门编制的 1:1 万地形图(等高距为 10 m)作为建立的基本信息源,按照国家标准和操作规程通过原图扫描、等高线数字化、再经过高程内差建立相应的,水平分辨率分别为 5 m、15 m、25 m、35 m、45 m、55 m、65 m、75 m。基于 1:1 万地形图建立的 5 m 分辨率等高线谷脊部位水平位移为 1.038 7 m,平滑部位水平位移为 0.280 7 m,高于国家标准(全国等高线水平位移平均值为 0.341 3 m),完全能够真实地表达实际地形地面。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^[7]。坡度是描述地形形态及获取其它地形因子的重要基础数据,坡度的变化会引起一系列的相关变化。因此研究不同空间分辨率中地面坡度的变化是重要的工作。

2 实验结果及分析

2.1 分辨率对坡度的影响

研究应用 ARC/VIEW 地理信息系统软件平台,根据 Borrough. P. A 提出的窗口微分分析法(曲面拟合法)计算坡度。即坡度的计算是在 3 × 3 的 DEM 栅格窗口中进行的,窗口在 DEM 数据矩阵中连续移动后完成整幅图的计算工作。所获得的坡度按照水土保持工作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°。以下图表中 1 ~ 9 序号对应坡度的 9 个分级级别。通过改变 1:1 万 DEM 分辨率,可以得到不同的坡度占总面积百分比数据,见图 2。

观察图 2 可以看出,随着分辨率增大坡度的总体取值范围在缩小从较高的坡度(7 ~ 9 级别对应于 35 ~ 90°)来分析,随分辨率增大,其所提取的高坡度范围均在单调减小,尤其是当分辨率大于 35 m 后,8、9 两级别的面积都小于 0.1% 以至于零。这说明随栅格尺寸变大较陡坡度被概括,空间分辨率的变化对于陡坡的概括作用是明显的。由于当 7 ~ 9 级别坡

度的区域被概括后转为中等坡度,因此随着分辨率的增加坡度曲线的波峰部左移,先向第 5 级别集中,同时第 4 级别也有相应的升高,当分辨率为 55 m 时候第 5 级别集中达到最高,随后表现为向第 4 级别集中,因此可以得出分辨率的变化对于不同坡度概括作用是不同的。另外,虽然随着分辨率增大第 6 级别坡度面积先有所上升,但总体趋势是在减小的,因此这对第 6 级别坡度的概括应该属于第 7 ~ 9 级别类型。

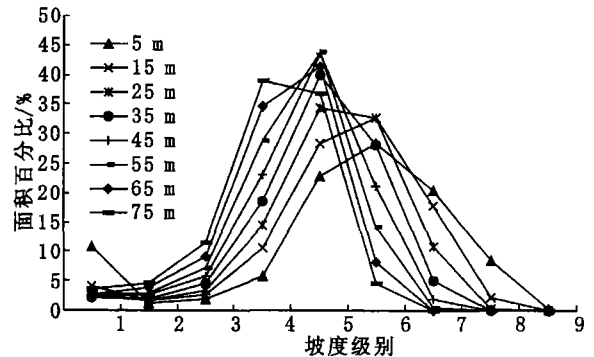


图2 不同分辨率 DEM 提取坡度面积曲线对比图

同时,随着分辨率的增大,第 1 级别面积先减小,当分辨率为 45 m 时面积达到最小,随后又缓慢增加,但是 75 m 分辨率时第 1 级别区域的面积数量只占 5 m 分辨率第 1 级别区域的面积数量的 33.36%。这说明随着栅格尺寸变大,起初一些微小地形起伏被概括,造成第 1 级别面积减小。然而我们知道,栅格尺寸超过一定大小,地面许多区域又被概括成平坦或接近平坦的区域,这就导致第 1 级别区的面积又开始攀升,这是一种与陡坡度区域不同的概括特征。

观察图 2 还可以发现随着分辨率的增大第 2、3 级别区域面积在增大。本文认为有两方面的原因:一方面是由于第 1 区域的微小起伏地形被概括转化而来,另一方面是相对于本区域的高坡度区域被概括趋向于平坦化而造成的本区域面积增加。可见,分辨率的增加总体会造成陡坡区域缩小及坡度向中等坡度集中,平缓坡区域先减少后增加。即分辨率的增加会使得坡度图数据量减小,更加反映出地形大的起伏轮廓,但是这是以损失陡缓两坡度级别的真实区域面积和增加中等坡度的虚假面积为代价的。

本文发现,分辨率的变化对于不同坡度概括作用是分段不同的。因此试图提出一种研究方法、指标来精确地衡量这种分段概括能力,这对于指导我们正确选用分辨率具有意义。

如果将图 2 所对应的数据排列成表格,每行为不同的坡度级别(从 1 ~ 9 共 9 行),每列为不同的分辨率(从 5 m,到 75 m 共 8 列),进行行间相关系数分析得到相关系数矩阵(9 行 9 列)。如果提取紧邻对角线并与之平行的线上各相关系数依次排列获得一组数据。这组数据依次是第 2 级别区域起,第 i 级别区域面积组合与第 $i-1$ ($i=2,3,4,\dots,9$) 级别面积组合的相关系数。把他们按照顺序作出相关系数变化图,见图 3。

图 3 中相关系数突降是表示上下两行坡度面积变化组合相似性较低,据此可以把分辨率对坡度的分段概括能力分为 3 类。分别为:第 1 级别型、第 2 ~ 5 级别型、第 6 ~ 9 级别型,这与我们实际的图形分析是吻合的,说明这种分类方法是可行的。由此得到量化研究 DEM 对坡度分段概括能力的一条思路。

以上是从不同的坡度分级来研究空间分辨率对 DEM 提取坡度不确定性的影响。接下来可以借助统计学的指标和信息论的相关概念从总体分析分辨率对坡度不确定性的影响。研究中所涉及的熵等概念见参考文献^[8]。

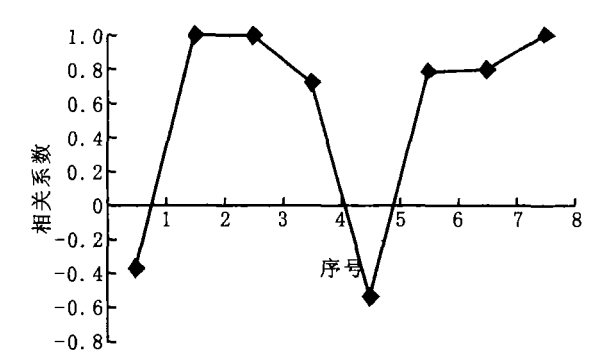


图 3 相关系数变化图

分辨率统计项	5 m	15 m	25 m	35 m	45 m	55 m	65 m	75 m
标准差	0.1036	0.1238	0.1361	0.1440	0.1501	0.1542	0.1570	0.1558
标准峰度系数	-1.1464	-0.5945	-0.2475	0.5004	1.5942	1.5236	0.6922	0.3482
熵	2.5672	2.3777	2.2244	2.1437	2.0839	2.0365	1.9991	2.0024

从表 1 可以看出,总体来看随着空间分辨率增大,坡度面积的标准差总体趋势在增大,但是到 65 m 分辨率后相对略有减小。由此可见随分辨率增大,即栅格尺寸增大,许多微小的地形起伏被概括,陡坡度趋向平坦化,所获得坡度集中程度增加。而且通过计算知道标准差是分辨率的二次函数(可以用公式 $y = -1.5 \times 10^{-5} x^2 + 0.0019x + 0.0967$ $R^2 = 0.9931$ 表示这一规律),分析函数的曲线可以知道在分辨率增加的初期标准差增大相对较快,随后标准差的增加速度逐步减缓,这说明分辨率在不同小时其单位变化造成的总体坡度偏差也是不同的,即概括能力是不同的。分辨率相对较小时分辨率每一个单位的变化造成提取的坡度总体偏差较大,反之偏差较小。这一规律有深入研究的价值,它提示我们在为 DEM 选取小分辨率时候更加需要精确的选取准则。标准峰度系数(以下简称峰度)也在随分辨率的增大先增大,揭示了坡度的组合数据曲线更加陡峭,其趋势是向比正态分布更加集中的方向发展,坡度更加集中于中等坡度大于 55 m 分辨率后,峰度仍旧大于零但略有减小,表明仍然比正态分布曲线陡峭,但是集中程度有所降低。这是因为分辨率超过一定大小后,一些区域被概括反而趋向平坦,这对于整体坡度向中等坡度集中是一种分散的趋势,因此峰度有所减小。

由于我们已经按照水土保持分类方法进行了分类,所以不同坡度级别已经成为离散信息源。而离散信源的不确定性与两个因素有关:基本事件(或可能结果)的数目大小和概率分布的均匀程度。一般来说,可能结果的数目越多,概率分布越均匀,不确定性越大。则等可能性事件的系统具有最大的熵,而只具有确定事件的系统其熵为零^[8]。因此可以运用信息论的熵来表征不同分辨率下,坡度因子的总体变动状况。观察表 1 可以得出,随着分辨率的增大,坡度组合熵在单调减小,说明坡度组合的不确定性在减小,很明显这是坡度集中引起的但是减小并非是线性的而是呈现开口向上的二次函数曲线的形状,可以用公式表达如下:

$y = 0.0001x^2 - 0.0193x + 2.6438$ $R^2 = 0.9942$ (1)
式中: y ——坡度组合熵即坡度分布的不确定性程度的度量;
 x ——DEM 的空间分辨率,单位为 m。函数特性可以说明在分辨率变化的不同阶段,DEM 坡度组合的不确定性变化的敏感性是不同的;在分辨率较小时,不确定性变化较敏感,分辨率较大时相反。这是与前面的标准差,峰度的分析结果相互应证的。说明引入信息熵的概念来研究 DEM 提取坡度不确定性是可行的。对(1)式两边求导则有:

$y = 0.0002x - 0.0193$ (2)
根据导数的定义知道 y 表示分辨率的微小变化造成的不确定性变化,因此可以将 y 称为分辨率影响力因子。这样式(2)即是黄土丘陵沟壑区域 1:1 万 DEM 分辨率对其所提取的坡度不确定性影响的定量公式,公式可以精确衡量分辨率对不确定性影响的程度。

2.2 误差与分辨率的函数关系

前面只是分析了坡度的变化特征,但是需要拿出一个指标来衡量坡度误差究竟有多大,而且指标应该是分辨率的函数。如果能找到这个函数,那么通过该函数的反函数就可以由已知误差求得所需要的分辨率大小。这样我们在提取坡度时候可以根据实际需要的误差精度计算出究竟需要多大的分辨率,避免了分辨率选取的任意性,同时在保证精度的前提下作到成本的最大节约。

现在考虑,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,最简单的参数就是将不同分辨率的不同级别坡度面积向量与 5 m 分辨率的不同级别坡度面积向量相减(简称 5 m 坡度面积向量),得到不同级别坡度面积的绝对误差(简称坡度绝对误差)。随后将坡度绝对误差除以 5 m 坡度面积向量得到不同坡度的相对误差(简称坡度相对误差),坡度相对误差根据 5 m 坡度面积向量进行加权则得到一个加权总体误差。我们就采用这加权总体误差指标表示不同分辨率 DEM 所提取坡度的面积精度评价指标。值得注意的是由于实际的坡度绝对误差可以为负数,在它们累加时候会出现正负相抵的情况,因此我们取绝对误差的绝对值随后计算相对误差。计算公式如下:

5 m 分辨率坡度面积向量用 P^5 表示, $P^5 = [p_1^5, p_2^5, \dots, p_8^5]$, p_i^5 下标表示不同的坡度级别 i ,上标 5 表示分辨率数值, p_i^5 数值为第 i 级别坡度的面积,其余类推。如果用 S 表示研究区总面积,用 r 表示 DEM 空间分辨率,则加权总体误差可以表达为

$$r = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\frac{|p_i^r - p_i^5|}{p_i^5} \times p_i^5 \right) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 |p_i^r - p_i^5| \quad (r = 15, 25, \dots, 75)$$

现在求法则 f ,使得 $r = f(r)$ 。另外还可以定义平均总

体误差,其表达式为 $r_0 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{|p_i^r - p_i^5|}{p_i^5}$, ($r = 15, 25, \dots,$

75), 同样求法则 f_0 ,使得 $r_0 = f_0(r)$ 。通过对试验数据的计算可以得到以下结果,见图 4。求图 4 中两关系式的反函数可以得到公式(3)、(4)如下。因此,根据前面分析,当我们已经知道误差的大小,可以通过以下公式(3)、(4)求出所需要 DEM 分辨率。

$$r = 36.765 r_0 - 0.75368$$
 (3)

$$r = 65.789 r_0 - 8.6974$$
 (4)

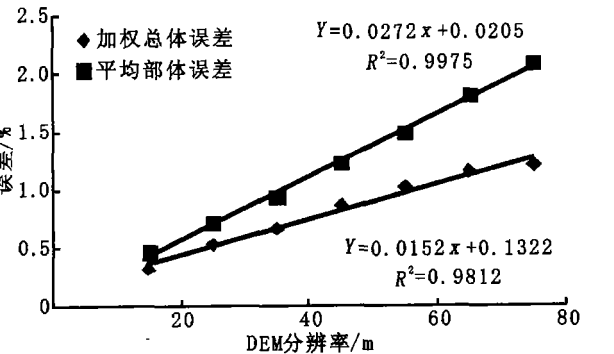


图 4 误差与分辨率关系曲线图

2.3 关系式的检验

在本流域选取任意两块区域作为检验样区,见图1。根据实际工作需要,取加权总体误差分别为0.5%~2%,利用以上公式(3)(4)分别计算所需要的最大DEM空间分辨率。随后在检验样区按照计算出来的空间分辨率建立DEM提取坡度,如果所提取的坡度加权总体误差仍然非常接近公式计算的误差,则说明本公式可以在黄土丘陵沟壑区可以推广使用(平均相对误差也使用同样方法进行检验)。表2是根据公式(3)(4)计算出来的不同误差所对应的分辨率。

表2 误差及对应分辨率数据表

加权总体误差/%	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
所对应分辨率/m	8.4	17.6	26.8	36.0	45.2	54.4	63.6	72.8	82.0	91.2
平均总体误差/%	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
所对应分辨率/m	7.8	24.2	40.6	57.1	73.5	90.0	106.4	122.9	139.3	155.8

随后按照表2的分辨率在检验样区建立DEM提取坡度,计算其误差,进行检验样区结果数据与通用公式对应数据之间的差异显著性检验。选用SPSS软件,进行t均值检验,显著性水平均为0.05,检验结果如下表:

表3 检验样区相关数据表

DEM分辨率/m	8.4	17.6	26.8	36.0	45.2	54.4	63.6	72.8	82.0	91.2	t统计量
加权总 检验样区1	0.24	0.49	0.76	1.01	1.14	1.52	1.92	1.91	2.44	2.23	-0.03
体误差/% 检验样区2	0.24	0.48	0.73	0.97	1.19	1.47	1.81	2.21	2.14	2.65	0.04
DEM分辨率/m	7.8	24.2	40.6	57.1	73.5	90.0	106.4	122.9	139.3	155.8	t test
平均总/ 检验样区1	0.24	0.48	0.81	0.90	1.22	1.48	1.79	1.95	2.02	2.56	-0.09
体误差 检验样区2	0.28	0.46	0.71	1.08	1.28	1.66	1.70	2.18	2.41	2.57	0.16

参考文献:

- [1] 李大军,龚健雅,邹时林,等.未知误差分布的熵不确定度[J].测绘通报,2002,(12):5-7.
- [2] 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,2003,33(2):237-240.
- [3] 陈楠,林宗坚,李成名,等.1:10000及1:50000比例尺DEM信息容量的比较[J].测绘科学,2004,29(3):39-41.
- [4] 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.
- [5] 汤国安,陈楠,柳咏梅,等.黄土丘陵沟壑区1:1万及1:5万比例尺DEM地形信息容量对比[J].水土保持通报,2001,21(2):34-36.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 朱雪龙.应用信息论基础[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [9] 阎国年,钱亚东,陈钟明.基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿技术[J].地理科学,1998,18(6):567-573.
- [10] Tang Guan. A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models[M]. Beijing and New York: Science Press, 2000.

(上接第152页)

(3)桩受荷变形后,反馈影响桩周岩土体会导致荷载的调整和应力重分布。其实这是所有桩基所共同面对的问题,而不是抗滑桩所独有的问题。抗滑桩桩身上所承受的荷载是由于滑坡体的运动而引起的,它与有无桩的存在、以及桩的形状、数量和布置均有关,是变化的。所以抗滑桩应该属于被动桩的范畴^[5],必须将桩-土体系当作整体来考虑。关于被动桩的工作机理,迄今还未有较系统成熟的理论描述,这也是今后抗滑桩设计中需要重点研究的一个课题。

参考文献:

- [1] 铁道部第二勘测设计院.抗滑桩设计与计算[M].北京:中国铁道出版社,1983.32-65.
- [2] 刘金砺.桩基础设计与计算[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.182-187,189-206.
- [3] 刘兴远,等.桩基工作特性分析的神经网络模型[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.114-118.
- [4] 中华人民共和国行业标准.建筑桩基技术规范(JGJ94-94)[S].北京:中国建筑工业出版社,1995.110-129.
- [5] 林天健,等.桩基础设计指南[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.24-26,160-161.
- [6] 贺建清,等.弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):600-602.
- [7] 罗一农.抗滑桩设计中几个问题的商榷[J].路基工程,1997,(6):9-13.

通过查t分布表知道,计算所得的t统计量绝对数值均远小于检验数值2.101,即通过了t检验。所以认为2个检验样区的数据与通用公式的计算数据之间差异不显著,即本通用方程是可以使用的。

3 结 论

(1)空间分辨率的变化会造成DEM提取坡度的不确定性变化。但是这种不确定性变化是有规律的,坡度向中等坡度集中,陡坡区域缩小,平缓坡区域先减少后增加。表现为坡度组合熵在减小,标准差在增大。

(2)分辨率的变化对DEM坡度的概括是分段不同的,即对不同的坡度有不同的特点。根据对现有统计资料的定性分析可以将这种概括能力分为三类,同时本文提出了相关系数分析方法从定量的角度研究了分段概括能力,所得到的结论与定性分析完全吻合,说明这种方法是可行的。同时本文提出了黄土丘陵沟壑区1:1万DEM分辨率对其所提取的坡度不确定性影响的定量计算公式。

(3)本文提出了DEM提取坡度加权总体误差与平均总体误差的概念及计算方法,并找到了根据误差计算所需要的分辨率的经验公式,公式通过了实际检验。这对于实际工作选定分辨率提供了科学依据,同时对节约成本具有实际意义。

(4)DEM的比例尺、数据的组织方式、建立的工艺方案对DEM提取坡度的不确定性也具有重要影响,因此本研究可以继续深化,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 结 语

抗滑桩这种抗滑支挡结构物已经成为滑坡防治工程中一种重要的工程措施。如何将现今抗滑桩设计中存在的问题加以深入分析和解决,使抗滑桩的设计理论和方法更加完善和合理已日益成为众多学者研究的焦点。对这些问题的解决,将对抗滑桩设计理论和方法的推进乃至整个滑坡防治工程技术的推进都将起到举足轻重的作用。