

DEM 尺度变换中直方图相似度计算与应用^{*}

牛亮, 杨勤科

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 基于 DEM 尺度变换生成的不同栅格尺寸 DEM 分辨率确定的需求, 采用直方图相似度计算方法, 将不同栅格尺寸 DEM 同不同比例尺地形图对应分辨率的 DEM 进行对比, 从而确定尺度变换生成 DEM 的分辨率。采用了 4 种不同的相似度计算方法, L_1 距离, L_2 距离, X^2 距离和直方图的交, 实验结果表明直方图的相似度计算可以有效地确定相似的 DEM 数据, 从而确定 DEM 的分辨率。4 种计算方法, L_1 距离比直方图的交有更广的适用范围, 比 L_2 距离、 X^2 距离更加直观。

关键词: 直方图; 相似性度量; 数字高程模型尺度变换; 分辨率

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0120-06

Calculation and Application of Histogram Similarity Measure in DEM Scaling

NIU Liang, YANG Qin-ke

(College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Based on the needs that determination of resolution of the different cellsize DEM generated by DEM scaling, using histogram similarity method of calculation, the DEMs with different grid sizes compare to the DEMs of the topographic maps with different scales corresponding resolution to determine the DEM resolution generated by scaling. In this paper, four different similarity calculation method, L_1 distance, L_2 distance, X^2 distance, and the histogram intersection, experimental results show that the similarity calculation of the histogram can effectively determine the similarity of the DEM data to determine the DEM resolution. Four kinds of calculation, the L_1 distance than the histogram intersection has a broader scope of application and more intuitive than the L_2 distance and X^2 distance.

Key words: histogram; similarity measure; DEM scaling; resolution

研究表明, DEM 及其基础上提取的地形要素因受到水平分辨率的强烈影响, 表现出明显的尺度效应。认识理解尺度效应, 是有效利用 DEM 数据资源, 准确提取适应与应用尺度和目的地形数据的基础^[1]。基于多种比例尺地形图生成的多种分辨率的 DEM(原生 DEM) 为尺度效应研究提供了基础, 但由于不同比例尺地形图之间并不具备完全相同的定位控制基础, 限制了研究。为此, 研究者通过对高分辨率 DEM 进行变换方法生成多种分辨率(或者栅格)的 DEM 数据。常见方法包括重采样^[2-4]、小波变换^[5-6]、空间滤波^[1]等。在这些方法中, 如何将变换结果与原生 DEM 的分辨率建立联系, 也就是说

如何确认变换结果的分辨率, 是一个有待研究解决的问题, 其中直方图的相似性比较是一个有效方法。

基于 1: 1 万数字地形图数据插值建立多种栅格尺寸的 DEM, 通过直方图相似度比较找到与 1: 5 万、1: 10 万、1: 25 万原生 DEM 等分辨率的 DEM, 为坡度的尺度效应分析研究和中低分辨率 DEM 坡度的变换提供依据。

1 数据基础和研究方法

1.1 研究区域与数据基础

本研究工作是在黄土高原中部延河流域的二级支流县南沟流域内进行的。研究区为典型的黄土丘

* 收稿日期: 2010-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(40971173); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB407203)

作者简介: 牛亮(1981-), 男, 陕西省泾阳县人, 在读硕士研究生, 主要从事基于 GIS 的区域水土流失评价。E-mail: niuliang730@yaho.com.cn

通信作者: 杨勤科(1962-), 男, 陕西省陇县人, 教授, 博士, 主要从事基于 GIS 的区域水土流失研究。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

陵,地面起伏较大。基于 10 m 分辨率 DEM 的坡度图统计表明,坡度大于 25° 的地面约占总土地面积的 50%。研究所用基础数据为:(1) 1: 1 万、1: 5 万、1: 10 万和 1: 25 万四种不同比例尺的数字化地形图,等高距分别为 5 m、20 m、40 m 和 100 m,与之对应的原生 DEM,分辨率应分别为 5 m、10 m、25 m 和 50 m^[7-9],标记为 DEM_{5a}、DEM_{10a}、DEM_{25a}、DEM_{50a}。

1.2 研究方法

本研究基于 1: 1 万数字化地形图,生成多种栅格尺寸的 DEM,然后通过与原生 DEM 的对比,使分辨率得到匹配,方法如下。

1.2.1 多种栅格 DEM 生成 为了弄清地形形态及其与坡面流水的关系,本研究采用 ANUDEM^[10-11] 软件对 1: 1 万数字化地形图进行空间插值,生成栅格尺寸为 10 m、20 m、25 m、30 m、40 m、50 m、60 m 和 70 m 的 DEM,分别标记为 DEM_{10b}、DEM_{20b}、DEM_{25b}、DEM_{30b}、DEM_{40b}、DEM_{50b}、DEM_{60b}和 DEM_{70b}。所用参数设置为第二粗糙系数 0.5,迭代次数 40。

1.2.2 DEM 相似性比较参数计算 通常比较两个 DEM 之间的相似性和差异性是在比较图像统计特征基础上,通过观察来实现的^[1]。本文引入直方图相似度指数和逼真度指数,以便客观进行比较。

(1) 统计特征: 将 DEM 看成简单的矩阵,利用经典统计学统计其特征变量,包括:最小值、最大值、平均值、标准差、众数等,并计算信息熵^[12]。

(2) 直方图相似度: 直方图是数字图像的重要特征之一,反映图像(或其中一部分区域)的灰度的总体分布信息。在图像变换中,变换前后 2 幅图像的相似程度通常用直方图相似性来度量。直方图相似度指数包括:

①距离直方图相似度指数: 直方图相似性度量通常是基于 2 幅直方图相同窗口之间的距离或经过变换后的一些距离标准,如 L₁ 距离(曼哈顿距离)、L₂ (欧几里得距离)距离、x² 距离等^[13],这些方法侧重于衡量两幅图像的差异,得到的距离越小表示两幅图像越相似。其中 L₁、L₂ 和 x² 距离的计算公式为:

$$L_1 \text{ 距离} = \sum_{i=0}^n |g(i) - h(i)| \quad (1)$$

$$L_2 \text{ 距离} = \left[\sum_{i=0}^n |g(i) - h(i)|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$x^2 \text{ 距离} = \sum_{i=0}^n \frac{|g(i) - h(i)|^2}{g(i) + h(i)} / 2j \quad (3)$$

对于频率直方图,L₁ 距离的取值范围是[0, 2], L₂ 距离的取值范围是[0, $\sqrt{2}$], x² 距离的取值范围是[0, 1], 值为 0 时最相似, 值为最大值时最不相似。

为了统一规范化相似性距离度量函数的取值范围,将两幅图像的相似度定义在[0, 1]之间,值越接近 1 则图像越相似。对于累计频率直方图而言,统一规范化相似性距离度量函数的取值范围比较困难,直接采用距离来判定相似性,距离越小越相似。

$$L_1 \text{ 距离相似度} = \frac{2 - L_1 \text{ 距离}}{2} \quad (4)$$

$$L_2 \text{ 距离相似度} = \frac{\sqrt{2} - L_2 \text{ 距离}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$x^2 \text{ 距离相似度} = \frac{1 - x^2 \text{ 距离}}{1} \quad (6)$$

②相交直方图相似度指数。另一种方法称为直方图的交^[14],对于归一化的直方图,其具体计算公式如下:

$$D(X, Y) = \sum_{i=0}^n \min(x^i, y^i) \quad (7)$$

直方图的交运算就是取两幅图像的特征直方图在各个数值级上的较小值,累加即表示图像之间的相似程度。这种相似性实际上表示两幅图像在该直方图特征意义下的公共部分。 $0 \leq D(X, Y) \leq 1$, 它的值越大,则两幅图像越相似,如果两幅图像完全一致,则 $D(X, Y) = 1$ 。

(3) 图像逼真度指数。图像逼真度,是描述待对比图像是否存在较大误差的一个重要技术指标^[15],本文根据公式(5)计算,以逼真度接近数值 1 的程度作为处理前后图像的近似性度量^[15],越接近于 1,逼真度越高,反之越小。

$$S = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I_{ij} \times I'_{ij}) / [\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I_{ij}^2)]}{\quad} \quad (8)$$

式中: I ——原生 DEM 的坡度和曲率; I' ——多栅格 DEM 的坡度和曲率; I_{ij} ——原生 DEM 的坡度和曲率的第 i 行 j 列栅格单元的值; I'_{ij} ——多栅格 DEM 的坡度和曲率第 i 行 j 列栅格单元值。

1.3 试验步骤

本研究的试验只要包括 DEM 生成、统计表、直方图相似度和逼真度计算、分析比较等。工作流程如图 1 示。

(1) DEM 生成。将经过质量检查编辑好的 1: 1 万、1: 5 万、1: 10 万、1: 25 万数字地形图分别输入到 ANUDEM 软件中,所采用的主要参数是第二粗糙系数 0.5,迭代次数 40。1: 1 万选择的栅格尺寸分别为 10 m、20 m、25 m、30 m、40 m、50 m、60 m 和 70 m,生成标记为 DEM_{10b}、DEM_{20b}、DEM_{25b}、DEM_{30b}、DEM_{40b}、DEM_{50b}、DEM_{60b}和 DEM_{70b}的多栅格 DEM。1: 5 万、1: 10 万和 1: 25 万地形图根据基于信息含量确定相应分辨率分别为 10 m、25 m

和 50 m, 生成对应分辨率 DEM, 分别标记为: DEM_{10a}、DEM_{25a}、DEM_{50a}。

(2) 坡度和曲率的生成及统计参数比较。在 ARCGIS 软件中分别对所有的 DEM 求取坡度和曲率, 并记录各坡度和曲率的空间统计特征参数, 包括最小值、最大值、平均值、标准差、众数和信息熵。通过比较各统计特征参数, 找到统计特征参数最为相似的两个坡度或者曲率。

(3) 坡度和曲率直方图相似度计算。生成坡度和曲率做频率和累计频率图。频率和累计频率图实质上也是直方图的表现形式。通过直方图相似度 L₁ 距离、L₂ 距离、 χ^2 距离和直方图交四种方法分别计算基本比例尺 1: 1 万地形图生成 DEM 的坡度、曲率的频率和累计频率与 1: 5 万、1: 10 万和 1: 25 万地形图生成 DEM 的坡度、曲率的频率和累计频率的相似度, 从而分别找到与 1: 5 万、1: 10 万、1: 25 万比例尺 DEM 的最为相似的 1: 1 万比例尺插值 DEM 的栅格尺寸。

(4) 坡度和曲率的直方图逼真度计算。在 ArcGIS 软件中, 先使用重采样工具对多栅格 DEM 重采样生成目标分辨率 DEM 的栅格大小, 使用栅格计算器进行栅格计算得出相应参数, 带入到公式 (8) 中得到逼真度值。

(5) 分辨率匹配。根据统计参数、直方图相似度、逼真度分别将多栅格 DEM 与多分辨率 DEM 进

行匹配, 根据结果得出相关结论。

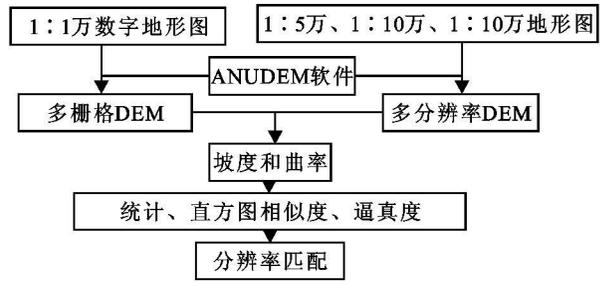


图 1 研究技术路线图

2 结果与分析

2.1 坡度和曲率的统计特征参数

坡度和曲率统计特征参数见表 1 和表 2。从表 1 可以看出 DEM_{10b} 的坡度统计特征与目标数据 DEM_{10a} 上提取的坡度特征更为接近, DEM_{25b} 的坡度统计特征与目标数据 DEM_{25a} 上提取的坡度特征更为接近。从表 2 中可以看到 DEM_{10b} 的曲率统计特征与目标数据 DEM_{10a} 上提取的曲率特征更为接近, DEM_{25b} 的曲率统计特征与目标数据 DEM_{25a} 上提取的曲率特征更为接近。综合坡度和曲率的统计特征, 可以认为 DEM_{10b}、DEM_{25b} 的地形起伏反映能力分别相当于 DEM_{10a}、DEM_{25a}。从表 1 中找不到与 DEM_{50a} 的坡度统计特征相近的由 1: 1 万地形图生成的 DEM, 从表 2 中可以看到 DEM_{60b} 与目标数据 DEM_{50a} 的曲率统计特征较为相近。

表 1 坡度的统计特征

统计项	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}	DEM _{10a}	DEM _{25a}	DEM _{50a}
最小值	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.10	0.05	0.13	0.00	0.00	0.00
最大值	58.33	47.60	47.01	44.01	41.28	37.87	35.89	33.61	59.80	54.82	42.79
平均值	26.70	22.84	21.81	20.46	19.90	18.31	16.91	15.70	25.11	20.91	13.28
标准差	10.38	9.16	8.98	8.45	8.09	7.59	7.10	6.71	10.49	9.90	8.25
众数	32	27	26	25	26	24	20	19	31	25	9
坡度信息熵	3.72	3.72	3.58	3.57	3.51	3.46	3.40	3.35	3.72	3.67	3.43

表 2 曲率的统计特征

统计项	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}	DEM _{10a}	DEM _{25a}	DEM _{50a}
最小值	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
最大值	67.77	46.33	41.80	32.63	22.95	17.48	14.78	11.11	68.27	44.42	21.09
平均值	19.19	11.46	9.96	8.26	6.49	5.16	4.17	3.45	18.43	10.86	4.32
标准差	12.49	7.86	6.62	5.47	4.13	3.16	2.48	2.03	11.70	6.75	3.07
众数	11	6	5	4	4	3	4	3	12	7	3
曲率信息熵	3.81	3.33	3.17	2.99	2.73	2.48	2.25	2.06	3.77	3.23	2.38

2.2 坡度和曲率的相似度计算

坡度和曲率的频率直方图和累计频率直方图如下: 以与 DEM_{10a} 的相似度比较为例(见图 2)。

对坡度和曲率的频率和累计频率分别使用直方

图 L₁ 距离、L₂ 距离、 χ^2 距离和直方图交 4 种方法求取相关直方图的相似度, 与 DEM_{10a}、DEM_{25a} 和 DEM_{50a} 比较的相似度计算结果如表 3- 5 所示(加黑数字为最大相似度值):

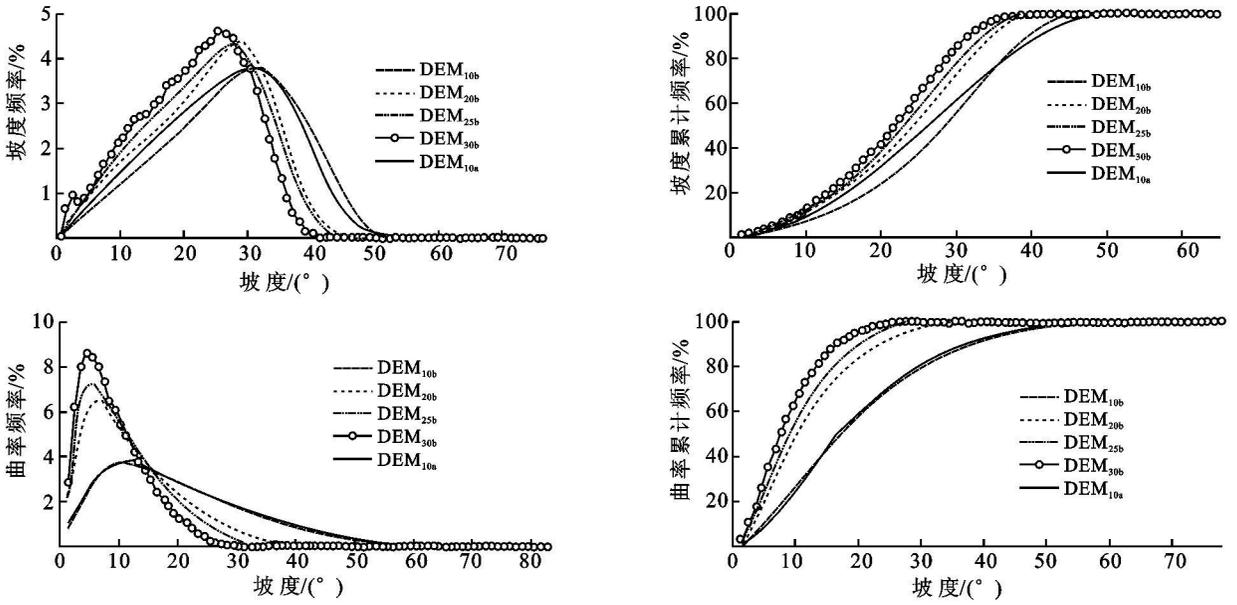


图 2 部分 DEM 坡度和曲率频率分布

表 3 与 DEM_{10a} 比较坡度、曲率直方图相似度

多栅格 DEM	坡度相似度				曲率相似度			
	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{30b}	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}
频率 L ₁ 距离	0.94	0.87	0.83	0.77	0.98	0.74	0.68	0.58
频率 L ₂ 距离	0.99	0.97	0.96	0.94	0.99	0.93	0.92	0.89
频率直方图的交	0.94	0.87	0.83	0.77	0.98	0.74	0.68	0.58
频率 x ² 距离	0.99	0.96	0.94	0.90	0.99	0.89	0.83	0.74
累计频率 L ₁ 距离	1.59	2.27	3.31	4.65	0.76	6.98	8.48	10.18
累计频率 L ₂ 距离	0.27	0.44	0.62	0.87	0.11	1.15	1.43	1.75
累计频率 x ² 距离	0.06	0.08	0.17	0.33	0.00	0.65	0.96	1.42

表 4 与 DEM_{25a} 比较坡度、曲率直方图相似度

多栅格 DEM	坡度相似度				曲率相似度			
	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}
频率 L ₁ 距离	0.89	0.92	0.89	0.86	0.93	0.93	0.84	0.71
频率 L ₂ 距离	0.97	0.98	0.97	0.97	0.98	0.97	0.95	0.91
频率直方图的交	0.89	0.92	0.89	0.86	0.93	0.93	0.84	0.71
频率 x ² 距离	0.98	0.99	0.97	0.96	0.99	0.99	0.96	0.86
累计频率 L ₁ 距离	2.03	1.28	1.31	1.66	0.83	0.91	2.61	4.38
累计频率 L ₂ 距离	0.39	0.23	0.24	0.33	0.16	0.21	0.55	0.96
累计频率 x ² 距离	0.13	0.06	0.03	0.05	0.01	0.03	0.16	0.43

表 5 与 DEM_{50a} 比较坡度、曲率直方图相似度

多栅格 DEM	坡度相似度				曲率相似度			
	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}
频率 L ₁ 距离	0.66	0.72	0.76	0.78	0.77	0.87	0.91	0.87
频率 L ₂ 距离	0.91	0.92	0.93	0.94	0.91	0.94	0.96	0.95
频率直方图的交	0.66	0.72	0.76	0.78	0.77	0.87	0.91	0.87
频率 x ² 距离	0.85	0.89	0.91	0.93	0.92	0.98	0.98	0.95
累计频率 L ₁ 距离	6.61	5.07	3.82	2.94	2.17	0.85	0.42	0.88
累计频率 L ₂ 距离	1.31	1.04	0.82	0.63	0.60	0.28	0.12	0.28
累计频率 x ² 距离	1.12	0.78	0.53	0.35	0.18	0.05	0.01	0.03

从表 3 中可以看出 DEM_{10b} 与 DEM_{10a} 的坡度频率、坡度累计频率、曲率频率和曲率累计频率的所有

相似度值都最高, 因此可以认为 DEM_{10b} 与 DEM_{10a} 最为相似。从表 4 中可以看出 DEM_{25b} 与 DEM_{25a} 的

坡度频率和坡度累计频率的各相似度值最高, DEM_{20b}和DEM_{25b}与DEM_{25a}的曲率频率和曲率累计频率的相似度值接近并最为相似, 综合认为 DEM_{25b}与DEM_{25a}最为相似。从表 5 中可以看出随着 DEM 栅格尺寸不断变大, 与 DEM_{50a}的坡度频率和累计频率的相似度变大, 是一个增函数, 但是相似度是不是一直增大, 或者有个峰值, 还需生成更大栅格尺寸的 DEM 进行验证, 再生成 DEM_{80b}, DEM_{90b}和 DEM_{100b}

进行验证, 见表 6 所示, 结果显示, DEM_{80b}的频率各相似度值最高, 而 DEM_{90b}的累计频率相似度值最高。同时也可以从表 5 看出, DEM_{60b}与 DEM_{50a}的曲率频率、曲率累计频率的相似度最高, 综合来看, 坡度和曲率的相似度不统一。

2.3 坡度和曲率的逼真度计算

采用公式(8), 计算出的坡度和曲率的逼真度如表 7- 8 所示:

表 6 与 DEM_{50a} 比较坡度、曲率直方图相似度

多栅格 DEM	坡度相似度						
	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}	DEM _{80b}	DEM _{90b}	DEM _{100b}
频率 L ₁ 距离	0.66	0.72	0.76	0.78	0.79	0.78	0.77
频率 L ₂ 距离	0.91	0.92	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
频率直方图的交	0.66	0.72	0.76	0.78	0.79	0.78	0.77
频率 x ² 距离	0.85	0.89	0.91	0.93	0.93	0.92	0.91
累计频率 L ₁ 距离	6.61	5.07	3.82	2.94	2.42	2.19	2.25
累计频率 L ₂ 距离	1.31	1.04	0.82	0.63	0.50	0.43	0.44
累计频率 x ² 距离	1.12	0.78	0.53	0.35	0.24	0.17	0.14

表 7 坡度的逼真度值

逼真度值	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}
DEM _{10a}	1.00	0.87	0.83	0.78				
DEM _{25a}	1.39	0.98	0.94	0.89	0.85			
DEM _{30a}					1.17	1.08	1.01	0.95

表 8 曲率的逼真度值

逼真度值	DEM _{10b}	DEM _{20b}	DEM _{25b}	DEM _{30b}	DEM _{40b}	DEM _{50b}	DEM _{60b}	DEM _{70b}
DEM _{10a}	0.84	0.51	0.43	0.35				
DEM _{25a}		0.83	0.72	0.61	0.46			
DEM _{30a}					1.05	0.84	0.68	0.57

从表 7 中可以看出 DEM_{10b}与DEM_{10a}, DEM_{20b}与DEM_{25a}, DEM_{60b}与DEM_{50a}的逼真度值最高, 都接近于 1。从表 8 中得出的结果是 DEM_{10b}与DEM_{10a}, DEM_{20b}与DEM_{25a}, DEM_{40b}与DEM_{50a}的逼真度值较高, 但是曲率逼真度值总体较坡度的逼真度值小。

值并不高。也可以看出随着比例尺变小, 原生 DEM 与 1: 1 万地形图插值生成的栅格 DEM 的相似度变小。

3 结论与讨论

3.1 结论

在变换前后 DEM 统计特征比较的基础上, 通过引入直方图相似度和逼真度指数两个指标, 可以对分辨率匹配提供依据。

(1) 初步分析表明, 基于 1: 1 万地形图插值生成的 10 m、20 m 或 25 m 栅格的 DEM, 与基于 1: 5 万、1: 10 万地形图生成的原生 DEM (分辨率为 10 m、25 m) 相似。从统计特征参数、直方图相似度和逼真度指数这三种方法得不到统一的与 1: 25 万原生分辨率 DEM 相似的基于 1: 1 万地形图插值栅格大小的 DEM, 并且各方法得到的相似度

(2) 关于相似度指数, 从本文的试验结果看, 四种直方图相似度的计算方法对计算 DEM 统计特征的直方图相似度同样适用, 取得基本相同的结果, 但是 L₁ 距离、L₂ 距离、x² 距离相比直方图的交方法的优势在于可以对累计直方图进行计算。L₁ 距离所反映的相似度值的幅度变化较大, 所以更加直观, 因此 L₁ 距离是 4 种方法中最适合的相似度指数计算方法。

3.2 讨论

(1) 由于直方图相似度和逼真度计算只是基于统计学原理, 而 DEM 具有空间格局属性, 因此在直方图相似度和逼真度计算基础上, 还必须充分考虑 DEM 的格局和地形信息含量等, 才能形成全面准确的认识;

(2) 随着比例尺的变小, 原生 DEM 与 1: 1 万地形图插值生成的栅格 DEM 的相似度变小。可能

的原因是, DEM 地形分析的尺度推绎要考虑 DEM 格网单元异质性和尺度推绎范围, 由于尺度推绎非线性的根本原因, 尺度推绎不能无限度的进行^[16], 随着从高分辨率到低分辨率的转换过程, 尺度转换的有效性在降低。

(3) 利用 1: 1 万地形图插值, 生成与 1: 25 万地形图原生 DEM 分辨率对应的 DEM 的有效性还需进一步探讨。

参考文献

- [1] 杨勤科, Jupp D B L, 郭伟玲, 等. 基于滤波方法的 DEM 尺度变换方法研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 58-62.
- [2] 郝振纯, 池宸星, 王玲, 等. DEM 空间分辨率的初步分析[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 499-504.
- [3] Wolck D M, McCabe G J. Differences in topographic characteristics computed from 100m and 1000m resolution digital elevation model data [J]. hydrological processes, 2000, 14(2): 987-1002.
- [4] 吴险峰, 刘昌明, 王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173.
- [5] 吴凡, 祝国瑞. 基于小波分析的地貌多尺度表达与自动综合[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(2): 170-176.
- [6] 于浩, 杨勤科, 张晓萍, 等. 基于小波多尺度分析的 DEM 数据综合研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 93-95.
- [7] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1009-1013.
- [8] 师维娟, 杨勤科, 赵东波, 等. 中分辨率水文地貌关系正确 DEM 建立方法研究: 以黄土丘陵区为例[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 143-148.
- [9] Yang Q K, McVicar T R, Van Niel T G, et al. Improving terrain representation of a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: an example in the Loess Plateau [J]. China International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007, 9(3): 235-246.
- [10] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5.1. A. N. U. Centre for Resource and Environmental Studies [M]. Canberra, 2004.
- [11] 杨勤科, Mcvicar T R, 李领涛, 等. ANUDEM-专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. 干旱地区农业研究[J]. 2006, 24(3): 36-41.
- [12] 朱伟, 王东华, 周晓光. 基于信息熵的 DEM 最佳分辨率确定方法研究[J]. 遥感信息, 2008(5): 79-82.
- [13] 马煜, 顾晓东, 汪源源. 基于平均窗口平移的直方图相似性度量[J]. 应用科学学报, 2008, 26(1): 28-33.
- [14] 林丽惠. 一种改进的颜色直方图相似性度量算法[J]. 武夷学院学报, 2009, 28(2): 58-61.
- [15] 尹忠海, 简剑锋, 周利华, 等. 现有影像逼真度定义的缺陷及其改进[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版[J]. 2004, 31(6): 833-836, 869.
- [16] 刘学军, 卢华兴, 仁政, 等. 论 DEM 地形分析中的尺度问题[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 433-442.
- [15] 石诗源, 张小林. 江苏省农村居民点用地现状分析与整理潜力测算[J]. 中国土地科学, 2009, 23(9): 52-58.
- [16] 陈荣清, 张凤荣, 孟媛, 等. 农村居民点整理的现实潜力估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 216-221.
- [17] 张占录, 杨庆媛. 北京市顺义区农民居民点整理的推动力分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 49-53.
- [18] 沈燕, 张涛, 廖和平. 西南丘陵山区农村居民点整理潜力的评价分级: 以重庆市长寿区为例[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(6): 141-147.
- [19] 刘玉, 门明新, 许峰, 等. 农用地综合生产能力测算及应用研究: 以霸州市为例[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(1): 87-92.
- [20] 郭文华, 郝晋珉, 覃丽, 等. 中国城镇化过程中的建设用地评价指数探讨[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 66-72.
- [21] 中国农业大学土地资源管理系. 海淀北部地区农村居民点整理的模式、布局与对策[R]. 北京: 北京市海淀区国土资源局, 2005.
- [22] 张军民. “迁村并点”的调查与分析: 以山东省兖州市新兖镇寨子片区为例[J]. 中国农村经济, 2003(8): 57-62.
- [23] 张正峰, 赵伟. 北京市大兴区耕地整理潜力模糊评价研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 83-88.
- [23] 张正峰, 赵伟. 北京市大兴区耕地整理潜力模糊评价研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 83-88.
- [24] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 熵权法在草原生态安全评价研究中的应用: 以甘肃牧区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 17-21.

(上接第 119 页)