

基于不同分辨率 DEM 的永寿县地形信息差异分析

杨颖楠^{1,2}, 李子夫^{1,2}, 刘梦云^{1,2}, 张杰^{1,2}, 张萌萌^{1,2}, 杨静涵^{1,2}, 曹润珊^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 高分辨率的 DEM 往往可以囊括更多更详细的地形信息, 但过于详细的数据可能会造成数据冗余给计算带来不便。为了研究不同分辨率的数字高程模型(DEM)在对地形信息表达的现实意义, 基于不同比例尺、不同栅格空间分辨率的 DEM 进行了地形特征的提取与分析, 结果表明: (1) 地面整体坡度随着分辨率降低逐渐减小, 对地形的描述越来越粗糙, 概括性越来越高, 地形整体趋于平坦化。(2) 基于较小分辨率 DEM 提取的坡向更具有宏观意义, 而高分辨率 DEM 提取的坡向可反映地形的细部朝向。(3) 随着 DEM 分辨率下降, 地面平面曲率能更加概括区域地形, 使山谷线和山脊线更明显, 但会导致大量细部信息的丢失。(4) DEM 所提取的地面剖面曲率值随着 DEM 分辨率的下降显著减小, 即地面坡度的变化减小, 地面的转折棱角逐渐趋于平滑, 地形起伏变化特征精度降低。

关键词: DEM 分辨率; 永寿县; 地形信息

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0131-06

Analysis of Topographic Differences of Yongshou County Based on Different Resolutions of DEM

YANG Yingnan^{1,2}, LI Zifu^{1,2}, LIU Mengyun^{1,2},

ZHANG Jie^{1,2}, ZHANG Mengmeng^{1,2}, YANG Jinghan^{1,2}, CAO Runshan^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: High-resolution DEM can include more detailed topographical information, but the excessively detailed data could make it redundant and even cause data to be inconveniently calculated. In order to research whether different levels of resolution of the DEM (digital elevation models) has a very important practical significance on the terrain information expression, based on different scales and different resolutions of DEM, we extracted and analyzed topographical feature. The results showed that: (1) with the gradual reduction of resolution of DEM, the overall slope of the ground was decreasing, the description of the terrain was getting rough, and the topography became more and more coincident, the terrain tended to be more flattened; (2) the slope extracted from low resolution of DEM had better macro meaning, while the slope extracted from high resolution of DEM could reflect the fine orientation of the terrain; (3) with the reduction of the resolution of DEM, surface curvature could generalize regional topography better, and the mountain ridge line and valley line would be more obvious, but this would lead to loss of a lot of detail information; (4) with the decrease of the DEM resolution, the profile curvature information extracted from DEM would be dropped significantly, in other words, the decrease of the DEM resolution made the variety of terrain slope less, the turning point of the ground tend to be smooth gradually, and the characteristic of the topographic fluctuation reduce.

Keywords: resolution of DEM; Yongshou County; topographic information

数字高程模型(DEM)是区域地面高程的数学表示, 是地理信息系统中进行地形分析的核心数据系

统, 在测绘、资源与环境、灾害防治、国防等与地形分析有关的科学研究和国民经济各领域发挥着巨大的

作用^[1]。不同分辨率的 DEM 在地形信息容量及精度等方面存在显著差异,有时候要求 DEM 的分辨率所表达的信息量应该最大限度地接近原始数据的信息量,有时候要求 DEM 的分辨率仅表示大范围地形的差异,因此,选择合适的 DEM 分辨率是地形分析的关键^[2]。地形因子是为有效地研究与表达地貌的形态特征所设定的具有一定意义的参数或指标。基于 DEM 的地形因子提取是数字地形分析的基础与核心内容^[3]。坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率是传统的坡面地形因子,在地形分析中有着重要的地位。依据 DEM 提取的坡向变率是反映地形在水平方向上变化特征的关键指标,在数字地形分析中具有重要作用^[4],而坡向则可以表示地面上任何一点高程值改变量的最大变化方向,是坡向变率以至山脊、山谷线提取的信息基础。坡度是最基本的地貌形态指标,它对地表物质能量迁移转换具有重要影响^[5]。曲率是对地形表面一点扭曲变化程度的定量化度量因子。地面曲率在垂直和水平两个方向上的分量分别称为平面曲率和剖面曲率。平面曲率反映了地形的结构和形态,同时也影响着土壤有机物含量的分布,在地表过程模拟、水文、土壤等领域有着重要的应用价值和意义。剖面曲率则是影响垂直方向坡形变化的主要因子,是反映地形起伏变化特征的重要指标之一。

近年来,空间数据不确定性的研究成为地理信息科学理论研究的热点^[6],不少学者开始着手研究相关问题,并取得了一些重要成果^[7-10]。陈楠等^[8]在黄土高原选择典型地貌类型区基于不同分辨率 DEM 提取坡度、坡向信息进行了探讨;杨昕^[9]通过地形湿度指数的提取对坡度尺度效应和坡度变换进行了系统研究分析;杨勤科等^[10]研究了中低分辨率坡度的衰减、坡度变换方法和 DEM 的综合等问题。这些研究为 DEM 分辨率和地形信息的相关问题探索提供了参考思路。本文以陕西省永寿县为研究区,选择 30, 50, 90, 100 m 共 4 种分辨率 DEM 为研究对象,以 30 m 分辨率 DEM 中的数据为参考真值,选取坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率 4 种地形信息要素作为分析因子,研究不同分辨率 DEM 对地形信息表达程度的影响。本文以永寿县为例,通过不同分辨率多种地形因素分析,对比该研究区与其他地区间的异同,为相关研究中 DEM 分辨率的选择提供理论借鉴,得到更普遍的规律。

1 研究区概况

永寿县位于陕西省中部偏西,东经 $107^{\circ}56'$ — $108^{\circ}21'$ 、北纬 $34^{\circ}29'$ — $34^{\circ}55'$ 。该县属黄土高原丘陵

沟壑区,地貌结构复杂,地质构造单元属鄂尔多斯地台南缘褶皱带。褶皱、断裂构造比较发育,构造线多呈东西或北东方向延伸。全县地貌类型包括中低山区、残原梁峁区、分割黄土原区、低黄土原区、沟壑、泾河高阶地及河谷谷地等类型。地形北高南低,起伏较大,最高点为黑山,最低点在店头坡龙头沟谷,整个地形向南、北、东三面倾斜,高低悬殊,造成该地水土流失严重,是一个水土流失严重的高原山区县。近 10 年来,我国在 DEM 信息特征及数字地形分析方面的研究取得了突飞猛进的发展,特别是以黄土高原数字地形研究为代表的地域地貌研究。永寿县地区复杂的地貌地形可使地形信息的研究分析得到更全面的结论,是一个较为理想的研究区。

2 数据与方法

本试验以陕西省永寿县地形图经过数字化得到的等高线图作为基础数据,选取坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率 4 种地形信息进行分析。首先在 ArcGIS 10.0 中利用已知高程值的等高线图进行不规则三角网(TIN)的生成,将生成的不规则三角网(TIN)转换为栅格大小分别为 30, 50, 90, 100 m 的 4 个栅格数据,即得到 30, 50, 90, 100 m 的 4 个数字高程模型(DEM)。随后利用空间分析(Spatial Analysis)模块的表面分析(Surface Analysis)工具分别提取以上 4 种分辨率的 DEM 数据的地形信息(坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率),运用 Excel 统计软件对地形信息进行统计,分析其随分辨率变化的规律。比较分析法是本研究的基本方法,研究中以 30 m 分辨率 DEM 为真实值与其他分辨率 DEM 所提取的地形信息进行对比。

3 结果与分析

3.1 坡面坡度

坡度指过该点的切平面与水平地面的夹角,表示地表面在该点的倾斜程度。在地面坡度研究中,常采用的分级方法有 3° 分级法、 5° 分级法和水土保持分级法 3 种。本次试验采用水土保持通用分级标准,将基于 DEM 所提取的坡度分为 8 级($0^{\circ}\sim 3^{\circ}$, $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$, $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$, $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$, $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$, $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$, $\geq 45^{\circ}$),通过统计各级别栅格数目及总栅格数并获得各级别所占比例(表 1)。

不同分辨率 DEM 表现出其坡度信息存在较大差异(表 1)。永寿县的坡度主要集中在 25° 以下(不同分辨率坡度 $< 25^{\circ}$ 占 $84\%\sim 98\%$),其中, $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 占 42.55% , $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 所占比例最大为 30.83% ,坡度 $> 35^{\circ}$ 的仅占 2.61% ,说明永寿县的地面整体坡度较和缓,

中等坡度的地形所占比例适中,少有地势较陡。以 30 m 分辨率 DEM 的结果假设为真实值,其他 3 种作为测量值与其比较分析,坡度 $<3^{\circ}$ 时,其所占比例随分辨率的降低而略有下降;坡度 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$, $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 和 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,其所占比例随分辨率的降低而上升;坡度 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时,其所占比例随分辨率的降低大体有上升,但在 90 m 变化到 100 m 时又有所下降;当坡度 $>25^{\circ}$ 时,其所占比例随分辨率的降低而略有下降,且当分辨率由 50 m 变化到 90 m 时,变化非常明显。从不同分辨率各坡度等级面积变化分析,临界坡度 3° , $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 25° 为趋势变化拐点, $<3^{\circ}$ 的面积变化率较小,而且分辨率越高各坡度等级越表现完整;

表 1 不同分辨率 DEM 坡度分级状况								%
分辨率	$0^{\circ}\sim 3^{\circ}$	$3^{\circ}\sim 5^{\circ}$	$5^{\circ}\sim 8^{\circ}$	$8^{\circ}\sim 15^{\circ}$	$15^{\circ}\sim 25^{\circ}$	$25^{\circ}\sim 35^{\circ}$	$35^{\circ}\sim 45^{\circ}$	$\geq 45^{\circ}$
30 m	30.83	11.72	8.20	13.04	20.35	13.26	2.51	0.10
50 m	29.20	12.01	8.97	15.91	23.04	10.19	0.69	0.01
90 m	28.37	12.83	10.78	21.79	23.26	2.95	0.03	0.00
100 m	28.24	13.28	11.27	23.26	22.06	1.87	0.01	0.00
敏感性	9.17	13.31	37.44	78.37	8.40	85.90	99.60	100

随着分辨率的变化,最大坡度、平均坡度以及标准差都存在一致的变化趋势。由表 2 可知,分辨率越低平均坡度值越小,最大值与标准差也相应变小。标准差反映的是数据与平均值的离散程度,标准差越小,数据分布越接近平均值。如表 1 所示,随着标准差的减小,高坡度所占比例逐渐降低,低坡度逐渐升高(坡度 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 范围略有减小),且坡度 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围(平均值所在级别)所占比例最大。其中坡度较大处变为相对较小的坡度,整体地形趋于平坦,可见由于分辨率的粗略化,对地形的概括能力越强。

表 2 不同分辨率 DEM 坡度自信息量的统计分析				
分辨率	最小值	最大值	平均值	标准差
30 m	0	56.56	12.06	10.99
50 m	0	49.34	11.28	9.77
90 m	0	41.07	9.69	7.88
100 m	0	38.72	9.34	7.50

坡度的变化会引起一系列的相关变化,研究不同分辨率 DEM 中坡度的变化可反映 DEM 的可信度坡度^[6],是描述地表形态和获取其他地形因子的重要基础数据。在汤国安等^[7]利用绘制地面坡谱曲线的方法研究黄土高原的坡度随分辨率变化的基础上对更小分辨率进行研究分析,可得到基本一致的结论。从表 1 中可看出,分辨率越低,该地区较高坡度和较低坡度所占比例越小,中等坡度所占比例越多,其中较高坡度所占比例下降尤为显著,即地面起伏程度逐渐趋于平缓,较高和较低处被平坦化,这与李抗彬等^[11]对黑河金盆水库流域的研究中的结论随着 DEM 分

$8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 这个范围的坡度随分辨率降低越能表现完整,而 $>25^{\circ}$ 的坡度范围则随着分辨率的降低越表现不出来。总体分析,随着分辨率的降低,坡度在 $3^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 所占比例呈上升趋势,特别是在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 比例幅度变化最大;在 $25^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 所占比例呈明显下降趋势,坡度损失率达 88.09%(分辨率=100 m 时)。这主要是由于分辨率的粗略化,使地面的弯曲被简化,地面整体坡度减小,向更为平坦的地势转化。当分辨率减小至 100 m 时, $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 坡度范围所占比例下降至 0.00(无限趋近于 0),这主要是由于随着分辨率的降低,对地形的描述越来越粗糙,概括性越来越高,地形整体趋于平坦化。

分辨率降低,地形失真程度变大,地形信息损失越严重基本相同。其次,本次试验中可看到随着分辨率的粗略化坡度平均值逐渐减小,这与陈楠^[12]在对黄土高原 DEM 分辨率的相关研究中的发现随着 DEM 分辨率粗略化造成所提取的坡度平均值降低也一致。因此,对于 DEM 分辨率的选择要依据一定的研究精度要求确定,当然也要考虑范围大小的可行性。

3.2 坡 向

坡向指地表面上一点的切平面的法线矢量在水平面投影与过该点正北方向的夹角^[13]。在输出的坡向数据中,坡向值有以下规定:正北方向为 0° ,以顺时针方向计算取值范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 。在 ArcView 和 ArcGIS 软件中,通常把坡向综合成 9 种:平缓坡(-1°)、北坡($0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$, $337.5^{\circ}\sim 360^{\circ}$)、东北坡($22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$)、东坡($67.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}$)、东南坡($112.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}$)、南坡($157.5^{\circ}\sim 202.5^{\circ}$)、西南坡($202.5^{\circ}\sim 247.5^{\circ}$)、西坡($247.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$)、西北坡($292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$)。

不同分辨率 DEM 提取的坡向面积比例存在一定差异(表 3)。与 30 m 分辨率相比,随着分辨率的降低,平坦地形所占比例逐渐降低(降低了 68%),西南坡向面积比例基本变化不大,而其他坡向所占比例则表现为逐渐增加(增加了 6%~10%)。从变化率来讲,不同分辨率 DEM 提取的坡向比例表现为平坦地形变化率最大(达 215%),西南坡向最低(仅 2%左右),其他坡向则差异不大(变化率 6%~10%)。综上,随着分辨率的降低,平坦地形所占比例明显下降,这是因为随着像素块的变大,

其所包含的地势越复杂,得到的平地数据就会越少,而非平地数据就会越来越多。这些说明较小分辨率

DEM 提取的坡向更具有宏观意义,而高分辨率 DEM 提取的坡向可反映地形的细部朝向。

表 3 不同分辨率 DEM 坡向面积比例特征

分辨率	平坦	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北	最小值	最大值	平均值	标准差
30 m	9.87	7.39	11.97	15.25	13.81	10.73	11.68	10.69	8.61	-1	357.18	125.64	80.72
50 m	6.70	7.69	12.31	15.95	14.34	11.07	11.96	11.07	8.90	-1	358.58	157.86	81.23
90 m	3.64	8.11	12.56	16.62	14.98	11.58	11.84	11.36	9.31	-1	360.00	162.91	81.95
100 m	3.13	8.12	12.74	16.68	15.16	11.57	11.80	11.43	9.38	-1	358.58	163.61	82.23
变化率	215.33	9.88	6.43	9.38	9.78	7.83	2.40	6.92	8.94	—	—	—	—

坡向可以表示地面上任何一点高程值改变量的最大变化方向。从表 3 中的平均值和标准差可以看出,随着 DEM 分辨率的降低,高程值改变量的最大变化方向有所增加,平坦地形的表示有所减少。然而平均坡向、标准差及各坡向所占比例变化均较小,说明无论较小分辨率 DEM 提取的坡向值,还是较高分辨率提取的坡向值,都具有较高的可信度。此结论与先前刘学军等^[14]得出的高分辨率的 DEM 并不一定能给出高精的坡向计算结果相符合。

3.3 平面曲率

平面曲率即地面坡向变率,是指在地表的坡向提取基础之上,进行对坡向变化率值的二次提取,亦即坡向之坡度。平面曲率用来描述地表曲面沿水平方向的弯曲、变化情况,其大小决定坡面水平方向的坡形变化。

图 1 为永寿县在不同分辨率 DEM 下的平面曲率图,不同分辨率 DEM 所提取的地面平面曲率统计如表 4 所示。可以看出,随着 DEM 分辨率的降低,

地面平面曲率的最小值增大,而最大值和标准差的绝对值都相应减小。100 m 分辨率的地面平面曲率的最大值和最小值比 30 m 分辨率都有显著变化。这些数据分析说明,随着分辨率的降低,等高线弯曲程度降低,即等高线变得平滑,降低了极端微地形的显示,这与本文坡度的分析结果一致,也充分体现了制图综合的作用与效果。平面曲率标准差随着 DEM 分辨率降低而减小,与平均值的偏离程度逐渐减小,说明平面曲率的值分布趋于集中。综上所述,低分辨率 DEM 所提取的地面平面曲率能更加概括区域地形,使山谷线和山脊线更明显,但会导致大量细部信息的丢失。该结果与贾志成等^[15]对宁夏盐池县南部黄土丘陵沟壑区有关平面曲率和 DEM 分辨率的研究结论相一致,即,当需要利用地形图建立 DEM 提取平面曲率时,尤其是提取变化较缓和的平面曲率时,在条件允许的情况下要尽可能采用好分辨率的 DEM,否则会丢失较多有用信息。

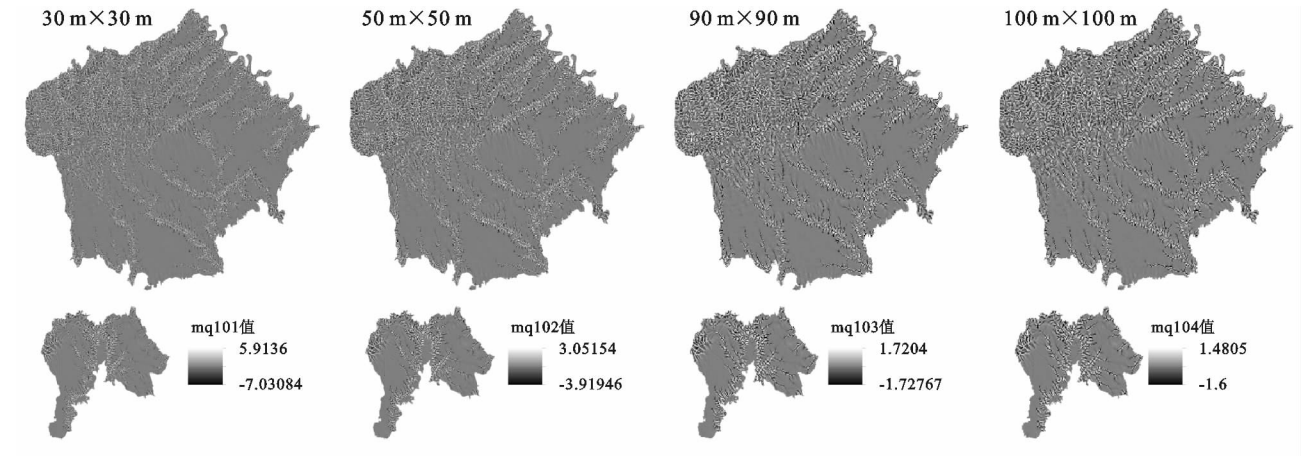


图 1 不同分辨率 DEM 所提取的永寿县地面平面曲率

表 4 不同分辨率 DEM 地面平面曲率值

分辨率	最小值	最大值	平均值	标准差
30 m	-7.03	5.91	-0.0506	0.48
50 m	-3.92	3.05	-0.0272	0.37
90 m	-1.73	1.72	-0.0148	0.24
100 m	-1.60	1.46	-0.0132	0.22

3.4 剖面曲率

剖面曲率是对地面坡度沿最大坡降方向地面高

程变化率的度量,或者称为高程变化的二次倒数。剖面曲率用来描述地表曲面在垂直方向的弯曲变化情况,可以反映地面的复杂程度^[16]。

图 2 为永寿县不同分辨率 DEM 下的剖面曲率图,该地区不同分辨率 DEM 所提取的地面剖面曲率值统计见表 5。可以看出,随着 DEM 分辨率的降低,地面剖面曲率的最小值增大,最大值和标准差减小,且变化幅度都逐渐降低,与表 4 中平面曲率随 DEM

分辨率的变化基本相同,与呼雪梅等^[17]对多地地面曲率随 DEM 分辨率变化的研究中所得结论相一致。剖面曲率统计值变化表明,随着 DEM 分辨率降低,对应 DEM 所提取的地面剖面曲率值显著减小,即地面坡度的变化减小,地面的转折棱角不断得到平滑,

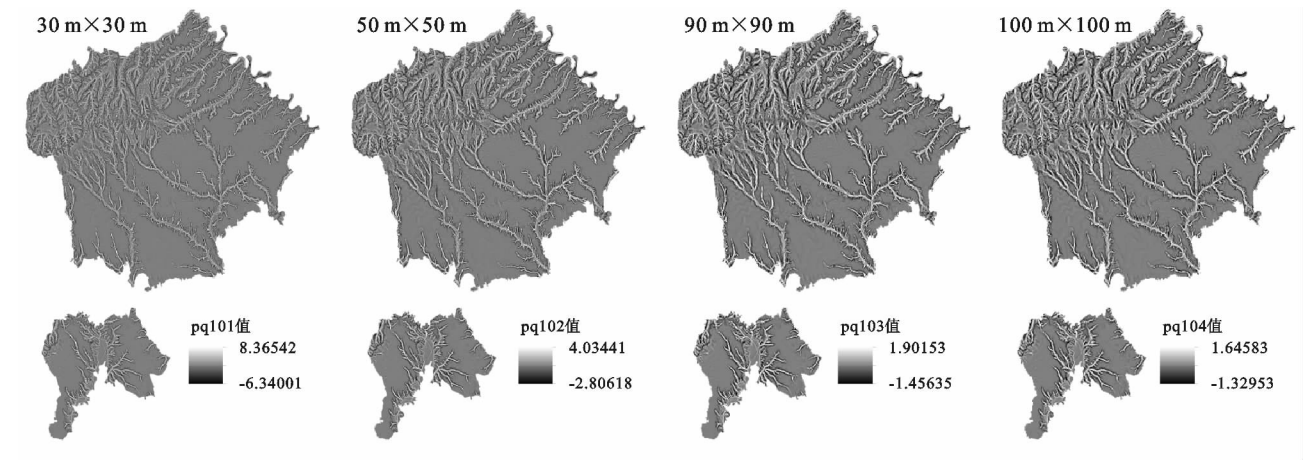


图 2 不同分辨率 DEM 所提取的永寿县地面剖面曲率

表 5 不同分辨率 DEM 地面剖面曲率值统计

分辨率	最小值	最大值	平均值	标准差
30 m	-6.34	8.37	-0.0571	0.69
50 m	-2.81	4.03	-0.0238	0.46
90 m	-1.46	1.90	-0.0133	0.27
100 m	-1.33	1.65	-0.0126	0.25

剖面曲率是影响垂直方向坡形变化的主要因子,也是反映地形起伏变化特征的重要指标之一^[18]。表 5 中剖面曲率随着 DEM 分辨率的降低,最大值、最小值、平均值、标准差的变化程度都逐渐减小。表中可明显看出,各个值 90~50 m 的变化程度远小于 30~50 m,而 90~100 m 的变化程度逐渐趋于 0。由此可推断,当分辨率达到一定大小时,其表示地形信息的详细程度趋于平稳,这与刘娜等^[19]对漠河地区剖面曲率随 DEM 分辨率变化的研究结果相同,即当地形信息损失到一定程度时便将维持在这一水平,此时对地形复杂程度的描述趋于简单化,地形也趋于平坦化。

3.5 不同分辨率 DEM 信息熵特征

信息熵的概念来源于信号通信理论,它通过分析组成通信信号的数字或符号的统计特征来定量表示信号通信能力即信息量大小。在 Shannon 的信息论中,信息熵的表达式写为^[20]:

$$H = - \sum p_i(x) \ln p_i(x) \tag{1}$$

式中: H 为信息熵(Entropy); $p_i(x)$ 为随机事件是 x 概率。

利用公式(1)计算出不同分辨率的坡度信息熵和坡向信息熵,根据所得结果绘出坡度信息熵和坡向信息熵随分辨率的变化曲线(图 3)。

说明低分辨率 DEM 所描述的地形起伏变化特征精度降低,对区域地形具有更宏观的指示意义。由于等高线制图综合及栅格分辨率的增大,从很大程度上降低了所提取的地面剖面曲率值,且与实际地形具有较大的差异。

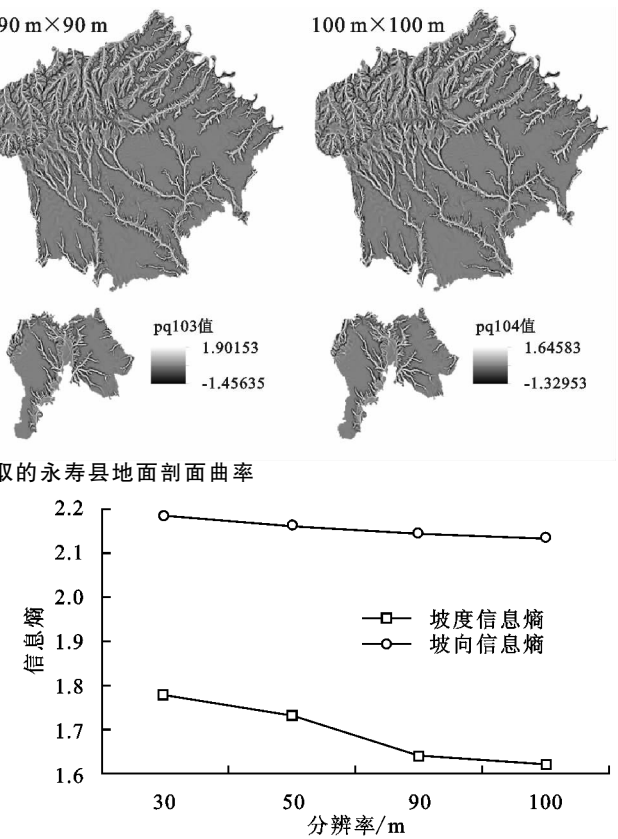


图 3 不同分辨率地形信息信息熵变化特征

随着空间分辨率的变化,DEM 所包含的地形信息量也相应发生变化^[21]。从图 3 可以看出,随着分辨率降低,信息熵逐渐减小,这说明了分辨率越小,DEM 所包含的地形信息量越少,地形逐渐趋于稳定。

4 结论

本研究发现,随着分辨率下降,其对地形的概括能力越强,同时细节信息损失越多。100 m 分辨率 DEM 能从宏观上指示区域地形的变化和沟谷的范围,但高分辨率 DEM 更能表示地表细微的起伏变化,有利于对局部地表的研究。

(1) 地面整体坡度随着分辨率降低逐渐减小,对地形的描述越来越粗糙,概括性越来越高,地形整体趋于平坦化。

(2) 基于较小分辨率 DEM 提取的坡向更具有宏观意义,而高分辨率 DEM 提取的坡向可反映地形的细部朝向。

(3) 随着 DEM 分辨率下降,地面平面曲率能更

加概括区域地形,使山谷线和山脊线更明显,但会导致大量细部信息的丢失。

(4) DEM 所提取的地面剖面曲率值随着 DEM 分辨率的下降显著减小,即地面坡度的变化减小,地面的转折棱角逐渐趋于平滑,地形起伏变化特征精度降低。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2009,64(1):1-16.
- [3] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325.
- [4] 谢轶,群汤国,安江岭. DEM 提取坡向变率中的误差特征与消除方法[J].地理与地理信息科学,2013,29(2):49-53.
- [5] 杨勤科,贾大韦,李锐,等.基于 DEM 的坡度研究:现状与展望[J].水土保持通报,2007,27(1):146-150.
- [6] 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(3):5-9.
- [7] 汤国安,赵牡丹,李天文,等. DEM 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.
- [8] 陈楠,王钦敏,汤国安.黄土高原坡向信息量变化与 DEM 分辨率的关系[J].高技术通讯,2008,18(5):525-530.
- [9] 杨昕.基于 DEM 地形指数的尺度效应与尺度转换[D].南京:南京师范大学,2007.
- [10] 杨勤科, Jupp D, 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.
- [11] 李抗彬,沈冰,李智录. DEM 数据分辨率对黑河金盆水库流域地形参数提取的影响分析[J].西安理工大学学报,2012,28(2):127-131.
- [12] 陈楠. DEM 分辨率与平均坡度的关系分析[J].地球信息科学学报,2014,16(4):524-530.
- [13] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等.基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J].测绘学报,2004,33(3):258-263.
- [14] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J].地理与地理信息科学,2004,20(6):1-5.
- [15] 贾志成,杨光,杨国苑.基于不同精度 DEM 的黄土丘陵沟壑区地形指标提取误差分析[J].安徽农业科学,2008,36(5):2147-2148.
- [16] 陈楠.剖面曲率精度变化与 DEM 分辨率关系[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):147-151.
- [17] 呼雪梅,秦承志.地形信息对确定 DEM 适宜分辨率的影响[J].地理科学进展,2014,33(1):50-56.
- [18] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006.
- [19] 刘娜,杨斌斌,房靖楠,等. DEM 分辨率对地形因子提取影响的研究[J].森林工程,2016,32(6):57-60.
- [20] 朱雪龙.应用信息论基础[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [21] 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.

(上接第 130 页)

- [5] Li C H, Yang Z F, Wang X. Tendency and persistence of natural runoff in the Yellow River Basin[J]. Water International, 2004,29(4):447-454.
- [6] 秦年秀,姜彤,许崇育.长江流域径流趋势变化及突变分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.
- [7] Jha M K, Singh A K. Trend analysis of extreme runoff events in major river basins of Peninsular Malaysia[J]. International Journal of Water, 2013,7(1/2):142-158.
- [8] 李东龙,王文圣,李跃清,等.中国主要江河年径流变化特性分析[J].水电能源科学,2011,29(11):1-5.
- [9] 陆志华,夏自强,于岚岚.松花江佳木斯站径流变化规律及演变趋势分析[J].水电能源科学,2011,29(4):14-17.
- [10] 陈玉壮,管仪庆,谢悦波.海流兔河流域径流变化的周期和趋势分析[J].水资源保护,2016,32(2):45-50,56.
- [11] 龚云,孔兰.南明河流域径流量时间序列演变趋势分析[J].中国农村水利水电,2011(1):14-15,18.
- [12] 王文圣,丁晶,李跃清,等.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] 桑燕芳,王栋.水文序列小波分析中小波函数选择方法[J].水利学报,2008,39(3):295-306.
- [14] 李想,李维京,赵振国.我国松花江流域和辽河流域降水的长期变化规律和未来趋势分析[J].应用气象学报,2005,16(5):593-599.
- [15] 侯伟,张树文,张养贞,等.三江平原挠力河流域 50 年代以来湿地退缩过程及驱动力分析[J].自然资源学报,2004,19(6):725-731.