

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 04. 008

两种分辨率 DEM 在不同空间尺度下的差异——以黄土高原丘陵区为例^{*}

张永红¹, 黄付强¹, 程华¹, 金宝成²

(1. 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 贵州大学 动物科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 以黄土高原丘陵区的局部山区为研究区域, 利用空间分辨率为 5m 和 30m 的数字高程模型 (DEM) 数据, 通过 ArcGIS 软件提取其海拔、坡度、地表粗糙度和太阳辐射 4 个地形因子, 结合 SPSS 中的 Mann-whitney 检验分析不同空间尺度下 (缓冲半径 R 为 100 ~ 5 000m) 5m 和 30m 分辨率的 DEM 之间的差异。结果表明, 随着空间尺度变化, 5m 和 30m 分辨率 DEM 中提取的地形因子的变化趋势是相同的; 当 $R \geq 500\text{m}$, 30m 分辨率的 DEM 的海拔显著大于 5m 分辨率的海拔; 当 $R \geq 1\,500\text{m}$, 30m 分辨率 DEM 的坡度显著大于 5m 的坡度; 当 $R \geq 2\,500\text{m}$, 30m 分辨率 DEM 的地表粗糙度显著大于 5m 的地表粗糙度; 但 $R \geq 1\,000\text{m}$ 时, 30m 分辨率 DEM 的太阳辐射显著小于 5m 分辨率的太阳辐射。其中坡度与太阳辐射呈显著负相关关系。对于地形比较复杂的山地丘陵区, 选择高分辨率的 DEM 更能清楚地反映地形特征。

关键词: 黄土高原丘陵区; DEM; 地形因子; 空间尺度

中图分类号: P 208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 04-0054-07

Difference of the Two Kinds of Resolution DEM at Different Spatial Scales: A Case of Hilly Region in Loess Plateau

ZHANG Yong-hong¹, HUANG Fu-qiang¹, CHENG Hua¹, JIN Bao-cheng²

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, P. R. China;
2. College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China)

Abstract: The mountainous areas in the hilly region of the Loess Plateau are the study areas. Four terrain factors including elevation, slope, roughness and solar radiation were extracted by using data with spatial resolution of 5m and 30m DEM by ArcGIS software. Meanwhile, Mann-whitney test in SPSS was used to analyze the difference between 5m and 30m DEM in different spatial scales (Buffer radius R is 100–5 000m). The results show that the terrain factors extracted from 5m and 30m DEM have the same variation trend with the change of spatial scale. When $R \geq 500\text{m}$, the elevation of 30m DEM is significantly greater than that of 5m. When $R \geq 1\,500\text{m}$, the slope of 30m DEM is significantly larger than that of 5m. When $R \geq 2\,500\text{m}$, the surface roughness of 30m DEM is significantly greater than that of 5m. However, when $R \geq 1\,000\text{m}$, the solar radiation of 30m DEM is significantly less than that of 5m. The slope is negatively correlated with solar radiation. For mountainous and hilly areas with complex topography, the DEM with high resolution can more clearly reflect the topographic features.

Key words: hilly region in Loess Plateau; DEM; topographical factor; spatial scale

^{*} 收稿日期: 2019-12-24
基金项目: 国家自然科学基金 (31700390)。
第一作者简介: 张永红 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事景观生态学与地理信息系统的研究。E-mail: yhzhang2017@lzu.edu.cn
通讯作者简介: 程华 (1992-), 女, 博士研究生, 主要从事景观生态学与地理信息系统的研究。E-mail: chengh16@lzu.edu.cn
金宝成 (1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态遥感和地理信息系统的研究。E-mail: bcjin@gzu.edu.cn

数字高程模型 (Digital Elevation Model, 简称 DEM) 是通过有限的地形高程数据实现对地面地形的数字化模拟 (即地形表面形态的数字化表达), 是数字地形模型 (Digital Terrain Model, 简称 DTM) 的一个分支。DEM 是研究地表过程、构造地貌的一种行之有效的方法和手段, 高精度的 DEM 不仅能直观地展示该地区的地形和地貌特征, 而且也能为各种地形特征的定量分析提供了基本数据^[1]。陈晨等^[2]基于 DEM 的小班坡度自动提取算法提高了小班内高低起伏点引起的异常, 同时获取了小班内的斜平面模型。此外, DEM 还被广泛应用于土壤制图^[3]、水文模型^[4]、遥感辅助解译和流域信息提取^[5]等领域。其分辨率的不同对地形特征的提取有着不确定性影响; 同时, 由于 DEM 以及地形分析具有强烈的尺度依赖性, 亟待进行多学科综合、深层次的探索^[6-7]。从空间尺度来讲, 针对不同分辨率的 DEM 数据源对地形因子提取的影响研究报道较少。因此, 研究不同空间分辨率的 DEM 在空间尺度上的变化规律、自然地面与 DEM 模拟地面两者之间的尺度匹配问题, 对研究区的 DEM 选取和应用有重要意义。

自 20 世纪 50 年代末提出 DEM 概念以来, DEM 逐渐发展成为地理数据库的核心^[8-9]。DEM 数据资料在地理信息数据库中占有重要的地位, 并为各类地形研究提供了数据基础。由于 DEM 的分辨率是影响信息质量的关键因素, 当前已引起很多学者的关注并进行了相关的探索和研究, 进而取得了一些相应的研究成果。汤国安等^[10]研究认为对于比例尺为 1 : 1 万的 DEM 来说, 5m 是保证该地区地形描述精度的理想分辨率, 并且地面平均坡度误差与栅格分辨率和沟壑密度存在量化关系。陈楠^[11]研究结果显示: 在黄土高原试验区, DEM 分辨率粗略化并不一定造成所提取出的坡度平均值降低, 坡度平均值变化需要从单点坡度变化 (增加或减少) 栅格的数量, 以及变化幅度两方面一起解释。王峰等^[12]研究结果表明, 随着 DEM 分辨率的降低, 平均坡度呈对数函数降低, 坡度向低坡度范围集中, 平均坡长增大且在高分辨率范围内较强烈, 坡长向较长坡长范围集中。此外, 随着 DEM 分辨率降低, 平均汇水面积呈线性增大, 且不同汇水面积等级所占面积的变化规律也有所不同。一定分辨率的 DEM 所表达的信息量应该最大限度地接近原始数据的信息量, 所以选择适合分辨率的 DEM 是进行数字地形分析的关键^[13]。

地形是地理环境中的核心因子, 制约着该地区地理景观的基本格局。黄土高原地区有着独特的地理环境, 其地域广阔, 地貌类型复杂、多样化, 传统的研究难以找到能有效进行定量研究的切入点; 而黄土高原地区数字高程模型的建立为该区地貌的定量研究提供了必要的条件^[14]。DEM 分析方法的引入, 给黄土高原地区的研究带来了新的理念和思路, 如基于 DEM 的黄土高原特征地貌的提取及分析、土壤侵蚀模型的矫正等都取得了很好的效果^[15]。由于 DEM 栅格大小的不同决定了其空间分辨的多样化, 因此, 如何在不同空间尺度下选择恰当分辨率的 DEM 显得十分重要, 但在目前的研究中, 对该方面的研究报道较少。

本文以榆中县宛川河流域 (面积约为 100km²) 为研究区 (见图 1), 通过该区域两种空间分辨率 (即分辨率为 5m 和 30m) 的 DEM, 分别提取并计算出海拔、坡度、地表粗糙度和太阳辐射 4 个地形因子, 以研究该区域面积的大小代表空间尺度的变化。探索这些地形因子在不同空间尺度下的变化规律; 分析在特定空间尺度上不同分辨率的 DEM 之间存在的差异, 以期为更合理地选择和利用不同空间分辨率的 DEM 提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于中国黄土高原西部, 甘肃省兰州市榆中县的宛川河流域 (103°56' ~ 104°13'E, 35°31' ~ 36°09'N, 海拔 1 500 ~ 2 400m)。属温带半干旱大陆性气候, 年均气温 1.1 ~ 14.2℃, 降水量 300 ~ 400mm, 全年降水分布不均, 主要集中在 7—9 月份, 年蒸发量 1 000 ~ 1 450mm。植被群落主要由草本、灌木和半灌木组成, 包括: 小画眉草 (*Eragrostis minor*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、多裂骆驼蓬 (*Potentilla bifurca*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、灌木亚菊 (*Ajania fruticulosa*)、铁杆蒿 (*Artemisia sanctorum*) 等。宛川河流域属半干旱黄土高原丘陵区, 黄土厚度达数米, 土质疏松, 侵蚀严重, 属于典型的梁、峁地貌^[16]。

空间分辨率为 30m 的 DEM 数据为 ASTER GDEM 数据^[17], 下载于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 平台; 空间分辨率为 5m 的 DEM 数据通过对资源 3 号 (ZY3) 卫星影像进行立体像对提取制作完成^[18]。

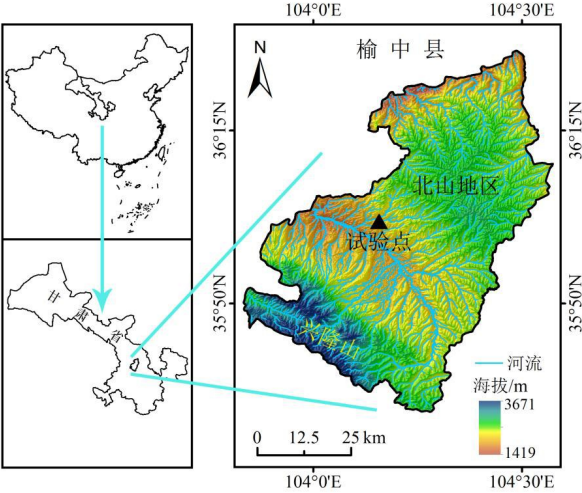


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 The study area

1.2 研究方法

通过 ArcGIS 10.4 软件，对两种不同分辨率的 DEM 数据，分别提取其坡度^[19]和 2018 年 7—8 月份间 1 个月的太阳辐射^[20]，并计算地表粗糙度^[21~22]。其中地表粗糙度 (r) 的计算公式为： r

$$= \frac{S}{s} = \frac{1}{\cos ([\text{slope}] \times \frac{3.14}{180})}$$
。式中： r 表示地表粗

糙度， S 表示地表面单元的曲面面积， s 表示地表单元在水平面上的投影， slope 表示通过 DEM 提取的坡度值。

目视选取 DEM 的中心位置，建立矢量点文件，并以该点为中心，建立缓冲区，缓冲半径 R 分别为：100、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000m。然后在不同缓冲区域内创建随机点，其数量为 $R \times R / 500$ 个，以使不同半径的缓冲区域内创建的随机点密度分布均匀。最后，利用所创建的随机点来提取不同缓冲区域内的海拔、坡度、地表粗糙度和太阳辐射。另外，在缓冲半径为 5 000m 缓冲区域内再创建 500 个随机点，并提取每个点所在位置的坡度和太阳辐射，用于检测两者的相关关系。

1.3 数据处理分析

通过 SPSS 19.0 统计分析软件中的非参数检验 (Mann-whitney 检验) 来检测 5m 和 30m 两种分辨率的 DEM 提取地形因子之间在同一缓冲半径下是否具有显著差异 ($P < 0.05$)；空间统计分析在 ArcGIS 10.4 软件中进行；制图采用 ArcGIS 10.4、Origin 9.0 和 Photoshop CC 软件；利用 Python 2.7 进行地形因子的批量提取。

2 结果与分析

2.1 在不同缓冲半径下，从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 所提取的海拔之间的关系

当缓冲半径 R 为 100m 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的海拔分别为 $1\,967.01 \pm 2.28\text{m}$ (平均值 $\pm$ 标准误) 和 $1\,963.65 \pm 2.41\text{m}$ ，两者间差异不显著 ($P > 0.05$)。而当缓冲半径 R 为 500m 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的海拔分别为 $1\,967.43 \pm 1.45\text{m}$ 和 $1\,973.25 \pm 1.31\text{m}$ ，两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。当缓冲半径 $R > 500\text{m}$ 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的海拔都大于缓冲半径为 500m 的海拔，且 5m 和 30m 分辨率的 DEM 之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着缓冲半径的增大，两者的海拔都呈单峰变化，都在缓冲半径为 2 500m 时达到最大值，同时 30m 分辨率的 DEM 的海拔始终大于 5m 分辨率的海拔 (图 2)。

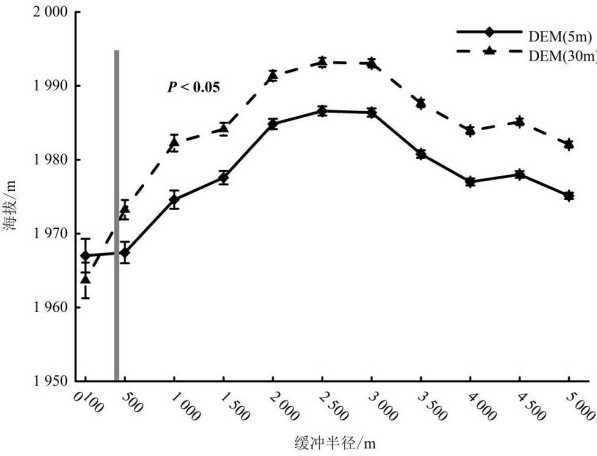


图 2 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 中提取的海拔随缓冲半径的变化

注：图中灰线左侧 (即 $R < 500\text{m}$) 表示，在同一缓冲半径下，从空间分辨率为 5m 和 30m DEM 中提取出来的海拔之间无显著差异 (即 $P > 0.05$)；而灰线右侧 (即， $R \geq 500\text{m}$) 表示，在同一缓冲半径下，从空间分辨率为 5m 和 30m DEM 中提取出来的海拔之间差异显著 (即 $P < 0.05$)，下同。

Fig. 2 The elevation extracted from DEM of 5m and 30m varies with buffer radius

2.2 在不同缓冲半径下，从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 所提取的坡度之间的关系

随着缓冲半径 R 的变化，从分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 分别提取出来的坡度之间也呈现出了显著差异。当缓冲半径 $R < 1\,500\text{m}$ 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 提取出来的坡度之间无显著差

异 ($P > 0.05$)。而当缓冲半径 R 为 1 500m 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的坡度分别为 $13.48 \pm 0.10^\circ$ (平均值 $\pm$ 标准误) 和 $14.14 \pm 0.10^\circ$, 两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。当缓冲半径 $R > 1\,500\text{m}$ 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的坡度都大于缓冲半径为 1 500m 的坡度, 且 5m 和 30m 分辨率的 DEM 之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着缓冲半径的增大, 两者的坡度都呈现出增大的趋势, 同时 30m 分辨率的坡度始终大于 5m 分辨率的坡度 (图 3)。

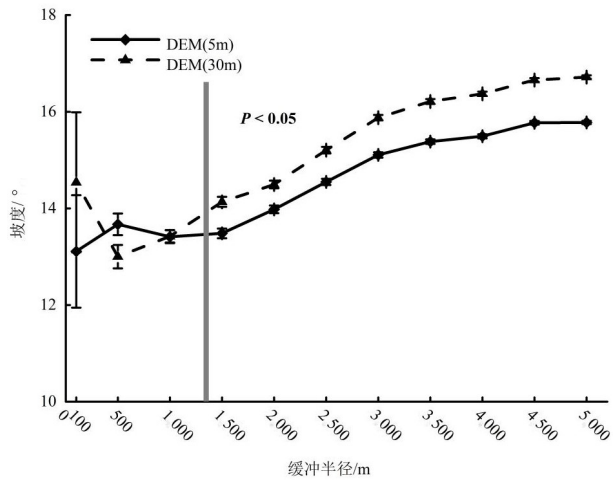


图 3 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 中提取的坡度随缓冲半径的变化

Fig. 3 The slope extracted from DEM of 5m and 30m varies with buffer radius

2.3 在不同缓冲半径下, 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 所提取的地表粗糙度之间关系

地表粗糙度是能够反映地形的起伏变化和侵蚀程度的宏观因子, 其在水土保持及环境监测研究中有着重要的意义^[23]。当缓冲半径 $R < 2\,500\text{m}$ 时, 其分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 提取出来的地表粗糙度之间差异不显著 ($P > 0.05$)。而当缓冲半径 R 为 2 500m 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的地表粗糙度分别为 $1.042 \pm 0.000\,4$ (平均值 $\pm$ 标准误) 和 $1.047 \pm 0.000\,4$, 两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。当缓冲半径 $R > 2\,500\text{m}$ 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的地表粗糙度都大于缓冲半径为 2 500m 的地表粗糙度, 且 5m 和 30m 分辨率的 DEM 之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着缓冲半径的增大, 两者的地表粗糙度都呈现出增大的趋势, 同时 30m 分辨率的地表粗糙度始终大于 5m 分辨率的地表粗糙度 (图 4)。

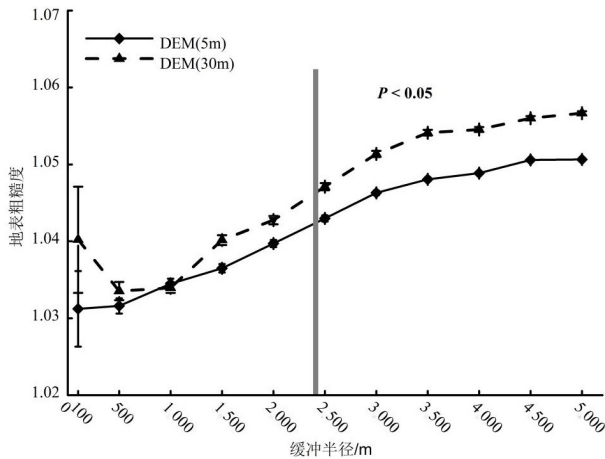


图 4 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 中提取的地表粗糙度随缓冲半径的变化

Fig. 4 The surface roughness extracted from DEM of 5m and 30m varies with buffer radius

2.4 在不同缓冲半径下, 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 所提取的太阳辐射之间的关系

随着缓冲半径 R 的变化, 根据空间分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 分别提取出来的太阳辐射之间也发生了变化。当缓冲半径 $R < 1\,000\text{m}$ 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 提取出来的太阳辐射之间差异不显著 ($P > 0.05$)。而当缓冲半径 R 为 1 000m 时, 其分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的太阳辐射分别为 $17\,3446.55 \pm 1\,425.05\text{WH/m}^2$ (平均值 $\pm$ 标准误) 和 $162\,435.29 \pm 1\,335.83\text{WH/m}^2$, 两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。当缓冲半径 $R > 1\,000\text{m}$ 时, 分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 所对应的太阳辐射都小于缓冲半径为 1 000m 的太阳辐射, 且 5m 和 30m 的 DEM 之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着缓冲半径的增大, 两者的太阳辐射都呈现出减小的趋势, 同时 30m 分辨率的太阳辐射始终小于 5m 分辨率的太阳辐射 (图 5)。

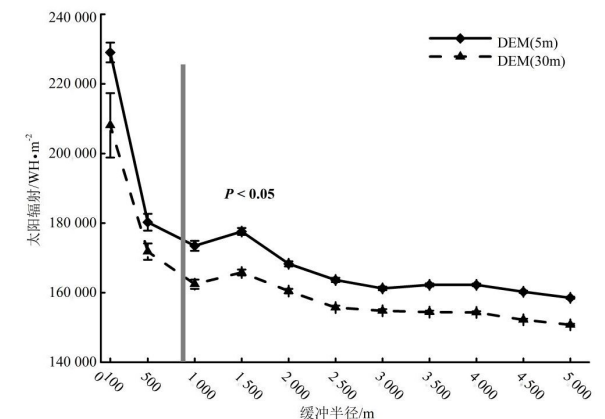


图 5 从 5m 和 30m 分辨率的 DEM 中提取的太阳辐射随缓冲半径的变化

Fig. 5 The solar radiation extracted from DEM of 5m and 30m varies with buffer radius

2.5 坡度与太阳辐射之间的关系

由于山地地表接收的太阳辐射受到坡度、坡向及地形遮蔽等因素的影响。从 5m 和 30m 分辨率的

DEM 中计算得到的坡度和太阳辐射成负相关关系 ($P < 0.05$)，随着研究区域坡度的增大，其太阳辐射逐渐在减小 (图 6)。

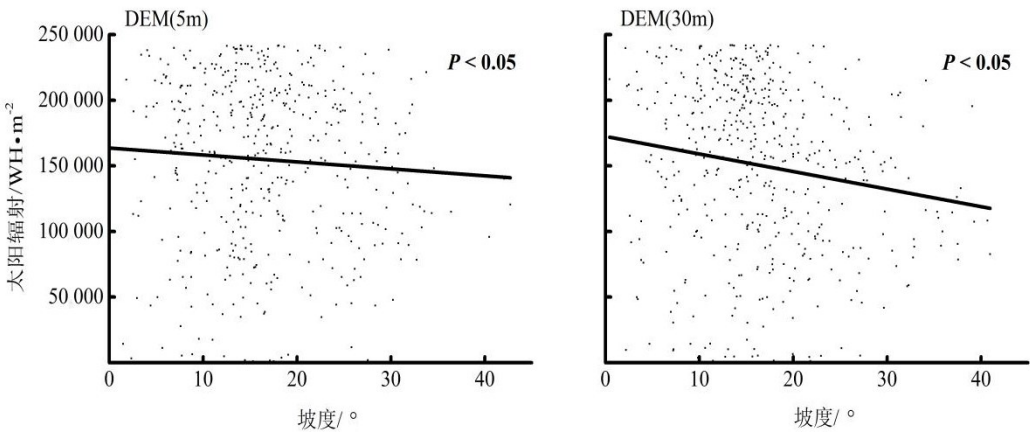


图 6 坡度与太阳辐射的关系

Fig. 6 The relationship between slope and solar radiation

3 讨论与结论

3.1 讨论

数字高程模型 (DEM) 包含大量的地形信息，是地形分析的主要数据源，DEM 中计算的地形因子对水土流失、土地利用、土地资源评价和城市规划的研究起着重要的作用^[24~25]。本研究通过分析两种不同分辨率的 DEM 所提取的地形因子随着缓冲面积的变化，发现随着缓冲面积的增大，5m 和 30m 分辨率 DEM 的变化趋势相同 (见图 2~5)。说明不同分辨率的 DEM 数据对于整体地表地貌变化的反映基本是一致的。王建强^[22]以丽水市某区 5、25、45、75 和 100m 5 种不同分辨率的 DEM 数据为基础，分别计算其地面坡度、坡向和地表粗糙度 3 个地形因子并进行分析，同样发现不同空间分辨率的遥感影像对平地、丘陵、山地和高山的描述基本相同。刘远等^[26]基于 HYDRO1K、SRTM (version 4) 和 ASTER GDEM 共 3 种不同的 DEM 数据源对韩江流域的高程进行了分析，发现 3 组数据的平均高程很接近，海拔分布曲线差别较小，说明 3 种 DEM 反映的地貌状况基本一致，该结果与本文一致。

对于不同的地形因子来说，在不同的面积范围内，5m 和 30m 分辨率的 DEM 之间不存在显著差异 ($P > 0.05$) 如：缓冲半径 $R < 500m$ 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 之间差异不显著；当空间尺

度面积达到某一范围后，两种分辨率的 DEM 之间呈现出显著的差异 ($P < 0.05$)，如：缓冲半径 $R \geq 500m$ 时，分辨率为 5m 和 30m 的 DEM 之间存在显著差异 (见图 2)。究其原因，由于研究区域为黄土高原丘陵区，该区疏松的黄土表层经流水侵蚀，形成了沟壑纵横的地表，梁、峁广泛分布的破碎地形，山地沟谷密度大^[27~28]，因此地形起伏较复杂^[29]。随着缓冲面积的增大，研究范围内所包含的地貌特征越来越丰富。两种分辨率的 DEM，5m 分辨率的 DEM 能更全面细致地刻画所选研究的区域，包含的地形信息更加丰富，可以真实地反映地表起伏形态；而 30m 分辨率的 DEM 对地形的刻画随着研究面积的增大的变化趋于平坦化，所包含的地形信息比较单一，对地形的刻画不太深刻，某些如小沟谷这样的微地形特征就会被忽略。

在研究中发现，随着缓冲面积的增大，提取得到的海拔、坡度和地表粗糙度的平均值也呈现出上升的趋势，而且 30m 分辨率的 DEM 计算出的海拔、坡度、地表粗糙度的平均值高于 5m (图 2~4)。陈楠^[11]选择了位于黄土高原上的 7 个研究样区 (每个样区面积约为 100km²) 发现，随着 DEM 分辨率的粗略化，所提取的平均坡度值有可能升高。郝振纯等^[30]选取黄河中游的小理河岔巴沟流域为研究对象，基于 50m 的 DEM 生成 150~950m 的 9 组 DEM，分析了高程、河网长度、坡度、地形指数等几个特征参数，发现随着 DEM 空间分辨率的降低，地形因子指数的平均值在增大，增大比

率逐渐变小,反映了整体地形是向更平坦的地势转化,该结果与本文一致。可能的原因是由于缓冲区域的增大,地形变得更加复杂,使得地形因子变大。但是,随着缓冲面积的增大,不同分辨率DEM计算的海拔、坡度和坡向的平均值显示出升高的趋势,而提取的太阳辐射量随缓冲面积的增长呈现出下降趋势,同时5m的太阳辐射始终高于30m的。黄盼等^[31]研究发现,随着坡度的增大,太阳辐射呈现递减的趋势。骆汉等^[32]同样发现,太阳直接辐射日均量随坡度增大呈递减趋势。这些研究结果与本文一致。由于山地地表接收的太阳辐射受到坡度、坡向及地形遮蔽等影响^[32];随着缓冲面积的增大,研究区内的坡度也在变大(图3),坡度与太阳辐射呈负相关关系(见图6),因此太阳辐射随着缓冲区域的增大而降低。

3.2 结论

本文在研究中通过提取5m和30m分辨率DEM的地形因子,并对其在不同空间尺度下进行了对比分析,得出以下结论:

(1)不同来源的DEM对于研究区域内的地形地貌的反映和描述基本是一致的;但由于地形信息受到DEM栅格精度的影响,DEM分辨率越高,其包含的信息量也相应的越多,对地形地貌的刻画越精确。

(2)不同分辨率的DEM所包含的地形信息受空间尺度效应的影响表现尤为明显,对于30m分辨率的DEM数据,适用于计算地貌类型单一、地势平坦的平原地区。对于地形比较复杂的地区(地形起伏较大),如黄土高原地区,选择5m分辨率的DEM数据能更好地反映出局部地形特征。

(3)此外,太阳辐射分布具有很强的地形规律,其受许多地形因子的影响在本研究的黄土高原丘陵区,坡度与辐射量呈负相关关系,即随着坡度的增加,辐射量呈递减的趋势。

参考文献:

[1]叶海建. DEM模型生成效率分析[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(6): 81-84.

[2]陈晨, 陈永刚, 徐文兵, 等. 基于DEM的小班坡度自动提取算法及其验证[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 83-88.

[3]Were K, Bui D T, DICK Q B, *et al.* A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic car-

bon stocks across an Afromontane landscape[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 394-403.

[4]Yun J B, Seong Y B. An algorithm to extract more accurate stream longitudinal profiles from unfilled DEMs[J]. *Geomorphology*, 2015, 242: 38-48.

[5]Hani A F M, Sathyamoorthy D, Asirvadam V S. A method for computation of surface roughness of digital elevation model terrains via multiscale analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(2): 177-192.

[6]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.

[7]汤国安, 刘学军, 房亮, 等. DEM及数字地形分析中尺度问题研究综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(12): 1059-1066.

[8]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.

[9]季建华, 杨军生. 大比例尺DEM生产过程中的粗差检测与质量控制的研究[J]. *现代测绘*, 2004, 27(3): 31-33.

[10]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.

[11]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.

[12]王峰, 王春梅. 地形因子与DEM分辨率关系的初步研究——以蒙阴县为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 225-229.

[13]Clement M, Frederic B. Full-waveform Topographic Lidar: State-of-the-art[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16.

[14]李发源, 龙毅, 葛珊珊. 数字高程模型在黄土高原研究中的应用综述[J]. *人民黄河*, 2006, 28(1): 73-75.

[15]李发源. 数字高程模型(DEM)在黄土高原研究中的应用与展望[C]. 中国地理信息系统协会. 中国地理信息系统协会第八届年会论文集. 北京: 中国地理信息系统协会, 2004: 809-813.

[16]耿豪鹏, 潘保田, 王超, 等. 基于GIS与USLE的榆中县土壤侵蚀[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(6): 8-13.

[17]李蒙蒙, 赵媛媛, 高广磊, 等. DEM分辨率对地形因子提取精度的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(5): 15-22.

[18]李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 317-322.

[19]韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率DEM的地形特征提取与分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(1): 33-36.