

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.026.

李泽森, 广慧冰, 张新宇, 等. 基于尺度效应曲线及信息熵的延河流域适宜 DEM 分辨率判定[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 42-49, 58.

Li Zesen, Guang Huibing, Zhang Xinyu, et al. DEM Resolution Selection in the Yanhe River Basin Based on Topographic Scale Effect Curve and Information Entropy Theory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 42-49, 58.

基于尺度效应曲线及信息熵的延河流域 适宜 DEM 分辨率判定

李泽森¹, 广慧冰¹, 张新宇¹, 颜秉龙², 焦峰^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.连云港市水利规划设计院有限公司,
江苏 连云港 222006; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 确定黄土高原小流域地貌水文研究需要下的适宜 DEM 分辨率, 探究尺度效应曲线和信息熵方法适用度, 并为判定适宜分辨率提供新视角和新途径。 [方法] 以黄土丘陵沟壑区的延河流域为研究区, 利用 ArcGIS 对原分辨率 DEM 进行重采样, 获取多组不同分辨率 DEM, 并提取相应尺度下地形属性值, 绘制两种不同的尺度效应曲线 (“平均坡度-分辨率”和“局部方差均值-分辨率”曲线), 并引入信息熵和互信息熵, 结合实际地形, 对适宜 DEM 分辨率进行了判别。 [结果] (1) 在地形复杂的延河流域, 基于不同判定方法所获结果有所不同, 而局部方差均值、信息熵及互信息熵所获适宜分辨率结果相近。(2) 采用不同地形属性判别适宜分辨率结果有所不同, 剖面曲率和平面曲率所获适宜分辨率较为相近(局部方差均值结果为 15~20 m, 信息熵和互信息熵结果均为 15 m), 坡度较曲率所获适宜分辨率差异更大(局部方差均值结果为 20~35 m, 信息熵和互信息熵结果均为 20 m)。 [结论] 局部方差均值和信息熵均适用于该地区的 DEM 分辨率判定, 延河流域适宜 DEM 分辨率为 15~20 m。

关键词: DEM; 分辨率; 流域地形参数; 信息熵; 互信息熵; 延河流域

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0042-08

DEM Resolution Selection in the Yanhe River Basin Based on Topographic Scale Effect Curve and Information Entropy Theory

Li Zesen¹, Guang Huibing¹, Zhang Xinyu¹, Yan Binglong², Jiao Feng^{1,3}

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Lianyungang Water Resources Planning and Design Institute, Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222006, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, MWR & CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to determine the appropriate DEM resolution for geomorphic hydrology research in a small watershed of the Loess Plateau, explore the applicability of scale effect curve and information entropy method, and provide a new perspective and approach for determining the appropriate resolution. [Methods] Taking Yanhe River Basin in the loess hilly region as the research area, ArcGIS was used to resample the original resolution DEM, obtain multiple groups of DEM with different resolutions, extract the terrain attribute values at corresponding scales, and draw two different scale effect curves (‘ average slope-resolution ’ and ‘ local variance mean-resolution ’ curves). Information entropy and mutual information entropy are introduced to distinguish suitable DEM resolution based on actual terrain. [Results] (1) In the Yanhe River Basin with complex terrain, the results obtained by different determination methods are different, while the results of local variance mean, information entropy and

收稿日期: 2023-09-06

修回日期: 2023-09-18

资助项目: 国家自然科学基金“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426)

第一作者: 李泽森(1999—), 男, 陕西汉阴人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持效益评价。E-mail: 15594537278@nwfufu.edu.cn

通信作者: 焦峰(1967—), 男, 陕西三原人, 博士, 研究员, 主要从事 GIS 应用和水土保持与环境效应监测评价研究。E-mail: Jiaof@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

mutual information entropy are similar. (2) The results of determining the appropriate resolution by different terrain attributes are different. The appropriate resolution obtained by profile curvature and plane curvature is similar (the local mean variance is 15~20 m, and the information entropy and mutual information entropy are both 15 m), and the difference of the appropriate resolution obtained by slope is greater than that obtained by curvature (the local mean variance is 20~35 m). The results of information entropy and mutual information entropy are both 20 m. [Conclusion] Both local variance mean and information entropy method are suitable for DEM resolution determination in this area, and the appropriate DEM resolution in Yanhe River Basin is 15~20 m.

Keywords: DEM; resolution; basin topographic parameters; information entropy; mutual information entropy; Yanhe River Basin

数字高程模型(DEM)的分辨率是其刻画地形地貌精确程度的重要指标,其对于地形的描述是利用栅格离散点的格式进行模拟。有研究表明,DEM分辨率与其他地形属性的提取及表达均有不同程度的影响^[1],如分辨率与坡长提取值呈负相关^[2],河网精度也显著受制于分辨率^[3-4]。诸如流域水文模型的构建等,流域参数的获取精度和模型的模拟精度等都受DEM分辨率的影响^[5-6]。所以DEM描述地形程度有很大的程度受制于栅格分辨率的尺寸^[7-8]。不同DEM分辨率如何影响流域特征值的提取以及如何选取适宜的分辨率成为许多学者的研究对象。

在不同分辨率对流域特征参数影响研究中,常用的确定DEM适宜分辨率的方法主要有3种^[9]:(1)基于具有地貌学意义的地形参数精度确定适宜分辨率,如基于坡度均方根、中误差等绘制趋势线,并以趋势平缓区域作为适宜分辨率^[10];(2)依据研究或应用需求,在模型应用中确定适宜分辨率^[11]。(3)以等高线或采样点为基础判定适宜分辨率。但是由于研究区域的地貌复杂程度及地形结构差异显著,选用具有地貌学意义的地形参数以确定适宜分辨率,参数单一,且受限于分析算法和原始采样数据,对于不同研究区的适用程度存在一定差异^[12]。在研究中,过高的分辨率会导致计算冗余,在部分研究情况下,还会导致细部地形出现微地貌,影响地形参数整体统计结果的精度^[13]。所以,部分研究在受制于原始数据、计算量或研究尺度需要的情况下,通常选用的分辨率相对较低,而部分地形特征参数并不能清晰显示拐点以筛选合适分辨率,进而无法满足试验需要。由此可见,确定分辨率方法仍存在拐点不清晰,在不同复杂地形上适用性具有差异性,判定精度受制于所选地形特征参数等问题,所以,采用不同的地形特征参数,对于不同的判定方法,得出的适宜分辨率尺寸是否会受到影响,如何引入新指标以尽可能减少选择特定地形参数对于适宜分辨率的干扰,还有待进一步研究。

本研究选择位于黄土丘陵沟壑区的延河流域,统计不同分辨率DEM地形特征值,利用地形信息定量刻画尺度效应的曲线(“平均坡度-分辨率”趋势线和“局部方差均值-分辨率”趋势线),再结合信息熵及互信息熵对适宜分辨率进行判定,分析探讨不同地形属性和不同方法对结果的影响,以期为黄土高原流域尺度适宜DEM分辨率确定提供依据,为判定适宜分辨率提供新思路。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

延河是黄河中游的一级支流,延河流域地处陕西省北部,发源地为陕西省靖边天赐湾乡周山,由西北至东南走向,流经志丹、安塞、延安等地,于延长南河沟乡流入黄河,河流总长约286.9 km,整体地势起伏较大,绝大部分地区坡度在15°以上,流域整体平均坡度为17°,平均海拔约1 214 m,高程为560~1 760 m,面积约为7 687 km²。地理位置为36°23′—37°17′N, 108°45′—110°28′E,流域地形支离破碎,沟壑纵横且梁峁起伏,且地势西北高、东南低^[14-15]。

1.2 研究方法

本文以小流域地貌水文研究为应用需要,利用ArcGIS对延河流域原分辨率DEM进行重采样并提取各分辨率DEM数据的地形信息,并进行分类统计。而后基于两种不同的地形信息定量刻画尺度效应曲线(“平均坡度-分辨率”趋势线和“局部方差均值-分辨率”趋势线)和信息熵理论,获取逼近真实地形且冗余信息量少的适宜分辨率,并从地形形态表达(坡度参数和山体阴影图)和等高线套合效果对确立的适宜分辨率予以验证分析。在此基础上,对3种方法得出的结果进行比较分析,以分析不同地形信息及不同方法对判别适宜分辨率的影响,并对延河流域DEM适宜分辨率区间进行判断。

1.2.1 DEM数据源与坡度曲率计算 本研究所用

DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 经投影、格式转换、裁剪等处理后, 获得延河流域分辨率为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的 DEM。在此基础上, 利用 ArcGIS 对其进行重采样得到 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 140, 180, 220 m 共 15 种不同分辨率 DEM, 重采样方法为双线性内插法 (bilinear)。并利用空间分析 (spatial analysis) 模块的表面分析 (surface analysis) 工具提取各不同分辨率的地形信息 (坡度、剖面曲率和平面曲率)。在提取的地形参数中, 将提取出的坡度数值, 结合研究区域实际情况和水土保持通用分级标准^[16]进行分级延伸, 共分为 8 个等级, 分别是 $0^\circ \sim 3^\circ$, $3^\circ \sim 5^\circ$, $5^\circ \sim 8^\circ$, $8^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$, $35^\circ \sim 45^\circ$, $45^\circ \sim 90^\circ$ 。同理, 将所提取的曲率分为 8 个等级, 分别为 < -6 , $-6 \sim -4$, $-4 \sim -2$, $-2 \sim 0$, $0 \sim 2$, $2 \sim 4$, $4 \sim 6$, > 6 , 为后续信息熵计算做数据基础。

1.2.2 “平均坡度-分辨率”曲线 基于“地形指标-DEM 分辨率”曲线是较为常用的确定适宜 DEM 分辨率的方法之一, 常用坡度均方根和分辨率的关系曲线来遴选适宜分辨率。而坡度均方根是 ANUDEM 自动计算的, 许多研究所用 DEM 无法得出该项参数, 就需要借助其他具有地貌学意义的参数进行代替, 而栅格坡度和坡度均方根的算法相近^[17], 且平均坡度具有明确的地形地貌意义, 所以可代替坡度均方根作为判别依据。本试验提取多组分辨率下坡度均值, 绘制“坡度均值-分辨率”趋势图, 其中趋势线拐点可作为 DEM 适宜分辨率。

1.2.3 “局部方差均值-分辨率”曲线 该方法借鉴于遥感影像适宜尺度选择方法^[18], 首先通过重采样等方式获得多尺度数据, 而后基于 3×3 大小的分析窗口, 以获取局部方差均值 (\overline{LV}), 公式如下^[19]:

$$\overline{LV} = (\sum_x \sum_y LV_{x,y}) / N, \quad LV_{x,y} = [\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2] / n \quad (1)$$

式中: $LV_{x,y}$ 为分析窗口中栅格 (x, y) 对应地形指标的局部方差; n 为分析窗口的栅格总数; X_k 为分析窗口中第 k 个栅格的地形参数; N 为 DEM 的总栅格数。各可由 DEM 提取获得的地形参数中, 坡度和平面曲率、剖面曲率等可以视为地表高程面的一阶导数和二阶导数^[20], 因此坡度以及曲率可作为遴选适宜分辨率的重要指标。在一定领域范围内 DEM 高程信息的变化会随着分辨率或是分析窗口的改变而改变, 当地形属性变化最为强烈时, 则最能体现地形与各种地理过程、地理现象之间的紧密联系^[18,21]。因此, 本试验分别选取坡度局部方差均值、剖面曲率局

部方差均值和平面曲率局部方差均值绘制趋势线, 并以趋势线最大值对应的分辨率作为适宜分辨率。

1.2.4 信息熵与互信息熵计算 信息熵 (Entropy) 是一个统计量, 表征可以从系统中提取信息的度量^[22]。对于由一系列栅格组成的 DEM, 可借鉴信息论, 将其视为离散的平稳信息源。信息熵则可以表征 DEM 栅格中具有的地形信息量。随着栅格尺寸及分布改变, 其栅格所具有的地形信息量也随之变化, 熵值愈高, 所传输的信息愈多, 反之则愈少, 随着分辨率变化, 地形因子的熵值愈大, 其具有的信息量愈大, 能更加准确地刻画实际地形。因此, 可以基于信息熵以表征不同分辨率 DEM 下地形的信息总量。在 Shannon 信息论中, 信息熵表达式为:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P_i(x) \log_2 P_i(x) \quad (2)$$

式中: H 为信息熵 (bit); $P_i(x)$ 为随机事件 x 发生的概率。随分辨率变化, 其栅格所含总地形信息量亦随之改变, 信息含量愈大, DEM 愈能充分表征地形, 而信息量过大, 则会数据冗余, 会对地形信息提取分析造成影响。当地形信息熵由平稳变化转为剧烈衰减, 则拐点处代表地形信息含量较完整的最低分辨率, 选该处为适宜分辨率则数据冗余较低分辨率较小, 且具有较高信息含量能反映原始数据所包含的地形信息, 因此, 绘制“信息熵-分辨率”趋势图时, 其拐点对应分辨率为适宜分辨率。

互信息熵表征两个随机变量之间的关联程度, 即确定一个随机变量后, 另一个随机变量随机性的削弱程度。依据信息熵理论, $0 \leq I(X, Y) \leq H_{\min}$, 若 X 和 Y 相互独立, 则熵值为 0^[23-24], 因此, 对于重采样后的 DEM, 其包含的地形信息并未完全随栅格尺寸增大而丢失, 其互信息熵值恒大于 0。综上, 通过互信息熵值, 可以评估 DEM 经重采样后在其他分辨率下坡度、剖面曲率、平面曲率等残留的信息量大小, 借此, 可以衡量地形属性经分辨率变化后的变化大小, 互信息熵值愈大, 则愈接近原分辨率下地形属性, 借此以确定地形信息在重采样下的信息完整程度。

互信息熵表达式为:

$$I(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j) \log_2 \frac{P(x_i, y_j)}{P(x_i)P(y_j)} \quad (3)$$

式中: $P(x_i, y_j)$ 为环境参数 X 和 Y 的联合概率分布函数; $P(x_i)$ 和 $P(y_j)$ 分别为环境参数 X 和 Y 的边缘概率分布函数; 互信息 $I(X, Y)$ 则是对环境参数 X 和 Y 相互依存程度的信息度量。

本研究互信息熵的具体计算方法如下: 如 DEM 分辨率为 5 m 和 10 m, 对这两种分辨率坡度数值统

计并分级, $P(x_i)$, $P(y_j)$ 分别为栅格随机落入分辨率 5 m, 10 m DEM 第 i, j ($i, j=1, 2, \dots, 8$ 为坡度分级的编号) 级别的概率, 则 $P(x_i, y_j)$ 表示随即栅格落入 5 m DEM 坡度为第 i 级同时对应 10 m DEM 坡度为 j 级别时的概率, 计算出互信息熵值为 $\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 P(x_i, y_j) \log_2 [P(x_i, y_j) / P(x_i) P(y_j)]$, 单位为 bit。同理, 可以分别计算出 5 m 与其他分辨率地形因子的互信息熵值。绘制“互信息熵-分辨率”趋势线, 以其拐点对应分辨率作为适宜分辨率。

2 结果与分析

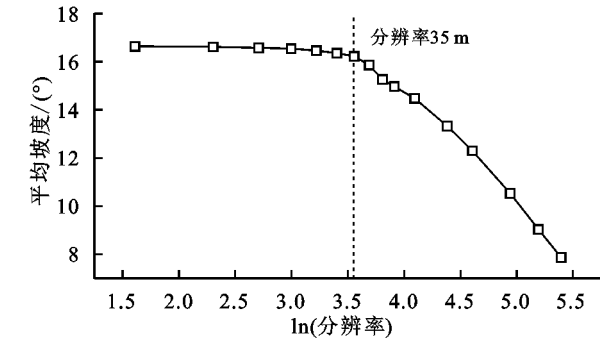
2.1 基于平均坡度的 DEM 分辨率选择

从生成的 16 组不同分辨率 DEM 中提取并统计其平均坡度, 绘制“平均坡度-分辨率”尺度效应曲线图。从图 1 可以看出, 随着栅格尺寸的变大, 平均坡度总体呈现衰减态势, 先于 5~35 m 分辨率区间以较为平缓的趋势衰减, 随后于分辨率 35 m 处出现拐点并剧烈衰减, 后以更明显的趋势下降。这说明, 随栅格尺寸增大, 坡度“陡减缓增”, 在拐点处之后, DEM 对地形概括性显著增强, 地形离散化, 地势平坦化加剧。由此, 可以看出在延河流域建立及运用 DEM 时, 适宜分辨率区间为 35 m。

2.2 基于局部方差均值的 DEM 分辨率选择

于不同分辨率, 获取相应分辨率下坡度、曲率等, 并利用公式(1)计算得出“局部方差均值-分辨率”尺度效应曲线(图 2), 由图可得出适宜分辨率。由图 2 可以看出, 选用不同地形属性进行局部方差均值计算,

所得的“局部方差均值-分辨率”曲线结果有所差异, 获取的适宜分辨率并不一致, 即遴选适宜分辨率时地形属性的选取对结果影响较明显。



注:横坐标采用自然对数坐标,即以 e 为底分辨率的对数,以清晰区分分辨率数据点。下图同。

图 1 不同分辨率“平均坡度-分辨率”趋势
Fig. 1 ‘Average slope-resolution’ trend plots with different resolutions

由图 2A 可见,坡度局部方差均值在 30 m 分辨率处至极值,并于 20~35 m 分辨率区间处具有较高且平稳的局部方差均值区间,即 20~35 m 为适宜分辨率区间,35 m 为适宜分辨率最低值。由图 2B 和图 2C 可见,剖面曲率及平面曲率的局部方差均值均在 15 m 分辨率处出现极值,并且在较窄的区间(15~20 m)出现较为明显平稳的局部方差均值高值区间,所得适宜分辨率区间为 15~20 m,20 m 为适宜分辨率最低值。可见,在采用平面曲率以及剖面曲率时,获得的适宜分辨率相同。相较于曲率局部方差均值,采用坡度局部方差均值所取的适宜分辨率明显更粗,且具有较宽的适宜分辨率区间。

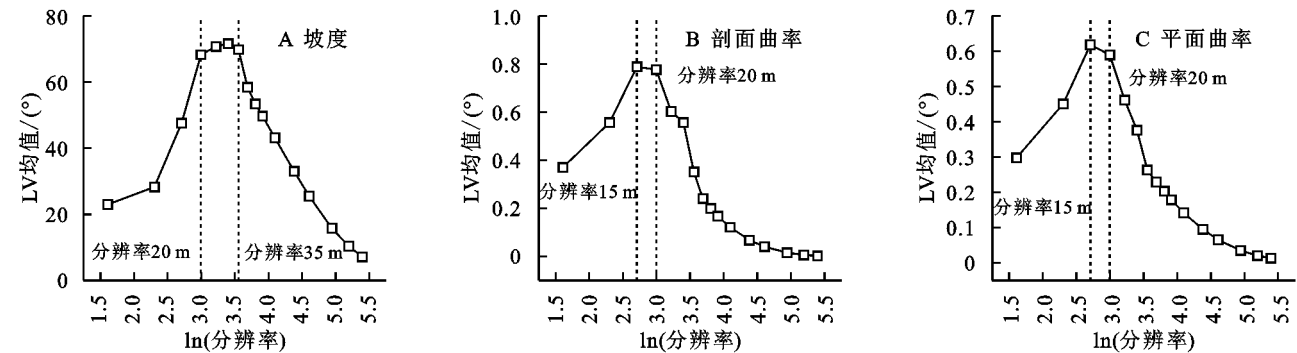


图 2 不同分辨率 DEM“局部方差均值-分辨率”趋势
Fig. 2 ‘Mean local variance-resolution’ trend graph of DEM with different resolutions

2.3 基于信息熵的 DEM 分辨率选择

依据信息熵进行计算,并绘制“信息熵-分辨率”和“互信息熵-分辨率”趋势图(图 3—4)。如图 3A 所示,随着栅格尺寸的增大,坡度信息熵均在 5~20 m 分辨率区间内缓慢衰减,后于分辨率 20 m 处开始加剧衰减。如图 3B—3C 所示,剖面曲率和平面曲率信息熵均于 5~15 m 分辨率区间呈平缓衰减态势,于

分辨率 15 m 处出现拐点,并以更陡的趋势迅速衰减并在分辨率 180 m 处趋于平缓。相较于曲率信息熵,坡度信息熵高值衰减平缓区更宽(5~20 m)。无论坡度或曲率信息熵,均在拐点之后出现剧烈衰减,这是因为随着栅格尺寸加大,对于地形概括性增强,栅格内地势被平坦化,地形离散化加剧,其信息量下降,所以信息熵下降趋势明显。而随着分辨率减小,

流域中陡坡均平坦化,地形趋于愈加简单化,其信息熵趋于平衡。由此可见,坡度信息熵所得适宜分辨率

为 20 m,剖面 and 平面曲率较坡度信息熵所得适宜分辨率更高,为 15 m。

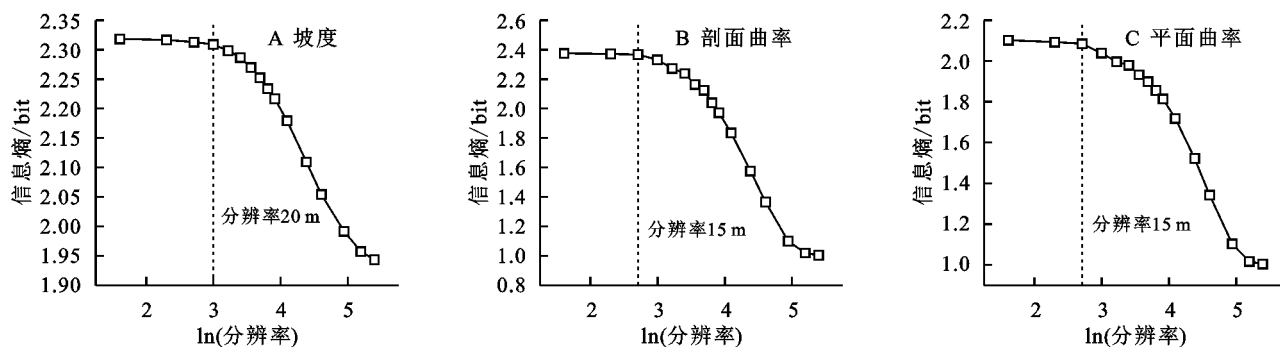


图 3 不同分辨率 DEM“信息熵-分辨率”趋势

Fig. 3 ‘Information entropy-resolution’ trend graph of DEM with different resolutions

从图 4 可以看出,坡度和曲率的互信息熵值均呈先平稳后剧烈衰减态势,并在最后趋于稳定,这说明,栅格尺寸变化,原分辨率 DEM 于更粗分辨率的“残留”先缓慢减少,后急剧衰减并最终趋于平缓。由图 4A 可知,坡度互信息熵值先平缓,后于 20 m 出现拐点,并呈剧烈衰减态势后于 180 m 处趋于平稳。与坡度互

信息熵不同,由图 4B—4C 可知,剖面曲率和平面曲率的互信息熵值趋势线,由平缓转为剧烈变化的拐点在 15 m 处。由此可见,相较于两种曲率,坡度在分辨率改变后,趋势变化的拐点值对应分辨率更粗。坡度互信息熵值的拐点在 20 m 处,而剖面曲率和平面曲率的互信息熵值的拐点均出现在 15 m 处。

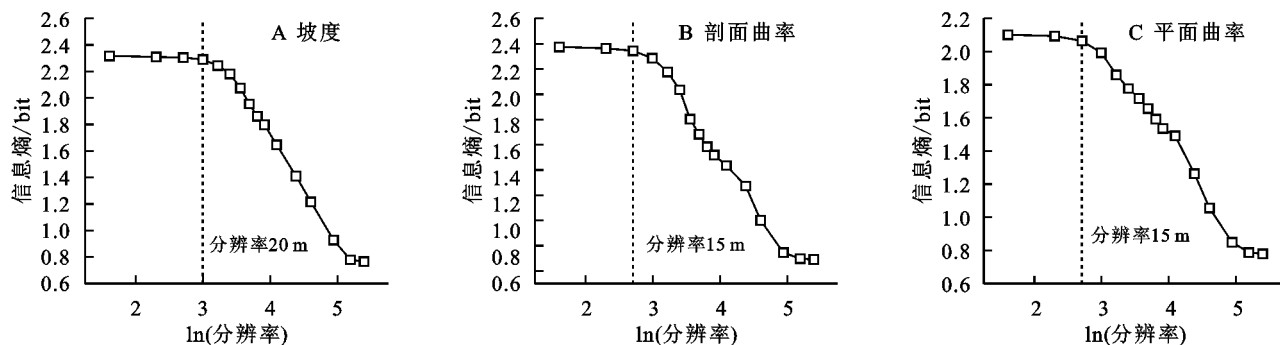


图 4 不同分辨率 DEM“互信息熵-分辨率”趋势

Fig. 4 ‘Mutual information entropy-resolution’ trend graph of DEM with different resolutions

综上所述,利用信息熵和互信息熵这两种指标进行适宜分辨率的判别,其结果均受所选取地形曲面参数不同而有所差异;剖面曲率和平面曲率所得遴选结果相同;且当选取地形指标相同时,由信息熵和互信息熵这两种指标所绘制的曲线所得适宜分辨率相同。

2.4 适宜分辨率验证

本文采用地形形态分析和等高线套合分析对上述 3 种方法的结果进行验证。本文从不同 DEM 分辨率提取和统计坡度参数(表 1),同时绘制山体阴影图(图 5)以分析地形特征。由表 1 可知,以 5 m 分辨率为参照,15 m 和 20 m 分辨率平均坡度衰减率较低,分别为 0.32%, 0.50%,而 35 m 分辨率的坡度均值衰减率较前者比较大,为 2.49%,同时,35 m 的最大坡度较其他分辨率有较明显的降低,其标准差也有较明显的下降。这说明相对于其他适宜分辨率,35 m 分辨率下坡度衰减较明显,地形概括性较强。由此可见,随栅格尺寸增大,

对地形概括性愈高,从而致使坡度明显减少,流域整体及地形复杂区域愈加逐渐平坦化均质化。

从图 5 可见,通过比较不同分辨率下山体阴影图,5 m 分辨率生成的山体阴影图具有清晰明显的地势起伏,有明显山脊及山谷等山体特征纹理,这是一种过采样的结果,而 15 m 和 20 m 分辨率下地形地貌特征仍有较为清晰的表达,35 m 分辨率下地形特征变得较为模糊,但未出现多余的纹理特征。

表 1 不同分辨率 DEM 坡度参数

Table 1 Statistical charts of slope parameters of DEM with different resolutions

分辨率/m	最小值/(°)	最大值/(°)	平均值/(°)	标准差
5	0	54.7334	16.6412	10.1583
15	0	54.5178	16.5883	9.8145
20	0	54.3303	16.5573	9.4847
35	0	47.5072	16.2261	8.6246

从图 6 可见,由 15 m,20 m 分辨率生成的等高线与原分辨率(5 m)趋势基本吻合,叠合效果较好,而 35 m 分辨率下不仅缺失部分原等高线,且局部等高线走势及弯曲程度变化较大,叠合效果较前两者差,说明分辨率

降低会导致地形概括化加剧,并逐步致使等高线失真。可见,35 m 分辨率下坡度变化较大,等高线叠合效果较差,而 15 m 和 20 m 地形特征明显,等高线套合较好且坡度衰减极小,作为适宜分辨率是合适的。

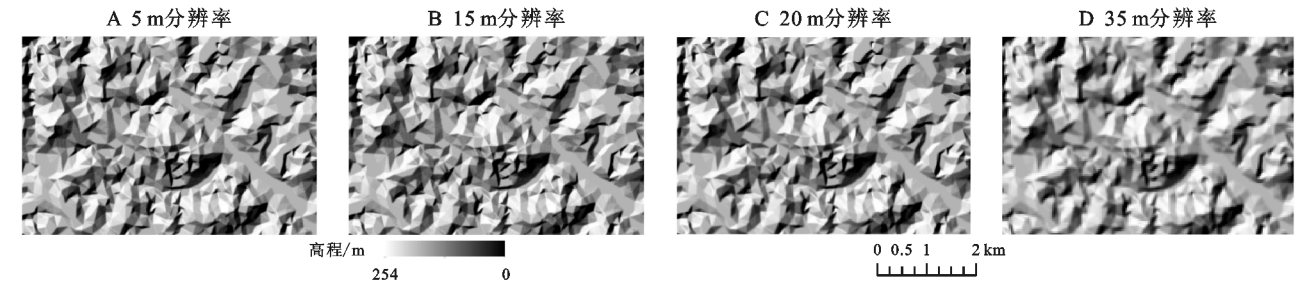


图 5 不同分辨率 DEM 山体阴影

Fig. 5 Mountain shadow maps of DEM with different resolutions

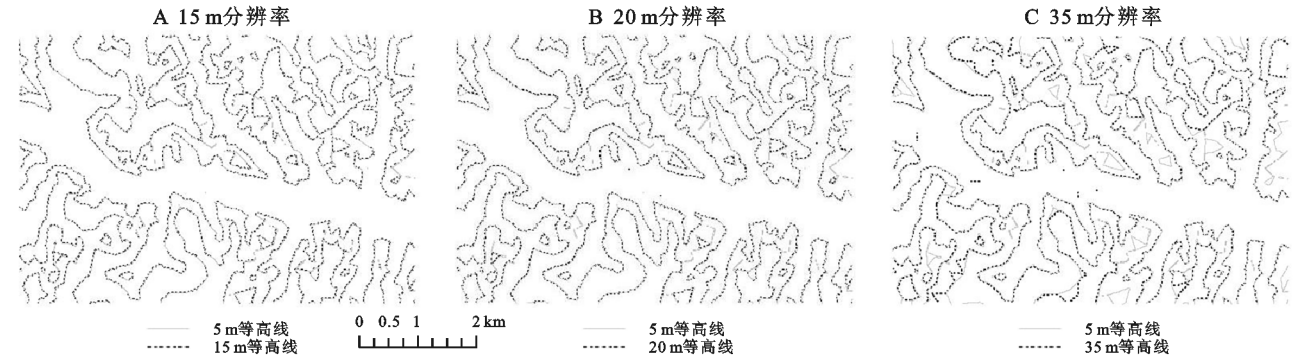


图 6 不同分辨率 DEM 等高线

Fig. 6 DEM contour maps of different resolutions

3 讨论

3.1 坡度与曲率等地形指标的选择

从本研究分析可得出,DEM 对地形分析和细部地形的真实反映程度是由水平分辨率决定的,随着分辨率变粗,地形信息衰减,流域地形平坦化,这与前人研究结果相似^[25]。坡度、平面曲率和剖面曲率三者精度均易受 DEM 质量的影响^[26-28]。DEM 分辨率大小对于坡度和曲率值提取有着显著影响,采用不同地形属性指标,获取的适宜分辨率有所不同。选用坡度作为判断指标,所获适宜分辨率较曲率更粗,这是因为坡度是单一因子,反映了地表高差与水平距离之比,而剖面曲率和平面曲率均为复合因子,其变化涉及到地形在不同方向上的弯曲程度变化,坡度变率、坡向变率等都会对曲率造成影响。而在黄土丘陵沟壑区,地形复杂,不同地形特征条件的区域变化较频繁,当地形起伏较大时,其高程变化和斜率变化可能会非常剧烈,导致剖面曲率和平面曲率较坡度变化更加剧烈,所以随着分辨率变化,曲率变化敏感度较坡度更高。因此在地形复杂区域,选用剖面曲率和平面曲率作为判断指标所得适宜分辨率贴合实际地形。本文只考虑了指标之间的结果差异,但指标提取方法不同以及

空间尺度变化对分辨率结果的影响亟需探究。

3.2 地形指标与信息熵-分辨率变化曲线解析

在如何确定流域适宜 DEM 分辨率研究中,本文主要基于“平均坡度-分辨率”“局部方差均值-分辨率”曲线和信息熵对适宜分辨率进行分析。从研究结果上看,这 3 种方法得出的适宜分辨率是不同的。基于平均坡度获得的适宜分辨率更粗,其在一定程度上忽视了部分极值情况的出现,对于最大坡度值的剧烈缩减和方差的改变并不敏感,且需要大量数据来确保趋势线的拐点足够清晰,不易于适宜分辨率的判定。在研究区域面积较小或地势较平缓的情况下,所求出的趋势线可能无拐点或不明显,无法做出准确判断,可见这一方法与数据详细程度以及地形复杂程度有关^[17]。基于局部方差均值进行分辨率遴选,所获适宜分辨率较前者更细,且具有宽窄程度不同的分辨率区间,而非单一值,这是因为分析窗口能够考虑到复杂地形局部的部分极端情况,对细部地形的离散程度较平均坡度法有更好的表征,因此在延河流域这一复杂地形其筛选结果较平均坡度更好,但该方法计算量较大,尤其在尺度较大的情况下。同时由于复杂地形下细部地形空间差异显著,不同地形地貌条件下,应用不同地形属性所得适宜分辨率尺度可能不同。该方法全程应用

固定栅格尺寸窗口进行计算并不符合地形实际变化情况,如何进一步改进有待研究。用信息熵值这一单个因子进行评定时,信息熵拐点趋势不明显,所以应计算多个地形参数信息熵以确保结果准确^[19]。本研究还选用了互信息熵值作为评定适宜分辨率的指标之一。互信息熵是对随机变量之间相互依存程度的度量^[29],重采样后的 DEM 会丢失部分地形信息,而互信息熵可评估原分辨率在低分辨率的信息残留量。因此,它更能表征高分辨率与重采样所获取尺度的关联度,并在一定程度上避免了不同地形参数对结果的干扰。但互信息熵不能直接判断各因子所含信息总量,所以需要结合信息熵值进行综合判断。引入信息熵和互信息熵值可为判定适宜分辨率提供新视角新途径,可视为对已有判定方法的补充而非替代。

由上述分析可见,在地形复杂的较大尺度地区,受不同地形条件的小尺度区域影响,选取信息熵和局部方差均值作为判断方法较为可取,应避免采用单一地形属性指标衡量适宜分辨率,应针对尺度大小和所关注指标,选用特定地形属性进行分辨率判别,且针对获取的适宜分辨率也应按相应应用需求,以选定适宜分辨率。如在坡度较陡,地形起伏较大区域,以地形起伏为关注对象,则应选择坡度、高程及曲率等进行分辨率筛选,并选取结果中较精细的分辨率为适宜分辨率^[12]。因此,在现有数据基础上,为更贴合实际地形特征变化及较小计算冗余程度,选用 15~20 m 分辨率区间作为适宜分辨率。

4 结论

(1) 在地形复杂的延河流域,采用同种方法,选取剖面曲率和平面曲率进行分辨率遴选时,结果近似,而坡度作为判别指标其结果较前者有明显差别,其所获适宜分辨率更粗。

(2) 平均坡度能替代坡度均方根作为无法获取坡度均方根时判定适宜分辨率的依据,但其忽略了部分小型陡峻地形随栅格尺寸增加而出现的平坦化,从而获取的适宜分辨率较高。其在地势起伏较大的黄土丘陵沟壑区并不适用,在平坦地区是否适用有待验证。

(3) 局部方差均值、信息熵值和互信息熵值均可作为判定适宜分辨率的指标。其中局部方差均值拐点清晰,但计算量大,互信息熵可衡量 DEM 尺度转换后高分辨率 DEM 在低分辨率的信息“残留量”,以辅助信息熵值对适宜分辨率进行判定。

(4) 基于平均坡度所获适宜分辨率最粗,其余两种方法结果相近。结合验证结果和实际流域地形状况,延河流域适宜 DEM 分辨率为 15~20 m。

笔者在此感谢中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 杨颖楠,李子夫,刘梦云,等.基于不同分辨率 DEM 的永寿县地形信息差异分析[J].水土保持研究,2018,25(6):131-136.
Yang Y N, Li Z F, Liu M Y, et al. Analysis of topographic differences of Yongshou County based on different resolutions of DEM[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(6):131-136.
- [2] 胡璐锦,王亮,陶坤旺.DEM 内插算法对区域坡长提取的影响分析:以陕北黄土丘陵区为例[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):169-175.
Hu L J, Wang L, Tao K W. Effect of DEM interpolation on the slope length extraction [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(10):169-175.
- [3] 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):148-154,258.
Wu X F, Liu C M, Wang Z G. Effect of horizontal resolution of raster DEM on drainage basin characteristics [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):148-154,258.
- [4] 沈俊杰,常宏,唐倩玉,等.汇流阈值对提取叶尔羌河上游流域面积高程积分的影响[J].地球环境学报,2021,12(4):402-410.
Shen J J, Chang H, Tang Q Y, et al. Influence of confluence threshold on extracting hypsometric integral of Upper Yarkant Basin [J]. Journal of Earth Environment, 2021,12(4):402-410.
- [5] 高超,金高洁.SWIM 水文模型的 DEM 尺度效应[J].地理研究,2012,31(3):399-408.
Gao C, Jin G J. Effects of DEM resolution on results of the SWIM hydrological model in the Changtaiguan basin [J]. Geographical Research, 2012,31(3):399-408.
- [6] Pradhan N R, Tachikawa Y, Takara K. A downscaling method of topographic index distribution for matching the scales of model application and parameter identification[J]. Hydrological Processes, 2006,20(6):1385-1405.
- [7] 郭伟玲,樊宇,杨勤科.基于不同分辨率 DEM 提取坡长的统计分布[J].水土保持研究,2019,26(3):72-76,85.
Guo W L, Fan Y, Yang Q K. Statistical distribution of slope length derived from DEM with different spatial resolutions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):72-76,85.
- [8] Wu S, Li J, Huang G H. Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography: Based watershed runoff simulation [J]. Environmental Modelling & Software, 2007,22(9):1250-1260.

- [9] 刘学军,王彦芳,晋蓓,等.顾及数据特性的格网 DEM 分辨率计算[J].地理研究,2010,29(5):852-862.
Liu X J, Wang Y F, Jin B, et al. Resolution analysis of grid digital elevation model based on data property[J]. Geographical Research, 2010,29(5):852-862.
- [10] Yang Q K, McVicar T R, Van Niel T G, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007,9(3):235-246.
- [11] Smith M P, Zhu A X, Burt J E, et al. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey[J]. Geoderma, 2006,137(1/2):58-69.
- [12] 何珊,王春梅,杨勤科.1:50000 DLG 建立 DEM 适宜栅格尺寸的确定[J].山地学报,2017,35(4):572-579.
He S, Wang C M, Yang Q K. Optimizing cellsize for DEM generation with 1:50000 DLG[J]. Mountain Research, 2017,35(4):572-579.
- [13] 江娜,陈超,韩海丰.海岸带地类统计模型中 DEM 空间尺度优选方法[J].自然资源遥感,2022,34(1):34-42.
Jiang N, Chen C, Han H F. An optimization method of DEM resolution for land type statistical model of coastal zones [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022,34(1):34-42.
- [14] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017,33(13):159-167.
Jiao J Y, Wang Z J, Wei Y H, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(13):159-167.
- [15] 姚静,薛超玉,焦峰.基于 Landsat8 OLI 遥感影像的延河流域土壤水分反演研究[J].草地学报,2018,26(5):1109-1117.
Yao J, Xue C Y, Jiao F. Soil moisture retrieval based on Landsat8 OLI image data in the Yanhe River basin [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018,26(5):1109-1117.
- [16] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion SL190—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [17] 王雷,杨勤科,龙永清,等.基于全数字摄影测量数据建立 DEM 时分辨率的确定[J].水土保持通报,2013,33(5):152-155,195.
Wang L, Yang Q K, Long Y Q, et al. Determining DEMs' resolution with digital photogrammetric data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(5):152-155,195.
- [18] 秦承志,呼雪梅.栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J].地理研究,2014,33(2):270-283.
Qin C Z, Hu X M. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis[J]. Geographical Research, 2014,33(2):270-283.
- [19] 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.
Hu X M, Qin C Z. Effects of different topographic attributes on determining appropriate DEM resolution [J]. Progress in Geography, 2014,33(1):50-56.
- [20] Drăguț L, Eisank C, Strasser T. Local variance for multi-scale analysis in geomorphometry[J]. Geomorphology, 2011,130(3/4):162-172.
- [21] Shary P A, Sharaya L S, Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis [J]. Geoderma, 2002,107(1/2):1-32.
- [22] Gaur N, Mohanty B P. Evolution of physical controls for soil moisture in humid and subhumid watersheds [J]. Water Resources Research, 2013,49(3):1244-1258.
- [23] Pan F, Pachepsky Y A, Guber A K, et al. Scale effects on information theory-based measures applied to streamflow patterns in two rural watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2012,414:99-107.
- [24] 高浩然,周勇,刘甲康,等.基于信息熵的耕地土壤养分与环境影响因子空间相关性研究[J].水土保持通报,2021,41(6):226-236.
Gao H R, Zhou Y, Liu J K, et al. Spatial correlation between soil nutrients and environmental factors in cultivated land based on information entropy[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):226-236.
- [25] Wolock D M, McCabe G J. Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000- m resolution digital elevation model data [J]. Hydrological Processes, 2000,14(6):987-1002.
- [26] 杨勤科,贾大伟,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.
Yang Q K, Jupp D, Li R, et al. Researches on DEM derived slope: A review and prospective[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27(1):146-150.
- [27] 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.
Liu X J, Gong J Y, Zhou Q M, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model (DEM) [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004,33(3):258-263.

- [17] 师银芳,熊劲锐,邢捷.1971—2015 年鄂西山地极端气温变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(6):10-17.
Shi Y F, Xiong J K, Xing J. Characteristics of extreme temperature changes in Western Hubei Mountains from 1971 to 2015[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(6):10-17.
- [18] 丁爱中,赵银军,郝弟,等.永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):17-22.
Ding A Z, Zhao Y J, Hao D, et al. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(1):17-22.
- [19] 曹振宇.穆棱河流域上游径流年内分配特性[J].水电能源科学,2019,37(1):21-25.
Cao Z Y. Variation regularity of intra-annual runoff distribution in the upstream of the Muling River Basin [J]. Water Resources and Power, 2019,37(1):21-25.
- [20] 马于航,索梅芹.基于 GA-BP 神经网络与正态区间估计的需水预测:以邯郸市为例[J].中国农村水利水电,2022,64(3):19-24.
Ma Y H, Suo M Q. Research on water demand forecasting in Handan City based on GA-BP neural network and normal interval estimation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022,64(3):19-24.
- [21] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.
Ren G Y, Guo J. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956—2000 [J]. Journal of Natural Resources, 2006,21(1):31-44.
- [22] 刘红国.疏勒河流域水文气象要素趋势分析[J].地下水,2020,42(3):184-185.
Liu H G. Trend analysis of hydrometeorological elements in Shule River Basin [J]. Ground Water, 2020,42(3):184-185.
- [23] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J].水科学进展,2008,19(2):147-152.
Cong Z T, Ni G H, Yang D W, et al. Evaporation paradox in China [J]. Advances in Water Science, 2008,19(2):147-152.
- [24] 陈娜娜,任欣琪.疏勒河流域气温、降水、径流演变特征及径流影响因素分析[C]//河海大学,生态环境部黄河流域生态环境监督管理局,华北水利水电大学,中国自然资源学会水资源专业委员会,2020(第八届)中国水生态大会论文集.
Chen N N, Ren X Q. Variation Characteristics of Temperature, Precipitation, Runoff and Influencing Factors of Runoff in Shule River Basin [C] // Hohai University, Yellow River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Hydropower, Water Resources Committee of Chinese Society of Natural Resources. Proceedings of the 8th China Water Ecology Conference 2020.
- [25] 张昌顺.疏勒河流域山前区降水量变化趋势分析[J].地下水,2015,37(5):158-159,165.
Zhang C S. Analysis of precipitation change trend in the piedmont area of Shule River Basin [J]. Ground Water, 2015,37(5):158-159,165.
- [26] 颜明慧,张文春,刘刚.疏勒河干流降水时空分布研究[J].地下水,2022,44(5):197-200.
Yang M H, Zhang W C, Liu G. Spatiotemporal distribution of precipitation in Shule River main stream [J]. Ground Water, 2022,44(5):197-200.
- [27] 贾玲,张百祖,牛最荣,等.疏勒河上游径流变化与预测分析[J].干旱区研究,2022,39(5):1588-1597.
Jia L, Zhang B Z, Niu Z R, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River [J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1588-1597.

(上接第 49 页)

- [28] 罗为东,甘淑,袁希平,等.基于 UAV 高分辨率 DEM 的复杂微地貌形态特征分析:以恐龙谷南缘山区为例[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(5):109-117.
Luo W D, Gan S, Yuan X P, et al. Morphological characterization of complex micro-landscapes based on UAV high-resolution DEM: Take the mountainous area on the southern rim of Dinosaur valley as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(5):109-117.
- [29] 陈楠,王钦敏.基于地形因子信息量的数字高程模型分辨率的选择:以黄土高原的研究为例[J].武汉大学学报:信息科学版,2009,34(6):692-695,705.
Chen N, Wang Q M. Selection of DEM resolutions based on the information amount of terrain factors: A case study of Loess Plateau area [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(6):692-695,705.