

引用格式:蔡顺,耿豪鹏,郑炜珊,等.基于傅里叶变换的谷间距特征信息提取及其影响因素研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):399-409. [Cai S, Geng H P, Zheng W S, et al. Valley spacing character information and its influencing factors based on the fourier transform[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):399-409.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190529

基于傅里叶变换的谷间距特征信息提取及其影响因素研究

蔡 顺,耿豪鹏*,郑炜珊,潘保田

兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室,兰州 730000

Valley Spacing Character Information and Its Influencing Factors based on the Fourier Transform

CAI Shun, GENG Haopeng*, ZHENG Weishan, PAN Baotian

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Valley spacing is an important characteristic to describe the distance between adjacent valleys. It can reflect the structural feature and spatial distribution of valleys. In this study, we took the Heihe Zhengyixia region and Lanzhou Dalingxian region as examples. We used the ArcGIS to resample the digital surface models (DSM) at 0.12 m resolution which were obtained by unmanned aerial vehicle to different resolution DSM. The different resolution DSM data were further processed by Fourier transform in MATLAB software. We compared different spectrums to build the relationship between land surface spectral feature and valley spacing. Analytical results show that: (1) for the first-order valley region, the effective identification of valley spacing feature signal in the spectrum required a terrain resolution higher than 1/5 of valley spacing. The terrain resolution could directly affect the identification accuracy of valley spacing signal. While the space domain had less influence on the valley spacing signal identification. (2) for the multi-order valley region, the effective identification of valley spacing feature signal in the spectrum required a terrain resolution higher than 1/3 of valley spacing. Either the decrease in terrain resolution or the increase in the spatial domain could decrease the spacing signal of lower-order valleys and increase the spacing signal of higher-order valleys in the spectrum.

Key words: digital surface model; valley spacing; fourier transform; spectrum analysis; unmanned aerial vehicle; digital terrain analysis; loess plateau; hexi corridor

*Corresponding author: GENG Haopeng, E-mail: hpgeng@lzu.edu.cn

摘要: 谷间距 (Valley Spacing) 是描述相邻沟谷距离的特征参数, 它能较好地反映沟谷的次序等级和空间分布特征。本研究以黑河正义峡和兰州大岭岷2个样区为例, 利用ArcGIS软件, 将无人机测绘获取的0.12 m分辨率地表高程数据通过重采样生成不同分辨率的数字地表模型。通过MATLAB软件, 将不同分辨率、不同空间域的数字地表模型作为二维空间域信号进行傅

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41730637, 41571003, 41971001)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41730637, 41571003, 41971001.]

作者简介: 蔡 顺(1989—), 男, 江苏盐城人, 博士生, 研究方向为地表过程与数值模拟。E-mail: caish17@lzu.edu.cn

*通讯作者: 耿豪鹏(1985—), 男, 河南襄城人, 博士, 副教授, 研究方向为坡面侵蚀过程与地貌演化。E-mail: hpgeng@lzu.edu.cn

里叶变换。通过傅里叶变换及频谱分析研究地形的频谱特征与地表谷间距之间的转换关系。分析结果显示:①当区域内只有一级沟谷时,频谱中谷间距特征信号的有效提取要求地形分辨率至少优于1/5谷间距,分辨率的粗略化则直接影响着地形频谱中谷间距特征信号的识别,但是分析空间域对频谱谷间距特征信号的捕获影响较小;②当区域内有多级沟谷时,分辨率优于1/3谷间距时即可有效提取到该级沟谷的谷间距特征信号,分辨率的粗略化和空间域的增大都会使得频谱中较低序次等级沟谷的谷间距特征信号减弱,而较高序次等级沟谷的谷间距特征信号增强。

关键词:数字地表模型;谷间距;傅里叶变换;频谱分析;无人机;数字地形分析;黄土高原;河西走廊

1 引言

地貌是由岩石的抬升、变形与风化,以及地表的侵蚀、搬运与堆积过程所塑造的^[1]。而坡面过程和河流过程的相对强度则控制着山区地貌的空间分布格局^[2]。其中一个重要的地形表现为沟谷的切割程度^[3],以及山脊-山谷的重复频率与序次等级^[4]。沟谷密度是衡量地表破碎程度的常用标准^[5-6],是描述沟谷切割程度的重要指标^[7-8]。但沟谷密度无法描述沟谷的序次等级和空间分布特征^[9]。前人的野外观察及遥感影像分析发现,许多区域的坡面上同一序次等级的沟谷具有相近的分布间隔^[10-15],并将这一具有相近分布间隔的沟谷谷间距称为准周期性谷间距(Uniform Valley Spacing)。因此,如何有效提取准周期性沟谷地形的特征信息一直被地貌学研究所关注。

数字地形分析技术(Digital Terrain Analysis, DTA)是利用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)进行地表形态特征信息提取和分析的数字信息处理技术^[16]。航空测绘技术的发展,特别是低空无人机测绘技术的进步,使得DEM的分辨率得到了极大的提高,为精确地分析地表形态特征提供了便利^[17-19]。DEM与数字图像在数据结构和信息提取上具有较好的相似性,所以数字图像处理中的直方图、滤波以及图像监督分类等数字图像处理技术也逐渐应用于数字地形分析中^[20-21]。其中频谱分析技术被用于分析地物影像中相似纹理重复出现的状态和变化程度^[22]。在频谱分析中,空间频率被定义为单位空间距离内周期性纹理重复出现的次数(周期/m)。如果单位距离内周期性纹理出现的次数多,则视为高频信号;反之则视为低频信号。Perron等^[9]利用二维离散傅里叶变换(Two-dimensional Discrete Fourier Transform, DFT)分析了美国加利福尼亚州 Gabilan Mesa 和 South Fork Eel River 2个区域地形(分辨率4 m)的频谱特征,识别区域准周期性沟谷谷间距在地形频谱中的特征信号,建立了地形频谱中特征信号与准周期性沟谷谷

间距之间的转换关系^[4,9,11]。然而DEM数据空间分辨率的差异对地表形态特征的提取有着较大的影响^[23-27]。前人研究表明:当DEM分辨率粗略化时,区域内坡长的分布区间缩小^[28]、平均坡度呈线性下降的趋势^[29]、沟谷密度则出现指数下降的趋势^[30]。但是,DEM分辨率的变化对不同序次等级沟谷间距提取的影响尚不清晰。这也使得谷间距作为衡量沟谷次序等级和空间分布特征的地表形态特征指标在区域地表形态特征分析中未能得到充分的应用。

黑河正义峡和兰州大岭岷附近沟谷的准周期性特征显著,并且2个区域谷间距特征长度具有明显差异。是探讨DEM分辨率对谷间距特征长度提取影响的理想区域。本文利用无人机测量技术获得了上述2个区域高分辨率的正射影像和数字地表模型(Digital Surface Model, DSM),进而借助ArcGIS软件与二维离散傅里叶变换工具提取了不同空间域内不同分辨率DSM的频率波谱,建立了频率波谱中特征频率与区域谷间距特征长度之间的转换关系,最终讨论了分辨率和空间域对不同序次等级沟谷谷间距提取的影响。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

本次研究以黑河正义峡和兰州大岭岷为研究样区。黑河正义峡位于河西走廊北部,峡谷东西两侧分别为合黎山和金塔南山,周边出露地层主要有白垩系砂岩和第四系冲洪积物、风积物和砾岩^[31]。沉积学和年代学研究表明:~1.8 Ma,合黎山和金塔南山相继开始隆升^[32-34]。~0.23 Ma开始,黑河切穿合黎山-金塔南山的连接区域,流向下游额济纳盆地^[35](图1)。正义峡地区属典型的大陆性气候,年均降水量约为50~100 mm^[36-37]。兰州大岭岷位于黄土高原西部的兰州地区,属于温带大陆性气候,年均降水量约为378 mm,区域内堆积了厚层的第四纪黄土。兰州大岭岷地区的黄土完全覆盖了下伏

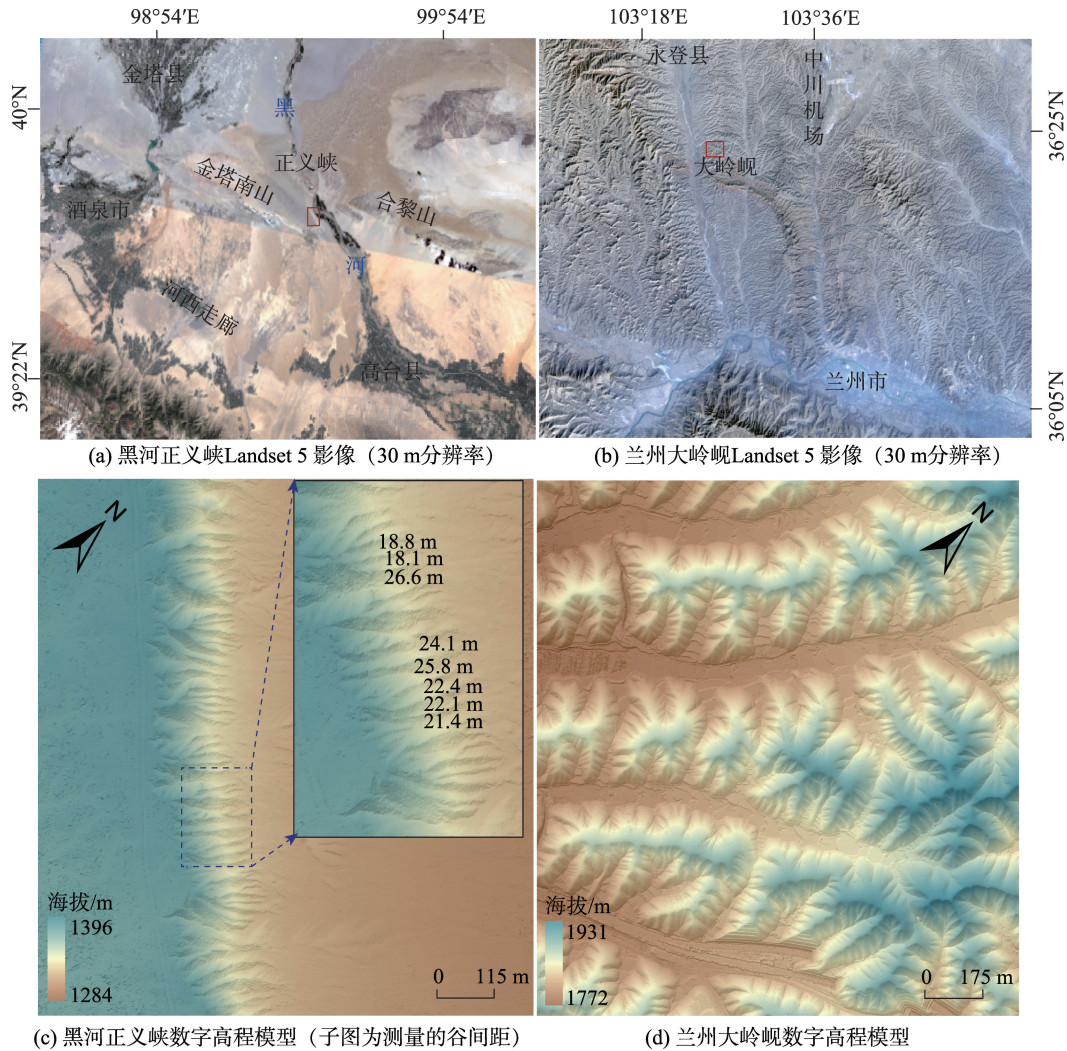


图1 黑河正义峡和兰州大岭岷概况和0.12 m分辨率数字高程

Fig. 1 Locations of the study area and 0.12 m resolution DEM

基岩,且沟谷未能深切到下覆基岩。

2.2 地形数据获取

本研究于2018年8月先后获取了黑河正义峡和兰州大岭岷2个研究样区的无人机航拍影像。航拍无人机型号为大疆精灵4专业2.0版(DJI Phantom 4 Pro V2.0)(具体参数型号见表1)。为使拍摄所获得的影像满足后续地表形态特征信息提取的需要,无人机飞行过程中飞行航向和旁向的重叠度分别设置为88%和65%,并且以等间距悬停拍照的方式进行拍照以保证影像的重叠度。航拍分别获得黑河正义峡和兰州大岭岷的高清晰真彩色遥感影像111幅和643幅,实际覆盖区域面积分别为2.39 km²和5.48 km²。通过Pix4DMapper软件获得2个区域0.12 m分辨率的DSM。本文的2个研究样

区均位于干旱、半干旱气候区,降水较少,地表植被稀疏且受人类活动的影响较小。野外考察发现2个样区的地表均无明显附着物,因此利用倾斜摄影技术获得的DSM地表高程数据与样区的DEM地形高程数据相近。在ArcGIS软件下对获得的DSM数据进行重采样及切割,生成不同分辨率和空间域的DSM(即DEM)。

表1 大疆精灵4专业2.0版主要系统参数

Tab. 1 Key parameters of DJI Phantom 4 Pro V2.0

性能	参数
GPS模块	GPS/GLONASS
GPS定位悬停水平精度	±1.5 m
GPS定位悬停垂直精度	±0.5 m
传感器有效像素	2000万
镜头	FOV 84°
	8.8 mm/24 mm(35 mm)

2.3 地形谷间距计算的DFT方法

地表起伏可以分解为不同频率和周期的二维空间波谱信号^[38-39]。在地形的功率谱中,较大的谷间距表现为波长较长、频率较低的低频信号;较小的谷间距则表现为波长较短、频率较高的高频信号。傅里叶变换频谱分析可以测量频谱信号中不同频率信号的分量及其强度,所以许多学者利用傅里叶变换讨论地形的周期性起伏特征^[40-42]。本研究利用二维离散傅里叶变换分析地形空间信号的频谱特征,其公式如下。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (1)$$

式中: $F(u, v)$ 表示了 M 行 \times N 列的频率矩阵,在频域中 u, v 表示频率的变量; $f(x, y)$ 代表一幅大小为 M 行 \times N 列的二维空间, x, y 表示 F 矩阵中的序号; e, j 则分别为自然指数和虚数单位。地形功率谱分析采用等间隔的方式将地形数据划分为 M 行 \times N 列的栅格且假定 u 方向上东向为正, v 方向上北向为正^[9]。

傅里叶变换的空间域为 M 行 \times N 列的规则格

网,所以在傅里叶变换中选择没有角度偏转的矩形地形以避免空值对傅里叶变换的地形功率谱产生影响。本研究中的地形功率谱分析则通过基于MATLAB的二维离散傅里叶变换工具完成^[8](<http://web.mit.edu/perron/www/downloads.html>),该工具将地形二维功率谱中2个维度的功率谱运用欧几里得范数转化为地形一维频谱图(地形频谱)。在地形频谱中,将对数排列的频域均分为20组,求取每组频域内所有DFT均方振幅值的算术平均值,经与每组频域的中值进行最小二乘法拟合后,获得地形频谱中频率与DFT均方振幅均值之间的关系(图2(a))。Perron等^[9]通过分析加利福尼亚州Gabilan Mesa和South Fork Eel River两个具有准周期性谷间距区域在4 m分辨率的地形频谱,发现DFT均方振幅均值的拟合曲线斜率绝对值(简称:拟合曲线斜率)的最大值所对应波长(频率)与区域的准周期性沟谷的谷间距长度(特征频率)相似。图2以兰州大岭岷地区1 m分辨率75 m \times 75 m空间域地形为例,利用二维离散傅里叶变换工具分析了兰州大岭

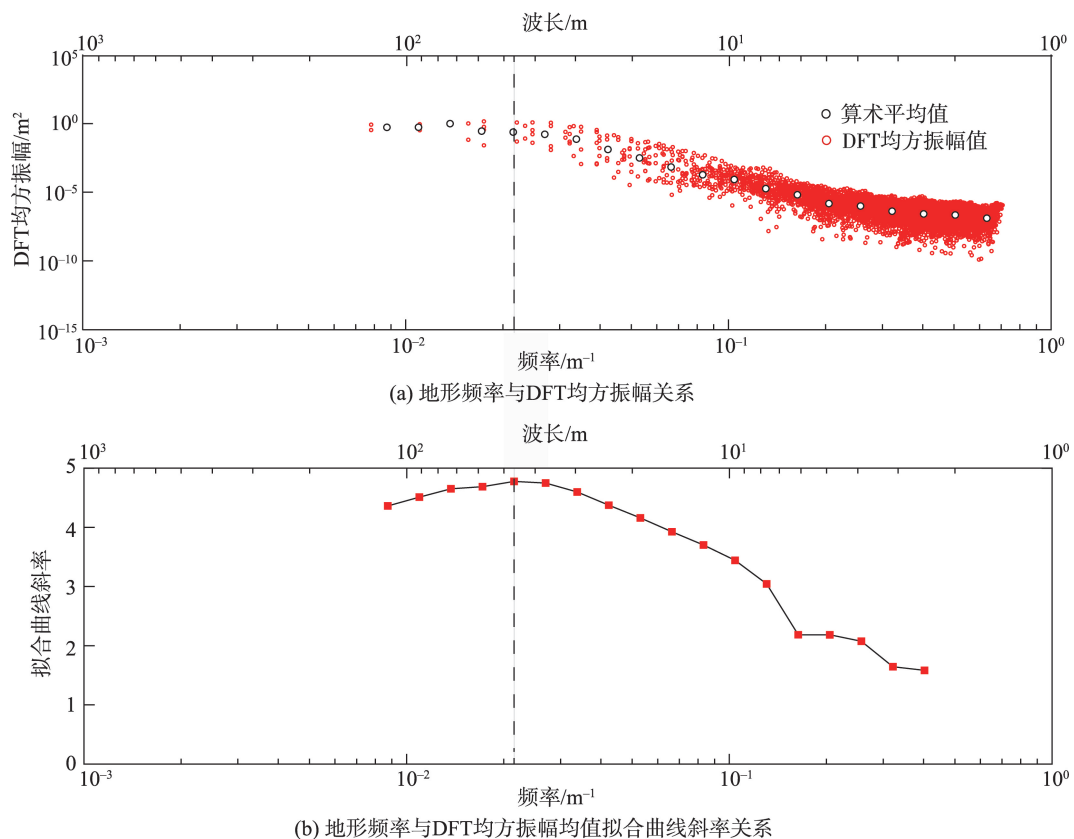


图2 兰州大岭岷地区1 m分辨率75 m \times 75 m空间域地形频率特征值提取(波长=1/频率)

Fig. 2 The terrain frequency characteristic signal about Lanzhou Dalingxian region with 1 m resolution and 75 m \times 75 m area (wavelength=1/frequency)

岷地区的地形频谱特征。分析结果显示兰州大岭岷地区地形的拟合曲线斜率在 $0.022/m$ 频率处出现最大值(图2(b)),指示兰州大岭岷地区准周期性沟谷谷间距的特征长度约为45 m(兰州大岭岷一级沟谷80%的实测谷间距集中分布在18~52 m范围内)。该结果表明二维离散傅里叶变换工具能够准确提取地形准周期性沟谷谷间距的特征信息。

3 结果与分析

3.1 研究样区的遥感影像判读与谷间距的测量

山体阴影通过模拟太阳光的照射计算每一个栅格的灰度值从而增强地图中地物的立体感,可使地表形态有较好的视觉效果^[43]。所以不同分辨率

DEM的山体阴影图可直观比对不同分辨率DEM对地表特征精细化描述的差异性(图3(a)—(f))。对比不同分辨率DEM的山体阴影图发现:随着分辨率的精细化,山体阴影图对地物信息的描述越详细,越能识别出较小的沟谷。结合野外考察和遥感影像的判读,沿垂直于沟谷延伸的方向进行统计剖面布设(图3(a)和图3(d))并测量谷间距(图3(g)—(i)),统计剖面应尽可能布设在沟谷中部^[38](图3)。影像判读和谷间距大小统计结果表明:黑河正义峡地区主要分布着一级沟谷,谷间距最大值为34 m,最小值为11 m,集中分布在15~31 m之间。兰州大岭岷地区发育有多级沟谷,一级沟谷的谷间距最大值为65 m,最小值为12 m,集中分布在18~52 m之间;二级沟谷谷间距最大值为187 m,最小值为68 m,集中分布在101~172 m。

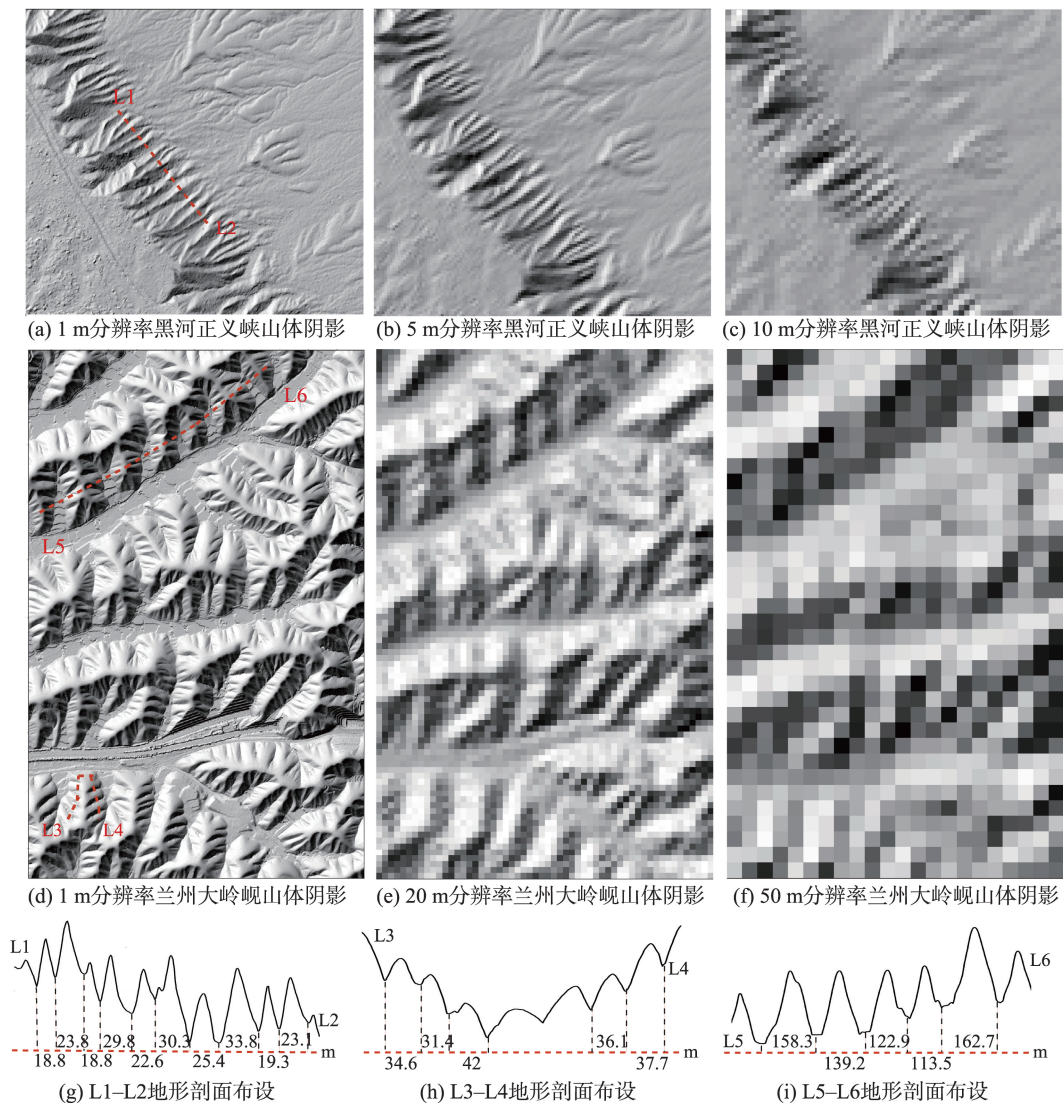


图3 不同分辨率的山体阴影图和谷间距测量示意

Fig. 3 Comparison of hill shade with different resolution and schematic diagram of valley spacing measurement

3.2 不同分辨率和空间域对地形频谱中特征信号提取的影响

为分析不同分辨率对只发育有一级沟谷地形和发育有多级沟谷地形的2种沟谷类型谷间距特征信息提取的影响。对黑河正义峡地区 $650\text{ m}\times 580\text{ m}$ 空间域的10个不同分辨率DEM数据(图4)和兰州大岭岷地区 $1414\text{ m}\times 2071\text{ m}$ 空间域的90个不同分辨率DEM数据(图5)进行傅里叶变换和地形频谱比对分析。分析结果显示:随着分辨率的精细化,黑河正义峡地区和兰州大岭岷地区的地形频谱中高频范围逐渐缩小(图4和图5(a))。在黑河正义峡地区,当分辨率优于6 m时,地形的频谱在频域 $0.032\sim 0.045\text{ m}^{-1}$ (即波长为 $22\sim 31\text{ m}$)之间拟合曲线斜率出现峰值(图4);当分辨率低于6 m时,则无法在地形的频谱中识别到有效的谷间距特征信号,同时低频区域有异常峰值的信号噪音(图4)。这一异常峰值的信号噪音是傅里叶变换中对区域高程最大值进行周期分析而产生的,噪音处的峰值不能代表地形谷间距的特征信息(图4)。这一结果表明当分辨率优于6 m时(谷间距集中分布范围最大值的1/5),地形频谱中能够有效识别出一级沟谷谷间距的特征信号;当分辨率低于7 m时,地形频谱则无法

识别一级沟谷谷间距的特征信号(图4)。在兰州大岭岷地区,分辨率1 m的地形频谱在 0.0076 m^{-1} 频率(波长分别为 132 m)处能够识别到二级沟谷的特征信号(图5(a),紫色箭头)。分辨率8 m的地形频谱在 0.021 m^{-1} 和 0.0075 m^{-1} 频率(波长分别为 47 m 和 133 m)处则能够识别到一级沟谷和二级沟谷的特征信号(图5(a),红色箭头)。分辨率为10 m的地形频谱在 0.0068 m^{-1} 频率(波长为 147 m)处识别到二级沟谷(图5(a),蓝色箭头)。在分辨率为57 m的地形频谱中,则无法识别到一级沟谷和二级沟谷的特征信号。90组分辨率数据分析结果显示,当分辨率优于56 m(谷间距集中分布范围最大值的1/3)时,地形频谱中均能识别出二级沟谷谷间距的特征信号(图5(b),红色散点),但是一级沟谷谷间距特征信号仅在分辨率为5~8 m之间的地形频谱中出现,推测其中一个原因可能是多级沟谷地形的频谱同时受到了地形分析空间域的影响。

为分析不同空间域对只发育有一级沟谷地形和发育有多级沟谷地形的2种沟谷类型谷间距特征信息提取的影响,利用 ArcGIS 软件提取了黑河正义峡地区10个不同大小空间域(图6(a))和兰州大岭岷地区12个不同大小空间域(图6(b))的分辨率

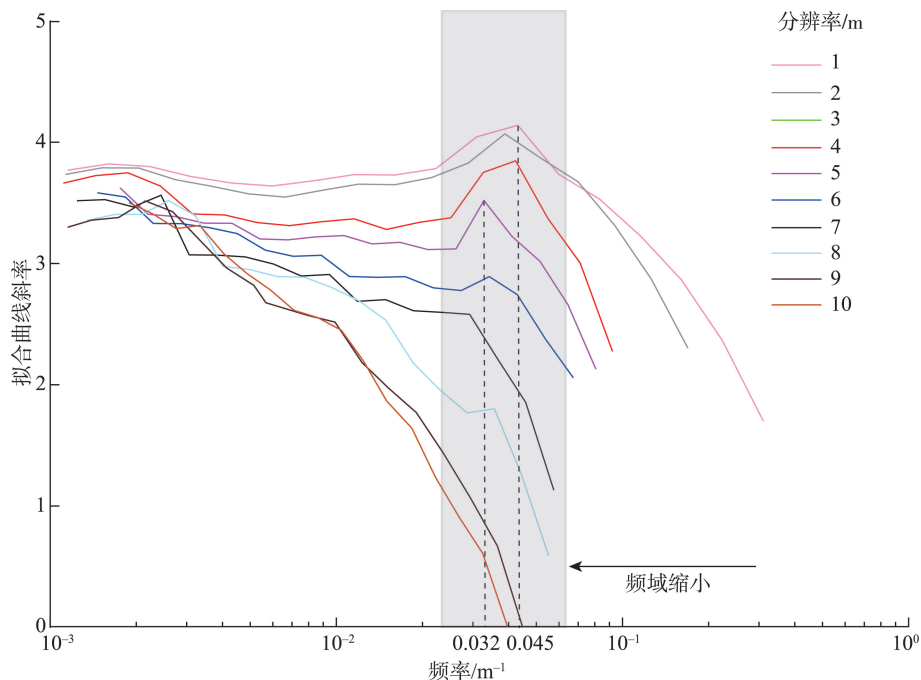
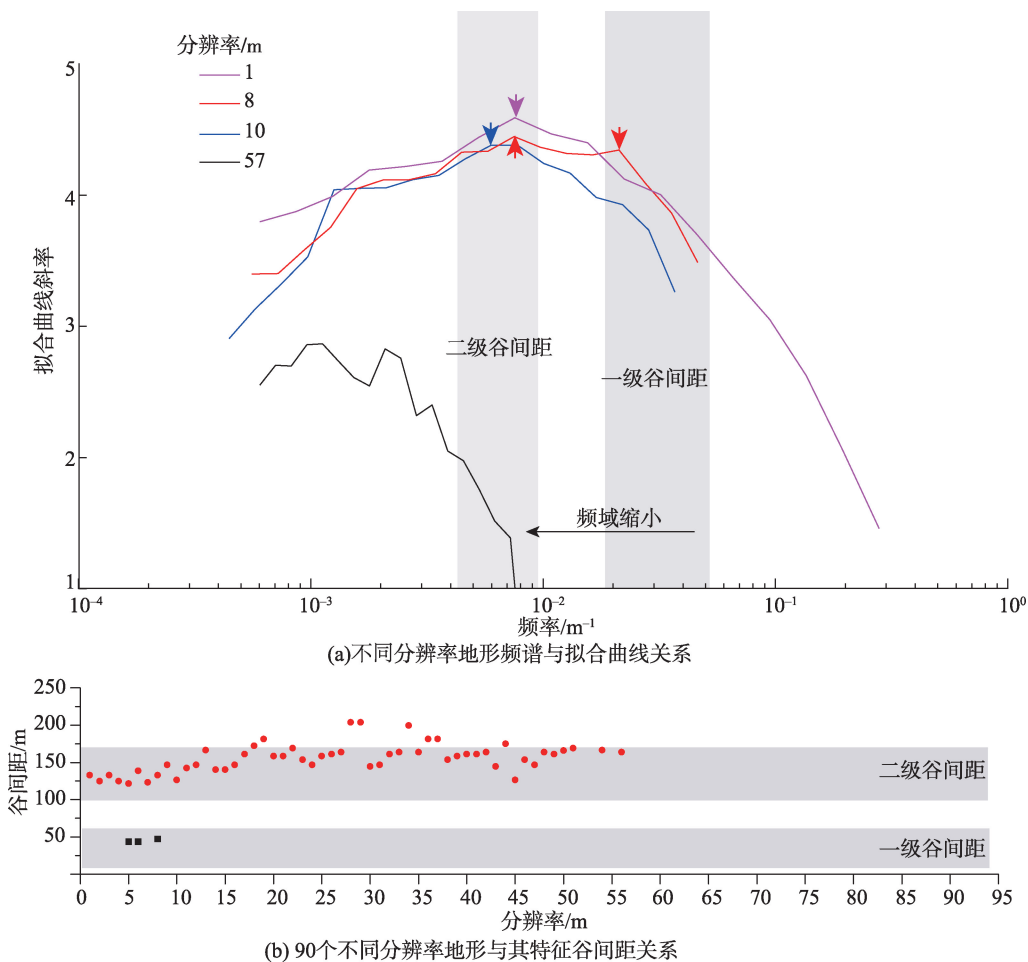


图4 黑河正义峡地区 $650\text{ m}\times 580\text{ m}$ 空间域1~10 m分辨率地形频谱与对应拟合曲线斜率关系(阴影为实测地形谷间距集中分布区域)

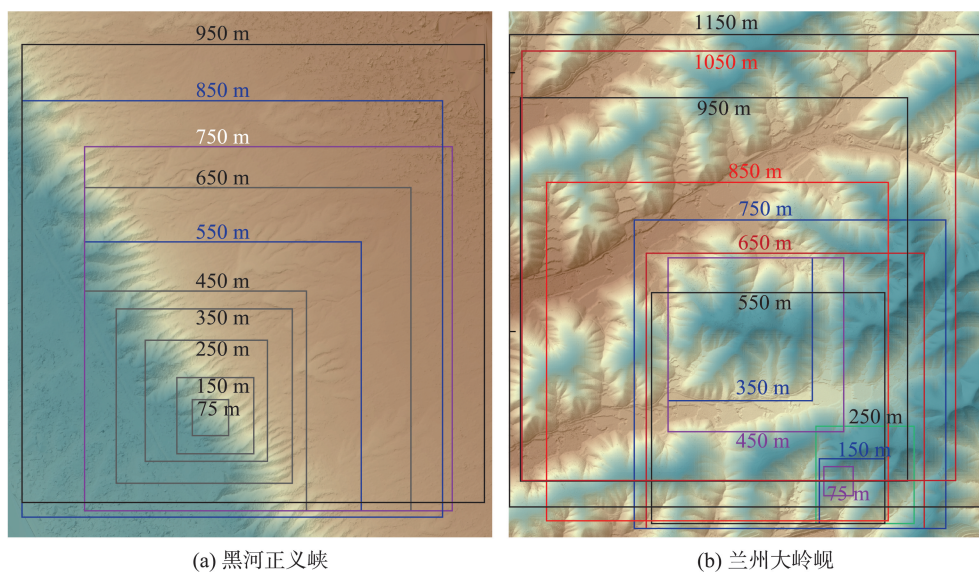
Fig. 4 The terrain frequency against the regression line slope about Heihe zhengyixia region with 1-10 m resolution and $650\text{ m}\times 580\text{ m}$ area



注：紫色箭头处识别到二级沟谷的特征信号；红色箭头处识别到一级沟谷和二级沟谷的特征信号；蓝色箭头处识别到二级沟谷信号；灰色阴影为实测地形谷间距集中分布区域。

图5 兰州大岭峁地区 1414 m×2071 m 空间域不同分辨率地形特征谷间距提取

Fig. 5 The terrain frequency characteristic signal about Lanzhou Dalingxian region with different resolution and 1414 m×2071 m area



注：正方形框表示不同空间域地形分布范围。

图6 1 m分辨率的不同空间域地形分布范围

Fig. 6 The terrain distribution ranges about different areas with 1 m resolution

为1 m的DEM数据进行傅里叶变换和地形频谱比对分析(图7)。在不同空间域地形的提取过程中,首先确定提取最大空间域地形的DEM数据;其次在最大空间域范围内以等间隔缩小的方式更改提取掩膜的大小并获得不同空间域大小的DEM数据。在提取过程中应满足提取地形中包含有尽可能多的沟谷数量的要求。分析结果显示:随着空间域的增加,黑河正义峡地区和兰州大岭岷地区的地形频谱中低频范围逐渐扩大(图7)。在黑河正义峡地区,随着空间域的增加,地形频谱中均可识别出一级沟谷谷间距的特征信号,但在低频区域有异常峰值的噪音信号(图7(a))。在兰州大岭岷地区,当空间域小于250 m×250 m时地形频谱中只能识别到一级沟谷谷间距的特征信号;当空间域范围在250 m×250 m~650 m×650 m之间时,地形频谱中可以识别到一级沟谷和二级沟谷谷间距的特征信号;当空间域范围大于650 m×650 m时,地形频谱中则只能识别到二级沟谷谷间距的特征信号(图7(b))。这一现象表明,在多级沟谷分布的大岭岷地区,随着空间域的逐渐增大,二级沟谷谷间距的特征信号也逐渐增强而一级沟谷谷间距的特征信号逐渐减弱直至无法识别(图7(b))。

3.3 讨论

分析结果显示:随着DEM分辨率的粗略化,DEM数据对较低序次等级沟谷的描述能力逐渐减弱,直至无法准确描述较低序次等级沟谷的沟谷特征(图3)。在不同分辨率的地形频谱比对中表现为描述较低序次等级沟谷的谷间距特征信号在地形频谱中逐渐减弱直至消失(图4和图5(a))。在多级沟谷的地形频谱比对中还表现为描述较高序次等级沟谷的谷间距特征信号逐渐加强(图5)。因此,基于傅里叶变换的地形频谱分析方法能够有效地提取地形中不同序次等级沟谷的谷间距特征信号,并能指示沟谷的准周期性间隔分布特征。

DEM的分辨率对提取不同序次等级沟谷的特征信息有着重要的影响。波谱分析中,为满足波谱中的周期性频率信号识别,分辨率应低于周期性波长的奈奎斯特频率(Nyquist Frequency)的倒数($\sim 1/2$ 波长)^[44]。本研究分析结果显示一级沟谷谷间距的特征信号识别要求地形分辨率优于1/5谷间距,二级沟谷谷间距的特征信号识别要求地形分辨率优于1/3谷间距,表明实际地形由于非均匀分布,需要更高分辨率的地形数据(高于1/5谷间距)来实现周期性

谷间距的有效提取。Heimsath等^[45]认为3~5 m分辨率的DEM为分析地表过程的最优分辨率,而该分辨率基本能够实现大于15~25 m谷间距的提取。Lidar数据能够提供此类分辨率的地形数据^[46],但我国此类数据尚未获得广泛推广与应用,因此借助无人机测绘技术所提供的高精度DSM地形数据是另外一个较为便利的途径。目前全球覆盖最广的数字高程模型(30 m分辨率的Shuttle Radar Topography Mission)正好满足了二级沟谷谷间距特征信号识别的地形分辨率要求。因此,基于傅里叶变换的地形频谱分析方法将会成为分析真实地形沟谷周期性分布特征的有效工具。

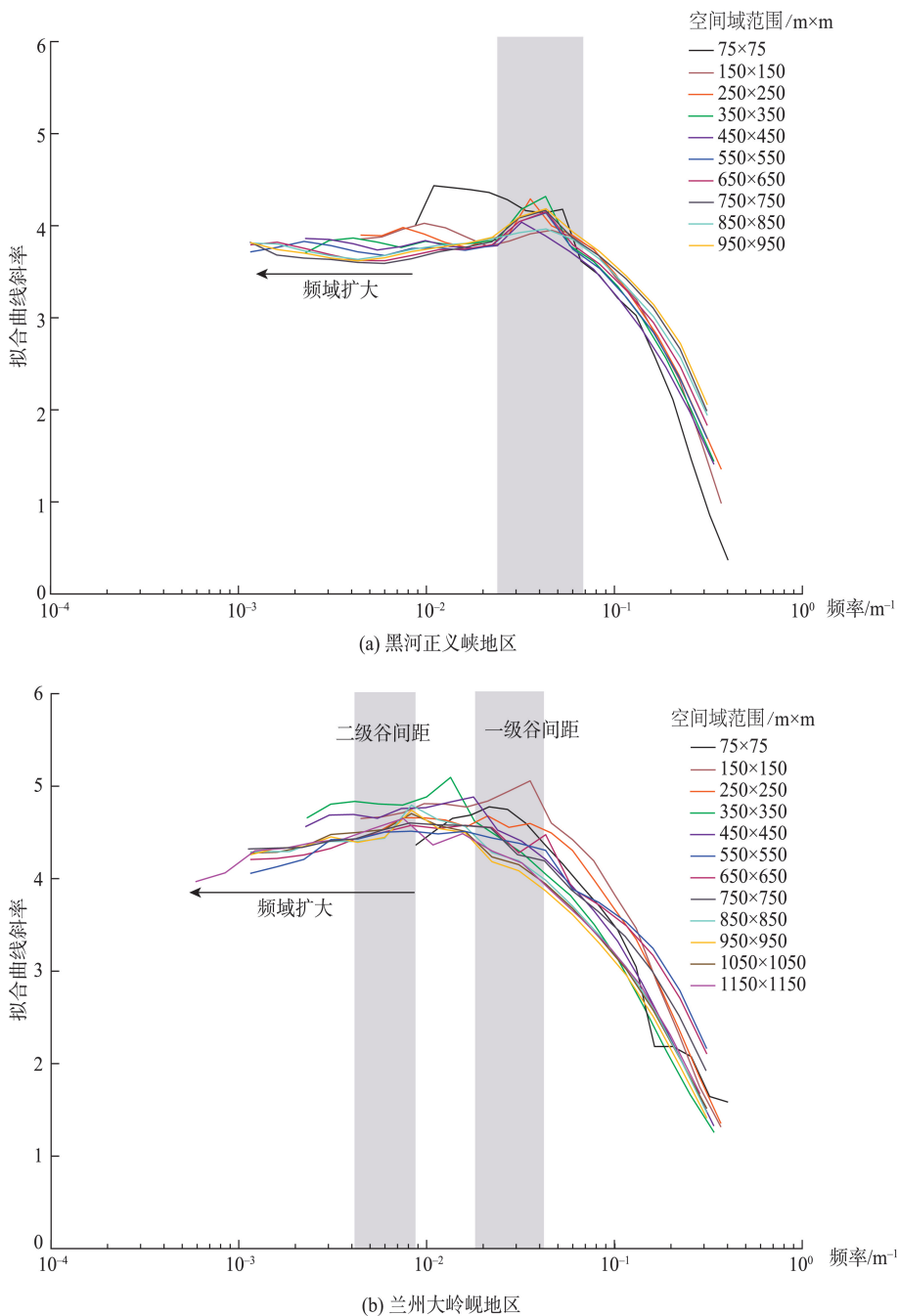
傅里叶变换的地形频谱分析方法同样是验证地貌演化数值模拟结果的有效手段。Perron等^[4]利用地貌演化模型(Landscape Evolution Models, LEMs)证明了谷间距的大小是坡面过程和河流过程相互作用的结果,印证了Davis^[2]和Gilbert^[47]提出的坡面过程和河流过程两者的作用强度决定了坡面沟谷的分布格局的观点。随后,人们利用地貌演化模型证明谷间距的大小也受到局地起伏度^[48]、流域长度^[1]和流域降水^[49]的影响,但是基于傅里叶变换的地形频谱分析方法,结合地貌演化数值模拟,分析真实地形的地貌演化过程及其影响因素尚缺乏全面系统的研究,是今后过程地貌学应该重点关注的研究方向。

4 结论

本文利用二维傅里叶变换的二维频谱分析方法,提取黑河正义峡地区和兰州大岭岷地区不同分辨率、不同空间域的地形频谱中谷间距特征信息,分析不同分辨率和空间域对不同类型和大小沟谷地形频谱中特征信息提取的影响。分析结果表明:

(1)在仅有一级沟谷分布的地区,空间域不影响谷间距特征信息的提取,DEM分辨率是影响谷间距信息提取准确性的主要因素。在频谱分析中,谷间距特征信号的有效提取要求地形分辨率至少优于1/5谷间距。

(2)在多级沟谷分布的地区,随着空间域的增长或分辨率的降低,较低序次等级沟谷的谷间距特征信息逐渐减弱,较高序次等级沟谷的谷间距特征信息逐渐增强。在频谱分析中,谷间距特征信号的有效提取要求地形分辨率至少优于1/3该



注：阴影为实测地形谷间距集中分布区域。

图7 1 m分辨率的不同空间域地形频谱与对应拟合曲线斜率关系

Fig. 7 The terrain frequency against the regression line slope about different areas with 1 m resolution

序次等级沟谷谷间距。

(3) 论文使用傅里叶变换地形频谱分析的方法能够有效提取地形频谱中不同序次等级沟谷的谷间距特征信号,并能描述沟谷的准周期性空间分布特征。为区域沟谷分布特征的提取和地形的准周期性研究提供了新的方法。

参考文献(References):

- [1] Dietrich W E, Perron J T. The search for a topographic signature of life[J]. Nature, 2006,439(7075):411-418.
- [2] Davis W M. The convex profile of bad-land divides[J]. Science, 1892,20:245.
- [3] Whipple K X. Landscape texture set to scale[J]. Nature, 2009,460(7254):468-469.
- [4] Perron J T, Dietrich W E, Kirchner J W. Controls on the

- spacing of first-order valleys[J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2008,113(F04016):1-21.
- [5] 杨岩岩,刘连友.无定河流域沟谷密度特征及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):79-85. [Yang Y Y, Liu L Y. Characteristics of gully density in the Wuding river basin and its influencing factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014,28(3):79-85.]
- [6] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622-628. [Tian J, Tang G A, Zhou Y, et al. Spatial variation of gully density in the loess plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,33(5): 622-628.]
- [7] Sweeney K E, Roering J J, Ellis C. Experimental evidence for hillslope control of landscape scale[J]. *Science*, 2015,349(6243):51-53.
- [8] 江岭,汤国安,赵明伟,等.顾及地貌结构特征的黄土沟头提取及分析[J].地理研究,2013,32(11):2153-2162. [Jiang L, Tang G A, Zhao M W, et al. Extraction and analysis of loess gully heads considering geomorphological structures [J]. *Geographical Research*, 2013,32(11):2153-2162.]
- [9] Perron J T, Kirchner J W, Dietrich W E. Spectral signatures of characteristic spatial scales and nonfractal structure in landscapes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008,113(F4):1-13
- [10] Allen P. Striking a chord[J]. *Nature*, 2005,434(7036):961.
- [11] Perron J T, Kirchner J W, Dietrich W E. Formation of evenly spaced ridges and valleys[J]. *Nature*, 2009,460 (7254):502-505.
- [12] Hovius N. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts[J]. *Basin Research*, 1996,8(1):29-44.
- [13] Whipple K X, Forte A M, Dibiase R A, et al. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017,122(1):248-273.
- [14] Talling P J, Stewart M D, Stark C P, et al. Regular spacing of drainage outlets from linear fault blocks[J]. *Basin Research*, 1997,9(4):275-302.
- [15] Pelletier J D, Comeau D, Kargel J. Controls of glacial valley spacing on earth and mars[J]. *Geomorphology*, 2010, 116(1-2):189-201.
- [16] 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. [Tang G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(9):1305-1325.]
- [17] Gao M, Xu X, Klinger Y, et al. High-resolution mapping based on an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture paleoseismic offsets along the Altyn-Tagh fault, China[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(8281):1-11.
- [18] Xiong J, Li Y, Zhong Y, et al. Latest pleistocene to Holocene thrusting recorded by a flight of strath terraces in the eastern Qilian Shan, NE Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2017,36(12):2973-2986.
- [19] 陈天博,胡卓玮,魏铄,等.无人机遥感数据处理与滑坡信息提取[J].地球信息科学学报,2017,19(5):692-701. [Chen T B, Hu Z W, Wei L, et al. Data processing and landslide information extraction based on UAV remote sensing. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(5): 692-701.]
- [20] Song X, Bai Y, Ying C. A three-dimensional topographic survey based on two-dimensional image information[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2014,15(1):68-82.
- [21] Yang Y, Li Y, Cui D. Identification of karst features with spectral analysis on the seismic reflection data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71(2):753-761.
- [22] 黄晓力,汤国安,刘凯.DEM分辨率对地形纹理特征提取的影响[J].地球信息科学学报.2015,17(7):822-829. [Huang X L, Tang G A, Liu K. Influence of DEM resolution on the extraction of terrain texture feature[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(7):822-829.]
- [23] 安辛克,李琳琳,张运刚.不同分辨率SRTM-DEM的数字地形分析比较研究[J].测绘与空间地理信息,2010,33(6): 73-75. [An X K, Li L L, Zhang Y G. Comparative research of digital terrain analysis based on different resolution SRTM- DEM[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010,33(6):73-75.]
- [24] 贺晓晖,陈楠.从规则格网DEM中提取沟谷网络的方法研究[J].遥感信息,2015,30(1):134-138. [He X H, Chen N. Stream network extraction based on digital elevation model data of regular grids[J]. *Remote Sensing Information*, 2015,30(1):134-138.]
- [25] 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. [Liu X J, Lu HX, Ren Z, et al. Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling[J]. *Geographical Research*, 2007,26(3):433-442.]
- [26] 杨存建,赵曦琳,周其林,等.丘陵地区DEM与坡度的尺度效应分析[J].地球信息科学学报.2013,15(6):814-818. [Yang C J, Zhao X L, Zhou Q L, et al. Analysis of scale effect characteristics of DEM and slope in hilly areas[J]. *Journal of Geo-information Science*,2013,15(6):814-818.]
- [27] 王婷婷,杨昕,叶娟娟,等.不同尺度DEM的河流裂点提取及其效应分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):882-889. [Wang T T, Yang X, Ye J J, et al. Identification of Fluvial knickpoints and analysis of its scale effect based on DEMs[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(6):882-889.]

- [28] 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. [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.]
- [29] 陈楠.基于信息损失量的坡度精度分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):852-858. [Chen N. Study on slope accuracy based on information loss[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(6):852-858.]
- [30] 苑露莎,郑新奇,郭继发.DEM提取沟谷的尺度效应分析:2013全国土地资源开发利用与生态文明建设学术研讨会[C].西宁,2013. [Yuan L S, Zhen X Q, Guo J F. The scale effect analysis on drainage network extraction based on DEM[C]. Research on Land Resource Utilization and Ecological Civilization Construction in China, Xining, China, 2013.]
- [31] 温振玲,胡小飞,潘保田,等.甘肃金塔南山河流阶地褶皱变形分析[J].地质论评.2015,61(5):1032-1046. [Wen Z L, Hu X F, Pan B T, et al. Deformation analysis of fluvial terrace in Jinta' nanshan Mountains, Gansu Province[J]. Geological Review, 2015,61(5):1032-1046.]
- [32] Hu X, Chen D, Pan B, et al. Sedimentary evolution of the foreland basin in the NE Tibetan Plateau and the growth of the Qilian Shan since 7 Ma[J]. Geological Society of America Bulletin, 2019,131(9-10):1744-1760.
- [33] Zheng W, Zhang P, Ge W, et al. Late quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2013,32(2):271-293.
- [34] Pan B, Chen D, Hu X, et al. Drainage evolution of the Heihe River in western Hexi Corridor, China, derived from sedimentary and magnetostratigraphic results[J]. Quaternary Science Reviews, 2016,150:250-263.
- [35] Hetzel R, Tao M, Niedermann S, et al. Implications of the fault scaling law for the growth of topography: mountain ranges in the broken foreland of north-east Tibet[J]. Terra Nova, 2004,16(3):157-162.
- [36] Geng H, Pan B, Huang B, et al. The spatial distribution of precipitation and topography in the Qilian Shan Mountains, northeastern Tibetan Plateau. Geomorphology, 2017,297:43-54.
- [37] Pan B, Geng H, Hu X, et al. The topographic controls on the decadal-scale erosion rates in Qilian Shan Mountains, N.W. China[J]. Earth Planet Science Letter, 2010,292(1-2):148-157.
- [38] 胡洁,杨勤科,郭兰勤.基于快速傅立叶变换(FFT)的地形剖面线的数学表达研究[J].长江科学院院报,2012,29(5):62-66. [Hu J, Yang K Q, Guo L Q. Mathematics expression of terrain profile based on fast fourier transform[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012,29(5):62-66.]
- [39] 胡洁.基于傅里叶变换的侵蚀地形频率研究——以黄土丘陵区为例[D].咸阳:西北农林科技大学,2012. [Hu J. Study on frequency of erosion landform based on fourier transform- taking loss hilly region as an example[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012.]
- [40] Mulla D J. Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, U.S.A.[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1988,13(5):389-405.
- [41] Brook G A, Hanson M. Doublefourierseriesanalysisofcokpitanddolinekarstnearbrownstown, jamaica[J]. Physical Geography, 1991,12(1):37-54.
- [42] Yan F H, Jin Y T, Zhou W, et al. Research on the obtainment of topography parameters by rough surface simulation with fast fourier transform[J]. Journal of Tribology, 2015,137(3):31401.
- [43] 龙恩.基于遥感与DEM的长白山区数字地貌制图方法研究[D].长春:东北师范大学,2005. [Long E. Research on digital geomorphologic mapping methodology based on RS and DEM of Changbaishan area[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2005.]
- [44] 段伟,闫利.融合图像的频率定量分析及其空间分辨率的确定方法[J].测绘学报.2016,45(6):691-697. [Duan W, Yan L. Quantitative analysis in frequency domain and determination of spatial resolution in image fusion[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016,45(6):691-697.]
- [45] Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth[J]. Geomorphology, 1999,27(1):151-172.
- [46] 任沂斌,陈振杰,程亮,等.采用动态负载均衡的LiDAR数据生成DEM并行算法[J].地球信息科学学报,2015,17(5):531-537. [Ren Y B, Chen Z J, Cheng L, et al. Parallel algorithm of generating DEM from LiDAR point clouds based on dynamic load balancing strategy[J]. Journal of Geo-information Science, 2015,17(5):531-537.]
- [47] Gilbert G K. The Convexity of Hilltops[J]. The Journal of Geology, 1909,17(4):344-350.
- [48] Mcguire L A, Pelletier J D. Controls on valley spacing in landscapes subject to rapid base-level fall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016,41(4):460-472.
- [49] Giachetta E, Refice A, Capolongo D, et al. Orogen-scale drainage network evolution and response to erodibility changes: insights from numerical experiments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014,39(9):1259-1268.