

禄丰恐龙谷 UAV-LiDAR 点云构建背斜数字地貌模型研究

杨在松¹, 甘 淑^{1,2}, 袁希平^{2,3}, 高 莎¹, 王泽华¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093;

3. 滇西应用技术大学地球科学与工程技术学院, 云南 大理 671006)

摘要: UAV-LiDAR 具有高效、准确地采集复杂地形点云数据的优势, 已成为构建精准数字地貌模型的重要手段。然而, 针对背斜地貌的 UAV-LiDAR 点云构建数字地貌模型的插值误差研究缺乏, 严重制约了其在地貌学研究中的应用。本文基于禄丰恐龙谷环状构造中背斜地貌的 UAV-LiDAR 点云数据, 优选了 IDW、NN、RBF、TIN、OK 插值算法的关键参数, 采用交叉验证和模型差异衡量不同点云密度和地表粗糙度下的插值精度, 全局 Moran 指数、地貌参数分析误差的空间分布特征, 基于最优的模型分析褶皱构造的形态特征。结果表明: 1) IDW 最优参数为权指数 2 和搜索点数 16, RBF 为规则样条函数和搜索点数 24, OK 为球面函数、无方向和搜索点数 8; 2) IDW 最容易受点云密度的影响, TIN 抑制插值误差随点云密度变化的效果最好, OK 构建的模型最优; 3) 局部插值误差在空间上是可变的, 地表粗糙度大的区域误差增加得快; 4) 该褶皱分为穹窿构造和短轴褶皱两类, 翼间角为 108~131°, 背斜 II 沿西南-东北向地下延伸。研究结果可为 UAV-LiDAR 用于禄丰恐龙谷环状构造数字地貌建模及地表特征测量模拟分析提供参考。

关键词: 无人机激光雷达; 数字高程模型; 普通克里金; 点云密度; 背斜地貌

中图分类号: P237; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.008

Study on UAV-LiDAR point clouds construction of backslope digital geomorphology model in Lufeng Dinosaur Valley

YANG Zai-song¹, GAN Shu^{1,2}, YUAN Xi-ping^{2,3}, GAO Sha¹, WANG Ze-hua¹

(1. Faculty of Land Resources and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Application Engineering Research Center of Spatial Information Surveying and Mapping Technology in Plateau and Mountainous Areas Set by Universities in Yunnan Province, Kunming 650093, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China)

Abstract: UAV-LiDAR has the advantage of efficient and accurate acquisition of complex terrain point clouds data, and has become an important means to build accurate digital landform model. However, there is a lack of research on the interpolation error of the digital geomorphological model constructed by UAV-LiDAR point clouds for anticline

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62266026; No. 41861054) 资助。

作者简介: 杨在松 (1996 -), 男, 硕士研究生, 主要从事机载激光雷达应用方面的研究。E-mail: xs17d102@163.com

通讯作者: 甘 淑 (1964 -), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事摄影测量与遥感技术方面的研究。E-mail: 1193887560@qq.com

收稿日期: 2022-09-14; **修订日期:** 2022-11-01

landforms, which seriously restricts its application in geomorphological research. In this paper, based on UAV-LiDAR point clouds data of anticline landform in Lufeng Dinosaur Valley ring structure, the key parameters of IDW, NN, RBF, TIN and OK interpolation algorithms are optimally selected, cross validation and model difference are used to measure the interpolation accuracy under different point clouds density and surface roughness. The spatial distribution characteristics of global Moran index and geomorphic parameter analysis error are analyzed. The morphological characteristics of fold structure are analyzed based on the optimal model. The results show that: 1) the optimal parameters of IDW are weight index 2 and search points 16, RBF is regular spline function and search points 24, and OK is a spherical function, no direction and search points 8. 2) IDW is most susceptible to the influence of point clouds density. TIN has the best effect on suppressing the interpolation error with the change of point clouds density. The model constructed by OK is optimal. 3) The local interpolation error is spatially variable, and the regional error with large surface roughness increases rapidly. 4) The fold is divided into dome structure and short axis fold. The inter-wing angle is $108^{\circ} \sim 131^{\circ}$. Anticline II extends underground along southwest-northeast. The research results can provide a reference for UAV-LiDAR for digital geomorphology modeling and surface feature measurement simulation analysis in the Lufeng Dinosaur Valley ring structure.

Keywords: UAV-LiDAR; DEM; OK; point clouds density; oblique topography

1 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是地形的数字化表达,实现了地貌形态的数字化模拟。目前,DEM 数据获取途径主要包括光学遥感^[1]、合成孔径雷达^[2]、航空摄影测量^[3]和激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)^[4]等。无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)具有较高的机动性,且易于掌控,可搭载多种传感器完成地形探测任务。UAV-LiDAR 是利用 UAV 搭载 LiDAR 扫描仪的一种主动遥感技术,因其穿透能力强、作业效率高、抗干扰能力强等特点,能够直接获取高精度的地表三维点云,已成为获取高精度地形建模数据的重要手段^[5-6]。获取的原始点云,结合一定的滤波算法可有效分类真实地面点云,进而利用插值算法构建高精度 DEM。

已有的插值算法可以分为三类^[7]:1)根据插值点邻域内的采样点来预测其空间位置的非地统计学方法,非地统计学方法还可以通过用于计算每个搜索点权重因子的方法来进一步区分,例如反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)、自然邻域(Natural Neighbor, NN)、径向基函数(Radial basis function, RBF)、不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)等^[8-9];2)同时利用采样点的空间结构和值的地统计学方法,例如普通克里金(Ordinary Kriging, OK)^[10];3)基于非地统计和地统计学方法或其他统计方法,估计未知点的组合方法。

由于插值过程引入的误差,在进一步应用之

前,需要对构建的 DEM 的质量进行评估^[11],评估 DEM 误差及其传播误差是地表过程研究的关键步骤^[12]。国内外学者对不同插值方法生成的 DEM 的精度进行了广泛的讨论和比较,尽管尚未确定用于构建 DEM 的通用最优插值方法,但关于控制插值精度的因素已经达成了一些共识,即:相同的数据应用不同的插值方法可能导致不同的插值结果^[13-14];数据采样间隔是影响 DEM 精度的关键因素,DEM 插值精度与点云密度正相关^[15];地形特征是造成 DEM 误差的主要因素之一,无论插值方法和分辨率如何选择,误差随着地表粗糙度的增加而增加^[16-17]。

禄丰恐龙谷环状构造地形破碎,复杂的地形条件对背斜地貌构建高精度的数字地貌模型提出了挑战。迄今鲜有研究将 UAV-LiDAR 点云用于背斜地貌数字化精准建模,并有效评价不同算法的插值精度,探讨误差的空间分布特征。因此,本研究基于 UAV-LiDAR 采集的禄丰恐龙谷环状构造中背斜地貌点云数据,对比 IDW、NN、RBF、TIN、OK 插值算法构建的 DEM 误差,探究不同插值算法、点云密度及地形条件下插值误差的变化规律,为禄丰恐龙谷环状构造的 UAV-LiDAR 数字地貌建模及地表特征测量模拟分析提供参考。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

禄丰恐龙谷环状构造位于云南省禄丰市,处于昆阳群周边断裂地带,可以在卫星遥感图上清晰辨认出一占地面积约 35 km^2 的典型封闭向斜盆构造,如图

1c 所示。该构造东西宽约 3 km, 南北长约 10 km, 坑缘隆起近 70° 的峭壁, 坑内与坑沿褶皱均呈放射状。研究区位于环状构造的北部坑缘, 海拔 1504.32 ~ 1760.21 m, 最大高程差约 256 m, 平均地形坡度为 28°, 地理坐标为 N24° 56' 41.33" ~ 24° 58' 3.35", E102° 04' 17.12" ~ 102° 05' 53.95" (如图 1d 所示)。(a), (b) 为云南省行政区划图; (c), (d) 为研究区

遥感影像图; (d) 中实线区域为研究区。地形的特点是背斜与向斜交错分布, 植被覆盖率低, 向斜被建筑物、农作物及常绿阔叶林覆盖。此外, 昆阳群、震旦系、寒武系、奥陶系等各时代地层长期暴露, 经长期侵蚀和多期地壳运动叠加, 褶皱出露于地表部分断裂, 未有形态完整的褶皱保留, 使得地形形态复杂^[18]。

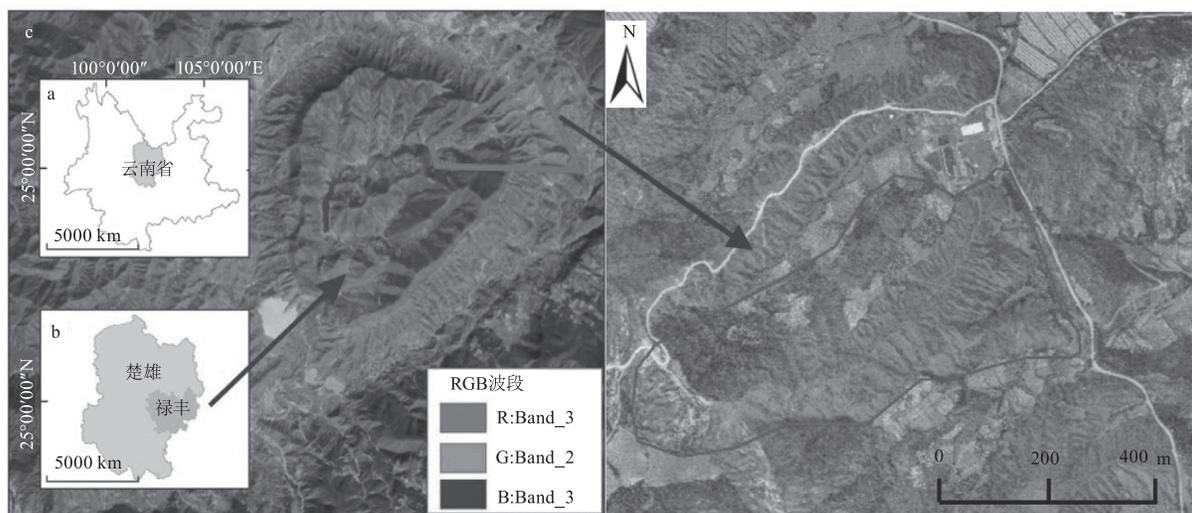


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study

2.2 数据获取与预处理

研究区的点云数据由 UAV-LiDAR 系统采集于 2020 年 10 月, 获取的原始点云密度为 124.6 点/m²。采集完成后进行航迹解算、点云配准、投影变换等数据预处理工作, 输出 Las 格式的点云数据。采用直通滤波、统计滤波和半径滤波器去除噪声点, 利用滤波算法分类地面点。由于滤波后的点云不可避免的存在分类误差, 因此参考实景三维模型, 在商业软件 Terrasolid 中采取人工编辑的方式修饰滤波获得的地面点云, 重分类错分的地面点和非地面点, 最终获得的地面点云密度为 20.2 点/m²。

3 研究方法

3.1 交叉验证

交叉验证法是统计学上的一种实用方法, 已被广泛用于估计预测模型 (或内插方法) 的精度^[19-20]。在这些研究中, 为了能够分析插值误差, 通常假设验证数据集 (即检查点) 为真值。在本试验中, 将地面点云随机分成训练集和验证集两部分, 分别占比 99% 和 1%, 训练集数据用于构建 0.5 m 分辨率的 DEM, 测试集数据用于精度验证^[13]。以

点云的坐标值作为真值, 提取 DEM 中与检查点位置对应的栅格高程值, 并基于点云高程值与栅格高程值计算绝对误差 (Absolute Error, AE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 评估 DEM 的精度, 二者值越小插值精度越高^[20]。RMSE 用来衡量预测值与真值的偏差, 是对插值精度最直接的评价, MAE 能准确反映插值误差的实际情况。

3.2 插值参数优选

插值参数是构成插值算法的基本元素, 包括插值核函数和搜索方式两类^[21]。插值核函数指决定权重的数学函数, 是影响 DEM 精度的重要因素之一。搜索方式指在以插值点为中心的圆形或矩形范围内, 按照规定的标准选择采样点进行插值计算的过程, 包括搜索采样点的形状、半径、方向、点数等。本文采用的 5 种插值方法种, NN 与 TIN 无需优选参数, 仅对 IDW、RBF 和 OK 插值算法优选插值参数。表 1 为插值算法的关键参数及其待选值, 根据关键参数不同取值下插值结果的 RMSE 值, 获取各算法的最优参数组合。

表 1 插值关键参数待选值
Tab. 1 Key parameters to be selected

插值算法	插值参数	待选值
IDW	权指数	1、2、3、4、5
	搜索点数	4、8、12、16、24、32、48
RBF	核函数	张力样条、规则样条、薄板样条、 高次曲面、反高次曲面
	搜索点数	4、8、12、16、24、32
Kriging	核函数	高斯、指数、球面
	搜索方向	无方向、四方向、八方向
	搜索点数	4、8、12、16、24

3.3 点云重采样

插值点的高程误差(即预测高程值与参考高程值之差)由两部分组成:1)测量传播误差;2)模型误差。前者是基于数据源的,与数据采集方法紧密相关。后者是基于模型的,涉及插值算法的预测精度。对于给定的插值方法,插值误差是采样点间距与地形表面粗糙度的函数,当用于构建 DEM 的采样点的密度相同时,局部内插误差在空间上是可变的^[19]。

鉴于此,利用点云进行重采样技术获得不同密度的点云,研究点云密度对所构建 DEM 的影响。利用随机采样法,选择 100%、75%、50%、25%、1% 五种重采样率(所抽取点数与总点数的比值),对滤波处理得到的地面点云重采样,获得的点云密度分别为 20.2 点/m²、15.1 点/m²、10.1 点/m²、5.0 点/m²、0.2 点/m²。

3.4 全局 Moran 指数

Moran 指数分为全局和局部指数,都是用来描述空间自相关性的指标,全局 Moran 指数判断邻近区域内观测数据之间是否存在相关关系,通过全局空间自相关分析探究高程误差点的聚集效应^[22]。全局 Moran 指数计算公式如下:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (z_i - \bar{z})^2} \quad (1)$$

式中, I 为全局 Moran 指数; n 为空间单元数量; z_i 、 z_j 、 \bar{z} 分别为第 i 、 j 个空间单元的误差及其平均值; W_{ij} 为空间权重。经过方差归一化之后, Moran 指数的分布在 $[-1, 1]$ 之间。 $I > 0$ 表示空间正相关,其值越大,空间相关性越明显; $I < 0$ 表示空间负相关,其

值越小,空间差异越大; $I = 0$ 表示不相关。计算全局 Moran 指数的同时还能得到 Z 分数值,即标准差倍数,这是用来判断数据集离散程度的指标。 $Z > 0$ 表示数据集在空间上呈聚集分布, $Z < 0$ 表示数据集在空间上呈随机分布。

3.5 地貌参数

地貌参数能够定量描述地形特征,揭示地表模型中蕴含的构造地貌信息。禄丰恐龙谷以构造侵蚀地貌为主,起伏度受地表坡度制约,计算坡度(Slope)和起伏度(Relief)两个地貌参数,对于该研究区的数字地形分析是有必要的。

坡度代表地表在该点的倾斜程度,是坡面的垂直距离 H 与水平距离 S 之比,通常用坡面与水平面的夹角 θ 表示。从数学角度看,DEM 可以视为一个或多个函数之和,对模型求一阶或二阶导数可以推导出地貌参数,如坡度、坡向、汇流方向、地表曲率等。坡度计算公式如下:

$$\theta = \arctan(H/S) \quad (2)$$

起伏度能够描述地面侵蚀程度,用单位范围内的最大高程差来表示。计算公式如下:

$$R = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (3)$$

式中, R 为地形起伏度; Z_{\max} 与 Z_{\min} 分别为采样窗口内高程的最大值与最小值。起伏度计算的关键在于确定最佳采样窗口,分析区域的变化,将导致最大高程差发生改变。经测试,以 9 m 的矩形采样窗口计算起伏度,结果满足统计误差要求并能突出研究对象特征。

4 结果与分析

4.1 插值算法的最优参数

不同关键参数取值对 IDW 算法插值精度的影响如图 2 所示。当权指数为 1 时,随着搜索点数增加, RMSE 先减小后增大,搜索点数为 12 时 RMSE 最小。当搜索点数超过 12 时,搜索点间的距离变化过大,导致插值误差增速变大。说明权指数为 1 时,插值结果稳定性差。除权指数为 1 外, RMSE 随搜索点数增加先减小后趋于稳定。权指数与插值误差呈正比,相同搜索点数,权指数越大插值误差越大,故权指数 2 为潜在优选参数。搜索点数大于 16 时,权指数为 2 的 RMSE 明显低于其余四种,且搜索点数为 16 时的误差最小。权指数 2、搜索点数 16 为 IDW 算法的最优参数。

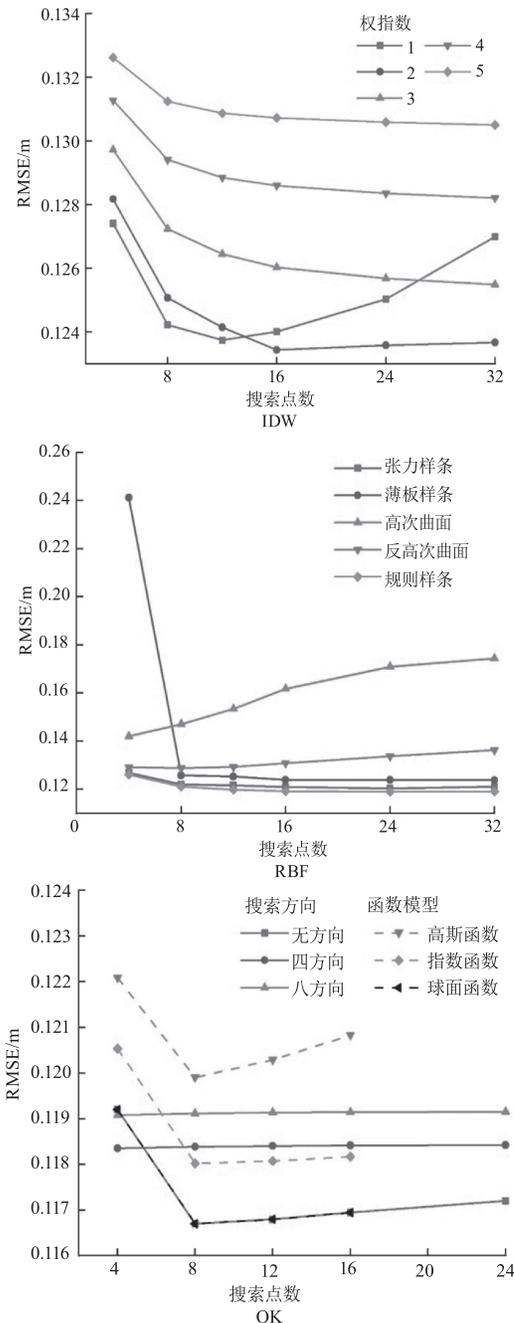


图2 关键参数取值对插值精度的影响

Fig. 2 Effect of key parameters on interpolation accuracy

当核函数为高次曲面函数时,RBF 的 RMSE 明显高于其余三种核函数,故最优参数排除高次曲面函数。搜索点数介于 4~8 时,薄板样条函数的 RMSE 骤减。另外,随着搜索点增加,核函数为规则样条函数、薄板样条函数和反高次曲面函数的 RMSE 先减小后趋于稳定。原因可能是 RBF 拟合的曲面搜索范围内需要较多的采样点,否则栅格图出现“失真”(即局部插值高程明显大于点云高程),造成插值结果不准。三条较稳定的误差曲线中,规则样条函数的精度优于反高次曲面与

张力样条函数,且搜索点数为 24 时 RMSE 最小。为兼顾插值效率,核函数为规则样条函数、搜索点数 24 为 RBF 算法的最优参数。

当搜索方向为无方向时,OK 插值的 RMSE 随着搜索点数的增加先减小后增大,相同搜索点数,核函数为球面函数的 RMSE 明显低于高斯函数和指数函数。可能是因为研究区土壤侵蚀剧烈,搜索范围内高程值突变明显,球面函数拟合效果较好。当搜索点数相同时,搜索方向越多,球面函数的插值精度越低,在搜索点数为 8 时 RMSE 最小。故核函数为球面函数、搜索方向选无方向、搜索点数 8 为 OK 算法的最优参数。

4.2 不同点云密度下的插值误差

根据参数优选结果,各插值算法以最优参数对不同密度的地面点云插值,分析点云密度对插值误差的影响,如图 3 所示。结果表明,随点云密度的增大,无论采用何种插值方法,DEM 的 RMSE 与 MAE 均先减小后趋于稳定,点云密度越大插值精度越高,插值算法的精度与点云密度正相关。RMSE 与 MAE 的变化分三个阶段:骤减阶段,重采样率 1%~25% (点云密度 0.2~5.0 点/m²),此时 RMSE 与 MAE 的变化最大,最大变化量分别是 0.270 和 0.178m;缓慢减小阶段,重采样率 25%~50% (点云密度 5.0~10.1 点/m²),RMSE 与 MAE 的最大变化量分别是 0.161 和 0.038 m;稳定阶段,重采样率 50%~100% (点云密度 10.1~20.2 点/m²),RMSE 与 MAE 的最大变化量小于 0.010 m。

IDW 的 RMSE 与 MAE 的变化量最大,分别是 0.322 和 0.191 m,说明 IDW 更容易受点云密度的影响。是因为其插值核函数 $\lambda_i = d_i^{-u} / \sum_{i=1}^n d_i^{-u}$ (λ_i 为采样点的权; u 为幂指数; d_i 为采样点到插值点的距离)是距离的衰减函数,随点云密度的减小,采样点与插值点的空间相关关系降低,采样点对插值结果的影响减弱,导致插值结果不确定性(误差)增大。当重采样率小于 50% (点云密度小于 10.1 点/m²)时,IDW、RBF、OK 的差异显著,NN 和 TIN 的整体误差相近且明显低于其余 3 种插值方法。点云密度较低的情况下,DEM 的质量损失严重,重采样率为 1% (点云密度 0.2 点/m²)时各算法描述地形的能力最差,如图 4 所示(其中参考 DEM 是利用 OK 算法对原始数据插值构建的(b)~(f)为 50% 重采样率下不同插值算法

构建的 DEM)。IDW 获得粗糙的表面,NN 和 TIN 高估了向斜的高程,RBF 造成严重的图形“失真”问题,OK 对局部地形变化敏感,出现许多褶皱。因此,当使用稀疏地面点生成 DEM 时,应仔细选择空间插值方法。当重采样率 50~100% (点云密度 10.1~20.2 点/m²) 时,5 种插值方法均能准确的描述地形特征,未有明显的地形表达差异,插值精度趋于稳定。这一结果说明点云密度足够大时,插值方法对 DEM 的精度影响较小,地形变化是影响 DEM 质量的主导因素。当重采样率为 100% (点云密度 20.2 点/m²) 时,OK 的插值精度最高,RMSE 与 MAE 分别是 0.117 和 0.084 m,其次是 TIN、RBF、NN、IDW。然而,5 种插值算法的插值精度最大变化量不超过 0.004 m,与 OK 算法相比,4 种插值算法精度差异不超过 6%。

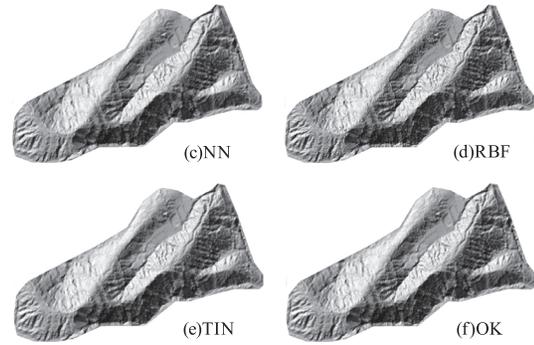


图 4 参考 DEM 和不同插值算法构建的 DEM
Fig. 4 Reference DEM and DEM constructed by different interpolation algorithms

UAV-LiDAR 技术的优势之一是测量精度高,但是高密度的点云造成了数据处理和存储困难的问题。因此,需要在保证 DEM 精度的前提下,简化 UAV-LiDAR 点云数据量以提高数据处理效率。图 3 和表 2 的结果表明,将点云密度降低到原始数的 50% 不会导致所有插值方法有明显的 DEM 精度损失,最佳点云密度为 10.1 点/m²。同时研究区内植被覆盖率低,获取的地面点云数据接近真实地表形态。此时,OK 算法的 RMSE 和 MAE 最小,可以认为 OK 算法为构建该地区 DEM 的最优算法。

表 2 交叉验证结果表

Tab. 2 Cross validation results table

重采样率/%	精度/m	IDW	NN	RBF	TIN	OK
1	RMSE	0.446	0.309	0.375	0.308	0.326
	MAE	0.278	0.189	0.201	0.179	0.223
25	RMSE	0.176	0.134	0.284	0.147	0.168
	MAE	0.100	0.090	0.126	0.094	0.109
50	RMSE	0.126	0.122	0.123	0.122	0.120
	MAE	0.089	0.086	0.088	0.087	0.085
75	RMSE	0.124	0.121	0.120	0.120	0.118
	MAE	0.087	0.085	0.085	0.085	0.084
100	RMSE	0.124	0.121	0.120	0.120	0.117
	MAE	0.086	0.085	0.085	0.085	0.084

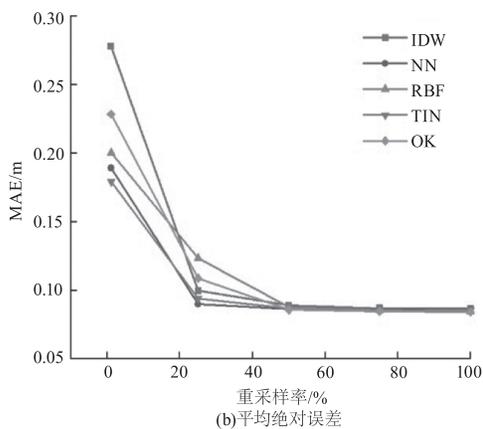
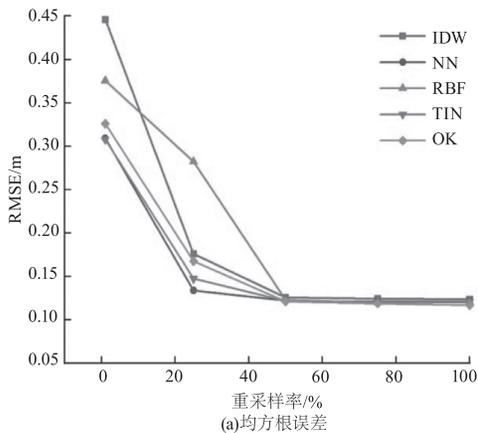
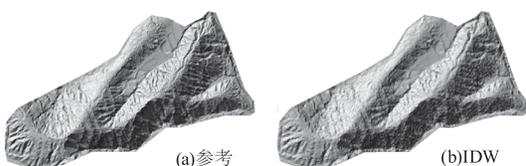


图 3 不同重采样率下各方法的插值误差

Fig. 3 Interpolation errors of different methods under different resampling rates



4.3 误差空间分布特征

为了探讨不同点云密度下各插值方法的误差空间分布特征,分别将 AE 值投影在对应插值方法所构建的 DEM 图中,对 AE 值进行插值得到误差的空间分布特征,如图 5 所示。随着点云密度降低,各插值方法的插值误差波动增大,误差点的聚集效应增强。TIN 的误差空间分布变化最小,说明 TIN 插值方法抑制误差变化的效果优于 NN、OK、RBF、IDW。

其中, IDW 误差点分布变化最明显, 对点云密度的变化最敏感, 与 RMSE 和 MAE 曲线的分析结果一致。5 种方法 AE 的高值 ($>0.3\text{ m}$) 与低值 ($<0.05\text{ m}$) 均有明显的公共区域。由图 5(a) 可知, AE 值较高的区域集中在背斜翼部的斜坡断裂处, 可能的原因是此区域坡度大, 流水侵蚀和风化作用严重导致起伏度大, 插值点领域范围内的采样点高程波动大造成插值算法预测误差大。当重采样率大于 50% (点云密度大于 $10.1\text{ 点}/\text{m}^2$) 时, 5 种插值方法在向斜区域均表现出较小的插值误差。

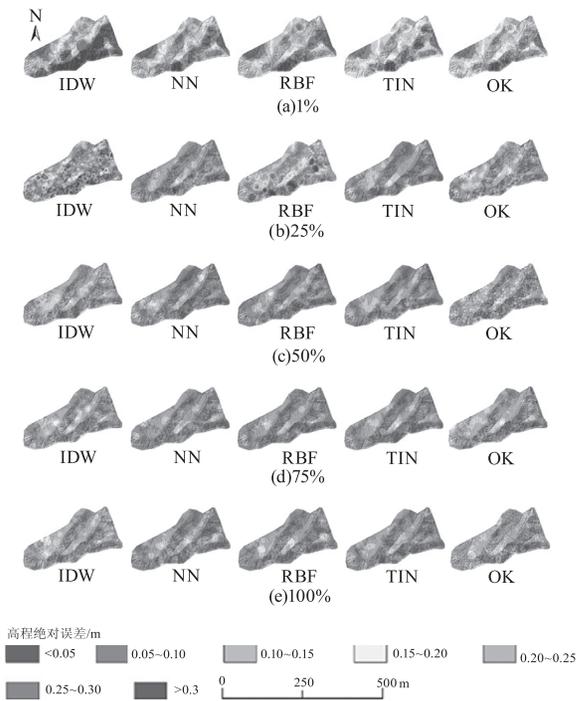


图 5 不同点云密度下 5 种插值方法的误差点分布

Fig. 5 The error point distribution of five interpolation methods under different point cloud density

表 3 显示了 50% 重采样率的所有插值算法 AE 值的全局 Moran 指数和 Z 分数值。全局 Moran 指数和 Z 分数值均为正, 这表明 5 种方法产生了相当程度的误差聚类, 空间正自相关强度 $TIN > NN > RBF > IDW > OK$ 。OK 算法的全局 Moran 指数和 Z 分数值最小, 分别是 0.03 和 2.18, 与其余 4 种方法差异显著。参考图 5 可以发现, 无论插值算法和点云密度如何, 插值误差高值和低值的聚类都是常见的。

以最优的点云密度和插值算法构建 DEM 并计算地貌参数, 用不同灰度代表数值的大小, 坡度计算结果如图 6(a) 所示。全区坡度的变化范围为

$0 \sim 82^\circ$, 平均坡度 28° , 空间上的分布差异明显。较陡险坡 (坡度 $>55^\circ$) 大致集中在翼部, 沿背斜两翼近似呈现出“水波纹”形态。平坡 (坡度 $<5^\circ$) 大致集中在向斜谷底, 背斜山脊有零星分布。

表 3 不同插值方法误差的全局 Moran 指数

Tab. 3 Global Moran's index of error of different interpolation methods

插值方法	全局 Moran 指数	Z 分数值
IDW	0.07	4.75
NN	0.09	6.37
RBF	0.08	5.56
TIN	0.10	5.38
OK	0.03	2.18

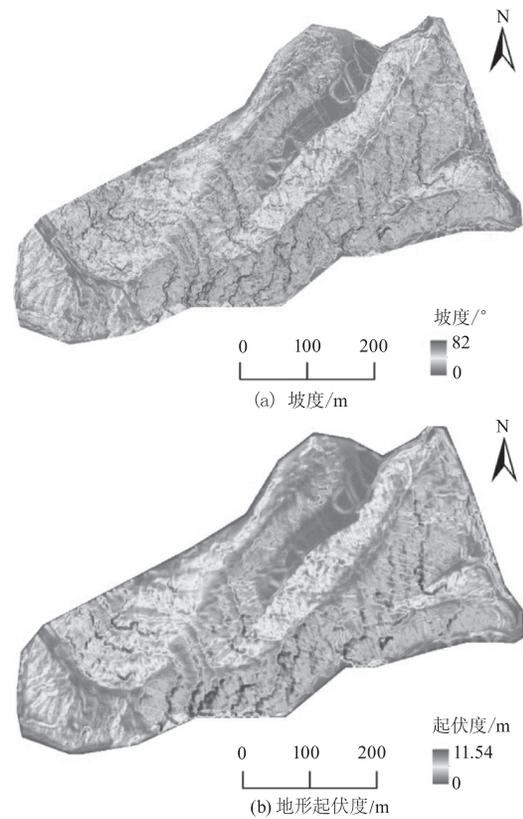


图 6 地貌参数提取结果

Fig. 6 Extraction results of geomorphological parameters

对研究区的起伏度进行计算, 结果如图 6(b) 所示。全区起伏度的变化范围为 $0 \sim 11.54\text{ m}$, 平均起伏度 2.82 m , 起伏度空间上差异分布与坡度相似。起伏度大的区域大致集中在翼部汇水盆地, 斜坡断裂处, 此区域土壤侵蚀剧烈, 同时也是误差高值点分布区域; 起伏度小的区域主要分布在向斜谷底, 沿山脊处有少量条带状分布。对比不同点云密度下 5 种插值方法的误差点分布图可知, 插值误差在空

间上是可变的,地表粗糙度大的区域,插值误差增长更快,这与 Fan 和 Atkinson 的研究结果一致^[23]。

4.4 褶皱构造特征提取

褶皱的基本类型有背斜和向斜两种,背斜表现为向上弯曲的形态,向斜表现为向下弯曲的形态。脊线和槽线是背斜和向斜的基本要素,背斜同一褶皱面的各横剖面上的最高点为脊点,它们的连线称为脊线;向斜同一褶皱面的各横剖面上的最低点为槽点,它们的连线称为槽线。根据这一特点,可以利用水文分析和几何分析相结合的方法提取脊线和槽线^[24]。以原始数据提取的脊线和槽线作为参考,对比最佳点云密度下 5 种插值算法所构建的模型提取的脊线和槽线,以特征线相交形成的多边形面积衡量各插值算法的误差特征^[22],如图 7 所示。统计多边形的面积(表 4),发现 OK 的多边形总面积或单个多边形面积最小,而 TIN 的最大。因此,OK 算法构建的模型质量损失最小,与交叉验证结果相符。

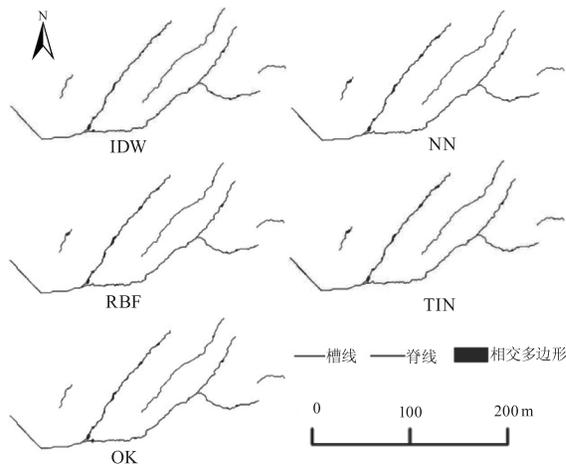


图 7 脊线和槽线差异对比图

Fig. 7 Comparison of ridge line and trough line difference

表 4 相交多边形面积(单位:m²)

Tab. 4 Intersecting polygon area(Unit:m²)

名称	IDW	NN	RBF	TIN	OK
槽线	118.44	157.82	148.35	165.79	91.16
脊线	691.11	706.33	719.20	762.06	582.88
Σ	809.55	864.15	867.55	927.85	674.04

为获得该褶皱的其他要素,将脊线和槽线投影于山体阴影图中,如图 8 所示。由图可知,OK 插值算法构建的地表模型能够清晰的描述褶皱构造的形态特征,利用水文分析方法提取的脊线和槽线连贯

且与实际地形相符。

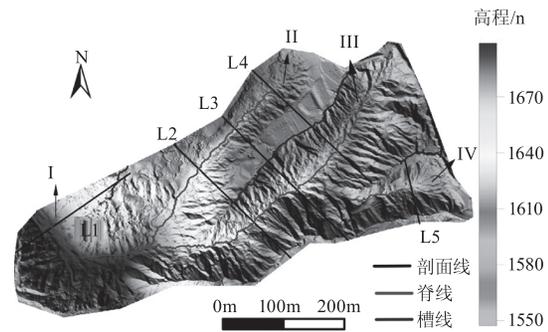


图 8 脊线和槽线位置

Fig. 8 Position of ridge andtrough lines

褶皱的剖面是分析褶皱形态的重要方式,正交剖面能表示出褶皱的真实形态。沿 L1 ~ L5 作正交剖面图,测量并统计翼间角、波长、波幅等褶皱的基本要素于表 5。翼间角是指正交剖面上两翼间的夹角,对于研究区内的褶皱呈圆弧形,翼间角是指分别过两翼上两个拐点的切线之间的夹角。背斜 I ~ IV 的翼间角在 108 ~ 131° 范围内,根据翼间角的大小,可以将该褶皱描述为开阔褶皱。西南至东北背斜 II 翼间角增大且高程减小,褶皱波长增大波幅减小,褶皱地表出露部分断裂,结合图 1d 可推测背斜 II 沿西南 - 东北向地下延伸。褶皱的某一岩层在平面上出露的纵向长度和横向宽度之比,是褶皱形态分类的重要依据。背斜 I、IV 长宽比分别为 0.90 和 2.27,比值小于 3 : 1,褶皱面自脊点向四周呈放射状倾斜,属于穹窿构造。背斜 II、III 长宽比分别为 3.62 和 3.37,比值介于 3 : 1 ~ 10 : 1 之间,属于短轴褶皱。

表 5 背斜基本要素测量结果

Tab.5 Measurement results of basic elements of anticline

剖面	背斜	翼间角/(°)	波长/m	波幅/m	长宽比
L1	I	108	/	/	0.90
L2	II	115	293.58	35.75	3.62
	III	106			3.37
L3	II	108	379.22	29.69	3.62
	III	107			3.37
L4	II	131	364.26	24.77	3.62
	III	116			3.37
L5	IV	102	/	/	2.27

5 结论

禄丰恐龙谷环状构造地形复杂,背斜表面地形起伏度大,传统的测量技术地形数据采集难度大。

本文基于 UAV-LiDAR 点云,构建禄丰恐龙谷环状构造中坑缘背斜地貌的精准数字地貌模型,比较 IDW、NN、RBF、TIN、OK 插值方法的插值精度和误差空间分布特征,利用数字模型对背斜进行地貌分析和测量。主要结论如下:

1) 由于研究区内植被覆盖率低,UAV-LiDAR 获取的地面点云数据接近真实地表形态,利用 OK 插值方法构建的数字地貌模型精度可达 0.117 m,最优参数为球面函数、无方向、搜索点数 8。试验结果表明,针对特定区域优选插值参数有利于减小插值误差,本文的参数优选结果能为植被覆盖率低的复杂地形构建地表模型提供一定的定参考与借鉴。

2) 插值参数、点云密度和地形表面粗糙度是影响插值误差的重要因素。点云密度与插值精度正相关,当点云密度足够大时(20.2 点/m²),插值方法对 DEM 的精度影响较小,插值参数取值和地形变化是影响 DEM 质量的主要原因。点云密度可以降低到原始地面点云密度的 50%,而不会造成严重的精度损失。无论插值算法和点云密度如何,插值误差高值和低值的聚类都是常见的,且局部误差在空间上是可变的,地表粗糙度大的区域误差增加得快,点云密度越低误差的变化越大。

3) 基于 OK 算法所构建的模型能够清晰的描述该背斜的地貌特征,提取的脊线和槽线符合实际情况。该褶皱构造的翼间角为 108~131°,背斜 I、IV 长宽比小于 3:1,褶皱面自脊点向四周呈放射状倾斜,属于穹窿构造;背斜 II、III 长宽比介于 3:1~10:1 之间,属于短轴褶皱。据正交剖面结果分析,推测背斜 II 沿西南-东北向地下延伸。

参考文献:

- [1] Jiang Haiying, Jia Kun, Zhao Xiang, et al. Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(12): 1433-1449. (in Chinese)
江海英, 贾坤, 赵祥, 等. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1433-1449.
- [2] Du Qingsong, Li Guoyu, Peng Wanlin, et al. Acquiring high-precision DEM in high altitude and cold area using InSAR technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021, (3): 44-49. (in Chinese)
- 杜青松, 李国玉, 彭万林, 等. 利用 InSAR 技术获取高寒高海拔地区高精度 DEM[J]. 测绘通报, 2021, (3): 44-49.
- [3] Gao Sha, Yuan Xiping, Gan Shu, et al. Experimental analysis of spatial feature detection of the ring geomorphology at the south edge of Lufeng Dinosaur Valley based on UAV imaging point cloud[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 283-292. (in Chinese)
高莎, 袁希平, 甘淑, 等. 基于无人机成像点云的禄丰恐龙谷南缘环状地貌空间特征探测实验分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 283-292.
- [4] Zhang Di, Li Jiacun, Ren Lili, et al. Topographic correction of GPR image based on terrestrial laser scanning[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(4): 416-421. (in Chinese)
张迪, 李家存, 任丽丽, 等. 基于地面激光的探地雷达图像地形校正方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 416-421.
- [5] Li Zhenhong, Li Peng, Ding Dong, et al. Research progress of global high resolution digital elevation models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1927-1942. (in Chinese)
李振洪, 李鹏, 丁咚, 等. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43(12): 1927-1942.
- [6] Li Yumei, Guo Qinghua, Wan Bo, et al. Current status and prospect of three-dimensional dynamic monitoring of natural resources based on LiDAR[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 381-402. (in Chinese)
李玉美, 郭庆华, 万波, 等. 基于激光雷达的自然资源三维动态监测现状与展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 381-402.
- [7] Jin Li, Andrew D. Heap. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review[J]. Environmental Modelling and Software, 2014, 53: 173-189.
- [8] Jiang Weida, Sun Yongfu, Liu Shaowen, et al. Terrain evolution of subaqueous delta in Chengdao sea area based on IDW[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 697-707. (in Chinese)
蒋伟达, 孙永福, 刘绍文, 等. 基于 IDW 的埕岛海域水下三角洲地形演变[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 697-707.
- [9] Alper Akar. Evaluation of accuracy of dems obtained from uav-point clouds for different topographical areas[J]. International Journal of Engineering and Geosciences, 2017,

- 2(3):110-117.
- [10] Habib Maan. Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness [J]. *Catena*, 2021, 198:105072.
- [11] Li Li, Mark A. Nearing, Mary H. Nichols, et al. The effects of DEM interpolation on quantifying soil surface roughness using terrestrial LiDAR [J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198(C):104570.
- [12] Nicholas Robert Goodwin, John Armston, Isaac Stiller, et al. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: a case study from Aratulla, Queensland, Australia [J]. *Geomorphology*, 2016, 262: 24-36.
- [13] Li Pengfei, Zhang Xiaocheng, Yan Lu, et al. Comparison of interpolation algorithms for DEMs in topographically complex areas using airborne LiDAR point clouds [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15):146-153. (in Chinese)
李朋飞, 张晓晨, 严露, 等. 复杂地形中机载 LiDAR 点云构建 DEM 的插值算法对比 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15):146-153.
- [14] P. V. Arun. A comparative analysis of different DEM interpolation methods [J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, (16):133-139.
- [15] Wang Daojie, Chen Bei, Sun Jianhui. Study on the effects of point density on DEM accuracy of airborne LiDAR [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022, (5):140-144, 169. (in Chinese)
王道杰, 陈倍, 孙健辉. 机载 LiDAR 点云密度对 DEM 精度的影响 [J]. *测绘通报*, 2022, (5):140-144, 169.
- [16] Liu Xiaohang, Hu Hai, Hu Peng. Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models based on approximation theory [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6):7062-7079.
- [17] Xiong Liyang, Tang Guoan, Yang Xin, et al. Geomorphology-oriented digital terrain analysis: progress and perspectives [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3):595-611. (in Chinese)
熊礼阳, 汤国安, 杨昕, 等. 面向地貌学本源的数字地形分析研究进展与展望 [J]. *地理学报*, 2021, 76(3):595-611.
- [18] Wang Ruiling. Study on geoh heritage investigation and development model of lufeng dinosaur national geopark, yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. (in Chinese)
王睿苓. 云南禄丰恐龙国家地质公园地质遗迹资源调查及发展模式研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [19] Lei Fan, Peter M. Atkinson. A new multi-resolution based method for estimating local surface roughness from point clouds [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144:369-378.
- [20] Chen Chuanfa, Bei Yixuan, Li Yanyan, et al. Effect of interpolation methods on quantifying terrain surface roughness under different data densities [J]. *Geomorphology*, 2022, 417:108448.
- [21] Zhang Jinming, You Xiong, Wan Gang. Experimental research on optimization of DEM interpolation parameters [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2):178-185, 192. (in Chinese)
张锦明, 游雄, 万刚. DEM 插值参数优选的试验研究 [J]. *测绘学报*, 2014, 43(2):178-185, 192.
- [22] Yue Yanli, Luo Mingliang, Zhang Bin. Study on spatial distribution of DEM interpolation errors in the gully of dry-hot valley [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(7):1122-1128. (in Chinese)
岳彦利, 罗明良, 张斌. 干热河谷冲沟 DEM 插值误差的空间分布研究 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2018, 43(7):1122-1128.
- [23] Lei Fan, Peter M. Atkinson. Accuracy of digital elevation models derived from terrestrial laser scanning data [J]. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(9):1923-1927.
- [24] Luo Weidong, Gan Sshu, Yuan Xiping, et al. Experimental study on the improvement of PTD filtering for dense point clouds of UAV in the southern margin of dinosaur valley [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(6):938-944. (in Chinese)
罗为东, 甘淑, 袁希平, 等. 恐龙谷南缘山区 DIM 点云的 PTD 滤波改进试验研究 [J]. *激光与红外*, 2022, 52(6):938-944.