

# 基于无人机图像的戈壁表面砾石特征变化研究\*

穆悦<sup>1</sup>, 冯益明<sup>1\*\*</sup>, 高翔<sup>2</sup>, 韩东<sup>1</sup>, 吴隐<sup>3</sup>, 张谱<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875;  
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** [目的] 通过无人机平台和运动结构建模技术获取了覆盖较大范围的戈壁表面正射图像和数字地面模型, 以位于新疆维吾尔自治区哈密市天山南坡的洪积扇为研究对象, 进行戈壁表面砾石覆盖度和粒径的测量及分析, 探讨利用无人机和图像处理技术进行大范围戈壁砾石研究的适用性。[方法] 通过自洪积扇扇心到靠近扇缘选取 3 个典型样区, 利用无人机获取连续覆盖的戈壁表面高分辨率图像, 生成了戈壁表面的高精正射拼接图像以及高精度的地形数据, 并提取了样区内砾石(粒径 $\geq 7$  mm)的覆盖度及砾石(粒径 $\geq 32$  mm)的粒径。[结果] 自扇心到靠近扇缘, 3 个样区的砾石覆盖度分别为 34.22%、26.85%、21.88%; 砾石粒径均值分别为 130、95、78 mm。随海拔下降, 样区总体砾石覆盖度和粒径均呈下降趋势, 且自扇中到扇缘相比自扇心到扇中下降趋势有所减缓; 而在各个样区内部, 砾石覆盖度及粒径与海拔关系不明显。[结论] 在洪积扇尺度上, 砾石覆盖度与粒径变化主要受海拔影响; 在样区尺度上, 砾石覆盖度和粒径变化则可能受到植被分布和局部地形的影响。利用无人机和图像处理技术, 可以高效且准确地评估大范围戈壁表面砾石特征及分布, 为戈壁形成演化研究提供基础数据及技术支持。

**关键词:** 无人机; 砾石覆盖度; 砾石粒径; 戈壁

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0055-08

## Spatial Distribution of Gravel Characteristics on Gobi Desert Surface Based on Image Acquired by Unmanned Aerial Vehicle

MU Yue<sup>1</sup>, FENG Yi-ming<sup>1</sup>, GAO Xiang<sup>2</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, WU Yin<sup>3</sup>, ZHANG Pu<sup>1</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China,)

**Abstract:** [Objective] To explore the applicability of using unmanned aerial vehicle (UAV) and image processing technique for large scale research of gravels on Gobi surface. [Method] Taking the pluvial fan at south slope of Tianshan Mountains in Hami of Xinjiang Uygur Autonomous Region as study area, the orthographic images and digital terrain models (DTM) covering a large range of Gobi were obtained by UAV platform and the structure from motion (SfM) technology, and the gravel coverage and diameter were measured and analyzed. From the center to near the edge of the pluvial fan, three typical sample zones were selected, and high resolution images of Gobi surface were shot by camera on UAV. High resolution mosaic image and terrain data of Gobi surface were produced, and the coverage of gravels (diameter  $\geq 7$  mm) and diameter of gravels (diameter  $\geq 32$  mm) were calculated. [Result] From center to near the edge of the fan, the gravel coverage of the three sample zones was 34.22%, 26.85% and 21.88%, and the mean gravel diameter was 130, 95 and 78 mm. As elevation decreased, the gravel coverage

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(31370708)

作者简介: 穆悦(1988—), 女(汉族), 河南信阳人, 博士, 主要从事环境遥感方向研究。

\*: 感谢中国林科院荒漠化研究所王锋副研究员对本研究无人机飞行实验设计提供的建议!

\*\* : 通讯作者, 冯益明. 邮箱: fengym@caf.ac.cn

and diameter dropped. The gravel coverage and diameter dropped more slowly from the middle to near the edge of the fan than from the center to the middle of the fan. However, within each sample zone, the relationship between gravel characteristics (coverage and diameter) and elevation was not obvious. [Conclusion] On the scale of pluvial fan, the changes of gravel coverage and diameter are mainly affected by elevation. On the scale of sample zone, the change of gravel coverage and diameter may be affected mainly by the vegetation distribution and local topography. Using UAV and image processing technology can efficiently and accurately estimate a wide range of the gravel characteristics and their spatial distribution, which provides basic data and methodological support for the research on Gobi evolution.

**Keywords:** UAV; gravel coverage; gravel diameter; Gobi desert

无人机技术在过去的十年中迅速发展,提供了一个高效的高分辨率图像采集平台,并被以各种方式应用于地貌学研究中。应用摄影测量技术获取的高精度地面和地形数据,开展了包括监测河床地形和形态<sup>[1-3]</sup>,河岸<sup>[4]</sup>,冲沟侵蚀<sup>[5]</sup>等的研究。其中近景摄影测量的应用还包括直接量化土壤侵蚀和实验室尺度景观的地貌动力学演化模型<sup>[3,6]</sup>。在时间、劳动力、成本等因素的影响下,通过无人机航拍图像来补充或取代野外大面积调查已经成为越来越多地貌学研究者的选择。通过机载图像完成的粒度制图已经显示出利用无人机航拍图像来分析粒径的前景<sup>[7]</sup>。

戈壁是干旱或极端干旱环境中的一种独特地貌景观<sup>[8]</sup>,广泛分布于我国西北地区<sup>[9-10]</sup>。典型的戈壁通常表面由砾石覆盖<sup>[11-12]</sup>,这也是其区别于其他荒漠景观的主要特征。戈壁表面砾石的覆盖度和粒径与地貌特征的关系,可以用来推测戈壁的形成演化规律<sup>[13-14]</sup>。现有的大面积粒度估算的研究通常使用卫星遥感图像,而戈壁表面砾石的粒级往往在厘米级,因此在利用卫星遥感影像来估算粒径时不可避免地存在精度过低的问题。因此,本研究通过无人机平台和运动结构建模(Structure from Motion, SfM)技术获取了较大范围的高空间分辨率的戈壁表面正射图像和数字地面模型(Digital Terrain Model, DTM),以探讨利用无人机和图像处理技术进行大范围戈壁砾石研究的适用性,为戈壁形成演化研究提供新的数据来源及技术支持。

## 1 研究区概况

本研究以位于新疆维吾尔自治区哈密市天山南坡的堆积型戈壁为研究对象,通过自一条洪积扇的扇心到靠近扇缘分别选取3个典型的样区(图1),开展戈壁近地面无人机飞行实验。样区1(扇心)、

样区2(扇中)、样区3(靠近扇缘)的平均海拔分别为1 735 m,1 436 m,1 209 m。

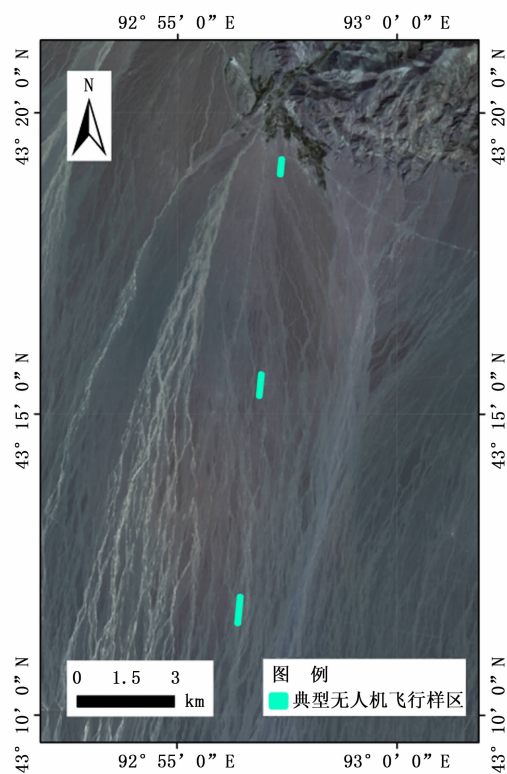


图1 研究区地理位置及样区布设

Fig. 1 Location of study area and sample zones

## 2 材料与方法

### 2.1 无人机图像采集与地面控制点布设

2016年8月21日到8月29日,利用大疆无人机(DJI Inspire 1 RAW)在3个样区分别进行了戈壁表面图像采集,并利用高精度GNSS设备(南方极智X6)进行地面控制点测量。

每个样区宽度固定为30 m,长度为1 km左右。无人机飞行的相对高度设置为20 m,共4条航线,两

条相邻航线的间距为 10 m。为了尽可能保证无人机距离地面的相对高度恒定,即保证采集图像的地面分辨率一致,在每个飞行小区内,沿样线方向均匀地内插了 4 个飞行高度控制点,更加精确地约束了无人机的飞行轨迹。

无人机的飞行速度为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,拍照间隔为 2 s。无人机获取的单景航片大小为  $4\,000 \times 2\,250$  像素,对应的地面大小为  $29.06 \text{ m} \times 16.35 \text{ m}$ 。根据飞行设置及航片大小,计算得到无人机航拍的航向重叠率为 72.47%,旁向重叠率为 38.84%。

为了在后期无人机图像处理中提高正射图像和地形数据的精度,使用中心喷绘有十字的方形发泡板进行地面控制点布设。每个飞行任务地面布设 5 个控制点(上端 2 个,下端 2 个,中间 1 个),并运用连接新疆 CORS 网络系统后精度可达厘米级的南方极智 X6 进行地面控制点的经度、纬度和高程信息采集。

## 2.2 生成正射图像

本研究无人机正射图像的生成利用基于 SfM 技术的 Agisoft LLC 公司的软件 PhotoScan 1.2.6 完成。图像处理流程如图 2 所示,具体步骤如下:采用通用成对预选进行高精度的照片对齐;利用添加的地面控制点坐标对相机对齐进行优化;采用进取模式进行高精度密集点云构建并生成数字表面模型(Digital Surface Model, DSM);最后以 DSM 模型作为表面模型进行正射校正,以生成正射图像。

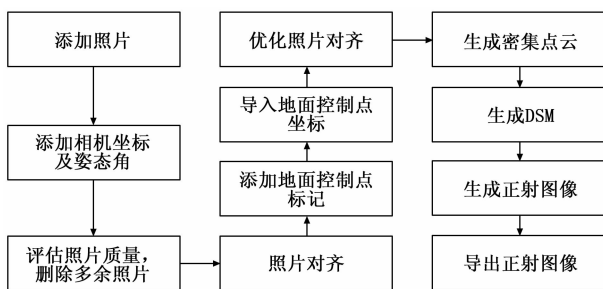


图2 无人机正射图像拼接流程图

Fig. 2 Flow chart of UAV image processing

## 2.3 砾石特征提取

按照“砾石形貌特征高效提取技术”<sup>[15]</sup>的基本流程,进行了基于无人机图像的砾石特征参数提取。砾石特征提取主要包含训练数据采集、构建决策树分类模型、砾石分类、砾石分割和特征参数计算 5 个关键步骤。

2.3.1 训练数据采集 利用 ArcGIS 10.2 (ESRI,

美国)的矢量工具分别进行了前景(砾石)和背景(非砾石)的训练数据勾绘,采集不同颜色、光照条件下的砾石像元及多种颜色和光照下的植被、土壤等非砾石像元。

2.3.2 构建决策树分类模型 通过色彩空间变换,将原来的数据由 RGB 空间扩展到 HSV 和 CIE  $L^*a^*b^*$  空间,即每个像元对应了红(R)、绿(G)、蓝(B)、色调(H)、饱和度(L)、明度(V)、亮度(L)以及有关色彩的 a 和 b 共 9 种特征量。然后利用 CART 算法,进行决策树分类模型构建。

2.3.3 砾石分类 为了降低噪声的影响,减少错分像元,对分类后图像进行前景和背景的噪声去除。将前景中像元数量小于 10 的对象去除,背景中像元数量小于 10 的空洞填充。通过砾石像元与图像中非空像元的比值计算得到砾石覆盖度。

2.3.4 砾石分割 为了提取出单个砾石,对分类后的二值图像利用分水岭算法进行图像分割。分割完成后,单个对象即为单个砾石。

2.3.5 特征参数计算 对每个对象进行特征参数计算,以进行筛选及分析。计算的参数包括面积( $\text{mm}^2$ ),紧实度, Feret 最大和最小粒径( $\text{mm}$ )<sup>[16]</sup> 4 项参数。根据正射图像的分辨率( $7 \text{ mm} \cdot \text{像元}^{-1}$ 左右),筛选出紧实度不小于 0.8 且不大于 0.95、Feret 最小粒径大于 32 mm、砾石面积大于 10 个像元的砾石。最后,输出所有砾石的 Feret 最大粒径即为砾石粒径。

## 2.4 高精度微地貌分析

为了分析砾石的空间分布,利用 PhotoScan 在生成密集点云之后,对点云进行分类得到地面点点云(单元大小 1.5 m,最大距离 0.1 m,最大角度  $15^\circ$ )。利用地面点点云生成高精度的 DTM,并在此基础上利用 ArcGIS 10.2 生成坡度和坡向数据。由于 DTM 数据地面分辨率过高,而坡度和坡向数据都是根据目标像元为中心的 9 个像元值来计算的,对原始 DTM 数据以  $100 \times 100$  像元为单元进行聚合,以去除砾石自身造成的地形变化。

## 3 结果与分析

### 3.1 正射图像拼接结果

经过照片对齐,3 个样区对齐的照片数量分别为 253 张,346 张,357 张。利用地面控制点对相片对齐的结果进行了优化,得到地面控制点的误差结果如表 1 所示。样区控制点总体误差最大的是样区

1,误差为 28 cm,整体误差最小的样区是样区 2,误差为 8.19 cm。

通过以 DSM 作为表面模型进行正射校正,生成了正射图像。3 个样区正射图像的地面分辨率依次

是 6.98 ,7.61 ,9.46 mm · 像元<sup>-1</sup>。根据 PhotoScan 的结果报告显示,样区 1 到样区 3 的正射拼接图像的地面覆盖面积分别为 0.022 8,0.034 7,0.038 6 km<sup>2</sup>。

表 1 各样区控制点误差分析

Table 1 The overall error analysis of control point in sample zones

样区 Sample zone	东西方向误差 X error /cm	南北方向误差 Y error/cm	垂直方向误差 Z error /cm	水平方向误差 XY error /cm	误差总计 Total /cm
1	9.79	26.22	1.06	27.99	28.01
2	7.67	2.83	0.31	8.18	8.19
3	52.94	8.43	5.46	8.93	10.47

### 3.2 砾石特征提取结果

如图 3 内放大图所示,洪积扇表面主要包含砾石、土壤以及植被 3 种地物类型。大多数砾石颜色为深蓝色,包含少部分黄色、红色、白色砾石。因此在进行砾石训练数据采集时,对各个颜色的砾石都进行了采样,而把土壤和植被的训练数据都归入背景数据集。根据构建的决策树分类模型,分别得到了 3 个样区的砾石分类图像。如图 3 中砾石分类结

果图所示,图像中砾石呈白色显示,植被和土壤呈黑色显示,决策树分类模型较好的区分出了砾石和背景像元。

分别对 3 个样区分类后的图像进行了图像分割,按照确定的砾石筛选规则,提取出了形状较为完整且粒径大于 32 mm 极粗砾。如图 4 中放大图所示,提取出来的砾石与正射图像中砾石形状和大小较为一致。

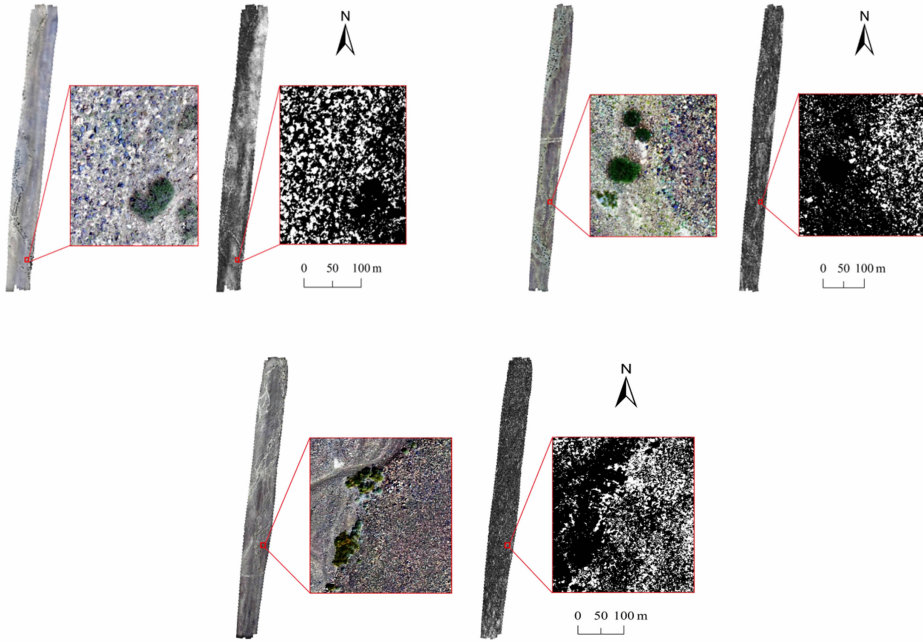


图 3 砾石(粒径≥7 mm)覆盖提取结果  
Fig. 3 Extraction map of gravel coverage

### 3.3 高精度微地貌分析

应用 PhotoScan 依据地面点点云生成了样区 DTM。3 个样区 DTM 的地面分辨率分别为 1.4, 1.5,1.9 cm · 像元<sup>-1</sup>。如图 5 所示,样区 1 的平均海拔为 1 735.21 m,样区 2 的平均海拔为 1 436.43

m,样区 3 的平均海拔为 1 208.94 m。整体而言,3 个样区的海拔变化均在 25 m 左右,海拔变化方向都是自东北方向向西南方向递减。

应用 ArcGIS 10.2 以 DTM 数据为基础,生成了坡度和坡向数据。如图 6 所示,3 个样区的地形大

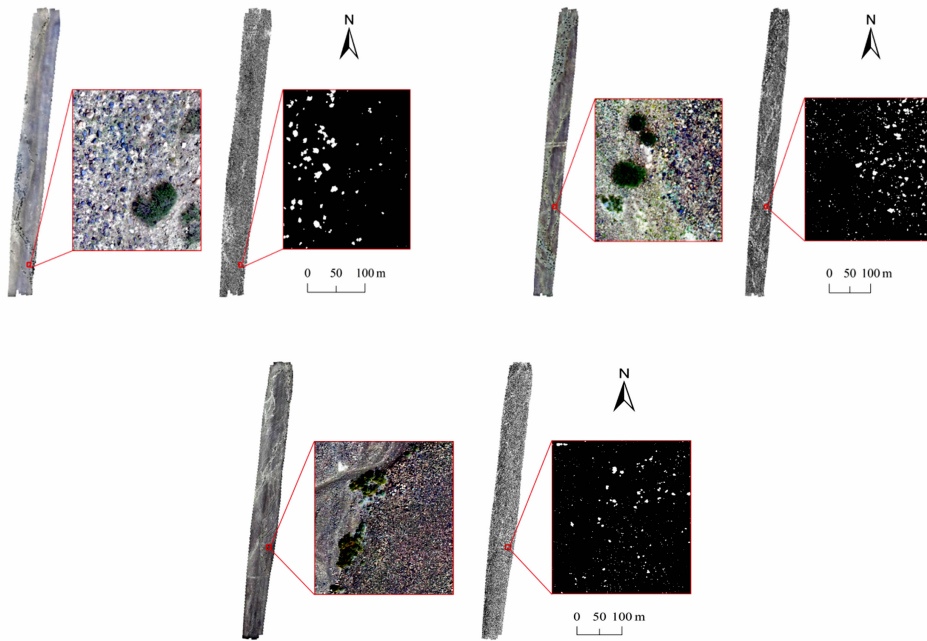


图 4 单个砾石(粒径≥32 mm)提取结果

Fig.4 Extraction map of individual gravel

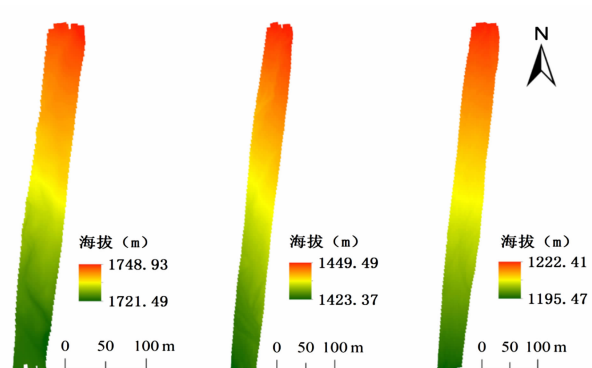


图 5 样区数字地面模型(从左到右分别为样区 1、样区 2、样区 3)

Fig.5 DTM of sample zones. Sample zone 1, sample zone 2, sample zone 3 is arranged from left to right.

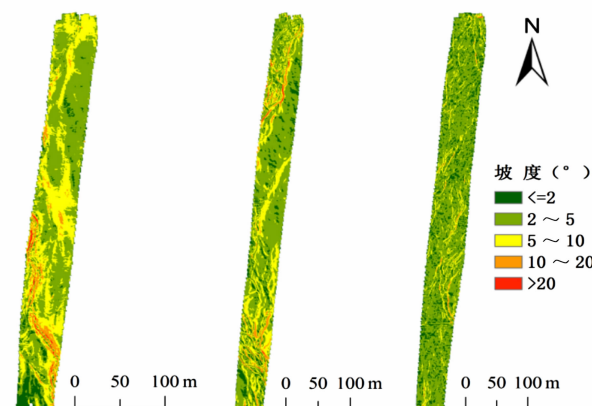


图 6 样区坡度图(从左到右分别为样区 1、样区 2、样区 3)

Fig.6 Slope distribution map of sample zone. Sample zone 1, sample zone 2, sample zone 3 is arranged from left to right.

体平坦,基本坡度都小于 10°。样区 1 坡度以 2°~10°为主,样区 2 坡度以 2°~5°为主,样区 3 坡度以小于 2°为主。如图 7 所示,样区 1 和样区 2 的坡向都是以西南坡为主;而样区 3 中各个方向的坡向分布较为均匀。在样区 1 和样区 2 中坡向变化还较为连续,而在样区 3 中由于地形起伏较小,因此坡向变化杂乱。由此可知,从洪积扇扇心到扇缘,地形起伏越来越平缓,冲沟和地垄逐渐消失。

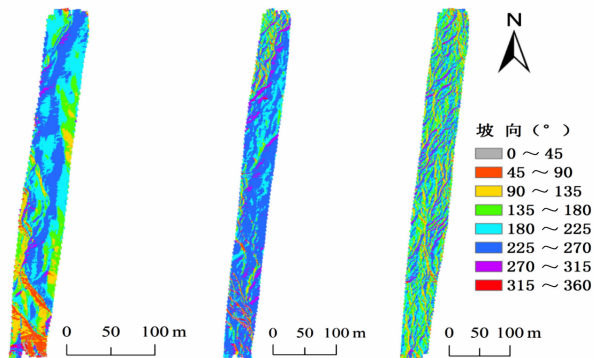


图 7 样区坡向图(从左到右分别为样区 1、样区 2、样区 3)

Fig.7 Aspect distribution map of sample zone. Sample zone 1, sample zone 2, sample zone 3 is arranged from left to right.

### 3.4 砾石特征变化分析

3.4.1 样区间砾石特征变化分析 经过计算各样区的总体砾石覆盖度(表 2),样区 1 的砾石覆盖度为 34.22%,样区 2 的砾石覆盖度为 26.85%,样区 3

的砾石覆盖度为 21.88%。通过样区间砾石覆盖度的变化可知,随着海拔下降,砾石覆盖度逐渐下降且下降幅度减小。

如表 2 所示,通过统计 3 个样区的砾石数量,粒径均值、中位数、众数以及标准差,发现:样区 1 内大砾石较多而砾石数量最少,粒径均值 130 mm,中值 128 mm,以 56 mm 粒径砾石最多,标准差最大,说明砾石粒径差异最大;样区 2 砾石粒径居中而砾石数量最多,粒径均值 95 mm,中值 85 mm,以 61 mm 粒

径的砾石最多;样区 3 砾石普遍较小而砾石数量居中,粒径均值 78 mm,中值 69 mm,以 51 mm 粒径砾石最多,标准差最小,说明砾石粒径差异最小。

整体而言,从洪积扇扇心到靠近扇缘,砾石覆盖度逐渐降低,砾石粒径均值也逐渐减小,而且变化幅度都逐渐减小,该趋势与海拔变化趋势基本一致,说明在洪积扇尺度上砾石覆盖度与粒径的变化主要受海拔影响。

表 2 各样区砾石特征统计

Table 2 Statistics of gravel characteristics in sample zones

样区 Sample zone	覆盖度 Coverage/%	砾石数量 Amount	粒径均值 Mean/mm	中位数 Median/mm	众数 Mode/mm	标准差 STD/mm
1	34.22	74 053	130	128	56	125
2	26.85	314 599	95	85	61	73
3	21.88	206 246	78	69	51	57

3.4.2 样区内砾石特征变化分析 以南北方向上约 30 m 为间隔将单个样区划分为样方,计算了每个样方内的砾石覆盖度,砾石 Feret 最大粒径的均值、中位数、众数、方差。

在单个样区内,如图 8 所示,从北向南,样区 1 内砾石覆盖度先升后降,而样区 2 和样区 3 内砾石覆盖度在样区靠下位置上升明显。砾石覆盖度变化与海拔关系不明显。

如图 9 所示,在单个样区内,自北向南,样区 1 内砾石粒径均值、中位数和标准差整体呈上升趋势;样区 2 内,砾石粒径均值和中位数略有下降,样区 3 内,砾石粒径均值和中位数变化不大。在靠近洪积扇扇心区域砾石粒径相比其他区域变化较大。

整体而言,在单个样区内砾石覆盖度和粒径的变化与海拔关系不大。

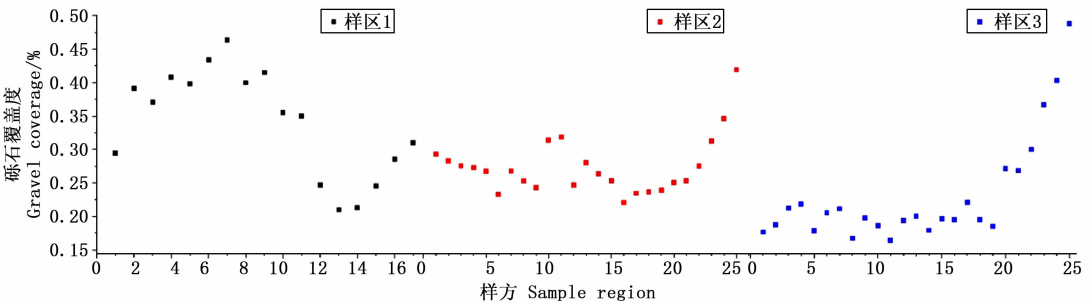


图 8 单个飞行小区内砾石覆盖度变化

Fig. 8 Changes of gravel coverage in different sample regions

## 4 讨论

### 4.1 基于无人机高清图像提取砾石特征的适用条件

基于数字图像来获取戈壁表面的砾石形貌特征参数已被证明具有可行性和适用性<sup>[15-16]</sup>,然而地面拍摄的图像往往覆盖面积过小(1 m × 1 m),不利于进行大面积的戈壁表面砾石分布研究。而利用遥感

影像估算的戈壁表面砾石粒径受遥感影像空间分辨率的限制,只能估算像元内砾石的平均粒径。利用无人机近地面飞行,可以实时获取较大面积连续覆盖的戈壁表面高清图像,对于分析戈壁面砾石特征具有重要意义。然而受无人机平台本身以及图像的地面分辨率的影响,在获取和分析砾石特征时应当有所取舍。

首先,无人机平台虽然相对于人为调查可以进

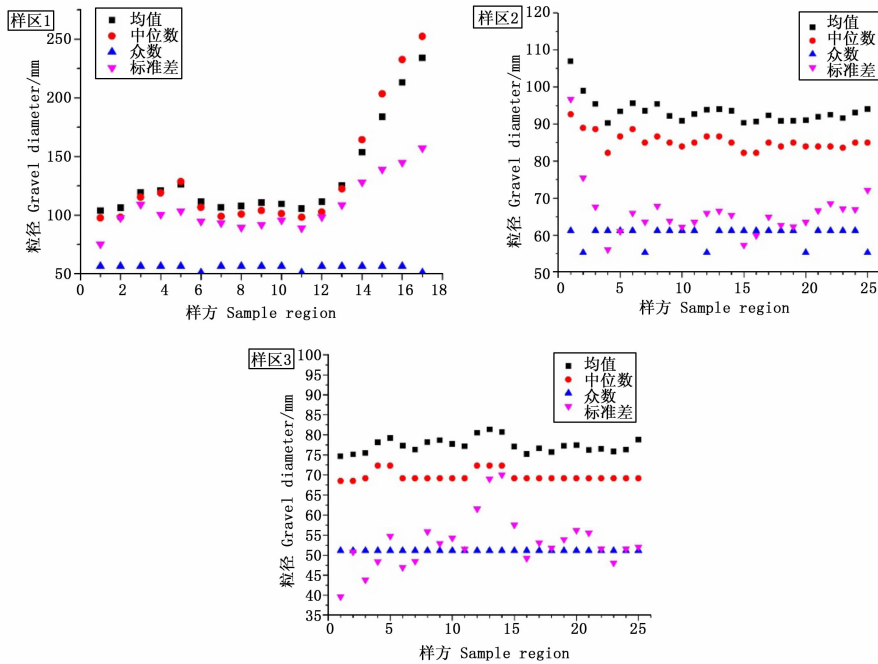


图9 单个飞行小区内砾石粒径变化

Fig. 9 Changes of gravel diameter in different sample regions

行更大面积的调查,但是由于砾石相对植被、建筑等地物类型尺寸要小得多,因此无人机的飞行高度不宜过高。受当前无人机电池的续航能力限制,其飞行时间有限,如本研究使用的大疆无人机 DJI Inspire 1 RAW,理论载重飞行时间 30 min 左右,而受戈壁区天气影响,往往实际只能飞行 20 min 左右。在飞行高度较低且飞行速度较慢情况下,执行一次飞行任务覆盖的地面面积一般小于 10 hm<sup>2</sup>,更适合进行典型样区研究。

其次,当前无人机平台搭载的相机分辨率越来越高,但是因为距离地面较远,获取的拼接正射图像的地面分辨率多在 5 mm · 像元<sup>-1</sup>到 10 mm · 像元<sup>-1</sup>左右(飞行高度距离地面 20 m),相对直接在地面拍摄的照片地面分辨率有所下降,因此不适合识别粒径较小的砾石,但是对于粗砾以上的砾石可以较好的识别。

#### 4.2 砾石特征分布影响因素

戈壁表面砾石覆盖度和粒径的分布往往与局部地形间存在联系。Dietze 等<sup>[14]</sup>通过研究戈壁表面砾石的方位角分布和坡度、坡向的关系,认为坡面过程,如非汇集的坡面流和蠕变流对戈壁的形成和恢复有作用。除了地形的影响之外,戈壁表面植被的分布格局对砾石覆盖度的影响也不可忽略。Quade 等<sup>[12]</sup>对莫哈维戈壁的研究发现,植被是砾

石减少的主要原因。随着植被增多,砾石覆盖度下降明显。

本研究分析了分别位于洪积扇扇心、扇中和靠近扇缘位置的 3 个样区间以及样区内的砾石覆盖度及粒径变化,发现自扇心到靠近扇缘,3 个样区的砾石覆盖度和粒径均值都逐渐下降,但是下降趋势减缓,该趋势基本与海拔下降的趋势相一致。而在各样区内部,砾石覆盖度和粒径的变化与海拔关系不明显,推测可能受到植被分布和局部地形的影响。在不同的研究尺度上,决定砾石特征空间分布的主要因素具有差异。

## 5 结论

本研究基于无人机高清图像,并运用砾石形貌特征高效提取技术,对戈壁表面砾石特征进行了研究。通过自洪积扇扇心到靠近扇缘选取 3 个典型样区,计算并分析了不同样区间以及样区内的砾石覆盖度及粒径变化。研究发现,在不同的研究尺度上,决定砾石特征空间分布的主要因素具有差异。在洪积扇尺度上,砾石覆盖度与粒径的变化整体与海拔变化相一致。而在样区尺度上,砾石覆盖度和粒径分布与海拔关系不大,可能受到植被分布和局部地形的影响。利用无人机和图像处理技术,可以高效且准确地评估大范围戈壁表面砾石特征及分布,为

戈壁形成演化研究提供基础数据及技术支撑。

### 参考文献:

- [1] LANE S N, JAMES T D, CROWELL M D. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research [J]. *The Photogrammetric Record*, 2000, 16(95): 793–821.
- [2] CHANDLER J. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(1): 51–63.
- [3] BRASINGTON J, SMART R M A. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(3): 231–247.
- [4] BARKER R, DIXON L, HOOKE J. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(13): 1217–1227.
- [5] BETTS H D, DEROSE R C. Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1999, 1(2): 91–101.
- [6] HANCOCK G, WILLGOOSE G. The production of digital elevation models for experimental model landscapes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(5): 475–490.
- [7] ARIF M S M, GÜLCH E, TUHTAN J A, *et al.* An investigation of image processing techniques for substrate classification based on dominant grain size using RGB images from UAV [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 10: 1–23.
- [8] GOUDIE A. *Arid and semi-arid geomorphology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [9] 申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究 [J]. *地理科学进展*, 2016(1): 57–66.
- [10] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究 [J]. *地理学报*, 2014(3): 391–398.
- [11] MCFADDEN L D, MCDONALD E V, WELLS S G, *et al.* The vesicular layer and carbonate collars of desert soils and pavements; formation, age and relation to climate change [J]. *Geomorphology*, 1998, 24(2–3): 101–145.
- [12] QUADE J. Desert pavements and associated rock varnish in the Mojave Desert: How old can they be? [J]. *Geology*, 2001, 29(9): 855–858.
- [13] ADELSBERGER K A, SMITH J R. Desert pavement development and landscape stability on the Eastern Libyan Plateau, Egypt [J]. *Geomorphology*, 2009, 107(3–4): 178–194.
- [14] DIETZE M, KLEBER A. Contribution of lateral processes to stone pavement formation in deserts inferred from clast orientation patterns [J]. *Geomorphology*, 2012, 139–140: 172–187.
- [15] MU Y, WANG F, ZHENG B, *et al.* The gravel coverage and size of Gobi desert analyzed by a rapid image-based method [C]. *IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016, Beijing, China*; 2016: 364.
- [16] 钱广强, 董治宝, 罗万银. 基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 625–633.

(责任编辑:彭南轩)