

机载激光雷达技术应用于沙丘变形监测的研究

叶光豪¹, 邓慷慷¹, 徐文兵^{1,2}, 牛正文¹

¹浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 临安 311300;

²同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要 土地沙化或荒漠化会造成重大经济损失, 基于机载激光雷达(LiDAR)技术获得的点云数据在监测沙丘变形和研究其规律方面有着重要意义。将获取的沙漠地区的两期机载 LiDAR 点云数据分别处理并生成数字高程模型(DEM)和坡度图, 结合面向地理对象和基于像元的变化检测技术实现对沙丘的变化及移动情况的精准监测。从不同时期坡度图上提取的沙丘背风坡脚线可用于反映沙丘的水平位移, 两期 DEM 的差值分析则反映了沙丘的垂直位移, 结合了主要风向的插值线分析则可以量化沙丘的地形变化及移动规律。分析结果显示整个实验区出现了总体沉降, 即沙物质搬移, 沙丘变形规律与主要风向相关; 沙丘迎风坡主要为沉降, 沙丘背风坡由于易滑塌, 所以顶部发生沉降, 底部发生沙物质沉积。

关键词 遥感; 机载激光雷达技术; 沙丘变形监测; 数字高程模型; 土地荒漠化

中图分类号 TP79; P237

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.052802

Application of Airborne LiDAR Technology in Dune Deformation Monitoring

Ye Guanghao¹, Deng Susu¹, Xu Wenbing^{1,2}, Niu Zhengwen¹

¹ School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;

² College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract Land desertification can cause significant economic losses. The point cloud data obtained by airborne light detection and ranging (LiDAR) technology is of great significance in monitoring the deformation of sand dunes and studying its laws. The acquired two-period airborne LiDAR data from desert area are processed to generate digital elevation model (DEM) and slope maps, and the combination of geographic object-based and pixel-based change detection methods is used to accurately monitor the deformation of dune and its movement. The toe lines of dunes extracted from multi-temporal slope maps provide horizontal deformation of dunes. Difference analysis of two-period DEM can be used to analyze vertical movement of dunes. The interpolate lines analysis combined with the dominant wind direction can quantify the topographic deformation and movement laws of dunes. The analysis results show that there is an overall settlement in the whole study area, which is the movement of sand material. The deformation law of dunes is highly related to the main wind direction. The stoss slope of dune is mainly subsidence, and the leeward slope of dune is prone to slip-off, so settlement occurs at the top and sand material deposition occurs at the bottom.

Key words remote sensing; airborne light detection and ranging technology; dune deformation monitoring; digital elevation model; land desertification

OCIS codes 280.3640; 100.2960

收稿日期: 2017-10-12; **收到修改稿日期:** 2017-11-30

基金项目: 2016 年度浙江省教育厅科研项目(Y201636125)、浙江农林大学 2016 年学生科研训练项目(112-2013200009)、浙江省公益技术研究项目(LGN18C160004)

作者简介: 叶光豪(1995—), 男, 本科生, 主要从事测绘工程方面的研究。E-mail: 375777616@qq.com

导师简介: 邓慷慷(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事机载激光雷达扫描数据处理等方法方面的研究。

E-mail: augustran@163.com(通信联系人)

1 引言

在我国荒漠化一直是一个值得关注的问题,据统计,2015年全国荒漠化土地 $261.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,沙化土地 $172.12 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有明显沙化趋势的土地 $30.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]。由此可见我国荒漠化和沙化状况严重,防治形势十分严峻。2005年国务院常务会议通过的《全国防沙治沙规划(2005—2010年)》^[2]中指出,近年来我国每年因沙化造成的直接经济损失高达540亿元,间接经济损失更是难以测算。因此对于沙漠的监测变得极为重要。

Hallet^[3]的研究显示,在风沙地貌中,沙丘的地貌格局最简单常见,也最容易研究。由 Meigs^[4]的研究可知,新月形沙丘是沙丘的主要类型。Belrhiti等^[5]的研究认为在风力的作用下,新月形沙丘移动时保持形状大致不变。因此地区荒漠化的动向可以根据沙丘的变化情况来判断^[6]。

由于沙漠地区范围较广,使用传统的变形监测技术如全站仪或全球定位系统(GPS)等采集数据,往往难以获得可以控制整片区域的采样点,费时费力。朱自娟等^[7]通过三期遥感影像信息提取的方法,对比研究了沙漠及周边地区的地表覆被类型及动态变化特征;但是这种方法只能获取平面的区域变化面积,无法获取沙漠高精度数字高程模型(DEM)。激光雷达(LiDAR)即三维激光扫描技术作为一种新型的主动遥感技术,可用于获取更加准确的高精度DEM^[8],因而开始应用于沙漠化监测^[9]。常用的LiDAR技术包括地面三维激光扫描和机载LiDAR。张庆圆等^[10]使用地面三维激光扫描仪在小区域范围内建立精准的地面模型,虽然可以较快获取点云数据,但是需要设置永久性标靶,无法快速做到大范围区域的建模。目前机载LiDAR技术能快速获取大范围区域点云数据且精度较高^[11]。楼燕敏等^[12]将机载LiDAR技术应用于滩涂海岸的测量研究中,通过获取点云数据,快速生产DEM和数字正射影像图(DOM),从而监测海岸变化及动态侵蚀情况,取得良好成果。可见机载LiDAR技术在监测地形变化方面具有较大的优势。

本文使用两期机载LiDAR点云数据分别生成高精度、高分辨率的DEM和坡度图,用以分析沙丘区域的地形、地貌以及提取沙丘特征线,然后采用两种变化检测方法,即基于像元与面向地理对象的分析方法^[13-14],结合主要风向和插值线分析,确定沙丘的变形规律,实现对土地荒漠化的监测。

2 研究区和数据

2.1 研究区概况

美国白沙国家公园位于美国新墨西哥州,平均海拔约1291m,面积约776 km^2 ,此地沙漠主要由石膏砂构成,气候为干旱、酷热和大风,区域内有少量沙漠植物和大约400种动物生存^[15]。

2.2 实验数据

本实验的两期机载LiDAR点云数据来源于由美国国家科学基金会支持、圣地亚哥超级计算机中心和加利福尼亚大学圣地亚哥分校等共建的高分辨率地形数据与工具共享网站(<http://www.opentopography.org>),数据获取时间分别为2009年1月和2009年9月,其中2009年1月数据的点云密度为 4.06 m^{-2} ,2009年9月数据的点云密度为 5.35 m^{-2} ,坐标系为NAD83/UTM zone 13N。本实验截取美国白沙国家公园沙漠中边长为900m的正方形区域,如图1红色框所示。

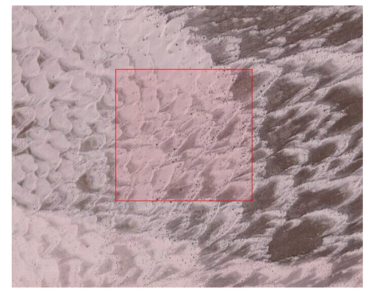


图1 美国白沙国家公园实验区

Fig. 1 Study area in White Sands Dune Field of USA

3 研究方法

基于多期机载LiDAR数据的沙丘变形监测方法包含机载LiDAR的数据预处理,生成DEM及坡度图,由坡度图提取沙丘特征线,基于提取的特征线及DEM差值图分析一定时间段沙丘的三维位移变化,并结合风向数据和插值线图分析沙丘的移动规律。技术流程如图2所示。

3.1 数据预处理

机载LiDAR数据预处理包括如下两个步骤:

1) 将机载LiDAR点云数据的las格式转换为地理信息系统软件ArcGIS可识别的txt格式,在ArcGIS中添加点云数据,并以shape file格式存储,便于后续操作;

2) 在ArcGIS Scene中查看点云分布情况,去除机载LiDAR数据中的粗差点,即明显高于或低

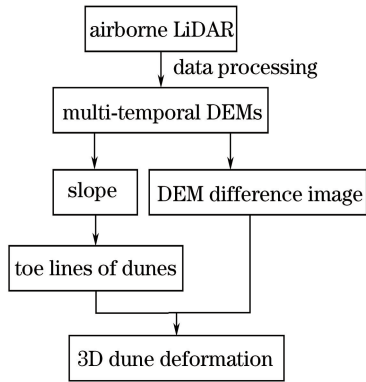


图2 沙丘变形监测方法流程

Fig. 2 Flow chart of dune deformation monitoring method at surrounding point cloud points.

由于研究区域位于沙漠地区,因此未对机载 LiDAR 点云进行滤波处理以区分地面点和非地面点,所有点均假设为地面点。

3.2 生成 DEM 及坡度图

DEM 是描述地球表面空间信息分布的有序数值阵列。陈秀玲等^[16]的研究表明沙丘形态属于小

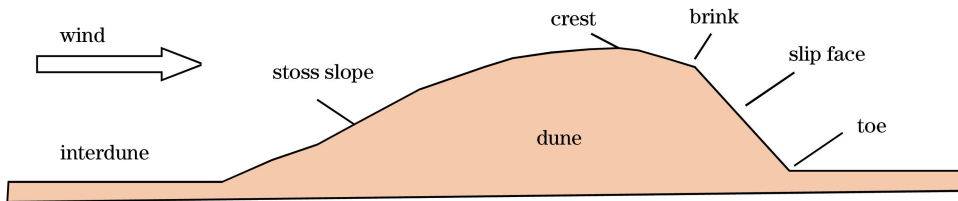


图3 沙丘地形特征图

Fig. 3 Morphological features of dunes

3.4 生成 DEM 差值图

通过 DEM 差值计算,显示沙丘高程位移量,从而定量分析沙丘在竖直面内发生变形的区域。将同一区域不同时期的 DEM 栅格图的像元值相减,得出各个像元的高程变化,设同一区域不同时期的 DEM 栅格图像元值之差为 Δh ,其公式为:

$$\Delta h = h_1 - h_2, \quad (1)$$

式中 h_1 为 2009 年 1 月某一区域 DEM 栅格图像元值, h_2 为 2009 年 9 月同一区域 DEM 栅格图像元值。

3.5 结合插值线图及风向分析沙丘变形规律

利用 ArcGIS 中的 Interpolate Line 功能得到区域地表从一个点出发到另一个点沿途的地形变化情况,再将同一区域的两期数据进行对比,从而得到沙丘变形及位移情况。插值线的方向依据该地区的主要风向。根据 Pedersen 等^[18]的研究,在 2007 年 6 月 9 日至 2010 年 6 月 5 日期间,研究区的主要风向

尺度地形。为详细表达沙丘的地形变化,本研究使用两期机载 LiDAR 点云数据分别生成像元大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的 DEM。生成 DEM 的常用方法有基于不规则三角网(TIN)的插值方法、反距离加权插值法(IDW)、样条函数法(Spline)、克里金插值法(Kriging)等,由于克里金插值法对于不同复杂程度的地形均能有效插值,且具有较高的精度^[17],因此本研究选用克里金插值法在 ArcGIS 中生成 DEM。

坡度是指坡面的垂直高度和水平距离的比,可以直观表现山体的形状以及陡坡所在位置。在 ArcGIS 中,基于已有的 DEM 生成坡度图,坡度的计算采用 3×3 像元的移动窗口。

3.3 沙丘坡脚线提取

如图 3 所示,沙丘与地面相交的线即为坡脚线,迎风坡因为坡度较缓,坡脚线不易提取,而背风坡有较陡的坡度,因此可根据生成的坡度图提取背风坡坡脚线,用于显示沙丘在一定时间段内的水平位移。以坡度图为底图,首先识别背风坡与平地区域,然后手工提取两块区域的边界线作为背风坡坡脚线。

为三个,分别为 64° 的西南风、 345° 的西北风和 165° 的东南风,其中主导风向为 64° 的西南风。根据风速及角度,利用风速、风向的联合概率分布(JPDF)模型计算得出三个主要风向的合成风向为 65° 的西南风。JPDF 模型函数形式^[19]为:

$$f(v, \theta) = \frac{v}{2\pi\sigma_y^2} \exp\left(-\frac{\mu_y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{v^2 - 2\mu_y v \cos \theta}{2\sigma_y^2}\right), \quad (2)$$

式中, v, θ 为风速及角度; μ_y, σ_y^2 为主导风向 y' 上风速的均值和方差。

本研究中插值线的方向采用 65° 西南风的合成风向。

4 结果和分析

本实验在沙丘特征明显的区域随机选取了 4 块 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的子区域进行分析。子区域分布如图 4 所示。

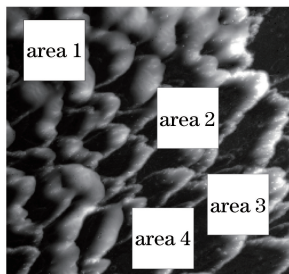


图4 实验区内的4个子区域

Fig. 4 Four subareas in study area

使用克里金插值法生成的DEM如图5所示,图中DEM由1号子区域的2009年1月的机载LiDAR数据生成。

图6为各个子区域的坡度图。黄鹏展等^[20]的研究表明,新月形沙丘迎风坡凸而平缓,背风坡凹而陡。由坡度图可以体现沙丘的迎风坡(缓坡区域)、

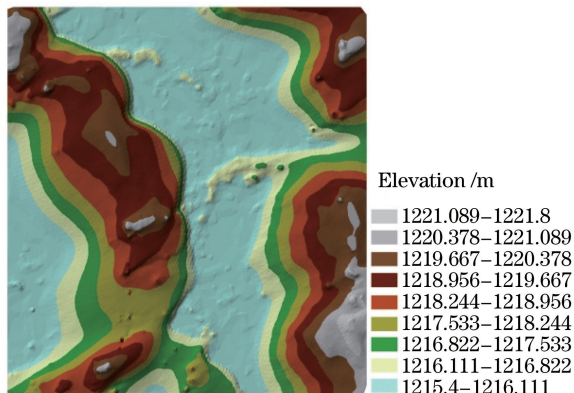


图5 1号子区域DEM

Fig. 5 DEM of subarea 1

背风坡(陡坡区域)及平地区域。如图6所示,沙丘陡坡一般具有大于20°的坡度,且边界较窄,其他区域坡度较缓,平地区域的坡度一般小于5°。

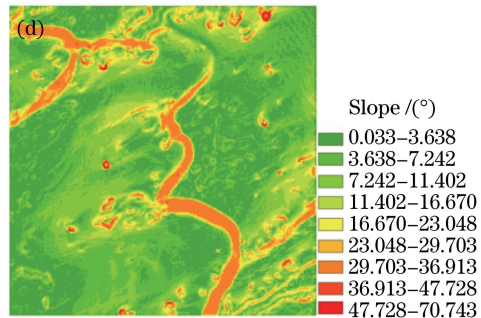
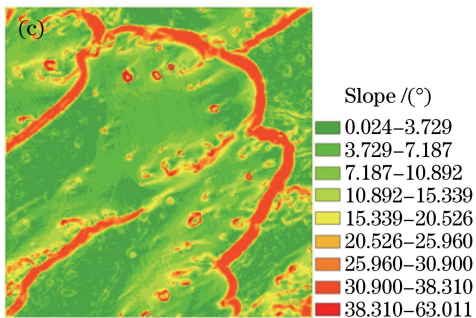
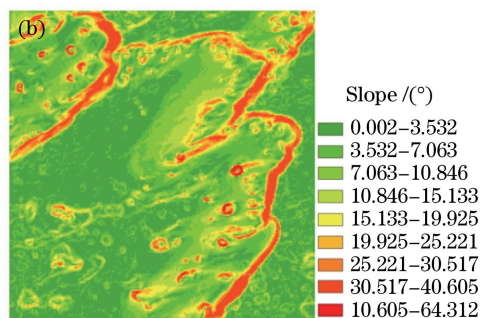
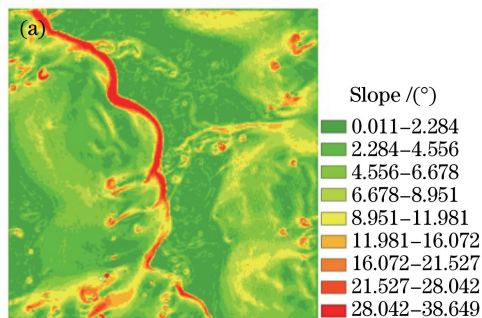


图6 子区域坡度图。(a) 1号子区域;(b) 2号子区域;(c) 3号子区域;(d) 4号子区域

Fig. 6 Slope images of subareas. (a) Subarea 1; (b) subarea 2; (c) subarea 3; (d) subarea 4

4.1 沙丘水平位移变化

图7为提取的沙丘背风坡坡脚线,两个时期坡度图提取的坡脚线叠加在一起显示了沙丘在风力作用下的水平位移。由图7可知,沙丘的移动方向与该区域的主要风向基本一致,沿主要风向可在图中量取不同空间位置处的水平位移量,即两条坡脚线之间沿65°方向所夹线段长度。各个子区域的水平位移量统计值如表1所示,所有区域中最小位移量为0.502 m,最大位移量为9.836 m,2号子区域的水

平位移量平均值最小,说明该区域沙丘的整体移动要小于其他子区域。

表1 子区域沙丘水平位移统计值

Table 1 Statistics of horizontal movement values of subarea dunes m

Subarea	Mean	Minimum	Maximum
1	3.412	1.302	9.836
2	1.773	0.848	4.543
3	2.445	0.502	4.580
4	2.162	0.911	4.907

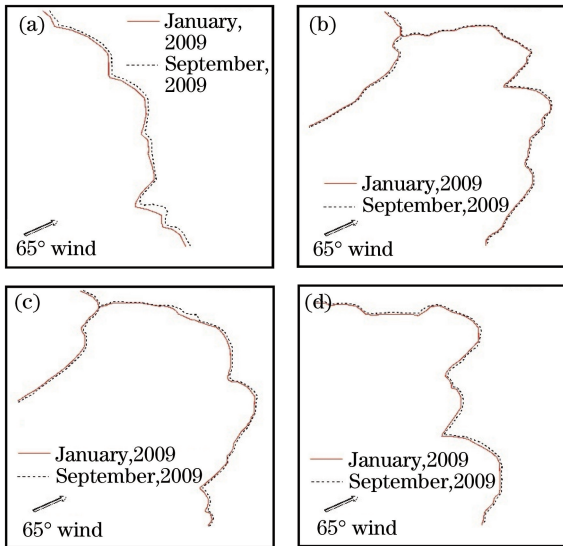


图7 子区域背风坡脚线。(a) 1号子区域;(b) 2号子区域;(c) 3号子区域;(d) 4号子区域

Fig. 7 Toe lines of slip faces in subareas. (a) Subarea 1; (b) subarea 2; (c) subarea 3; (d) subarea 4

4.2 沙丘高程变化

图8为4个子区域的DEM差值图,图中明暗

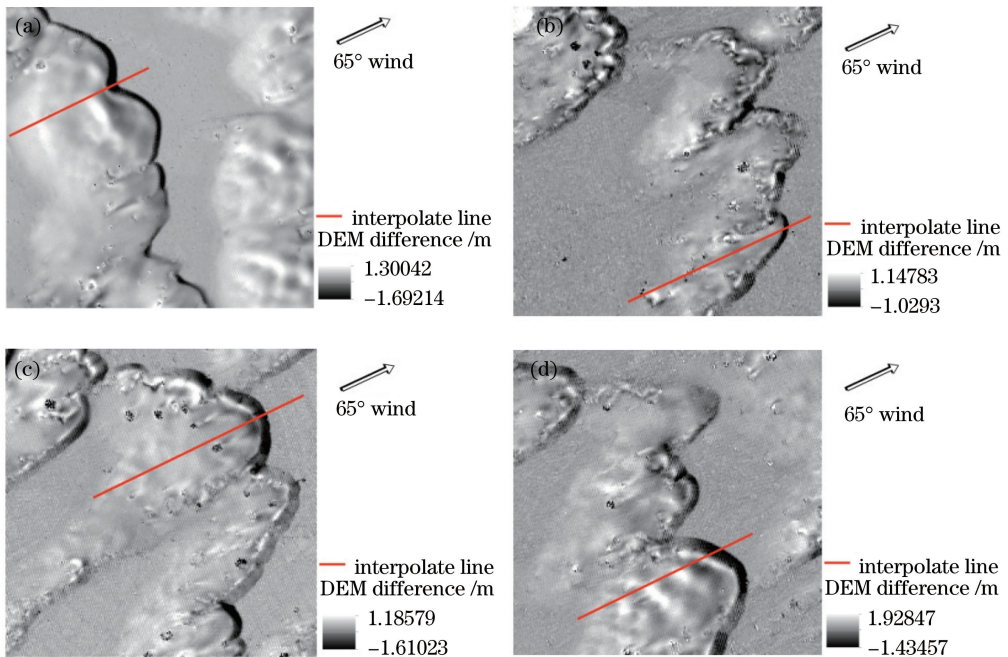


图8 子区域沙丘DEM变化与插值线位置图。(a) 1号子区域;(b) 2号子区域;(c) 3号子区域;(d) 4号子区域

Fig. 8 DEM change and interpolate line locations of dune in subareas. (a) Subarea 1; (b) subarea 2; (c) subarea 3; (d) subarea 4

4.3 插值线分析

结合沙丘边界和主要风向(65°的西南风),在两个时期的各个子区域DEM栅格图中建立插值线(插值线位置见图8),得到沙丘横剖面高程数据。通过比较不同时期同一位置的沙丘横剖面高程数据(图9),从而得

程度表现的是每个像元的高程变化情况,直观体现了沙丘的沉降或上升和位移方向,在沙丘的迎风坡区域高程变化值基本为正值,表明其变化主要为沉降,沙丘的背风坡区域高程变化值基本为负值,表明其变化主要为上升。

各个子区域的高程变化统计值如表2所示。由高程变化平均值均为正值可知各个子区域均发生了总体的沉降,表明在风力的影响下各个区域有较大幅度的沙物质搬移,而较大的标准偏差(STD)值显示出高程变化值的波动较大,这是由于不同地形地貌的高程变化具有显著差异,如沙丘迎风坡区域的沉降和背风坡区域的上升。

表2 子区域高程变化统计值

Table 2 Statistics of elevation change values of

Subarea	Mean	Minimum	Maximum	STD
1	0.327	-1.692	1.300	0.207
2	0.311	-1.029	1.148	0.095
3	0.258	-1.610	1.186	0.144
4	0.320	-1.435	1.928	0.136

到沙丘在风力影响下的地形变形情况。由图9可知,沙丘变形具有明显的规律:沙丘迎风坡发生较大的沉降;沙丘迎风坡弧顶处沉降程度较其他处大;沙丘背风坡顶部由于较易发生滑塌^[16],造成不同程度的沉降;沙丘背风坡中底部有不同程度的沙物质堆积。

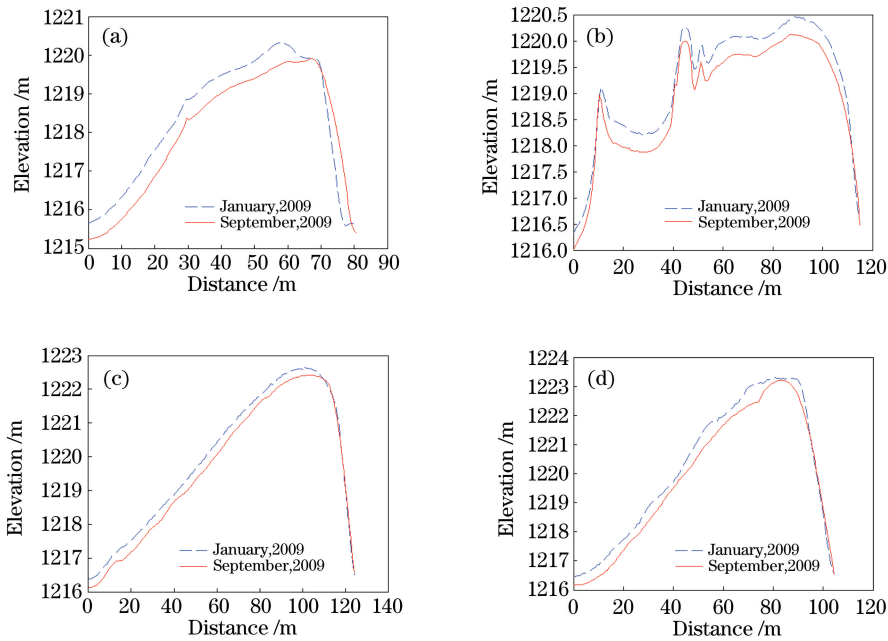


图9 子区域沙丘高程截面图。(a) 1号子区域;(b) 2号子区域;(c) 3号子区域;(d) 4号子区域

Fig. 9 Elevation sectional views of dune in subareas. (a) Subarea 1; (b) subarea 2; (c) subarea 3; (d) subarea 4

在各个子区域的 DEM 差值图中建立插值线(插值线位置见图 8),得到沙丘横剖面高程变化数据,沿插值线分别计算沙丘沉降和上升的平均值,结果见表 3,其中正值代表沉降,负值代表上升。由表 3 可知,1 号子区域和 4 号子区域沙丘沉降较大,背风坡沙物质沉积也较大,其余两个区域两项数值大致接近。从 LiDAR 点云的三维空间分布并结合实验区的遥感图像可知,1 号区域和 4 号区域插值线位置附近植被覆盖较少,固沙能力较弱,造成风力侵蚀严重。

表 3 子区域插值线高程变化均值

Table 3 Mean of elevation change values along interpolate lines in subareas m

Subarea	Mean of negative changes	Mean of positive changes
1	-0.861	0.470
2	-0.212	0.326
3	-0.179	0.311
4	-0.271	0.396

4.4 误差分析

从图 6 中可观察到沙丘区域存在一些圆形图斑,通过分析这些图斑处的 LiDAR 点云的三维空间分布并结合实验区的遥感图像可知,这些圆形图斑是由沙漠区域的灌木植被造成的,由于灌木植被数量不多,且对沙丘变形分析的影响不大,因此在生

成 DEM 之前未对机载 LiDAR 点云数据进行滤波(去除非地面点),从而在 DEM 及其衍生产品中引入了误差。在进一步研究工作中需要获取地面验证数据用以定量分析 DEM 的精度以及设计适合的滤波算法以去除非地面点。

5 结 论

以美国白沙国家公园为例,利用机载 LiDAR 技术提供的点云数据,定量分析沙丘区域的地形、地貌和变形特征,结论如下:

1) 使用机载 LiDAR 点云数据可以建立高分辨率的 DEM,基于 DEM 提取地形因子,可有效反映沙丘地貌特征,为建立风沙地貌模型提供新思路。

2) 结合不同时期坡度图提取的沙丘背风坡坡脚线及 DEM 差值分析,得到沙丘发生位移的三维变形量。根据该地区的主要风向,通过高程插值线分析,可以定量直观地反映沙丘的变形规律。

3) 本研究不足之处在于沙丘背风坡坡脚线采用目视解译的方式提取,不适用于大范围数据分析,自动化提取坡脚线的方法有待提出。另外,机载 LiDAR 点云数据包含了少量的地表植被点,由于条件的限制,本研究未进行分类并过滤,造成 DEM 部分区域小范围内有粗差。

综上所述,机载 LiDAR 技术有助于对沙漠地貌形态进行精细量化的研究。本研究使用两期数

据,对实验区沙丘形态进行动态变化监测,为沙漠化监测与控制提供有价值的信息。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[R/OL]. 2015. <http://www.forestry.gov.cn/main/69/content-831684.html>. State Forestry Administration of the People's Republic of China. Desertification and Desertification in China[R/OL]. 2015. <http://www.forestry.gov.cn/main/69/content-831684.html>.
- [2] 中华人民共和国国务院. 全国防沙治沙规划(2005-2010年)[R/OL]. 2005. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/ncjj/nczc/200804/t20080414_203915.html. State Council of the People's Republic of China. National sand defense and sand control planning (2005-2010). [R/OL]. 2005. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/ncjj/nczc/200804/t20080414_203915.html.
- [3] Hallet B. Spatial self-organization in geomorphology: from periodic bedforms and patterned ground to scale-invariant topography [J]. *Earth Science Reviews*, 1990, 29(1-4): 57-75.
- [4] Meigs P. World distribution of arid and semi-arid homoclimates[R]. Paris, 1952: 203-209.
- [5] Belrhiti H E, Douady S. Equilibrium versus disequilibrium of barchan dunes[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(4): 558-568.
- [6] He J L, Guo J Y, Xing E D, *et al.* Structure of wind-sand flow and law of dune movement along bank of Yellow River in Ulan Buh desert[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 71-77.
何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 71-77.
- [7] Zhu Z J, Zhang H Q, Ling C X. Monitoring of land cover change in Kumtag Desert and surrounding area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 131-135.
朱自娟, 张怀清, 凌成星. 库姆塔格沙漠及周边地表覆被变化监测[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 131-135.
- [8] Hui Z Y, Hu Y J. Review on morphological filtering algorithms based on LiDAR digital elevation model construction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080001.
惠振阳, 胡友健. 基于 LiDAR 数字高程模型构建的数学形态学滤波方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080001.
- [9] Sun D H, Wang Z C. Application of 3D laser scanning technology in topographic geology research [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(3): 88-89.
孙德鸿, 王占超. 三维激光扫描技术在地形地质研究中的应用(一)[J]. *测绘通报*, 2011(3): 88-89.
- [10] Zhang Q Y, Sun D H, Zhu B Z, *et al.* On monitoring of dune by using laser scanning technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(4): 32-34.
张庆圆, 孙德鸿, 朱本璋, 等. 三维激光扫描技术应用于沙丘监测的研究[J]. *测绘通报*, 2011(4): 32-34.
- [11] Zeng D, Li R. Airborne LiDAR technology and its application[J]. *Science Mosaic*, 2010(1): 187-188.
曾丹, 李荣. 机载激光雷达(LiDAR)技术及其应用[J]. *科技广场*, 2010(1): 187-188.
- [12] Lou Y M, Wu D. On shoals coast measurement in Zhejiang by airborne LiDAR technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(12): 47-50.
楼燕敏, 吴迪. 机载 LiDAR 技术在浙江省滩涂海岸测量中的应用研究[J]. *测绘通报*, 2012(12): 47-50.
- [13] Tong T, Mu X D, Zhang X M. SAR image change detection based on double difference images and adaboost-KNN [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 55(4): 041009.
仝彤, 慕晓冬, 张雄美. 基于双差异图与 adaboost-KNN 的 SAR 图像变化检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 55(4): 041009.
- [14] Dian Y Y, Fang S H, Yao C H. The geographic object-based method for change detection with remote sensing imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 906-912.
佃袁勇, 方圣辉, 姚崇怀. 一种面向地理对象的遥感影像变化检测方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(8): 906-912.
- [15] Guo Q. White sands national monument [J]. *Geography Teaching*, 2016(22): 65.
郭强. 白沙国家公园[J]. *地理教学*, 2016(22): 65.
- [16] Chen X L, Li Z Z, Chen S J, *et al.* The morphological character research of parabolic dune-based on the date of differential GPS survey [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 26(3): 84-89.
陈秀玲, 李志忠, 陈蜀江, 等. 基于差分 GPS 测量数据的抛物线沙丘形态特征研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(3): 84-89.

- [17] Gu C L, Yang Y, Zhu Z C. Accuracy cross-validation of several interpolation methods of DEM [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, 34(5): 99-102.
顾春雷, 杨漾, 朱志春. 几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证[J]. *测绘与空间地理信息*, 2011, 34(5): 99-102.
- [18] Pedersen A, Kocurek G, Mohrig D, *et al.* Dune deformation in a multi-directional wind regime: White Sands Dune Field, New Mexico [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40(7): 925-941.
- [19] McWilliams B, Newmann M M, Sprevak D. The probability distribution of wind velocity and direction [J]. *Wind Engineering*, 1979, 3(4): 269-273.
- [20] Huang P Z, Abudurexiti · Abuduwaili, Zhao J P. Research status of mobility of sand dune and its prospect[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2010, 4(1): 1-5.
黄鹏展, 阿布都热西提·阿布都外力, 赵建平. 沙丘移动的研究现状与未来研究思路[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(1): 1-5.