

机载激光雷达(LiDAR)在冻土探测中的应用研究进展

杨煜坤, 宋 炯, 范俊杰, 张映雷, 冯 鹤, 任 堃, 岳晓光

中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊

收稿日期: 2021年12月9日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月13日

摘 要

激光雷达(LiDAR)作为一种主动对地观测的现代光学遥感技术, 通过激光雷达传感器发射的激光脉冲经地面反射后被系统接收, 机载激光雷达系统仅需要少量的地面控制点, 即可以获取高精度、高密度的三维坐标数据, 并构建目标物的三维立体模型, 是有源遥感技术在空间信息获取及自动化快速处理方面的重要发展。机载激光雷达具有自动化程度高, 受地形地貌、天气影响小, 数据生产周期短等特点, 为获取高分辨率的地球空间信息, 可提供一种全新的技术手段。本文对机载激光雷达技术(LiDAR)系统组成和具体工作原理进行简单介绍, 对机载激光雷达在冻土区域研究应用作了重点描述, 分析了目前应用存在的问题, 并对未来发展趋势提出预测和展望。

关键词

机载LiDAR, 工作原理, 冻土, 积雪

Research Progress of the Application of LiDAR in Frozen Soil

Yukun Yang, Jiong Song, Junjie Fan, Yinglei Zhang, He Feng, Kun Ren, Xiaoguang Yue

Geophysical Center, China Geological Survey, Langfang Hebei

Received: Dec. 9th, 2021; accepted: Jan. 6th, 2022; published: Jan. 13th, 2022

Abstract

LiDAR is a modern optical remote sensing technology for active earth observation. The laser pulse emitted by the lidar sensor is reflected by the ground and then received by the system. The airborne laser mine system requires only a small number of ground control points. That is, it is poss-

able to obtain high-precision, high-density three-dimensional coordinate data and construct a three-dimensional model of the target. This is an important development of active remote sensing technology in the acquisition of spatial information and automatic and rapid processing. Airborne lidar has the characteristics of high degree of automation, little influence by topography, landforms, weather, and short data production cycle. It can provide a brand-new technical means for obtaining high-resolution geospatial information. This article briefly introduces the composition and specific working principles of the airborne laser radar technology (LIDAR) system, focuses on the research and application of airborne laser mines in frozen soil areas, analyzes the existing problems in the current application, and puts forward forecasts for prospects and trends to the future development.

Keywords

LiDAR, Working Principle, Frozen Soil, Snow

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光雷达(Light Detection and Ranging, 激光探测及测距, 英文简称 LiDAR)是一种基于主动源的对地观测遥感技术, 可以直接获取地表地形地貌的高精度三维空间信息数据[1] [2] [3] [4], 是有源遥感技术在空间信息获取及自动化快速处理方面的重要发展[5] [6] [7] [8]。

激光雷达技术最初是由美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA)于 20 世纪 70 年代研发, 随着激光测距技术、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和惯性导航系统(Inertial Navigation System-INS)的快速发展, 精准测距并确定遥感平台的实时位置和姿态得以实现, 20 世纪 90 年代末开始采用这种技术进行地理空间数据采集和制图[9] [10]。激光雷达通过测量多重回波的观测值, 获取数字高程模型(DEM)。激光雷达测量系统自动化程度高, 与无源遥感技术相比, 具有受天气影响小、数据采集周期短、精度高等技术优势[11] [12] [13] [14] [15], 已逐渐成为 DEM 数据采集的主要工具。

冻土是指温度在 0°C 或 0°C 以下并含有冰的岩土, 也包含温度在 0°C 或 0°C 以下不含冰的寒冷岩土。在世界范围内多年冻土主要分布在欧亚大陆北部、北美北部等高纬地区和中低纬度的高山高原、南极冰盖外缘陆地以及极地大陆架地区的海底, 除南极洲之外, 全球多年冻土区域覆盖面积约为 $21.7 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占裸露地表总面积的 17% [16] [17] [18]。我国是世界第三冻土大国, 多年冻土主要分布在青藏高原、东北北部和中西部高山高原区, 占国土总面积的 22.3%, 其中高海拔多年冻土面积居世界之最[18] [19] [20] [21]。冻土学是研究冻土及冻土过程和现象的形成、发育和分布的学科, 在冻土区经济开发和实践中产生和发展起来, 于 20 世纪 30 年代在前苏联首先形成为一门独立学科, 40 年代由于军事工程和资源开采的需要, 美国和加拿大等国也相继开展了关于冻土的各项研究[22] [23]。

冻土区域为地形复杂、交通不便、气候恶劣的复杂区域, 基于地面的冻土区的活动层与表层覆盖物的主要研究方法中, 受到很大的限制且成本高昂[22] [23]。目前, 为增强我们对冻土区域变化的认识, 通常利用基于地球物理场和遥感的方法对其进行研究[24]-[29]。因此, LiDAR 技术作为近年来迅速发展并可有效快速获取高精度地形、地貌数据的有效方法, 因其优于传统无源遥感的优势而在研究人员中广

泛关注,是能够满足冻土研究日益增长需求的实用替代方案[14] [30]。

本文我们主要关注 LiDAR 系统在冻土区域研究中的应用。我们首先简要介绍了 LiDAR 系统的基本原理和演变历史,终点讨论了使用 LiDAR 对冻土区域进行研究的成就、优势及其创新点。最后,我们论述了对利用 LiDAR 对冻土区域研究的重要性及其研究前景。

2. 机载 LiDAR 系统基本原理

激光雷达(LiDAR)的运用实现了对传统变形测量技术手段的技术突破,具有精度高、高密度、高效率、全数字特征等优点,广泛用于变形监测、地貌测量等领域[6] [7] [31]。按照 LiDAR 的载荷平台,可分为地基激光雷达、车载激光雷达、船载激光雷达、机载激光雷达和星载激光雷达等。机载 LiDAR 测量技术与其他遥感技术相比较具有自动化程度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高等技术特点,是目前最先进的能实时获取地形表面三维空间信息的航空遥感系统[8] [32] [33]。

2.1. 机载 LiDAR 系统组成

机载 LiDAR 系统是一个集多种电子设备于一身的集成系统,是以飞行器为载体,搭载激光扫描设备,获取研究区域内的地物点云数据。机载激光雷达系统组成包括飞行平台、动态差分 GPS 系统、IMU 姿态测量系统、激光扫描测距系统等,以及配套的计算机及其软件[1] [2] [3] [9] [10]。

机载 LiDAR 系统的主要组成部件及其作用如下:

- 1) 飞行平台,是遥感系统工作的平台,如直升机、固定翼、多旋翼无人机,用来搭载雷达系统;
- 2) 动态差分 GPS 系统,通过测定激光雷达信号的方向和激光器的空间位置,确定扫描投影中心的空间位置;
- 3) IMU 姿态测量系统,主要用来获得投影中心的瞬时姿态参数,和加速度参数,进而解算平台航迹;
- 4) 激光扫描测距系统,用于获取空间离散点表示的点云数据,其中包含探测点的三维空间信息和反射光谱信息,可以实现高分辨率的距离和强度成像;
- 5) 数据存储设备:数据存储设备用于记录作业时获取的各种原始数据。

2.2. 机载 LiDAR 系统基本工作原理

激光雷达使用的是由激光器发射的红外线,或可见光,或紫外线,随着超短脉冲激光技术、高灵敏度的信号探测和高速数据采集系统的发展和应用,激光雷达以它的高测量精度、精细的时间和空间分辨率以及大的探测跨度而成为一种重要的主动遥感工具[31] [33] [34]。

激光雷达测距的基本原理是利用光在空气中的传播速度,通过激光扫描器和距离传感器测定光波在收发装置与目标体之间往返传播的时间,获取距离值及回波特性。利用激光进行测距,需要精确地测出光波在一段距离上往返传播的时间,才能够求出待测定距离。具体的实现方法有两种:脉冲测距和相位测距,脉冲测距是测距仪直接测量激光脉冲在测距仪和目标之间的往返所需要的时间,进而得到激光器与地物点间的斜距。相位测量通过测距激光器的发射改和反射波之间的相位差来确定激光器与目标之间的距离。大部分的机载激光测距系统都采用脉冲测距的方法进行距离测量[35] [36] [37] [38] [39]。

机载 LiDAR 系统对地定位原理如下:

- 1) 由 IMU 姿态测量系统提供飞行器在空间的俯仰角、横滚角和航向角等机载激光测距仪的姿态参数;
- 2) 通过飞行平台上搭载的激光脉冲测距仪,记录激光脉冲信号从发射经地面目标物反射的回波接收的时间延迟,并根据时间延迟计算空中机载激光测距仪到地面激光脚点之间的距离;

- 3) 基于动态差分 GPS 测距系统测得飞行平台上激光发射器中心的精确的位置信息;
- 4) 利用飞行器姿态信息、激光测距仪测定的倾斜距离以及飞行器位置信息, 通过数据解算处理可确定点云数据中每个点的三维空间信息。

3. 应用研究进展

目前, 激光雷达测量技术在地形测绘[40]、环境监测[26] [41]和林业调查[42] [43] [44] [45]、地质灾害[30] [46] [47] [48]等诸多领域具有广泛的应用和广阔的发展前景。激光雷达测量技术在高植被覆盖率区域可以有效穿透森林冠层到达地面, 获取高精度地面点建立裸地数字高程模型(DEM), 且地形地貌数据可以达到分米级分辨率, 已越来越多地应用于复杂环境地形地貌的定量分析[4] [14] [15] [49] [50]。

冻土活动层是温室气体的碳储存区及地下水的蓄水层[22] [51] [52], 影响着全球气候及高原生态环境。冻土活动层地表有草甸、退化草甸、草原、沼泽和荒漠等五类典型的覆盖层, 它们的分布与活动层的变化紧密相关[22] [53] [54]。因此虽然冻土区域在总土地资源中占了很大一部分, 但使用 LiDAR 研究多年冻土数量相对较少, LiDAR 作为高精度、高效率的冻土研究方法, 能够用于观察与多年冻土有关的积雪、岩体移动、岩石坠落活动、地表植被动态和地形测绘, 研究冻土活动层结构及分布特征, 可以为高寒冻土地区冻土和生态环境的保护及合理利用提供科学依据。

对于冻土研究, 最早是国外使用地面激光雷达进行探测。Deline 等[55]在 Mont Blanc Massif (勃朗峰) 的 PERMAdataROC 项目的研究中, 使用地面 LiDAR 和 Optech ILRIS 3D 传感器来监测典型多年冻土对岩壁不稳定性的影响, 研究表明, 在现有多年冻土层的高山地区, 不稳定事件的发生和量级仍不清楚, 需要适当的仪器进行现场监测, 但从历史演化特征可知, 除多年冻土层退化之外, 边坡调整是大规模岩崩活动的主要因素。Avian 等[56]利用 Riegl LPM-2 k 地面 LiDAR 进行测量, 用于监测岩石冰川上冰斗内多年冻土环境中的岩体移动。他们对岩石冰川运动变化和动态变化开展详细监测, 并得到了一些重要发现, 例如冰川前缘岩石的物质坡移, 岩石冰川体的局部崩解以及冰川退化前缘与多年冻土影响滑坡的相似性。

Chasmer 等[53] [57] [58] [59]利用机载 Optech ALTM 3100 LiDAR 系统在加拿大西北地区开展冻土研究, 取得了许多重要研究成果。2010 年, Chasmer 等[58]试图通过对 1947 年至 2008 年的高原多年冻土地区的历史航空摄影、卫星图像和高分辨率数字图像解译, 来量化估算多年冻土覆盖变化的误差, 研究中利用 LiDAR DEM 对当时的照片和图像进行正射校正。该过程针对当时照片中的斜率起伏差异进行了标准化, 并允许对变化检测进行公平比较, 还应该考虑这些作者讨论的这种多年冻土动力学分析的误差来源。Chasmer 等[57]的另一项研究提出, 利用机载激光雷达(LiDAR)和 WorldView-2 多光谱数据的融合方法来表征冻土深度, 并描述冻土界面深度与地表植被覆盖和树木高度之间的关系, 试图通过将 LiDAR 与多光谱光学数据融合, 并将像素与基于实地的冻土地下观测相关联, 以克服 LiDAR 的地下局限性。Chasmer 等[59]利用激光雷达数据研究了在不连续冻土区内, 植被冠层和辐射对高原冻土层演化的影响控制因素。本研究表明在高原的边缘地带或不连续的多年冻土带, 可以很容易观察到植被退化。2014 年, Chasmer 等[53]进一步开发了一种决策树分类器开展进一步研究, 用于在不连续的多年冻土带内对低矮复杂的土地植被覆盖类型进行分析, 并使用分布式水文模型的结果对其进行验证。此外, 作者将这种分类器与通常使用的平行六面体分类器进行了比较, 发现决策树方法的准确性更高。所有这些研究都加深了我们对多年冻土分布条件的认识。

Stevens [60]利用机载 Leica ALS50-II 传感器对加拿大西北地区进行了研究, 在不连续的多年冻土带内进行湿地形的高分辨率测绘, 包括森林树冠下的区域和植被覆盖的表面(泥炭地, 沼泽, 被洪水淹没的黑云杉和白桦林, 以及路堤), 并通过 LiDAR 数据获取强度信息。在这种情况下, 可以观察到 Chasmer

等人[57]提出的融合方案的另一种衍生品。Stevens 和 Wolfe [60]将 LiDAR 强度产品与彩色正射影像相整合在一起, 以确保更好地地区分地形类型。

Hubbard 等人[61]在一项独立的研究中比较了使用激光雷达(LiDAR)和探地雷达(GPR)的地面和地下多年冻土变化情况的调查结果。Hubbard 等进行的研究与 Chasmer 等[57]的研究相似, Hubbard 等试图通过将激光雷达(LiDAR)与探地雷达(GPR)分析相结合以克服 LiDAR 观测地下局限性。

Paine 等[62]使用机载激光雷达对阿拉斯加北坡上的永久冻土特征进行测绘, 根据 LiDAR 数据生成了具有几厘米垂直精度的高分辨率数字高程模型(DEM)。综合 DEM、点云(point clouds)和高分辨率彩色红外图像(RGB imagery)测绘多年冻土景观特征, 如土壤/冰多边形和小丘, 并确定影响土壤湿度进而从而而影响湿地分布的微地形特征, 基于时间差分 DEM 可以量化北极沿海低地永久冻土层的景观变化。

Gangodagamage 等[63]在 Chasmer 等[57]研究的基础上, 采用 LiDAR 和 WorldView-2 数据以高空间分辨率估算了北极多年冻土的活动层厚度(ALT)。虽然 Gangodagamage 等[63]的方法与早期研究中使用的方法不同, 但他们的主要研究内容也是从测绘植被中导出的相互关系来估计活动层厚度(ALT)。

冻土区域中的积雪也是一个重要的研究对象, 其对气候变化尤为敏感。在积雪研究中, 例如积雪深度和雪水当量(SWE)估计, 积雪测绘, 地表建模, 雪崩以及植被覆盖下的积雪研究, LiDAR 测量技术均起到了重要的作用。

估算积雪深度的最基本和最容易使用的方法是生成无雪时和积雪时的 DEM, 并以高程差的形式获得积雪深度。Hopkinson 等[64] [65]在加拿大安大略省南部率先将 LiDAR 技术用于雪研究, 利用机载 Optech ALTM 1210 和 ALTM 1225 激光雷达传感器, 根据当时的激光雷达的观测数据测绘不同森林冠层(落叶林、针叶林和混合林)下积雪深度的空间分布。此外, 这些作者获取了地面横断面测量数据, 以验证 LiDAR 推导的雪深估计, 并得出结论冠层条件引入了小的系统误差, 可以通过使用基于先验土地覆盖信息的调整因子进行校正。

Deems 等[40] [66]分析了 LiDAR 系统进行积雪测深的误差的来源, 主要误差来源包括: 1) DEM 生成期间使用的内插器类型和重采样技术; 2) 机载平台使用的定位类型和惯性导航系统(INS); 3) 数据采集过程中的飞行湍流; 4) 冠层密度; 5) 积雪特征, 如粒度和水分含量。为了最小化重采样误差, Helfricht 等[67] [68]和 Kirchner 等[69]研究了量化积雪深度估算对分形维数和尺度的依赖性, 在估算积雪深度时, 不同的采样分辨率会产生不同的结果, 并且只允许在特定范围内重新缩放。

DeBeer 等[70]、Helfricht 等[67] [68]、Kirchner 等[69]通过结合雪水当量(SWE), 探索了基于 LiDAR 雪深估计的水文学意义。一方面, 这些研究试图将融雪转化为 SWE, 并研究了融雪和 SWE 与气象参数和地形的统计相关性。另一方面, 将流域范围的 LiDAR 积雪深度转换为 SWE, 可以为融雪水的季节性的供应提供线索。Varhola 等[71]在受干扰的森林中利用森林结构指标来模拟春季季节性融雪径流和洪水, 在冰川集水区的下游地区开发新的洪水预报模型, 这些模型考虑了 LiDAR 衍生的季节性融雪和当地地形。

Hopkinson 等[64] [65]将 LiDAR 数据与地理信息系统(GIS)相结合以估算山区流域内冬季瞬间积雪量的潜力, 这项研究着重强调了 GIS 在处理和分析 LiDAR 数据的用途和能力。然而, 根据我们的理解, 这些研究提供的主要未来前景是流域水文工具的强大应用, 这些工具可在现代 GIS 软件中用来进行水文建模, 并使用 SWE 对季节性降雪进行估计。如果可以获得航空或空间激光雷达观测资料, 这种分析可以扩展到相当大的地理范围。

国内基于激光雷达开展冻土探测研究相对国外起步较晚, 现在只有少数研究人员利用激光雷达在冻土区域的开展相关研究工作。重庆交通大学孙中震基于机载 LiDAR 的青藏高原冰川雪线提取研究, 对机载 LiDAR 点云数据强度信息特征分析的基础上, 结合雪山点云的回波强度远高于山川区域其它地物这一特点, 本文提出对点云数据的强度信息进行聚类, 对已有的 K-MEANS 聚类算法进行改进, 将其算法内

传统的欧式距离加入矩阵的思想,改进为马氏距离,很好的避免了变量之间相关性的干扰,利用距离评价函数(DEF)这一标准来选取一种最合适、最完善的聚类方式[72]。兰州大学仲文利用地面激光雷达(LiDAR),在祁连山黑河上游开展多年冻土区热融喀斯特地表变形监测研究,研究表明温度变化对热融喀斯特过程有重要影响,极端降水事件则成为诱发热融喀斯特发展的关键因素,研究结果证明激光雷达对热融喀斯特过程的定量研究是有效的[73]。

无人机激光雷达(LiDAR)作为一种基于主动源的对地观测遥感技术,在冻土探测中,具有受天候和地形影响小、数据采集周期短、精度高等技术优势,可以直接获取冻土区域地表地形地貌的高精度三维空间信息数据,为下一步研究提供数据支持。总体而言,国外的研究相对国内开展较早,在数据采集、处理和解释分析上具有更丰富的研究成果,并且与传统遥感开展对比研究,论证了激光雷达在冻土研究中优势,国内只是在局部开展试验性研究工作,需要更进一步深入研究,更好服务于冻土探测研究工作。

4. 未来展望

有效且可靠的探测数据是地质勘测的信息基础,这不但需要测量仪器设备采用正确的工作方法进行数据采集,还要对采集的数据进行各种必要的处理和解释。虽然近年来机载 LiDAR 探测技术取得了很大进展,但是也应该看到,目前还存在一些主要的问题影响其实用性。

4.1. LiDAR 数据处理

LiDAR 系统采集数据量大,处理过程复杂[4] [14]。在复杂冻土环境中利用 LiDAR 进行测量时,不同地质、地形、地貌的环境在采集到的点云表现出不同的数据特征。目前用于 LiDAR 数据处理的软件主要都是由各个硬件厂商提供的,而这些软件都是各个硬件厂家根据自己的硬件特性以及相应的数据处理原理开发出来的,对于用户来说难以根据实际情况进行适当的调整以获得更好的结果。

4.2. 点云特征信息应用

LiDAR 技术可以直接获取点位的三维空间坐标,但缺少对点云光谱特征信息的应用研究。冻土活动层状态变化在地表会有相应的反映, LiDAR 数据虽然在提取空间位置信息上具有独特的优势,但光谱信息的利用对直观认识地质现象具有同等重要的作用。对于复杂冻土区域的地物快速提取与重建,综合运用点云数据的空间信息和光谱信息能够更好地反映出研究区域的地形地貌特征,进而开展点云分类及建模分析。

4.3. 多源数据融合分析

多年冻土是一种次地表现象,而 LiDAR 更能监测地表现象,单纯依靠 LiDAR 点云数据的 DEM 探测多年冻土厚度和特征具有一定的困难。现在机载 LiDAR 系统能够接收同一激光束的多次回波和回波强度信息,再结合影像数据、GIS 数据和地球物理数据,如探地雷达(GPR)、电法勘探、地震勘探等方法获取的数据,这些数据信息相互补充,充分挖掘各自的优势,有望取得满意的效果。同时,数据源越多数据量越大,数据处理方法就越复杂,相应的难度就越大。

5. 总结

机载 LiDAR 技术作为一门新兴的测绘技术具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景,机载 LiDAR 技术能够实现快速、精确地获取三维空间坐标,重构目标的 3D 数据模型,为快速获取空间信息提供了简单有效的手段。冻土研究大都是在高海拔、地形起伏、气候恶劣的复杂环境中开展,野外工作困难,其探测研究仍相对不足。机载 LiDAR 技术独特的优势可以有效克服这些问题,尤其是在人工无法到达或危

险性比较大的区域开展探测工作, 其局限性从总体上来讲要小于传统航空摄影测量, 将是冻土区域测绘和探测应用较广、较先进的方法。机载 LiDAR 生成的 DEM 具有高精度的空间位置信息, 是岩土体运动、地表植被动态和地形测绘的最佳工具, 对冻土区域地形进行高精度地貌分析, 差分 DEM 可以有效监测冻土层的活动状态。随着科技的发展进步, 机载 LiDAR 快速探测技术未来的发展方向是多种传感器的高度智能集成, 多数据源的融合处理, 由探测转向监测地表的动态变化, 在地质调查、地形测绘、环境监测等地球科学领域中有重要的理论意义和应用价值。

参考文献

- [1] Baltsavias, E.P. (1999) A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 83-94. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)
- [2] Baltsavias, E.P. (1999) Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 199-214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)
- [3] Baltsavias, E.P. (1999) Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 164-198. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00016-7)
- [4] Zielke, O., Klinger, Y. and Arrowsmith, J.R. (2015) Fault Slip and Earthquake Recurrence along Strike-Slip Faults—Contributions of High-Resolution Geomorphic Data. *Tectonophysics*, **638**, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.004>
- [5] 李清泉, 李必军, 陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 387-393.
- [6] 张玉方, 程新文, 欧阳平, 王冬梅, 熊娜. 机载 LIDAR 数据处理及其应用综述[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(1): 119-124.
- [7] 黄先锋, 李卉, 王潇, 张帆. 机载 LiDAR 数据滤波方法评述[J]. 测绘学报, 2009, 8(5): 466-469.
- [8] 赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 李静, 于勇, 李凉海. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
- [9] Ackermann, F. (1999) Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 64-67. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00009-X)
- [10] Flood, M. (2001) Laser Altimetry: From Science to Commercial LIDAR Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **67**, 1209-1217.
- [11] 赖旭东, 李咏旭, 陈佩奇, 杨婧如, 祝勇. 机载激光雷达技术现状及展望[J]. 地理空间信息, 2017, 15(8): 1-4.
- [12] 赖旭东, 刘雨杉, 李咏旭, 祝勇. 机载激光雷达点云密度特征应用现状及进展[J]. 地理空间信息, 2018, 16(12): 1-5.
- [13] 郑若琳, 洪亮. 地理空间信息机载激光雷达的优势与发展[J]. 地理空间信息, 2018, 16(2): 37-39.
- [14] Ren, Z.K., Zielke, O. and Yu, J.X. (2018) Active Tectonics in 4D High-Resolution. *Journal of Structural Geology*, **117**, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.09.015>
- [15] Niedzielski, T. (2018) Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Geosciences: Introduction. *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 3141-3144. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1992-9>
- [16] Bockheim, J.G. and Hall, K.J. (2002) Permafrost, Active-Layer Dynamics and Periglacial Environments of Continental Antarctica: Periglacial and Permafrost Research in the Southern Hemisphere. *South African Journal of Science*, **98**, 82-90.
- [17] Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K. and Heginbottom, J.A. (2008) Statistics and Characteristics of Permafrost and Ground-Ice Distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, **31**, 47-68. <https://doi.org/10.1080/10889370802175895>
- [18] Gruber, S. (2012) Derivation and Analysis of a High-Resolution Estimate of Global Permafrost Zonation. *The Cryosphere*, **6**, 221-233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>
- [19] Li, X., Cheng, G.D., Jin, H.J., et al. (2008) Cryospheric Change in China. *Global and Planetary Change*, **62**, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.001>
- [20] Ran, Y.H., Li, X., Cheng, G.D., et al. (2012) Distribution of Permafrost in China: An Overview of Existing Permafrost Maps. *Permafrost and Periglacial Processes*, **23**, 322-333. <https://doi.org/10.1002/ppp.1756>
- [21] 冉有华, 李新. 中国多年冻土制图: 进展、挑战与机遇[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1015-1027.
- [22] Yin, G.A., Niu, F.J., Lin, Z.J., Luo, J. and Liu, M.H. (2017) Effects of Local Factors and Climate on Permafrost Condi-

- tions and Distribution in Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*, **581-582**, 472-485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.155>
- [23] 郭利娜. 冻土理论研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 145-154.
- [24] Koren, V., Schaake, J., Mitchell, K., Duan, Q.Y., Chen, F. and Baker, J.M. (1999) A Parameterization of Snowpack and Frozen Ground Intended for NCEP Weather and Climate Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104**, 19569-19585. <https://doi.org/10.1029/1999JD900232>
- [25] Zhao, L., Ping, C.L., Yang, D., Cheng, G., Ding, Y. and Liu, S. (2004) Changes of Climate and Seasonally Frozen Ground over the Past 30 Years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. *Global and Planetary Change*, **43**, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.02.003>
- [26] Bhardwaj, A., Sam, L., Bhardwaj, A. and Martín-Torres, F. J. (2016) LiDAR Remote Sensing of the Cryosphere: Present Applications and Future Prospects. *Remote Sensing of Environment*, **177**, 125-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.031>
- [27] 王通, 俞祁浩, 游艳辉. 物探技术在多年冻土探测方面的应用[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 639-642.
- [28] 王武, 赵林, 刘广岳, 俞祁浩, 盛煜. 瞬变电磁法(TEM)在多年冻土区的应用研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 156-163.
- [29] 龙作元, 何胜. 核磁共振测深方法在多年冻土区找水中的应用[J]. 物探与化探, 2015(2): 288-291.
- [30] 彭劲松, 许俊, 李娟, 周光明. 机载激光测量系统在地质灾害中的应用[J]. 测绘通报, 2018(9): 160-162.
- [31] Mallet, C. and Bretar, F. (2009) Full-Waveform Topographic LiDAR: State-of-the-Art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007>
- [32] 王宗跃, 马洪超, 彭检贵. 利用 LIDAR 数据提取山谷(脊)线的关键技术研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(6): 19-24.
- [33] 陈富强. 机载 LIDAR 技术的优势及应用前景研究[J]. 北京测绘, 2013(2): 12-14.
- [34] 卢小平, 庞星晨, 武永斌, 李理, 李国清, 于海洋. 机载 LiDAR 基础测绘关键技术及应用[J]. 测绘通报, 2014(9): 26-30.
- [35] 陈松尧, 程新文. 机载 LIDAR 系统原理及应用综述[J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 27-31.
- [36] 隋立春, 张宝印. LiDAR 遥感基本原理及其发展[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(2): 127-129.
- [37] 隋立春, 宋会传, 马远新, 李建武. 航空激光雷达数据处理原理及其应用前景[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(3): 157-159.
- [38] 靳克强, 龚志辉, 汤志强, 张斌, 王庆伍. 机载 LiDAR 技术原理及其几点应用分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(1): 144-146+150.
- [39] 靳克强, 龚志辉, 汤志强, 张斌, 袁辉. 机载激光雷达点云数据质量评价体系分析与探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(4): 197-200.
- [40] Deems, J.S., Painter, T.H. and Finnegan, D.C. (2013) LiDAR Measurement of Snow Depth: A Review. *Journal of Glaciology*, **59**, 467-479.
- [41] Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A. (2012) Use of LIDAR in Landslide Investigations: A Review. *Natural Hazards*, **61**, 5-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- [42] Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M. (2003) LiDAR Remote Sensing of Forest Structure. *Progress in Physical Geography*, **27**, 88-106. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360ra>
- [43] Bradbury, R.B., Hill, R.A., Mason, D.C., Hinsley, S.A., Wilson, J.D., Balzter, H. and Bellamy, P.E. (2005) Modelling Relationships between Birds and Vegetation Structure Using Airborne LiDAR Data: A Review with Case Studies from Agricultural and Woodland Environments. *IBIS International Journal of Avian Science*, **147**, 443-452. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919x.2005.00438.x>
- [44] Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Nsset, E., Rka, H.O., Coops, N.C. and Gobakken, T. (2012) Lidar Sampling for Large-Area Forest Characterization: A Review. *Remote Sensing of Environment*, **121**, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>
- [45] 梁晓军, 庞勇, 陈博伟. 基于地基激光雷达胸径提取的单木位置精确测量[J]. 林业科学研究, 2020, 33(4): 67-74.
- [46] 余金星, 程多祥, 刘飞, 陈思思, 杨武年. 机载激光雷达技术在地质灾害调查中的应用——以四川九寨沟 7.0 级地震为例[J]. 中国地震, 2018, 34(3): 435-444.
- [47] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.

- [48] 董秀军, 许强, 余金星, 李为乐, 刘飞, 周兴霞. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 432-441.
- [49] Meigs, A. (2013) Active Tectonics and the LiDAR Revolution. *Lithosphere*, **5**, 226-229. <https://doi.org/10.1130/RF.L004.1>
- [50] Glennie, C.L., Hinojosa-Corona, A., Nissen, E., Kusari, A., Oskin, M.E., Arrowsmith, J.R. and Borsa, A. (2014) Optimization of Legacy Lidar Data Sets for Measuring Near-Field Earthquake Displacements. *Geophysical Research Letters*, **41**, 3494-3501. <https://doi.org/10.1002/2014GL059919>
- [51] Wu, Q.B., Liu, Y.Z., Zhang J.M. and Tong C.J. (2002) A Review of Recent Frozen Soil Engineering in Permafrost Regions along Qinghai-Tibet Highway, China. *Permafrost & Periglacial Processes*, **13**, 199-205. <https://doi.org/10.1002/ppp.420>
- [52] 刘广岳, 谢昌卫, 杨淑华. 青藏公路沿线多年冻土区活动层起始冻融时间的时空变化特征和影响因素[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1067-1078.
- [53] Chasmer, L., Hopkinson, C., Veness, T., Quinton, W. and Baltzer, J. (2014) A Decision-Tree Classification for Low-Lying Complex Land Cover Types within the Zone of Discontinuous Permafrost. *Remote Sensing of Environment*, **143**, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.016>
- [54] 冯雨晴, 梁四海, 吴青柏, 陈建伟, 田鑫, 吴盼. 冻土退化过程中植被覆盖度的变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 311-316.
- [55] Deline, P., Jaillet, S., Rabatel, A. and Ravelin, L. (2008) Ground-Based LiDAR Data on Permafrost-Related Rock Fall Activity in the Mont-Blanc Massif. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, Alaska, 29 June-3 July 2008, 349-354.
- [56] Avian, M., Kellerer-Pirklbauer, A. and Bauer, A. (2009) LiDAR for Monitoring Mass Movements in Permafrost Environments at the Cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1087-1094. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1087-2009>
- [57] Chasmer, L., Hopkinson, C., Morrison, H., Petrone, R. and Quinton, W. (2011) Fusion of airborne LiDAR and WorldView-2 MS Data for Classification of Depth to Permafrost within Canada's Sub-Arctic. *Proceedings of SilviLaser*, Hobart, 16-20 October 2011, 16-20.
- [58] Chasmer, L., Hopkinson, C. and Quinton, W. (2010) Quantifying Errors in Discontinuous Permafrost Plateau Change from Optical Data, Northwest Territories, Canada: 1947-2008. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **36**, S211-S223. <https://doi.org/10.5589/m10-058>
- [59] Chasmer, L., Quinton, W., Hopkinson, C., Petrone, R. and Whittington, P. (2011) Vegetation Canopy and Radiation Controls on Permafrost Plateau Evolution within the Discontinuous Permafrost Zone, Northwest Territories. *Permafrost and Periglacial Process*, **22**, 199-213. <https://doi.org/10.1002/ppp.724>
- [60] Stevens, C.W. and Wolfe, S.A. (2012) High-Resolution Mapping of Wet Terrain within Discontinuous Permafrost Using LiDAR Intensity. *Permafrost and Periglacial Processes*, **23**, 334-341. <https://doi.org/10.1002/ppp.1752>
- [61] Hubbard, S.S., Gangodagamage, C., Dafflon, B., Wainwright, H., Peterson, J., Gusmeroli, A. and Wullschlegler, S.D. (2013) Quantifying and Relating Landsurface and Subsurface Variability in Permafrost Environments Using LiDAR and Surface Geophysical Datasets. *Hydrogeology Journal*, **21**, 149-169. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0939-y>
- [62] Paine, J.G., Andrews, J.R., Saylam, K., Tremblay, T.A., Averett, A.R., Caudle, T.L. and Young, M.H. (2013) Airborne Lidar on the Alaskan North Slope: Wetlands Mapping, Lake Volumes, and Permafrost Features. *The Leading Edge*, **32**, 798-805.
- [63] Gangodagamage, C., Rowland, J.C., Hubbard, S.S., Brumby, S.P., Liljedahl, A.K., Wainwright, H. and Dafflon, B. (2014) Extrapolating Active Layer Thickness Measurements across Arctic Polygonal Terrain Using LiDAR and NDVI Data Sets. *Water Resources Research*, **50**, 6339-6357. <https://doi.org/10.1002/2013WR014283>
- [64] Hopkinson, C., Demuth, M., Sitar, M. and Chasmer, L. (2001) Applications of Airborne LiDAR Mapping in Glaciated Mountainous Terrain. *IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, 9-13 July 2001, 949-951. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976690>
- [65] Hopkinson, C., Sitar, M., Chasmer, L. and Treltz, P. (2004) Mapping Snowpack Depth beneath Forest Canopies Using Airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **70**, 323-330. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.323>
- [66] Deems, J.S. and Painter, T.H. (2006) Lidar Measurement of Snow Depth: Accuracy and Error Sources. In: Gleason, J.A., Ed., *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, International SnowScience Workshop, Telluride, 30-38.
- [67] Helfricht, K., Kuhn, M., Keuschnig, M. and Heilig, A. (2014) Lidar Snow Cover Studies on Glaciers in the Ötztal Alps (Austria): Comparison with Snow Depths Calculated from GPR Measurements. *The Cryosphere*, **8**, 41-57.

<https://doi.org/10.5194/tc-8-41-2014>

- [68] Helfricht, K., Schöber, J., Schneider, K., Sailer, R. and Kuhn, M. (2014) Interannual Persistence of the Seasonal Snow Cover in a Glacierized Catchment. *Journal of Glaciology*, **60**, 889-904.
- [69] Kirchner, P.B., Bales, R.C., Molotch, N.P., Flanagan, J. and Guo, Q. (2014) LiDAR Measurement of Seasonal Snow Accumulation along an Elevation Gradient in the Southern Sierra Nevada, California. *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, 4261-4275. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4261-2014>
- [70] DeBeer, C.M. and Pomeroy, J.W. (2010) Simulation of the Snowmelt Runoff Contributing Area in a Small Alpine Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, **14**, 1205-1219. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1205-2010>
- [71] Varhola, A., Coops, N.C., Bater, C.W., Teti, P., Boon, S. and Weiler, M. (2010) The Influence of Ground- and Lidar-Derived Forest Structure Metrics on Snow Accumulation and Ablation in Disturbed Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **40**, 812-821. <https://doi.org/10.1139/X10-008>
- [72] 孙中震. 基于机载 LiDAR 的青藏高原冰川雪线提取研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [73] 仲文. 祁连山黑河上游多年冻土区热融喀斯特地表变形监测研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.