

侵蚀沟地面激光扫描与无人机 遥感监测技术

李斌兵 冯林 黄磊 著

非外借



科学出版社

侵蚀沟地面激光扫描与无人机 遥感监测技术

李斌兵 冯 林 黄 磊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对实际需求,总结地面激光雷达和无人机技术在黄土高原侵蚀沟监测及水土保持方面的最新研究成果。在地面激光雷达应用方面,系统介绍利用地面激光雷达获取侵蚀沟三维点云数据、点云数据的预处理、DEM构建、地形特征提取以及侵蚀泥沙量估算的方法,并通过实例进行验证。在无人机应用方面,介绍图像三维建模的原理与方法,详细阐述无人机监测侵蚀沟过程中的图像获取、外业实施、内业处理、三维模型建立及精度分析的方法,并在野外侵蚀沟监测中进行应用验证与分析讨论。

本书注重理论与实践相结合,配有大量应用实例,可供水土保持监测、预报和规划相关领域的技术人员与院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

侵蚀沟地面激光扫描与无人机遥感监测技术 / 李斌兵, 冯林, 黄磊著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057883-9

I. ①侵… II. ①李… ②冯… ③黄… III. ①沟壑—激光扫描 ②沟壑—无人驾驶飞机—航空遥感—监测 IV. ①P931.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 127169 号

责任编辑: 祝 洁 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年6月第一次印刷 印张: 16 1/8

字数: 320 000

定价: 105.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

侵蚀沟是在长期地理条件和人类活动作用下形成的特殊地貌，包括细沟、浅沟、切沟及冲沟等，黄土高原丘陵沟壑区侵蚀沟的分布面积占沟间地面积的70%左右。侵蚀沟演变过程中剥离了地表的沃土，导致大量土壤的沉淀和退化，并将泥沙淤积于河道，造成地表的割裂，对农业生产、水利安全以及交通出行等造成了极大的危害。

近年来，随着地面三维激光扫描技术及无人机技术的不断成熟，其在黄土高原侵蚀沟监测中的应用逐渐成为水土保持领域关注的焦点和热点。鉴于我国系统介绍三维激光扫描技术、无人机技术在侵蚀沟监测中的理论与技术方面的书籍较少，特别是基于图像的三维建模、三维点云提取谷脊线特征、基于倾斜影像与正射影像的侵蚀沟建模等方面少有涉及，因此亟须相关书籍作为指导，以提高三维激光扫描技术、无人机技术在水土保持领域的应用水平，进而对深入了解侵蚀过程演变、揭示侵蚀机理提供帮助。

本书研究成果主要来自作者主持的国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区切沟侵蚀过程的三维数值模拟研究”(41171224)以及水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验开放课题“黄土沟壑区切沟沟岸侵蚀监测及不确定性研究”(201402)。本书根据近年来野外及室内模拟降雨试验结果，将高精度地面三维激光扫描及无人机技术应用于侵蚀沟监测过程研究，讨论将地面三维激光扫描技术应用于侵蚀沟监测中涉及的关键理论和技术问题，主要内容包括基于地面三维激光扫描技术的数据采集与预处理、地形表面重建、侵蚀沟地形特征提取与分析，以及误差模型与分析等方面的理论与技术介绍，针对现有方法的不足，提出了相应的改进算法与编程实现，并给出三维激光扫描技术在侵蚀沟的形态发育、动态演变、侵蚀量估算及不确定性分析中的应用案例。

本书内容包括三个部分。第一部分为绪论，首先对侵蚀沟监测的内容、目的与意义进行详细说明，其次重点介绍地面三维激光扫描技术与无人机技术及其在侵蚀沟监测中的应用现状。第二部分是地面三维激光扫描技术在侵蚀沟监测中的应用，包含点云数据的获取与预处理、DEM构建、地形特征提取以及侵蚀沟变化分析四个章节。第2章首先介绍激光点云数据的获取与预处理。由地面激光雷达系统组成与原理的介绍开始，而后说明侵蚀沟激光点云数据的获取方法，最后详细说明与分析点云数据的配准拼接、滤波去噪、空洞修补、压缩抽稀等预处理方法。

第3章首先阐述与分析DEM插值算法，然后由实际点云数据构建实验区的DEM并展开分析。第4章首先阐明了基于DEM的地形特征提取方法并进行实验演示，然后基于切沟三维点云计算其法向量、曲率，进而得到三维谷脊线特征并进行实验与分析。第5章主要介绍了基于点云的侵蚀沟变化比较算法泥沙负载量估算与不确定性分析方法。第三部分介绍无人机在侵蚀沟监测中的应用。第6章首先对图像重建技术进行介绍，其次重点分析了基于匹配特征点的稀疏重建与稠密重建等关键步骤，最后通过室内外实验进行检验与分析。第7章采用无人机作为侵蚀沟图像获取手段，基于图像重建技术进行侵蚀沟的建模与分析，详细说明了实验的流程、硬件设备与软件工具、外业实施与内业处理过程，并分别对基于倾斜影像与正射影像的侵蚀沟建模进行了实验与分析。本书写作分工为：第1章由李斌兵、冯林撰写；第2章由冯林、马鼎、柳方明、李斌兵、黄磊撰写；第3章由冯林撰写；第4章由冯林、李斌兵撰写；第5章由冯林、李斌兵撰写；第6章由李俊利、李斌兵、黄磊撰写；第7章由冯林、李斌兵、黄磊撰写；最后由李斌兵汇总定稿，黄磊和冯林参加了书稿文字和图片的整理工作。

作者在切沟侵蚀监测与水土保持预报建模研究过程中，得到了中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与干旱地农业国家重点实验室、西安理工大学教育部西北水资源与环境生态重点实验室、水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室、神木侵蚀与环境试验站、黄河水利委员会天水水土保持科学试验站的积极支持和大力协助。感谢李占斌、郑粉莉、王占礼、李鹏等老师的热情指导，感谢马鼎、李俊利、柳方明、姚京威、刘睿、赵浩浩、薛冰融、唐辉等研究生的努力工作和辛勤劳动。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请同仁批评指正。

作 者

2017年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 侵蚀沟监测的目的和意义	1
1.2 侵蚀沟监测的内容和要求	2
1.2.1 侵蚀沟监测的内容	2
1.2.2 侵蚀沟监测的要求	4
1.3 常见侵蚀沟监测技术	4
1.3.1 传统皮尺、坡度计监测与地形剖面测量仪	4
1.3.2 侵蚀针监测	5
1.3.3 遥感监测	5
1.3.4 高精度GPS监测	8
1.4 地面三维激光扫描技术	9
1.4.1 三维激光扫描技术发展现状	9
1.4.2 地面三维激光扫描技术应用于侵蚀沟监测的几个难点问题	10
1.5 无人机图像三维建模技术	12
1.5.1 无人机图像三维建模技术发展现状	12
1.5.2 无人机图像三维建模技术应用于侵蚀沟监测的几个难点问题	13
参考文献	14
第 2 章 激光点云数据的获取与预处理	18
2.1 地面激光扫描系统简介	18
2.1.1 激光扫描定位原理	20
2.1.2 激光扫描点坐标精度	21
2.1.3 点云数据的特点	23
2.2 激光点云数据的获取	24
2.2.1 点云采集与处理作业流程	24
2.2.2 实验数据采集	26
2.3 激光点云数据的配准拼接	29
2.3.1 无特征的点云配准拼接原理	29
2.3.2 基于特征的点云配准拼接原理	30

2.3.3	点云配准拼接实例	32
2.4	激光点云数据的滤波去噪	34
2.4.1	点云数据的噪声来源	35
2.4.2	点云滤波方法	35
2.4.3	点云滤波的精度评定	36
2.4.4	融合回光强度的表面拟合滤波算法	40
2.5	激光点云数据的空洞修补	51
2.5.1	研究现状	51
2.5.2	空洞边界提取经典算法	52
2.5.3	基于Loop细分的点云空洞填补	54
2.5.4	基于Loop细分的点云空洞填补实验与分析	56
2.6	激光点云数据的压缩抽稀	62
2.6.1	面向地形数据的点云数据压缩抽稀算法	63
2.6.2	点云数据压缩抽稀实例	64
2.7	激光点云数据的误差对精度的影响	66
2.7.1	地面激光扫描误差分析	66
2.7.2	点云配准误差传播模型	66
	参考文献	70
第3章	三维激光点云数据的 DEM 构建	72
3.1	DEM插值算法	72
3.2	构建实验区DEM	74
3.2.1	数据检验	74
3.2.2	DEM构建	76
3.2.3	DEM精度评定	78
	参考文献	81
第4章	点云地形特征提取	82
4.1	基于DEM的地形特征提取	82
4.1.1	地物提取与分析	82
4.1.2	侵蚀特征提取及分析	83
4.2	基于鲁棒统计的点云法向量估计	84
4.2.1	相关研究	85
4.2.2	提出的算法	87
4.2.3	实验与分析	92
4.3	基于LiDAR点云的曲率计算	98

4.3.1 基于MLS法的曲率计算原理	99
4.3.2 基于MLS法的曲率计算方法	100
4.4 基于LiDAR点云的谷脊线提取	104
4.4.1 点云特征线提取研究现状	104
4.4.2 谷脊线的曲率特性	105
4.4.3 谷脊线提取算法描述	107
4.4.4 曲面拟合点云邻域点选择	108
4.4.5 谷脊点的判定	108
4.4.6 谷脊点的平滑收缩与谷脊线的生成	109
4.4.7 实验与分析	111
参考文献	118
第5章 基于地面三维激光扫描点云的侵蚀沟变化分析	121
5.1 研究现状	121
5.1.1 侵蚀沟变化分析的研究与发展	121
5.1.2 基于地面激光点云的地形变化分析方法与分类	122
5.1.3 基于点云的地形变化判定	124
5.2 研究区域与实验数据	125
5.3 基于点到点距离的点云变化比较算法	126
5.3.1 算法原理	126
5.3.2 算法描述	127
5.3.3 实验与分析	127
5.4 基于点到模型距离的点云变化比较算法	130
5.4.1 算法原理	130
5.4.2 算法描述	130
5.4.3 实验与分析	131
5.5 基于多尺度模型到模型距离的点云变化比较算法	135
5.5.1 算法原理	135
5.5.2 算法描述	136
5.5.3 关键步骤与参数	137
5.5.4 实验与分析	140
5.6 侵蚀沟泥沙负载量的估算及不确定性分析	149
5.6.1 测量过程随机误差	149
5.6.2 泥沙负载量不确定性及修正方法原理	150
5.6.3 结果与分析	154

参考文献	160
第 6 章 基于图像重建技术建立三维地面模型	161
6.1 基于图像重建技术建立三维地面模型的技术路线	161
6.2 基于匹配特征点的稀疏重建	162
6.2.1 特征点检测及常用算法	163
6.2.2 SIFT特征提取与匹配	164
6.2.3 Harris角点检测	166
6.2.4 融合Harris特征的SIFT描述与匹配	168
6.2.5 光束法平差	173
6.2.6 SFM计算流程	173
6.3 稠密重建及DEM构建	176
6.3.1 稠密重建	176
6.3.2 针对三维地形重建的改进面片扩展方法	177
6.4 实验验证及结果分析	182
6.4.1 室内实验验证及结果分析	182
6.4.2 切沟实验验证及结果分析	189
参考文献	191
第 7 章 基于无人机的切沟三维建模与分析	194
7.1 实验流程	194
7.2 实验硬件设备与软件工具	197
7.2.1 无人机——DJI Inspire 1	197
7.2.2 RTK GPS——FIOF A30	198
7.2.3 航路规划软件——Pix4D capture	198
7.2.4 三维建模软件——Agisoft PhotoScan	199
7.3 实验区域情况	200
7.3.1 实验地点	200
7.3.2 切沟情况	200
7.4 外业实施过程	201
7.4.1 航路规划与执行	201
7.4.2 地面控制点布置与量测	208
7.5 内业处理过程	210
7.5.1 相机模型与校准	210
7.5.2 航图导入与检查	213
7.5.3 POS信息处理	215

7.5.4	相机内/外参数解算	216
7.5.5	连接点的编辑与修整	217
7.5.6	相机参数优化	218
7.5.7	空间配准	221
7.5.8	稠密点云构建	222
7.5.9	栅格高程模型构建	222
7.5.10	三角网格构建	223
7.5.11	纹理映射	224
7.5.12	正射影像	225
7.6	独立切沟实验结果与分析(倾斜摄影)	225
7.6.1	航图获取	225
7.6.2	POS信息处理	227
7.6.3	地面控制点量测	227
7.6.4	相机参数解算	228
7.6.5	地面控制点标记	231
7.6.6	相机参数优化	232
7.6.7	稠密点云构建	236
7.6.8	DEM模型构建	237
7.6.9	TIN模型构建	238
7.6.10	正射影像构建	239
7.7	整体沟系实验结果与分析(正射摄影)	239
7.7.1	航图获取	239
7.7.2	POS信息处理	240
7.7.3	地面控制点量测	240
7.7.4	相机参数解算与优化	241
7.7.5	DEM模型构建	244
7.7.6	正射影像生成	244
	参考文献	246

第1章 绪论

1.1 侵蚀沟监测的目的和意义

侵蚀沟是地表径流集中冲刷土壤和母质并切入地表内形成的沟壑。典型的侵蚀沟是一条长而深的沟，它可以分为沟顶、沟底、水道、冲击圆锥及侵蚀沟岸地带等几个部分。沟蚀即侵蚀沟造成的土壤侵蚀，是一种重要的土壤侵蚀类型，主要发生在坡耕地。在坡面侵蚀过程中，径流汇集产生的细沟不断发育、拓宽、加深，形成更长、更深、更宽的沟道，最终农耕过程也无法修复这些沟道，它们由面蚀发育成沟蚀。对沟蚀的研究大都开始于19世纪70年代。Foster(1986)将沟蚀作为一种单独的侵蚀类型进行研究；Horton(1945)与Schumm(1956)给出了沟道产生的临界坡长与发生侵蚀沟道的临界面积的明确定义，为区分沟蚀提供了理论依据。我国学者曾根据坡面侵蚀机理，主要针对黄土高原侵蚀沟对沟道类型进行了分类。朱显谟(1956)从土壤侵蚀的角度，根据沟蚀发展阶段、演变时期和侵蚀强度等，将沟蚀划分为细沟(rills)侵蚀、浅沟(ephemeral gullies)侵蚀和切沟侵蚀，所有的沟蚀发展都是由细沟侵蚀、浅沟侵蚀到切沟侵蚀，它们构成了一个完整的发育体系。

Poesen 等(2003)研究指出，在不同的时空尺度上，侵蚀沟产沙量占整个水蚀产沙量的10%~94%。侵蚀沟剥离了地表的沃土，导致大量土壤的沉淀和退化，并将泥沙淤积于河道，造成了地表的割裂，蚕食了大量的土地，对农业生产、水利安全和交通出行等带来了极大的危害。作为一个人口大国与农业大国，我国也是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一。侵蚀的面积广大，强度也较为剧烈，造成的危害非常严重(郑粉莉等，2008)。第二次全国土地调查统计显示，截至2012年底，我国耕地总面积为 $1.35 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，其中受土壤侵蚀影响的耕地面积高达34.3%，平均年流失耕地表土为 $33 \times 10^8 \text{ t}$ ，相当于损失了约为1cm厚的耕地表层土。据估算，我国每年因土壤侵蚀造成的经济损失相当于GDP的2.25%(彭珂珊，2016)。

我国独特的自然地理环境，形成区域特点明显的三大侵蚀类型区，即西北风力侵蚀区、东部水力侵蚀区以及青藏高原冻融侵蚀区(郑粉莉等，2008)。其中，黄土高原是我国乃至全球范围内土壤侵蚀最严重的地区。西北黄土高原丘陵沟壑区侵蚀沟的分布面积占沟间地面积的70%左右(唐克丽等，1991)。黄土高原丘陵沟壑区地质构造特殊、自然条件严峻、生态环境脆弱以及人类活动影响强烈，导

致解决该区土壤侵蚀问题至今仍是世界水土保持工作中最具有挑战性的课题。除此以外,作为我国重要的粮食和工业生产基地,随着近百年来东北黑土区土地利用方式的转变,尤其是中华人民共和国成立以来大规模的快速开发和大面积的开荒整治,土壤侵蚀情况也日趋严重。东北黑土区内现有侵蚀沟 25 万多条,侵占耕地 59 万多公顷(张学俭等, 2007)。这不仅造成了黑土地资源的丧失,并且威胁该区农业和社会经济的发展。

随着生态环境的不断恶化,防治土壤侵蚀已成为世界各国政府和研究人员共同关注的重要问题,对侵蚀沟的相关研究已引起了国内外学者的普遍重视。研究侵蚀沟的基础是全面认识侵蚀沟,这就需要在不同时空尺度下对侵蚀沟的形态发展、水力特性以及土质特征等进行详细的监测。尤其是对侵蚀沟发育形态的监测,对于了解侵蚀沟的形成机制和发展状况,构建侵蚀沟评估与预测模型具有重要的作用。因此,研究合适的侵蚀沟监测方法对侵蚀沟的形态发展进行监测,对于深入认识侵蚀沟及其发展规律,制订有效的防治政策与措施具有重要意义。

过去技术手段的欠缺,加上侵蚀沟形成和发展的阶段性和复杂机制使得侵蚀沟监测非常困难,已经严重地制约了土壤侵蚀普查、预报和治理。为了解侵蚀沟的形成、发展及估计侵蚀量变化,以往的研究多以数字高程模型(digital elevation model, DEM)为基础,来解释侵蚀沟的形成与周围地形特征关系。借助准确和详细的地形信息,能够帮助人们更好地掌握侵蚀沟在何时、何地出现以及侵蚀沟的形态特征如何随着时间演化。目前,DEM 产品的空间分辨率一般为 1~30m,这个精度难以满足侵蚀沟调查的要求,特别是在人工试验小区内的侵蚀监测。其范围一般为 5m×30m,在如此小的尺度范围内,DEM 很难满足侵蚀沟变化监测的要求。为了捕捉影响沟壑形成和发展的地形微结构变化,DEM 的空间分辨率应该为 5mm~15cm(Schmid et al., 2004)。

1.2 侵蚀沟监测的内容和要求

1.2.1 侵蚀沟监测的内容

1. 侵蚀沟的形态监测

不同类型的侵蚀沟在不同的发展阶段具有不同的几何形态,研究侵蚀沟不同阶段的形态有助于认清土壤侵蚀过程。例如,黄土高原沟壑区在降雨条件下,坡面侵蚀是一个逐渐发展演化的过程。在降雨初期,由于雨滴击溅和坡面薄层水流侵蚀的作用,坡面上主要发生面蚀;随着降雨的进行,坡面逐渐出现跌坎并发展演化成细沟,坡面侵蚀形态由面蚀逐渐向细沟侵蚀演化;随着细沟的发育发展,

细沟侵蚀逐渐向切沟侵蚀演变。

通过常用的测量手段可以获得侵蚀沟不同发育阶段的沟长、沟宽、面积和体积等参数,从而了解和掌握不同阶段的沟蚀演变。例如, Hancock 等(2006)利用三维激光地形测量技术进行了切沟沟头定位,获得了较高的精度; Evans 等(2010)利用三维激光扫描仪进行了切沟系统制图和参数提取,也获得了较高的精度。

2. 侵蚀速率监测

侵蚀速率是反映地貌形态变化的重要指标,与地貌形态有着密切的关系。对于人工径流小区侵蚀沟侵蚀速率的监测可直接采用手工、示踪法或三维激光扫描(terrestrial laser scanning, TLS)测量方式;而对于野外切沟、冲沟侵蚀速率的监测可以采用直接法和间接法两类方法(Whitford et al., 2010)。直接法主要进行周期性观测以及对侵蚀沟参数进行定期调查;间接法包括使用不同年份的航空影像或数字高程模型对比等。与直接法相比,间接法在监测较大时空尺度的切沟侵蚀时更有优势。

侵蚀速率监测的传统方法主要采用插钎法或测针观测等,而现代方法多采用三维激光扫描仪、全球定位系统(global positioning system, GPS)、卫星以及航空遥感影像解译等方法。一般来说,插钎法、三维激光扫描仪以及 GPS 技术等方法更适合应用于短期内,进行小范围内的侵蚀沟监测;而遥感影像解译适用于较大时空尺度的侵蚀沟监测,通过不同时段的高分辨率影像,提取侵蚀沟变化特征,从而获得侵蚀沟的侵蚀速率。

于章涛(2005)从侵蚀沟线性特征、面状特征和体积参数出发,研究侵蚀沟的侵蚀速率,通过 GPS 测量数据生成的一维、二维、三维空间形态上的变化来揭示侵蚀速率的快慢,并探讨了侵蚀速率与地形特征的关系。

3. 侵蚀量监测

通过测量采集的点数据经插值处理,运用 GIS 分析功能,结合历史数据进行体积变化计算,从而估算侵蚀量。侵蚀量的估算对于摸清土壤侵蚀程度,分析侵蚀沟形态的动态演变过程,并对制订水土保持措施具有重要意义。侵蚀量的估算从侵蚀钎、纵断面测绘器、水准测量、树根裸露分析、摄影和示踪法等发展到 3S 技术(GPS、GIS、RS)、激光扫描仪的应用。张鹏等(2008)对比分析了高精度 GPS、徕卡(Leica)激光扫描仪和测针板法对坡面侵蚀量的估算精度。对三种测量方法采集的点数据经栅格插值处理,运用三维分析功能进行体积量计算,估算侵蚀量,发现徕卡激光扫描仪估算侵蚀量的精度最高,其误差仅为 4.56%,高精度 GPS 的估算误差为 7.38%,而测针板法为-17.19%。

1.2.2 侵蚀沟监测的要求

侵蚀沟监测是在一定时间尺度内对地理空间对象的监测,因此具有时间与空间两方面的要求。

时间方面,通常侵蚀沟的监测要在一段时间内按照一定的周期进行连续监测。理想的侵蚀沟监测应基于次降雨观测,但是因为难以预知准确的降雨时间,所以监测的代价大,且受降雨影响不便于即时测量。因此,通常是采用暴雨前和暴雨后分别观测,利用高精度测量技术观测侵蚀沟的形态变化,同时记录侵蚀沟产流降雨过程。

空间方面主要包括尺度与精度两项要求。监测的空间尺度主要由研究区域的大小决定,可以是流域内复杂的侵蚀沟系统或单条侵蚀沟。显然,监测的空间尺度越大,监测的工作量越大,代价越高。监测精度则主要由研究目的或相应模型的类型与特性决定。过高的监测精度要求会使监测工作的复杂度、时间以及费用增加,而过低的精度又会造成监测的误差过大,无法满足相应的研究分析需求。因此,需要根据相应的精度要求与实验条件,选定合适的监测技术。

从已有的侵蚀沟研究成果来看,插钎法、三维激光扫描仪和 GPS 技术等方法更多应用于短期(1~2 年)小范围内的侵蚀沟监测;而遥感、航空摄影测量等可以对侵蚀沟进行较大时空尺度的监测(十几年至几十年)。尤其是在时间尺度上,因为短期的侵蚀速率不能代表长期的侵蚀速率,所以高分辨率遥感影像在较大时间尺度的侵蚀速率分析上比实地监测技术更具有优势。但是受到分辨率的限制,对侵蚀沟的短期发展变化还无法进行分析。在我国,目前主要是基于 GPS 技术对侵蚀沟进行短期(1~2 年)的监测,随着技术的发展,近景摄影测量、三维激光扫描甚至无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术,也逐渐开始在侵蚀沟监测中得到应用。例如,在研究次降雨对侵蚀沟发育的影响时,已经开始应用近景摄影测量和三维激光扫描等高精度地面监测方法。

1.3 常见侵蚀沟监测技术

近年来,侵蚀沟监测技术的不断发展,使得侵蚀沟监测从传统的皮尺、插钎等测量方法,发展到 GPS 技术、三维激光扫描地形测量和高分辨率遥感影像等新技术的应用。

1.3.1 传统皮尺、坡度计监测与地形剖面测量仪

传统皮尺、坡度计监测就是不同时间,利用皮尺、坡度计沿侵蚀沟每隔一定的距离,测量侵蚀沟的横截面参数(上下截面宽、左右坡度和坡长)以及沟长、沟岸的各种形状参数,以此计算侵蚀沟的体积,比较不同时间的体积变化情况,

从而确定侵蚀沟的土壤侵蚀速率。此方法可以通过测量切沟不同部位的横断面的面积和横断面的间距来获得切沟的体积,具有操作简便的优点。但是此方法只能测量切沟整体体积的变化,无法对沟内具体部位的侵蚀/堆积进行监测。

地形剖面测量仪是研究人员为测量地形剖面而研制的测量设备。早期多为测针式地形剖面测量仪,目前结合激光测距技术,已出现了激光地形剖面测量仪。该方法成本低,但费时费力,测量精度受测量人员专业水平以及侵蚀沟的复杂程度影响,误差具有一定的不确定性。

Casali 等(2006)分析了使用皮尺和测针式剖面地形测量仪对细沟和浅沟的剖面进行测量时,测量间距对侵蚀沟体积计算误差的影响。结果表明,测量间距为1~5m时,体积计算误差小于10%。Castillo 等(2011)分析对比了几种实地测量技术对切沟测量的精度。结果表明,在剖面面积测量方面,激光地形剖面测量仪的误差超过10%;在体积计算方面,激光地形剖面测量仪的测量值均偏小,且误差较大。

1.3.2 侵蚀针监测

侵蚀针监测是开发建设项目土壤流失监测的一种常用方法,目前根据工程监测需要已有一系列改良的侵蚀针监测方法。传统的侵蚀针监测是在需要监测土壤侵蚀部位相隔一定的距离,钉下一系列侵蚀针,作为侵蚀基准点,并在露出地面的地方做好标记,每隔一段时间记录侵蚀针出露的高度,并以此计算该区域土壤侵蚀量及侵蚀速率,或者利用全站仪准确测量侵蚀针雨季前后的出露高度的变化,以此计算侵蚀量和侵蚀速率(范建容等, 2004)。采用侵蚀针进行土壤侵蚀监测,操作简单,易学易用,且监测精度相比皮尺测量更有保障,缺点是侵蚀针位置若固定在易发生崩塌或其他土体不稳的地方,有加剧土体失稳引起土壤侵蚀的可能,且易丢失该侵蚀针的监测数据。

随着光电传感器技术的发展,改进的光电侵蚀针也开始得到发展应用。该设备将光信号转变为电信号,形成可测光电流,根据探针传感器的电压与探针暴露长度呈正比例关系推算侵蚀深度,自动监测土壤侵蚀和沉积过程,连续记录地貌变化(Lawler, 1991)。

1.3.3 遥感监测

遥感是一种远离目标,通过非直接接触而判定、测量并分析目标性质的技术。Patton 等(1975)将遥感影像第一次应用于切沟体积计算与侵蚀程度分析中。随着遥感技术的不断发展,遥感监测技术也不断发展完善。通过分析、解译不同时期或者不同来源的遥感图像,可以获得侵蚀沟的形态发展信息,计算出侵蚀沟的体积、侵蚀量和侵蚀速率等。因此,越来越多的研究人员将其应用于侵蚀沟的监测中。

目前, 基于遥感影像的米级分辨率切沟侵蚀监测已较为成熟(Daba et al., 2003; Martinez-Casasnovas, 2003; Vandaele et al., 1997)。

根据传感器工作方式的不同, 遥感器可分为被动式遥感器与主动式遥感器两类。被动式遥感器是一种收集太阳光的反射及目标物辐射的电磁波的遥感传感器; 主动式遥感器是向目标物发射电磁波, 然后收集目标物反射回来的电磁波的遥感传感器。在遥感系统中, 搭载遥感器的工具称为遥感平台。遥感平台包括人造卫星、飞机与无人机和气球等超低空平台。在侵蚀沟监测中, 主要可以采用卫星遥感技术与航空摄影测量技术。相对于传统方法, 遥感监测技术具有可长期周期性监测以及测量精度可度量等优势, 因此相关研究与应用在不断完善与丰富。

1. 卫星遥感

卫星遥感影像具有多光谱特征, 空间范围大, 具有易于获得不同时间尺度数据的优势。但早期的遥感影像, 如 Landsat、SPOT、ASTER、IRS 和 ENVISAT 等的空间分辨率较低, 只能用来分析大中型切沟。近年来, 高分辨率卫星影像的快速发展以及遥感影像处理技术和 GIS 技术的进步, 为研究中小型侵蚀沟及其变化提供了条件, 也给开展较大时空尺度的沟蚀研究带来了可能。

Vrieling 等(2007)使用多光谱 QuickBird 影像和实地调查数据验证了 ASTER 影像空间(分辨率 15m)提取切沟的可行性; Shruthi 等(2011)使用卫星影像 IKONOS(多光谱数据分辨率 1m)和立体 GEOEYE-1 数据(全色波段分辨率 0.5m), 创建了基于目标的切沟提取方法, 实现了切沟形态的高精度半自动化提取。在我国, 闫业超等(2010)依据 Corona(分辨率 2.7m)和 SPOT-5(分辨率 2.5m)影像, 对东北典型黑土区 1965~2005 年切沟(长度在 7~8 个像元以上的切沟)的数量进行了统计分析; 杜国明等(2011)基于 SPOT-5 影像(分辨率 2.5m)提取切沟信息, 对东北黑土区切沟的空间格局分布特征进行了研究; 马玉凤等(2009)利用 QuickBird 影像(分辨率 0.61m)和航片, 结合 GPS, 提取图像信息, 并绘制二维和三维图, 对青海省共和盆地沙沟河流域典型冲沟进行了不同时间尺度的动态监测; 李建伟等(2012)介绍了松辽流域水土保持监测中心站采用 3S 技术在乌裕尔河和讷谟尔河流域开展大尺度范围内的侵蚀沟动态监测的实践, 详细介绍了大尺度条件下侵蚀沟的动态监测技术及研究过程。

——以上实践说明, 卫星遥感可应用于大范围侵蚀沟发育速率的研究, 依据卫星遥感数据还能够对切沟的溯源侵蚀、沟坡横向侵蚀的发展进行监测; 但受遥感影像分辨率的影响, 将其应用于监测切沟侵蚀速率的研究还不多见, 特别是对于垂直的下切侵蚀, 现在的研究还无法进行说明。

2. 航空摄影测量

航空摄影测量主要指在一定高度的遥感平台上利用光学摄影技术获取地面沟蚀区域立体像对影像,并根据立体像对获取高程信息,生成 DEM 后纠正航空影像获得正射影像,最后从正射影像上获取侵蚀沟谷信息。航空摄影测量是一种方便、快捷的沟蚀监测方法,其技术关键是保证地面分辨率以及图像的几何精确性。

胡文生等(2004)对摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用做了总结,回顾和评价了国内外摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用,对国内外摄影测量的主要产品进行了探讨。研究指出,摄影测量方法在土壤侵蚀研究中具有传统方法不可替代的优势,但成熟技术的引入和广泛应用仍需要进一步的研究。近年来,研究者为了保证地面分辨率,以使沟蚀状况能被最大限度地呈现出来,使用各种方法搭建了各式各样的遥感平台。Ries 等(2003)在西班牙埃布罗盆地中部应用热气球作为遥感平台,在不同的飞行高度(10~300m)和镜头焦距(50mm、28mm)组合下获得比例尺从 1:100 到 1:10000 的影像,精度能满足不同侵蚀沟的监测需求。范建容等(2006)利用四川省西昌大箐梁子 1957 年、1979 年和 2000 年的航空影像获取该区侵蚀沟长变化信息,并经过野外调查和验证符合实际情况。Marzolf 等(2009)在西班牙半干旱地区利用汽艇和风筝(飞行高度为 40m 左右)作为摄影平台,采用 LPS 8.7 徕卡相机拍摄侵蚀沟形状特征,完成了对侵蚀沟的监测,获得 5cm×5cm 和 7.5cm×7.5cm 的高分辨率 DEM,且保证了监测误差在 0.5 个栅格单元之内。近年来,随着无人机遥感监测系统的成功研制,该技术在环境监测领域的应用也逐渐增多。崔红霞等(2005)利用中国测绘科学研究院研制的无人机遥感监测系统 UAVRS2II,对试验区采用无人机搭载焦距 20mm、视场角为 42°的镜头以定高 300m 飞行获得 10km² 的地面影像,影像精度高(平面中误差 0.111mm,高程中误差 0.117mm),满足了摄影测量的精度要求,也能满足侵蚀沟变化信息的监测需求。

国外早期的沟蚀测量采用热气球或飞机在切沟上方飞行,用正射影像技术获得连续的大比例尺的航空相片,但是热气球在高空中的稳定性不高,飞行的忽高忽低及受紊乱气流影响都可能对相片数据的采集造成影响,飞行测量的花费普遍偏高,因此主要用于国家地质调查及地矿测量研究。执行这类航摄任务的手续繁杂、周期较长、成本费用高且经济效益不好,现有的航空摄影专业单位一般很难承担分散的小面积区域测量,限制了摄影测量在水土保持方面的应用。

最近,随着无人机技术的飞速发展,轻小型(重量小于 5kg)、低成本的多旋翼无人机开始广泛应用于低空摄影测量(Lucieer et al., 2014; Mancini et al., 2013; Harwin et al., 2012; Niethammer et al., 2012; Rosnell et al., 2012),这些无人机可以沿着设定好的航线在固定高度自动地进行摄影测量。李兵等(2008)基于无人机低空遥感平台,通过高清数码相机对测量物体进行拍摄,在对北京市海淀区北