

熊海仙, 黄光庆, 宫清华, 袁少雄, 陈波, 张冬良. 数字地形分析在滑坡研究中的应用综述[J]. 热带地理, 2015, 35 (1): 139-146.

XIONG Haixian, HUANG Guangqing, GONG Qinghua, YUAN Shaoxiong, CHEN Bo, ZHANG Dongliang. A Review on Application of Digital Terrain Analysis in Landslide Researches[J]. Tropical Geography, 2015, 35 (1): 139-146.

数字地形分析在滑坡研究中的应用综述

熊海仙^{1,2,3}, 黄光庆³, 宫清华³, 袁少雄^{1,2,3}, 陈波³, 张冬良^{1,2,3}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广州地理研究所, 广州 510070)

摘 要: 高效的数字地形分析 (Digital Terrain Analysis, DTA) 是滑坡预测与评估研究的重要手段。文章综述了 DTA 在滑坡研究中的应用现状, 基本内容包括地形因子分析、地形形态分析、地形单元划分以及 DEM 与滑坡模型的结合分析。地形因子分析的应用多而广, 主要思路是在地形因子与滑坡发育的关系研究基础上分析其滑坡敏感性, 进而构建滑坡预测和评估模型; 地形形态分析是滑坡识别的重要手段, 加强地貌形态和滑坡发育的关系研究有助于对潜在滑坡地形的识别; 地形单元划分能为滑坡研究提供统计和分析单元; DEM 与滑坡专业模型的结合方式多样, 程度各异。同时, 从尺度选择与转换的角度探讨了 DTA 滑坡研究的尺度问题, 分析了 DTA 的局限性, 指出 DEM 不能提供完备无误的地形信息, DTA 不能完全取代常规的地形分析。最后, 基于以上论述对未来的研究趋势提出了展望。

关键词: 滑坡; DEM; 数字地形; 地形因子; 地形单元; 尺度; LiDAR; 滑坡模型

中图分类号: P208

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221 (2015) 01-0139-08

DOI:10.13284/j.cnki.rddl.002644

滑坡是自然演变的地表过程^[1], 与人类社会发生交集时经常酿成重大的生命与财产损失, 因此往往被视为灾害性地质事件, 一直是人类生存和发展安全的重大研究课题。从内涵上看, 广义的滑坡是“斜坡移动”的总称术语, 包括了坡体崩落、倒塌、滑动、扩展和流动^[2], 狭义的滑坡仅指斜坡移动的滑动类型。从学科和研究角度上看, 20 世纪 20—50 年代, 滑坡的系统研究伴随工程地质学和土力学共同肇兴^[3], 主要研究其成因、过程机理和工程防治等问题; 其后, 地理学、生态学、气象学、遥感、数值分析及灾害管理等学科在滑坡过程、分布、勘测、自动识别、评估和管理上^[4]拓展了研究思路; 90 年代后, 非线性理论的应用大放异彩^[5]; 滑坡研究的学科交叉性明显, 以致形成了独立的边缘学科“滑坡学”^[6]。从成因上看, 斜坡岩土体的力学特性是滑坡发生的直接和根本原因, 与之关联的因素多而

复杂, 包括地质、地形、水文、气象、植被和人类活动等。其中, 地形因素非常关键, 在不同程度上决定了滑坡影响因素的空间分布, 如重力应力的分布、水文状况 (降水、汇水、渗流、地下水与孔隙水) 的分布、岩土和植被的分布等。滑坡地形分析是认知滑坡地形环境的一整套理论与方法, 其命题主要有: 如何勘测和识别滑坡地形? 地形因子、地貌形态、地形特征、地貌发育阶段与滑坡的关系怎样? 程度如何? 局限性在哪? 滑坡模型研究如何利用地形分析方法? 地形分析尺度对滑坡研究有何影响? 这也是当前最新的地形分析方法数字地形分析 (Digital Terrain Analysis, DTA) 的研究课题。

DTA 与传统地形分析在目的上一致, 区别主要在于地形信息载体、处理技术及性能表现。传统地形分析一般以纸质地形图为载体, 采用人工解译和手动计算, 程序繁琐效率低下。而 DTA 是基于 DEM

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271029); 广东省科技计划项目 (2012A030200010); 广东省水利科技创新项目 (2011-19)

作者简介: 熊海仙 (1989—), 男, 广东梅县人, 硕士研究生, 主要研究方向为地质灾害建模, (E-mail) xionghaixian@qq.com

通信作者: 黄光庆 (1964—), 男, 浙江金华人, 研究员, 博导, 主要研究方向为区域环境与规划, (E-mail) hgq@gdas.ac.cn.

进行地形属性计算和特征提取的数字信息处理技术^[7],其成本、效率、精度和自动化水平的提升是变革性的,因而成为目前主流的地形分析方法。DTA理论与方法的介绍已有诸多论述^[8-10],但其应用于滑坡研究中的系统性论述尚无。鉴于此,本文回顾了近30多年滑坡研究的文献,总结DTA的应用方式、优势与局限,以期厘清滑坡研究中地形分析的方法体系,发掘研究动态,为后续的研究提供借鉴。

1 DTA滑坡研究的基本内容

已有研究中,李志林等^[11]从复杂性出发将DTA基本内容分为基本地形因子计算和复杂地形分析(特征提取、水文分析、可视性分析与道路分析等);杨昕等^[10]认为DTA包括坡面地形因子计算、地形特征提取、地形统计分析和基于DEM的地学模型分析4个方面。本文结合滑坡的研究特点,将其划分为4类:地形因子分析、地形形态分析、地形单元划分以及DEM与滑坡模型的结合分析。

1.1 地形因子分析

地形是关于地表起伏形态的概念,是一种复杂的不规则几何形态,定量描述多采用统计性指标。地形因子便是这类刻画地形属性的定量指标,常见的有高程、坡度、坡向、曲率、粗糙度、地形湿度指数、面积和体积等。在研究中,学者们很早就关注地形因子与滑坡的相关性,并试图总结其对各种类型滑坡发育的贡献率和敏感性差异。DTA的出现为地形因子的计算提供了便利,极大地促进了这方面的研究。

1.1.1 高程 高程是最基本的地形因子。尽管其并不直接影响滑坡,但许多研究表明,滑坡的发育和分布集中在一定的高程范围内。如Dai等^[12]统计大屿山滑坡发育频率后发现中等高程更易出现滑坡;黄润秋等^[13]统计发现,汶川震区崩塌滑坡地质灾害大都发生在1500~2000m范围内,其解释是一方面许多区域的陡坡在高程上分布相对集中,另一方面很多滑坡影响因素像植被、土壤和风化作用具有垂直地带性;梁音等^[14]调查显示,华南地区的崩岗型滑坡集中分布于50~500m范围,因为该区间发育着深厚的花岗岩风化壳^[15]。

1.1.2 坡度 坡度对滑坡有控制性作用,显著影响岩土体的应力分布。对于物质组成均一、各向同性的坡体,滑坡发育的可能性随着坡度增大而增大^[12]。二者关系研究的焦点之一是确定各种环境中滑坡的

易发性坡度区间。当考虑岩性差异时,姚鑫等^[16]指出汶川震区破碎岩石区的滑坡多发于坡度 $<30^\circ$ 的部位,较坚硬岩石区的滑坡多发于坡度 $\geq 40^\circ$ 。对于土质滑坡,一项对贵州库区的研究发现,25°~45°坡度区间的发育概率最高^[17]。

1.1.3 坡向 坡向直接影响太阳辐射和水汽的分布,使降水、植被、侵蚀和风化作用等因素产生规律性分异。许多研究指出^[18-19],在不考虑地质构造因素的情况下,阳坡、迎风坡发生滑坡的概率比较高。在滑坡建模上,有研究利用坡向确定地震型滑坡的强度分布^[20]。

1.1.4 曲率 曲率因子可以反映地形的凹凸状况,直接影响地表径流的汇集,进而影响孔隙水压力分布。一般认为,滑坡体在孔隙水压力超过一个临界值后便开始移动^[21]。凹陷地形汇集地表径流,提高孔隙水压力,因此易引发浅层泥石流滑坡^[22]。

1.1.5 粗糙度 粗糙度可用于衡量地形表面纹理的光滑程度。滑坡区域的粗糙度往往比周边大^[23],不同类型、结构的滑坡,其粗糙度也不尽相同,分析粗糙度的模式可区分滑坡类型。另外,粗糙度与分形理论有相通之处,可用分维数来分析滑坡地形粗糙度^[24]。

1.1.6 地形湿度指数 地形湿度指数(Topographic Wetness Index, TWI)是一种复合地形因子,由单位汇水面积和坡度计算,可模拟和指示土壤湿度。TWI蕴含着地形和水文信息,高值TWI常对应会聚、平坦的地形,低值对应分叉、陡峭的地形^[25],泥石流易在高值TWI的滑坡体中启动^[26],准动态TWI能反映降雨过程中的土壤饱和度分布状况^[27]。这些特点对于浅层滑坡的稳定性、潜发性分析具有重要意义。

1.1.7 面积和体积 常用来量化滑坡的规模和影响。其中,体积的计算一直是滑坡地形分析的难点,DTA常用多时相的DEM对比法来估算滑坡体的体积^[28],近年来又发展了三维激光地形扫描的高精度算法^[29],以及基于LiDAR的斜坡局部基线(Sloping Local Base Level)计算不稳定坡体体积的思路^[30]。从研究和技术应用的趋势看,三维激光扫描技术将是滑坡体积计算的新焦点。

滑坡是多因素作用的结果,综合地形因子比单一因子更有普遍应用价值,相关研究包括多种地形因子对滑坡敏感性、影响权重的比较与判断^[22,31-32],以及整合地形因子进行滑坡建模的方法^[33]。它们是滑坡预测和评价实践中必不可少的环节。

1.2 地形形态分析

地形形态是由地形点、线和面构成的表征地势起伏的形态模式。滑坡一旦发育，便会呈现出特殊的地形地貌形态模式，这是滑坡形态研究的基本依据。

滑坡地形形态复杂多样，为概括其特征，需要作多角度的分类。从剖面上看，乔建平等^[34]将斜坡坡形分为凹坡、上凹下凸坡、直线坡、凸坡和上凸下凹坡，并统计了它们对三峡库区滑坡的贡献率，结果表明凸坡最有利滑坡发育，上凸下凹坡次之，直线坡中等，其余不利；汪旭涛等^[35]划分坡形为阶梯形、凸形、凹形和平直形，通过滑坡敏感性分析得出类似的结论，凸形和阶梯最敏感，平直形次之，凹形不敏感。从平面上看，王治华^[36]将滑坡分为圈椅、双沟同源、椭圆、矩形、长条、不规则多边形等地貌形态。按照地形结构与建构的视角，滑坡形态可分为滑坡地形要素、滑坡部位形态和整体形态。滑坡地形要素是具有控制作用的点（峰谷点、滑坡启动点）、线（谷脊线、水系、滑坡主轴、滑移路径）、面（坡面、凹凸面、滑移面）等地形特征；滑坡部位形态典型的有后缘洼地、后壁、侧壁、滑坡体、台坎、滑坡舌和裂缘等^[37]，但并非所有滑坡都拥有这些部位；滑坡整体形态例如瓢状、条状、爪状、箕形、弧形和混合型等，多为一些定性的描述。按照发育程度，滑坡形态还可分为潜在滑坡形态和既成滑坡形态。潜在滑坡形态对于滑坡的预测和防控具有重要意义，例如，根据前面的论述^[34-35]，凸形坡可看作是潜在形态，需要特别留意；既成滑坡的特殊形态可作为对滑坡的识别、成因分析、历史分析和趋势预测的重要证据。

目前地形形态与滑坡发育之间的关系研究较少，DTA 形态分析多集中于滑坡形态识别的应用上。其中地形剖面、峰谷点、谷脊线、水系和坡面等地形要素的提取已基本实现由纯 DEM 计算^[8,38]。对于一些简单的滑坡部位形态，可借助高精度 DTA 和经验模型加以识别。如 McKean 等^[23]通过 DEM 分析粗糙度来识别滑坡复合体及其内部突起、凹陷等特征；Jaboyedoff 等^[39]用多时相 LiDAR 数据融合对比分析识别次生滑坡后壁；Dunning 等^[40]用高精度 DEM 识别滑动面、滑动体、节理和脆性破裂等地貌特征。对于更为复杂的滑坡部位和整体形态，往往需要结合 DEM、遥感和地质构造数据，借助人机交互的计算机模式识别技术进行解译。

1.3 地形单元划分

地形单元划分是基于地形分析将连续地形面划分为离散地形单元的方法。这样做的意义是为滑坡研究提供合适的统计和分析单元，合理的划分方法要尽量保证每一单元内在属性的最大相似性及相邻单元间的明显差异性。滑坡研究中常用的地形单元是坡面和小流域，对比非地形单元如行政区、地质单元和规则格网，它们对于滑坡研究更具合理性，表现在：1) 属于 2.5 维曲面，内在地综合了地形因素；2) 能确保研究对象的完整性，因为滑坡天然发育于坡面，影响多在小流域内。

邹豹君^[41]认为，地貌是由不同的坡面组成的，地貌的变化源于坡面的变化。而滑坡正是坡面变化的高能形式。坡面（边坡、斜坡）的划分方法已经很成熟，主要采用 DTA 水文分析法^[42-44]。Carrara 等^[45]基于 DEM 设计了自动划分小流域（包含 2 个斜坡单元）的方法，并以斜坡为单元评估地貌、地质、植被及土地利用等滑坡敏感性因素；兰恒星等^[46]基于坡面单元，考虑降雨诱发因素，采用无限坡面和水文耦合模型分析和预测滑坡灾害；谢谟文等^[47]基于边坡单元采用三维条分模型研究滑坡的稳定性；谷天峰等^[48]基于斜坡单元利用耦合二维力学分析模型进行区域斜坡稳定性评价。可见，坡面单元在滑坡机理模型中的应用有所侧重，而在对滑坡风险性评估、滑坡诱发泥石流影响的研究中^[49-50]，小流域单元更加适用，在技术上也比坡面单元易于划分。

1.4 DEM 与滑坡模型相结合的分析

几乎所有的滑坡专业模型都需要地形数据的支撑，DEM 是目前滑坡模型最主要的数据源，但在具体的研究中它们的结合方式怎样？程度如何？局限性在哪？这些问题都值得深入探讨。

从程度上看，一类是完全结合，有些滑坡模型只考虑地形因素，可完全基于 DEM 高程序列进行二次建模。典型的例子如龙毅^[51]提出的元分维模型，这是一种基于 DEM 按照分形几何的原理构建的地表分维曲面模型，可综合反映地形信息；南希^[52]提出地貌分维模型（FDM）用于崩塌、滑坡敏感性分析。此外还有洪水淹没模型^[53]、泥石流泛滥面积计算模型^[54]、滑坡体积计算模型^[55]等。另一类是局部结合，大部分滑坡模型需要多元数据支持，DEM 则扮演地形数据提供者的角色。为进一步说明，先对滑坡模型作简单分类：机理模型、统计模型与非线性模型。

机理模型能反映滑坡孕育、启动、发展、成熟和消亡的实际物理过程,主要基于物理定律和监测数据推导^[56],适用于单体滑坡研究。典型的有蠕变模型、变形功率模型、流变模型、力学-水文模型、无限斜面模型、极限平衡模型、数值分析模型(有限元、离散元和无界元模型)等。在机理模型中,DTA 最多的应用是提供地形因子^[46,57-60]。其次,在有限元、有限差分数值分析中,参与构建滑坡的三维地质模型,为其提供地形骨架^[61-62]。除提供地形信息外,DEM 的格网结构可作为有限差分法的差分网格^[63],DTA 划分的坡面可作为模型的分析单元^[46-47]。

统计模型着重于分析滑坡与各种环境要素之间的关系,寻找规律,进行灾害预测和评估。常见的有回归模型、时间序列、灰色理论、Logistic 模型、梯度-正弦模型和马尔科夫链模型等^[64]。

非线性模型应用非线性理论对滑坡进行分析,擅长处理其他模型在不确定性或非线性问题上的短板。常见的有人工神经网络、混沌理论、分形理论、小波分析、非线性动力学等^[5]。DTA 与 GIS 有着深厚的“血缘”关系,借助 GIS 海量数据分析、多元数据融合及空间分析等功能,统计模型与非线性模型能够与 DEM 灵活地结合,尤其适用于对地形数据的挖掘^[50]和多地形因子滑坡敏感性分析^[65]。

总的来说,DEM 与滑坡专业模型的结合是广泛而多层次的。与机理模型的结合方式尽管较为多样,但多数应用中 DEM 仅作为地形因子提供者的角色;与统计、非线性模型的结合则灵活得多,易与 GIS 多元数据进行融合分析,有利于广泛地分析地形因素与其他滑坡因素之间的关系。

2 DTA滑坡研究的尺度问题

DTA 的尺度性是滑坡研究不可避免的关键问题。按照普遍的定义,尺度是观察和研究事物时所采用的时间和空间单位,可分为范围尺度和粒度尺度。对于 DEM,范围尺度指 DEM 所表达区域的空间大小和时间长短,如坡面尺度、流域尺度和区域尺度;粒度尺度指 DEM 采样间隔的大小,即空间分辨率和时间分辨率。不同类型的滑坡及其模型都有一定的区域范围,要求相应范围尺度的 DEM 与之匹配。DEM 的分辨率则决定着滑坡地形细节的取舍,它与范围尺度具有一定的相互制约性。因此,滑坡研究对 DTA 尺度有着很强的敏感性,尺度选择是其首要问题。

将滑坡地形视为原型,DEM 即为模型,那么尺度选择就是使模型与原型的尺度相匹配的过程。DEM 范围尺度的选择比较简单,只要覆盖研究区域,满足滑坡模型的要求即可,难点在于 DEM 分辨率的选择。既要确定滑坡及其模型的地形分析粒度,又要考虑 DEM 本身的分辨率效应。大量研究指出^[66-70],DEM 分辨率对于地形因子计算和地形特征提取具有极强的尺度效应。低分辨率 DEM 对坡度计算有整体降低和平滑的效果,高分辨率能放大局部坡度,降低连续性,掩盖变化趋势。Tarolli 等^[71]研究发现,对一些宽度 > 100 m 的滑坡,10 m 的 DEM 应用效果最佳,如宽度 > 10 m 则精度不足,< 10 m 则掩盖滑坡诱发的物理过程。除 DEM 外,DTA 分析方法也有粒度效应。例如地形统计窗口的粒度问题,郭芳芳等^[72]在对滑坡区域评价中比较和分析了坡度与起伏度在不同统计半径下与滑坡发育频数的关系,确定 2 km 为最佳分析粒度。因此,适宜的尺度选择有赖于对尺度效应的分析^[73],需要充分认识滑坡对象及其机理模型、统计模型和非线性模型的地形尺度效应,建立滑坡专业模型的 DTA 尺度选择方法和评价标准。

除了尺度选择,尺度转换是 DTA 尺度问题的另一方面^[74]。DTA 尺度转换就方向上有尺度上推和尺度下推^[10],方法上有聚合、重采样、插值、回归分析、变异函数和小波分析等^[73]。在滑坡研究中,人们主要关心的是尺度转换效应有何特点?对滑坡过程与规律表达有何影响?什么情况需要尺度转换?DTA 尺度转换与滑坡其他要素尺度转换之间如何保持平衡?不同尺度间的研究如何保持一致性?不同尺度的结果能否相互补充和验证?这些问题目前大多未有满意的回答。但可以肯定的是,DTA 尺度转换效应具有非线性和不确定性,不同尺度的方法与结论不能无差别地通用。而这种非线性和不确定性在一定程度上是有规律的^[75],通过探寻这些规律,可以建立 DTA 滑坡尺度转换的解决方案。

3 不足与展望

DTA 极大地方便了滑坡预测和评估的研究,这得益于 DEM 机械建模^[76]的优良特性:以简单的结构表达丰富的地形信息,可定量模拟、可视化地貌形态、水文过程乃至浅层地质构造。但其局限性也是客观存在的,具体表现在:

1) DEM 是 2.5 维的地表曲面模型,难以表达

坡度 $\geq 90^\circ$ 的地形,不能表达三维地下地形与深层地质构造,这也是 DTA 较少涉及深层滑坡研究的原因之一。

2) 由于是静态模型,单个 DEM 无法表达滑坡过程中地形变化的时态信息,难以回答如滑坡失稳的时间和速率问题。

3) DEM 的机械建模方式无法直接保存地形特征和地貌类型信息,需要通过 DTA 分析提取。然而,DTA 提取点、线、面特征的难度是依次递增的,地貌类型区分判断的自动化水平还较低^[77],对于复杂多样、不规则的滑坡地形形态,DTA 无法独当一面,需要借助遥感和人工解译进行判别。

4) DEM 数据误差^[78-79]和尺度效应带来的不确定性对滑坡模型精度的影响不可忽视,相关研究尚未跟上。

因此,在滑坡研究中,DEM 不能提供完备无误的地形信息,DTA 不能完全替代常规的地形分析。

未来研究至少可在以下 4 个方面加强:

1) 在滑坡的三维有限元、有限差分数值分析中,斜坡三维地质模型的构建是一项复杂耗时的前处理工作。从整体形态上看,三维地质模型的骨架正是地形,这意味着可利用 DTA 进行辅助建模。在一些岩性、地质构造单一的斜坡或简化的数值模型中,DEM 可以代替三维地质模型。那么,如何利用 DTA 辅助建模呢?已有的方案是将等高线矢量化,借助 AutoCAD、GoCAD、Surfer 等软件编辑和处理,生成可供数值分析软件如 ANSYS 和 FLAC3D 进行地质实体建模和网格划分的三维地形数据^[61,80]。可见,这类方法仍然十分繁琐,有必要探索快速、自动化的 DTA 辅助三维地质模型建模方案。

2) 地形因素与滑坡发育频率、分布、敏感性和稳定性之间的关系已有较多的研究,但地形与滑坡成因机理的定量研究尚显不足,未来 DTA 滑坡研究需要关注地形因素(地形因子、地形特征、形态模式)在滑坡岩土力学过程中的量化作用,探讨地形与斜坡土层厚度、应力分布、本构关系、变形特征和破坏模式之间的关系。

3) 近年来的滑坡研究中,三维激光地形扫描技术(LiDAR)的应用呈指数级发展态势^[81],预计未来 5~10 年内仍将受到滑坡学界的重视^[82]。LiDAR 的重要意义在于制作精细地形表达的高分辨率 DEM,有助于滑坡高分辨率识别、监测、制图和机理研究。DEM 分辨率的提升不单是简单的量变,它要求 DTA

进行理论与方法的转变,升级为高精度 DTA 方法,以满足滑坡研究对高精度地形分析的要求。此外,LiDAR 生成的数据严格说是数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),即“DEM+上覆地物”的模型,所以处理 DEM 与 DSM 之间的关系也是滑坡研究需要关注的。

4) 尺度性问题一直备受地学领域的关注,生态、遥感、水文、气象及地图制图领域在这方面的研究数量较多,但关于滑坡尺度的研究并不多见,有关 DTA 滑坡尺度问题的报道则更少。由于 3S 技术的发展,多尺度的地形数据快速积累,导致尺度问题日益凸显,这要求相关研究跟上步伐。未来 DTA 滑坡尺度研究可以参考 2 条主线进行:(1)分析和总结 DTA 滑坡研究的尺度效应,确定本底条件,获取尺度性参数,阐释尺度非线性与不确定性规律;(2)在方法论上,建立和完善 DTA 滑坡研究的尺度选择与尺度转换的规范化原则、方法和评价标准。

参考文献:

- [1] CRUDEN D M, VARNES D J. Landslide types and processes [J]. Landslides: Investigation and Mitigation, 1996, 247 (36): 36-75.
- [2] 舒斯特 R L, 克利泽克 R J. 滑坡的分析与防治[M]. 铁道部科学研究院西北研究所, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [3] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [4] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64 (1): 65-70.
- [5] 汤明高, 许强. 对非线性科学在地质灾害领域的认识和展望[J]. 灾害学, 2003, 18 (3): 74-80.
- [6] 陈自生. 论滑坡学[J]. 山地研究, 1996, 14 (2): 96-99.
- [7] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] WILSON J P, GALLANT J C. Terrain analysis: Principles and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [9] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 杨昕, 汤国安, 刘学军, 等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009, 64 (9): 1058-1062.
- [11] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [12] DAI F, LEE C. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong[J]. Geomorphology, 2002, 42 (3): 213-219.
- [13] 黄润秋, 李为乐. 5·12 汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (12): 2585-2588.
- [14] 梁音, 宁堆虎, 潘贤章, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J]. 中国水土保持, 2009 (1): 31-36.
- [15] 史德明. 我国热带、亚热带地区崩岗侵蚀的剖析[J]. 水土保持通报,

- 1984, 4 (3): 32-39.
- [16] 姚鑫, 许冲, 戴福初, 等. 四川汶川 Ms8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性[J]. 地质通报, 2009, 28 (8): 1156-1159.
- [17] 郭果, 陈筠, 李明惠, 等. 土质滑坡发育概率与坡度间关系研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21 (4): 607-612.
- [18] 吴彩燕, 乔建平. 三峡库区云阳一巫山段坡向因素对滑坡发育的贡献率研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37 (4): 25-29.
- [19] 王朝阳, 陈吉普. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[J]. 企业技术开发, 2007, 26 (12): 12-16.
- [20] TIBALDI A, FERRARI L, PASQUARÈ G. Landslides triggered by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry: an example from Ecuador[J]. *Geomorphology*, 1995, 11 (3): 215-226.
- [21] MATSUURA S, ASANO S, OKAMOTO T. Relationship between rain and/or meltwater, pore-water pressure and displacement of a reactivated landslide[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101 (1/2): 49-59.
- [22] AYALEW L, YAMAGISHI H, UGAWA N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan[J]. *Landslides*, 2004, 1 (1): 73-81.
- [23] MCKEAN J, ROERING J. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry [J]. *Geomorphology*, 2004, 57 (3/4): 331-351.
- [24] GLENN N F, STREUTKER D R, CHADWICK D J, et al. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity[J]. *Geomorphology*, 2006, 73 (1/2): 131-148.
- [25] SCHMIDT F, PERSSON A. Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices[J]. *Precision Agriculture*, 2003, 4 (2): 179-192.
- [26] CHEN C Y, YU F C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS[J]. *Geomorphology*, 2011, 129 (3/4): 387-397.
- [27] BORGA M, DALLA FONTANA G, CAZORZI F. Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 268 (1): 56-71.
- [28] VAN WESTEN C J, GETAHUN F L. Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models [J]. *Geomorphology*, 2003, 54 (1/2): 77-89.
- [29] CHEN R F, CHANG K J, ANGELIER J, et al. Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: The 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88 (3/4): 160-172.
- [30] JABOYEDOFF M, COUTURE R, LOCAT P. Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: Toward a progressive failure[J]. *Geomorphology*, 2009, 103 (1): 5-16.
- [31] GUINAU M, VILAJOSANA I, VILAPLANA J M. GIS-based debris flow source and runoff susceptibility assessment from DEM data—a case study in NW Nicaragua[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7 (6): 703-716.
- [32] YIN K, YAN T. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks[C]. Lausanne: Proceedings of the 5th international symposium on landslides, 1988: 1269-1272.
- [33] 程江涛, 蔡清, 陈星星. 中高山地区滑坡形成主控因子分析[J]. 土工基础, 2013, 35 (3): 62-65.
- [34] 乔建平, 吴彩燕, 田宏岭. 长江三峡库区云阳一巫山段斜坡坡度对滑坡的贡献率[J]. 山地学报, 2007, 25 (2): 207-211.
- [35] 汪旭涛, 谢昭宇, 胡凯锋. 中高山地区滑坡发育地形地貌因子敏感性研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35 (3): 597-603.
- [36] 王治华. 滑坡图像自动识别浅议[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15 (726): 10-15.
- [37] 王治华. RS+GCPs 获取滑坡基本信息[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15 (1): 94-101.
- [38] WOOD J. The geomorphological characterisation of digital elevation models[D]. Leicester: University of Leicester, 1996.
- [39] JABOYEDOFF M, DEMERS D, LOCAT J, et al. Use of terrestrial laser scanning for the characterization of retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46 (12): 1379-1390.
- [40] DUNNING S A, MASSEY C I, ROSSER N J. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning[J]. *Geomorphology*, 2009, 103 (1): 17-29.
- [41] 邹豹君. 小地貌学原理[M]. 北京: 商务印书馆, 1985.
- [42] MOORE I D, GRAYSON R B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27 (6): 1177-1191.
- [43] GILES P T, FRANKLIN S E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data[J]. *Geomorphology*, 1998, 21 (3/4): 251-264.
- [44] ROWBOTHAM D N, DUDYCHA D. GIS modelling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal[J]. *Geomorphology*, 1998, 26 (1/3): 151-170.
- [45] CARRARA A, CARDINALI M, DETTI R, et al. GIS techniques and statistical-models in evaluating landslide hazard[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16 (5): 427-445.
- [46] 兰恒星, 周成虎, 伍法权, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报, 2003, 48 (5): 507-512.
- [47] 谢谟文, 江崎哲郎, 周国云. 基于边坡单元的三维滑坡灾害评价的 GIS 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (6): 969-976.
- [48] 谷天峰, 王家鼎, 付新平. 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J]. 地理科学, 2013, 33 (11): 1400-1405.
- [49] MELELLI L, TARAMELLI A. An example of debris-flows hazard modeling using GIS[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, 4 (3): 347-358.
- [50] CHEVALIER G G, MEDINA V, HUERLIMANN M, et al. Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: application to the Central-Eastern Pyrenees[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67 (2): 213-238.
- [51] 龙毅. 扩展分维模型在地图目标空间信息描述中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [52] 南希. 地貌分维模型实现及其在地震诱发崩滑灾害敏感性研究中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

- [53] 郭利华, 龙毅. 基于 DEM 的洪水淹没分析[J]. 测绘通报, 2002(11): 25-27, 30.
- [54] BERTI M, SIMONI A. Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships[J]. *Geomorphology*, 2007, 90(1): 144-161.
- [55] 薛强, 张茂省, 朱立峰, 等. 基于多期 DEM 数据的滑坡变形定量分析[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 935-942.
- [56] 易顺民. 滑坡活动时间预测预报研究现状与展望[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(2): 157-163.
- [57] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 1153-1171.
- [58] DIETRICH W E, REISS R, HSU M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data [J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 383-400.
- [59] VAN BEEK L P H, VAN ASCH T W J. Regional assessment of the effects of land-use change on landslide hazard by means of physically based modelling[J]. *Natural Hazards*, 2004, 31(1): 289-304.
- [60] CLAESSENS L, KNAPEN A, KITUTU M G, et al. Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon[J]. *Geomorphology*, 2007, 90(1/2): 23-35.
- [61] 崔芳鹏, 胡瑞林, 刘照连, 等. 基于 Surfer 平台的 FLAC3D 复杂三维地质建模研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 699-702.
- [62] 陈蜀俊, 姚运生, 曾佐勋, 等. 三峡库首区蓄水前后构造应力场三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5611-5618.
- [63] CHUNXIANG W, SHIWEI B A I, TETSURO E, et al. GIS-based two-dimensional numerical simulation of debris flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1359-1362+1368.
- [64] 许春青. 滑坡预测预报模型比较分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [65] XU C, DAI F, XU X, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China[J]. *Geomorphology*, 2012, 145/146(1): 70-80.
- [66] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.
- [67] ZHOU Q, LIU X. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 369-378.
- [68] CHANG K T, TSAI B W. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping[J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1991, 18(1): 69-77.
- [69] ERSKINE R H, GREEN T R, RAMIREZ J A, et al. Digital elevation accuracy and grid cell size: Effects on estimated terrain attributes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(4): 1371-1380.
- [70] KIENZLE S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives[J]. *Transactions in GIS*, 2004, 8(1): 83-111.
- [71] TAROLLI P, TARBOTON D. A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, 10(5): 663-677.
- [72] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 131-135.
- [73] 秦承志, 呼雪梅. 栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J]. 地理研究, 2014, 33(2): 270-275.
- [74] 汤国安, 刘学军, 房亮, 等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 31(12): 1059-1066.
- [75] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 11-18.
- [76] 胡鹏, 高俊. 数字高程模型的数字综合原理研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(8): 940-942, 964.
- [77] 肖飞, 张百平, 凌峰, 等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 459-466.
- [78] 汤国安, 赵牡丹, 曹茜. DEM 地形描述误差空间结构分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(4): 349-352.
- [79] 卢华兴. DEM 误差模型研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [80] 王力. 基于 ANSYS 的一种三维地质建模方法[J]. 人民珠江, 2013(4): 19-23.
- [81] JABOYEDOFF M, OPPIKOFER T, ABELLAN A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review[J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 5-11.
- [82] DERRON M H, JABOYEDOFF M. "LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization" Preface[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(9): 1877-1890.

A Review on Application of Digital Terrain Analysis in Landslide Researches

XIONG Haixian^{1,2,3}, HUANG Guangqing³, GONG Qinghua³, YUAN Shaoxiong^{1,2,3},
CHEN Bo³, ZHANG Dongliang^{1,2,3}

(1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;
3. *Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China*)

Abstract: With efficient performance, Digital Terrain Analysis (DTA) has been the predominant means of terrain analysis in landslide researches. Based on previous landslide literature, this paper reviews the basic application of DTA in landslide studies, including analysis of terrain factors, analysis of topographic morphology, terrain unit partition, and coupling analysis of DEM and landslide models. There are various applications of terrain factors, whose relationship with landslides is widely studied so as to assess their susceptibilities to landslide and then build prediction and elevation models. Analysis of topographic morphology intends to distinguish and recognize desired landslide terrain from normal terrain. It is possible to recognize the relief forms readily developing to landslides with further study of the correlation between specific terrain forms and landslides. Unit network partitioned by DTA may serve as elementary zones for statistics or other analysis. In more than one way, DEM is frequently incorporated into many landslide models in need of terrain information. Besides basic applications, we discuss scale issues of DTA in landslide studies, involving scale selection and transformation. Limitations of DTA are individually discussed, with the conclusion that DEM fails to characterize complete topographic features of landslides and thus DTA is unable to completely replace conventional terrain analysis method. At last, we propose 4 aspects to be further improved, including: 1) developing DTA-assisted 3D geological models for landslide numerical analysis; 2) probing into the relationship between topographical factors and geomechanical parameters; 3) enhancing the application of LiDAR in landslide studies; 4) analyzing the scale effects of DTA in landslide studies and normalizing rules of scale selection and transformation.

Key words: landslide; DEM; Digital Terrain Analysis; terrain factors; terrain unit; scale; LiDAR; landslide models