

我国数字高程模型与数字地形分析研究进展

汤国安

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 数字高程模型是最重要的国家基础地理信息数据, 基于GIS的数字地形分析的理论、方法与应用, 是当今地理学、地貌学界, 特别是地理信息科学研究的热点问题。本文从DEM的数据模型、数字地形分析的不确定性、分析方法、尺度效应、高性能计算方法以及地学应用等方面, 对我国学者在该领域的研究情况, 特别是研究成果进行较全面的梳理与分析。综述显示, 我国具有一批从事数字高程模型与数字地形分析的高水平研究力量, 研究方向紧跟国际前沿, 并取得了丰硕的成果, 部分研究内容具有显著创新, 年轻一代科学家正加速成长。在黄土高原、青藏高原的区域数字地形分析方面更彰显我国科学家的优势与特色, 在国际学术界产生了重要的影响。

关键词: 数字高程模型; 数字地形分析; 地貌; 测绘; 地理信息科学; 研究综述

DOI: 10.11821/dlxb201409006

地形与地貌是最重要的自然地理要素。多年来, 对地形的科学表达与分析一直是地理学核心的研究命题, 也是测绘学、地图学及地貌学研究的热点。数字高程模型 (Digital Elevation Model, 简称DEM) 是地表形态的数字化表达, 蕴含了丰富的地学应用分析所必需的地形地貌信息^[1]。数字地形分析 (Digital Terrain Analysis, 简称DTA) 是在DEM上进行地形属性计算与地形信息提取的数字信息处理技术^[2]。DEM概念于1958年由Miller首次提出, 我国学者陈述彭、王之卓、廖克、刘岳等人最早在七十年代末采用格网DEM进行了计算机辅助制图研究^[3-4], 何建邦等在数字地形分析上亦进行了早期的探索^[5]。经过几十年的发展, DEM的诸多基础理论问题包括DEM数据模型构建、数字地形分析的方法、数字地形分析的精度与尺度问题等, 均得到了深入研究, 基于DEM的数字地形分析理论与技术方法正逐步走向成熟。与此同时, 由于DEM简洁的数据组织方式、对地形的直观表达、简单高效的地形因子解译方法, 以及DEM数据的不断丰富与完善, 数字地形分析方法在地貌、水文、土壤等地学领域研究中得到了广泛应用, 在测绘与制图、水土保持、水文地质灾害监测与控制、土地利用管理与规划等实践中也发挥了重要作用。

关于DEM、DTA基础理论与应用的研究一直是地球信息科学的热点。近年来, 我国学者在各类科学研究项目, 特别是国家自然科学基金的支持下, 在该研究领域也做出了突出贡献, 本文拟系统梳理我国学者在该领域中的研究成果与进展, 探讨今后发展的方向。

1 DEM数据模型研究

数字高程模型定义为通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟^[1]。王家

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171320); 江苏省高等学校重大科研计划项目 (13KJA170001) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171320; Major Scientific Research Projects of Universities in Jiangsu Province, No.13KJA170001]

作者简介: 汤国安 (1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事GIS空间分析及DEM数字地形分析方面的教学与研究工作。E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

耀 (2004) 等曾系统总结了 DEM 数据模型包括规则格网、不规则三角网、等高线、离散点、断面线和混合式等六种类型^[6]。其中,前三者最为常用,且可以相互转换,在一定程度上满足了地学研究 and 应用需求。然而,对于形态变化更为复杂的地理对象,或具有更高保真性需求的地形分析,上述 DEM 数据模型往往不能满足要求。我国学者在 DEM 数据模型改进与构建方法上展开了研究,在高程内插方法、地图代数方法、高精度数学曲面方法以及顾及地形特征要素方法上取得进展。

DEM 高程内插方法可分为整体内插法、局部分块内插法、逐点内插法和剖分内插法。整体内插法由于其主要反映地形起伏宏观趋势,不能有效表达局部地形特征,在 DEM 构建中并不常用。局部内插方法上,我国学者研究了二元样条函数^[7]、Coons 曲面^[8-9]及多层曲面叠加内插^[10]等内插方法;逐点内插的研究主要集中在内插函数的选择、权函数确定的改进算法方面^[11];剖分内插法主要面向三角网 DEM,现已提出了多种三角网剖分算法及快速更新方法^[12-13]。

基于地图代数原理的 DEM 构建方法 (MADEM) 由胡鹏 (2007) 提出,是一种在最速下降线水平投影上的线性插值方法。该方法可充分利用全部高程数据资料,其精度高于传统的三角剖分及克里金、反距离权重等插值方法^[14]。岳天祥等 (2007) 提出的基于微分几何曲面论的曲面建模方法 (HASM),利用离散点及等高线数据建立高精度 DEM,精度较传统的三角网数据结构有大幅提高^[15-16],并适用于实时动态模拟^[17]。

面对现有格网 DEM 在描述地形特征要素上的失真问题,我国学者还研究了顾及地形特征要素的 DEM 数据模型,如特征嵌入式 DEM^[18]、面向平原河网地区的 DEM^[19]以及梯田地形 DEM^[20-21]等,杨勤科等 (2007) 系统介绍了国外流行的水文地貌关系正确 DEM 建立方法^[22-23]这些成果都在相当程度上提高了地形数字化描述的保真性与实用性。

2 数字地形分析不确定性研究

不确定性是地理空间数据的基本特征,空间数据及分析的不确定性一直是地球信息科学研究的核心命题之一^[24]。数字地形分析的不确定性包括 DEM 数据的不确定性和 DTA 解译算法的不确定性两个方面^[25]。

2.1 DEM 数据不确定性

误差通常被定义为观测值与真实值的差异程度,而不确定性是对真值的认知或肯定程度,是更为广泛意义上的误差^[26]。DEM 数据的不确定性主要表现在:数据源的不确定性和建模方法引起的不确定性。由于 DEM 是对真实地表的离散化采样过程,数据源的不确定性是指在 DEM 数据采样过程中产生的系统性误差^[2],野外测量、地形图数字化和摄影测量等数据采集过程中的采样点密度及分布、人员、设备等因素都是不确定性的来源。DEM 建模的不确定性是指在 DEM 构建的过程中,由于采用不同的插值模型导致的插值表面与真实表面之间的差异^[14]。

对于 DEM 数据不确定性描述,常用中误差、相对中误差、平均误差、标准差等统计数值模型来衡量误差的大小^[25]。此外,王耀革等 (2008)、刘学军等 (2008) 采用空间自相关性指数^[27-28]描述误差的空间相关关系。胡鹏等 (2007) 采用频率分布图、等 (高) 值线图、误差图等可视化模型^[14]来表达数值模型无法反映的误差的空间分布情况。

对 DEM 数据不确定性的度量方法可总结为三类,分别基于统计观点、几何观点和解析观点。基于统计观点的方法主要有检查点法、传递函数法、协方差函数法等^[29]。基于几何观点的方法是指将回放后的地形特征线和原有的线进行几何匹配,根据两者差异确定其不确定性的方法,最典型的有等高线套合分析法^[30]。从解析观点看,采取中误差作为评价高程内插指标的确值得商榷,高程内插误差的产生源于内插模型对复杂地表的函数逼近,

误差值应是真实地表函数与逼近函数之差即逼近误差。汤国安 (2000) 提出了DEM地形描述误差概念与模型^[31], 随后相继有学者在此基础上分析了DEM地形描述误差的空间结构^[32], 改进了DEM地形描述误差模型^[33-34], 探讨了地形描述误差的性质、影响因素及其对DEM地形分析与应用的影响程度^[35-36]。

此外, 已公开发布的覆盖全球的DEM数据越来越丰富, 如GTOPO30 [<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>]、SRTM DEM [<http://srtm.csi.cgiar.org>]、ASTER GDEM [<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>]、World DEM [<http://www.astrium-geo.com>] 等, 为DEM的广泛应用提供了数据基础。我国学者对不同数据源在不同地区的精度评价和适用性方面展开了部分研究^[37-38], 分析其应用适宜性特征。

2.2 DEM解译算法的不确定性

DEM解译算法是指基于DEM数据提取地形变量或地形特征要素的数学模型或算法。DEM解译算法的不确定性是指由于所设计解译算法的差异而引起计算结果的不确定性, 或由于DEM数据模型的差异而引起解译结果的差异性。我国学者在该方面的研究, 主要集中在坡度、坡向以及径流算法等方面。周启鸣、刘学军等系统研究了不同差分计算模型对坡度、坡向、曲率等坡面因子的不确定性, 提出了三阶不带权差分算法具有较高的精度^[39-41]。邬伦等 (2006)、刘学军等 (2006)、秦承志等 (2006) 研究了不同流向算法对沟谷网络、集水区以及水文模拟的不确定性^[42-44]。这些研究为数字地形分析中地形算子的合理选取提供了依据。

3 数字地形分析方法研究

数字地形分析方法主要包括地形因子提取、特征地形要素提取及地形统计分析等方面。我国学者在数字地形分析方面进行了系统而深入、全面的研究。

3.1 地形因子分析

地形因子 (或称: 地形属性、地形变量、地形要素等) 是为有效的研究与表达地貌形态特征所设定的具有一定意义的参数或指标。基于DEM的地形因子提取是数字地形分析的基础与核心内容。目前, 基于DEM的各种坡面地形因子分析算法已较为成熟。除了坡度、坡向、坡长、平面曲率、剖面曲率、地形粗糙度、地形起伏度、高程变异系数、地表切割深度等传统的坡面地形因子外^[45], 我国学者根据不同地域特点及实际研究工作的需要, 提出了地形信息容量^[46-47]、地形复杂度指数^[48]、地形动力因子^[49]、流水侵蚀潜能因子^[50]、流域分布式侵蚀学坡长^[51]和流域LS因子^[52]等。这些成果丰富了地形因子的内涵。面对众多的地形因子, 汤国安 (2005)、周启鸣 (2006) 等按照不同依据对其进行了系统分类。张磊等 (2013) 以应用目标、计算方法、尺度特征等为依据对地形因子进行了系统整合^[53], 为提高地形因子分析与应用的有效性提供了依据。

此外, 我国学者在地形因子的算法与精度方面进行了改进, 提出了坡度计算的适宜窗口与最佳尺度选择方法^[54-55], 实现了对坡度、坡向、地形粗糙度、地势起伏度等地形因子算法模型的评价与改进^[56-59], 以及坡向变率提取中的误差消除方法等^[60]。

3.2 特征地形要素分析

特征地形要素即对地面形态的空间分布具有控制作用的点、线或面状要素, 构成了地貌形态及其空间格局的基本框架, 对于地貌类型的识别与划分以及地形地貌分析有重要意义。

地形特征点包括山顶点、裂点、径流节点、沟头点、鞍部点等。我国学者新发展的地形特征点提取方法包括: 基于反地形汇流累积量法的山顶点提取^[61]、基于汇流跃变性的径流节点提取^[62]、基于流域边界线上高程相对低点的鞍部点提取^[63]、基于汇流模型模拟特征

线求交法^[64]、以及基于窗口分析与等高距分层拓扑关系的鞍部提取法^[65]等。沟谷裂点可以通过基于能量累积的窗口分析方法^[66]和纵剖面识别法^[67]进行提取,其分析研究主要集中在裂点发育与溯源迁移^[68]、裂点后退速率与断层活动的关系^[69]、以及基于裂点的古地震序列判断^[67]等方面。此外,沟头点的提取发展了利用沟沿线、沟谷与沟沿线交点、最大变坡点等新方法^[70]。罗明良等^[71] (2008) 从地形特征点的空间组合关系-格局入手,实践了地形特征点簇提取与分析方法,实现了山顶点、径流节点和鞍部点的一体化组织,并由此实现对地貌形态类型的自动划分。

关于线状地形要素的提取与分析方面,我国学者也取得重要进展。山脊线、山谷线作为反映地形结构特征信息的典型线状要素,其提取方法得到了广泛关注,根据数据来源不同可以分为基于等高线的方法^[72-73]、基于不规则三角网的方法^[74]、基于规则格网的方法^[75-77]和基于激光点云的方法^[78];而依据算法原理的不同,有基于地形表面水流方向分析的方法^[71]、基于图像处理技术的方法^[76]、基于地表几何形态分析的方法^[75]、以及基于地形表面几何形态分析和流水物理模拟分析相结合的方法^[79]。沟沿线作为最能体现黄土地貌形态特征的线状要素和黄土地貌单元划分的重要分界线,其提取方法一直是数字地形分析领域备受关注的热点问题。闫国年等 (1998 年) 最早提出了基于形态学的沟沿线提取方法^[82],此后,相继提出了坡度变异法^[80]、汇流路径坡度变化特征法^[81]。晏实江 (2011) 等引入了 LOG 边缘检测算子^[83]、改进主动轮廓模型 (Snake 模型) 等新的方法和模型^[84-85],提高了沟沿线自动提取的精度和效率。

近几年,关于面状地形要素的提取与分析研究开始活跃,研究成果主要集中在正负地形提取与分析方面。周毅等 (2010) 提出了坡面形态与汇流特征相结合的方法的正负地形提取方法,构建了正负地形描述指标,研究了黄土高原重点水土流失区正负地形空间分异特征^[86-87]。陈永刚等 (2012) 提出了采用多方位地形晕渲法提取正负地形^[88]。

3.3 其他方法创新

鉴于传统数字地形分析方法多依赖地貌局部特征来揭示地貌整体形态及空间结构,在认识与分析宏观地貌特征方面存在局限,我国学者将一些新的理论与方法引入到数字地形分析领域,丰富了数字地形分析的理论与方法体系。汤国安 (2003) 引入地学信息图谱分析方法,提出了黄土高原地面坡谱的新理论,研究结果显示,坡谱可以很好地描述黄土地貌塬、梁、峁及其组合形态的空间分布特征;随着黄土地貌形态在黄土高原不同地理空间的变异,坡谱的各种定量指标也呈现有规律的变异特征。基于坡谱的黄土地貌类型区自动划分进一步体现了坡谱的地学意义。该方法成为利用微观地形因子研究宏观地貌特征的一次有益探索^[89-92]。随后,流域边界剖面谱^[93]和面积高程积分谱分析方法^[94]的应用,进一步丰富和完善了坡谱分析理论。此外,基于 DEM 的地形纹理研究^[95]和结合景观生态学方法的坡面景观格局研究^[96-97],也为地貌形态空间变异规律的认识提供了新的契机。

4 数字地形分析的尺度问题

DEM 作为数字化的地形模型,试图通过离散的方式表达连续变化的地形表面,因而,DEM 及基于 DEM 的数字地形分析具有明显的尺度依赖性。我国关于数字地形分析尺度问题的研究集中在尺度效应、最佳尺度确定及尺度转换三方面。

4.1 数字地形分析中的尺度效应

刘学军等 (2007) 提出了数字地形分析中的尺度体系,描述了各尺度之间的依赖关系,并指出结构尺度和分析尺度是尺度问题关注的重点^[98]。尺度效应是指由尺度所引起的对象表达和分析结果上的变化。DEM 的结构尺度和分析尺度会引起数字地形分析的尺度效应,其研究主要包括 DEM 的水平分辨率、垂直分辨率及分析窗口等方面的尺度效应。

由于水平分辨率在DEM表达和分析中的重要意义,其尺度效应研究成为重点,研究内容涉及DEM水平分辨率与提取的地形因子或地形特征之间关系,特别在坡度^[99-101]、坡向^[102]、河道长度^[103]、单位汇水面积^[104]等重要地形因子方面进行了深入的研究。另一研究重点是DEM水平分辨率与地学模型模拟结果之间的关系,包括DEM分辨率对TOPMODEL水文模拟^[105-106]和土壤流失模型应用的影响^[107]。

DEM垂直分辨率所引起的尺度效应是指DEM高程数值表达精度(即小数位数)对地形分析结果的影响。房亮(2006)研究了垂直分辨率对地形参数计算精度的影响规律^[108],王春在讨论DEM高程数值精度与地形形态精度的区别与联系的基础上,提出了地形描述形态精度的概念^[109]。DEM地形参数的计算还受分析窗口大小的影响,刘学军(2009)等认为,DEM地形参数计算中过分追求计算精度会导致结果只具备数学意义而没有地形意义^[110]。此外,在数字地形分析中栅格单元内部地形的复杂性和变异性导致DEM格网单元具备单元异质性,单元异质性依赖于DEM水平分辨率和分析窗口尺度。单元异质性的定量描述^[111]可以帮助理解地学模型中的地学过程和反馈机制。

4.2 数字地形分析中的最佳尺度

由于尺度效应的存在,数字地形分析在不同的应用目标中需要确定对其适应的分析尺度,以保证结果的合理性和有效性。目前常用的方法为地形参数法,它通过研究一个或多个地形参数与DEM分辨率或DEM误差的关系,进而确定适宜DEM分辨率。常用到的地形参数有地形粗糙度^[112]、平均坡度^[39, 113]、曲率^[114]、地形信息熵^[115]等。此外,地统计学、分析窗口和应用模型等方法也被应用到最佳尺度确定。地统计学法是利用非参数密度估计法,从数据源本身结构出发确定DEM水平适宜分辨率^[109]。利用地学模型计算结果对比确定最佳DEM分辨率尺度,是常用的最佳尺度确定方法。另一种最佳尺度的研究是分析窗口尺度,朱阿兴等(2008)研究邻域尺度对地形参数和土壤制图的影响,从而确定最佳尺度^[116];刘学军等(2009)研究不同分析窗口下拟合曲面和DEM曲面的匹配程度,探讨DEM坡度计算的适宜窗口^[110]。

4.3 数字地形分析中的尺度转换

数字地形分析的尺度转换指不同水平分辨率的DEM及其地形参数的转换。尺度转换按照内容可分为对DEM数据本身的转换和DEM提取地形参数的尺度转换;按照尺度转换的方向又分为“尺度上推”(Upscaling,指由细分辨率向粗分辨率转换,强调概括和综合)和“尺度下推”(Downscaling,指由粗分辨率向细分辨率转换,强调具体与细化)。目前,我国学者对数字地形分析中的尺度转换主要涉及两方面,一方面是DEM数据的尺度上推,也称为DEM模型简化和数据压缩。朱长青等(1999)在DEM尺度转换中引入小波分析实现DEM数据压缩^[117],此类方法被国内学者广泛采用,如利用DWT、IWT、SPIHT、M进制小波编码等压缩DEM数据^[118-121]。此外,各种数学方法也运用到DEM简化中来,如滤波分析^[122]、点扩散函数法^[114]等;费立凡等(2006)利用三维Douglas-Peucker算法实现了DEM自动综合,并取得了较好效果^[123]。

另一方面是地形因子的尺度转换研究。由于缺乏补充信息,DEM本身进行尺度下推较为困难,但是,提取的地形因子随尺度的变化在统计上确有规律可循,其研究主要集中在坡度、单位汇水面积和地形湿度指数的尺度下推。如陈燕(2004)采用图谱统计分析建立了1:5万与1:1万比例尺坡度的转换图谱^[124],杨勤科(2008)采用直方图匹配方法实现坡度的尺度转换^[125],杨昕(2007, 2011)采用分形方法探讨了黄土高原地区坡度尺度转换模型^[126]、单位汇水面积的尺度下推模型等^[104],徐静(2008)等实现了地形湿度指数的尺度转换^[127]。

尺度转换的研究成果有助于获得适宜分辨率下的DEM数据或参数。然而,现有的转换模型中尚不能实现对DEM本身的尺度下推,模型的地域适用性还有待完善。

5 DEM与数字地形分析并行计算

海量数据的高效的处理是当前GIS面临的一大挑战,DEM数据亦呈现多比例尺、多分辨率、海量化的特征。作为高性能地学计算的重要途径,并行计算技术给海量空间数据的处理带来了新的契机^[128]。将数字地形分析的计算体系由串行计算转化为并行计算是发展的必然趋势。目前,我国学者在并行DEM构建、并行数字地形分析算法及并行地形可视化等方面做了大量的研究。

5.1 并行DEM构建

并行DEM构建的研究主要包括并行构建规则格网DEM、并行构建不规则三角网、并行提取等高线等^[129]。内插算法的并行化是并行构建规则格网DEM的重要研究内容,主要包括数据并行和主从式计算两种处理模式^[130-133]。近年来,基于LiDAR的DEM获取技术的迅速发展,对DEM构建技术提出了新的要求。传统的并行策略出现技术瓶颈,而基于新型硬件架构的多核并行技术,成为提高规则格网DEM构建能力的重要途径^[134-137]。不规则三角网生成算法主要包括分割合并、三角网增长和逐点插入三种方式^[138],但计算过程较为复杂。三角网生成并行计算已成为研究重点关注的问题^[139-140]。

5.2 并行数字地形分析算法

并行数字地形分析算法的研究成果多集中在邻域统计分析、特征地形要素提取、水文分析、可视性分析等方面。邻域统计型算法是数字地形分析常用的分析方法,通过对邻域统计型算法进行并行化改造,可以有效提高其计算效率和处理规模^[141-143]。江岭等(2013)以坡度算法为样本,从数据并行的角度,对并行计算环境下的数据划分粒度、I/O策略及结果融合方法进行了分析,构建局部型地形因子的并行计算方法^[144-145],该方法可快速对局部型地形因子串行算法进行并行化改造,提高算法的执行效率,具有较好的并行性能。刘凯等(2013)以地形起伏度算法为例,重点研究了数据划分和光圈效应处理策略^[146],结果显示窗口大小和数据集规模对邻域统计型并行算法效率有较大影响。特征地形要素对地表的空间分布特征具有控制性作用,许多学者采用不同并行方法设计了特征地形要素的并行提取算法,取得了良好的应用效果^[147-148]。水文分析是数字地形分析的一个重要内容,针对其处理海量DEM时常面临数据密集和计算密集问题,我国学者从高性能和高吞吐率两种并行计算模式对水文分析的并行算法进行研究。基于集群(机器)、多核CPU及GPU等硬件设备,已形成了多种水文分析的高性能计算方法^[149-152],这些并行算法与串行算法相比,均不同程度地提高了水文分析的计算效率。秦承志等(2012)基于GPU实现了DEM预处理算法和多流向算法的并行化,结果表明该并行算法较串行算法的加速比高达10倍左右^[153],且该并行策略具有较好的可移植性。与高性能计算不同,高吞吐率计算更强调处理数据的吞吐率。Gong等(2013)^[154]在高通量计算环境下,通过预处理DEM数据,按照低分辨率DEM的分水岭边界实现高分辨率DEM数据进行不规则切分,该算法有效避免了数据分割粒度大小不等造成的计算异步问题,但DEM的预处理和后处理如何并行化尚未涉及。可视性分析计算量大且复杂,宋效东等(2013)基于MPI技术研究了可视性分析的并行计算方法,取得了较好的并行性能^[155]。张刚(2013)等从负载均衡的角度详细分析了数据并行的特征,设计了通用且有效数据可达的DEM数据划分策略,实现了分布式并行通视分析算法^[156]。该方法有效地提高了海量数据的通视分析算法的计算效率,动态数据划分方案有望为并行环境下地形分析提供新的思路。

5.3 并行地形可视化

地形可视化是研究数字地形模型或数字高程模型的显示、简化、仿真等内容的重要技术。面对与日俱增的DEM数据,传统的桌面系统受处理速度、GPU绘制能力和显示分辨

率的限制,难以满足海量数据可视化分析的需求,我国学者在分布式并行技术上的突破,为解决此问题提供了有效途径^[157]。海量DEM并行可视化技术主要包括海量数据自适应分割、任务动态调度及多线程并行处理三个方面。该技术在地质分析中的应用不仅很好满足了地质数据分析的要求,同时有助于对试验结果细节的发现与挖掘^[158-159]。

6 数字地形分析应用研究

数字地形分析的相关理论与方法为传统的地理学研究提供了新的思路与重要的技术手段。近年来,我国学者将数字地形分析广泛应用于水文、土壤、气象等地质分析研究中,并取得了重要的成果。

6.1 地貌学应用

我国基础地理数据库多尺度DEM的建立,为基于DEM的地貌分析应用创造了良好条件。其中,基于DEM的地貌分类及分区,是数字地形分析在地貌学研究中应用的重要方面。周成虎等^[160]利用DEM数据,完善了数字地貌分类的指标体系,提出了中国陆地1:100万数字地貌三等六级七层的数值分类方法,并依此编绘了《中华人民共和国地貌图集》,该成果获2009年国家自然科学二等奖。

6.1.1 DEM在黄土高原研究中应用 黄土高原与青藏高原因其特殊的地理位置、特有的地貌形态及复杂独特的成因机理,而成为我国数字地形分析在地貌学应用的重要区域。基于DEM的黄土高原地貌研究,主要包括黄土高原地貌形态空间格局和地貌演化发育研究等方面。闫国年等早在1998年就在基于DEM的黄土地形识别与分割方面做出了有益探索^[82];李发源等基于多尺度DEM数据,基于地形信息图谱方法研究黄土高原地貌形态及空间分异规律^[91-92];不同学者分别从基于DEM的核心地形因子^[53]、面积高程积分^[94]、纹理分析^[95]、正负地形^[86]、流域剖面谱^[93]、坡面景观^[97]、地形特征点簇^[71]等不同角度,对黄土地貌的形态特征及其空间分异进行分析。在地貌演化发育方面,学者们主要从流域尺度和区域尺度对黄土地貌演化机理与发育态势进行研究。例如,基于多时期DEM数据,对黄土小流域的地形与正负地形演化进行模拟^[161];在区域尺度上,以地质图、DEM、遥感影像及实测数据等多源数据为基础,利用GIS相关分析方法模拟了第四纪黄土堆积前原始地形的数字高程,分析了黄土高原地貌演化的继承性特征^[162]。在黄土高原数字地形分析上,已经形成系列研究成果。

6.1.2 DEM在青藏高原研究中应用 DEM数据在青藏高原地貌研究中的应用主要包括三维地形可视化表达、地形参数提取及分析、以及多学科多技术综合应用。在三维地形可视化表达方面,刘勇等(1999)建立了兰州以南、青藏高原东北部边缘的美武高原数字高程模型,使高原夷平面得到充分的展示,弥补了传统的地理野外考察工作的局限性^[163]。在地形参数提取及分析方面,韩海辉等(2012)利用DEM提取地貌参数,并结合剖面分析法,探讨了青藏高原地形与隆升的关系^[164-165];姚永慧等(2007)在提取地貌参数的基础上,对青藏高原进行了地貌分区^[166]。随着遥感和地表高程影像的广泛应用,深入挖掘DEM数据信息并结合地质学、沉积学、构造学、地貌学等多学科理论的应用研究,已成为当前青藏高原地貌研究的主要方向,研究内容主要包括水系分析^[167-168]、构造分析^[169]、古沉积面恢复与古侵蚀量计算^[170]、冰川变化监测^[171]等。

6.1.3 DEM在月球探测研究中应用 数字地形分析在月球地貌研究中也取得了一系列成果。我国科学家利用“嫦娥一号、二号”月球探测器所得到的数据^[172-173]制作了全月500米分辨率DEM和虹湾地区局部地图^[174]。月表撞击坑作为月球地貌的基本单元,是月球地貌研究的基础。我国学者根据相关DEM数据,在月球撞击坑的提取与特征分析上做了大量工作,主要成果包括:利用DEM探索月球全球重力场分布情况^[175];利用面向对象^[176]、数

学形态学^[177]、特征匹配^[178]等方法提出了不同的撞击坑提取方法;对撞击坑的参数^[179]、撞击坑形态特征^[180]、撞击坑形成过程^[181]等问题进行探讨。此外,月表形貌特征与格局^[182]等问题也得到了部分学者的关注。

6.2 水文学应用

地形特征的差异导致了水文特征空间差异性,地形要素间的拓扑关系和几何形状直接影响着流域的性质^[182-183]。在水文学研究中,我国学者主要利用数字地形分析技术,对静态的水文特征分析和动态的水文过程模拟两个方面进行了研究。静态水文特征分析主要包括水文地貌关系正确的DEM构建^[22]、DEM数据平地 and 洼地的处理方法^[184-185]、水文流向算法的改进^[186-187]以及水文特征对象提取^[188]等方面。在动态水文过程模拟方面,现有研究主要包括分布式水文建模方法^[189]、水文模型中DEM的尺度效应^[190-191]以及流域划分对水文模拟影响等方面^[191-192]。近年来,在GIS技术支持下,以徐宗学、任立良、王中根等学者提出了一系列的水文模型^[189,193-196],在不同样区不同尺度上实现了对水文过程的动态模拟^[197-199],取得了重要的研究成果。在数字流域研究方面,王光谦等基于数字流域模型对流域侵蚀产沙量进行了计算^[200],并在黄土高原地区得到了成功的应用。

6.3 地质灾害

地震、滑坡、崩塌等地质灾害的发生与地形存在着密切的联系。利用DEM作为数据源进行地质灾害分析一直是DEM应用的一个重要方面。其中,朱阿兴等(2006)基于DEM与专家知识进行滑坡危险性的模糊评估^[201],另有学者利用DEM派生出的地形因子对于滑坡的影响因子进行敏感性分析,确定了有利于滑坡发育的影响因子^[202-203]。

6.4 土壤学应用

DEM在土壤学中的应用主要体现在土壤采样策略、土壤侵蚀和土壤属性研究等方面。DEM在土壤采样中的应用主要是土壤采样方案的设计和土壤制图等^[204],基于DEM的土壤属性研究则多集中在地形湿度指数^[205-206]方面。在土壤侵蚀方面,傅伯杰等较早利用DEM研究了土壤侵蚀与地形的关系,并开展黄土高原大尺度流域土壤侵蚀估算研究^[207],杨勤科、刘洪义等致力于基于DEM的区域土壤侵蚀地形因子研究,在第四次全国土壤侵蚀普查项目提取了全国范围的LS因子,并进行了典型地区侵蚀地形特征分析^[208-210]。在此基础上,我国学者还基于DEM探讨了区域土壤侵蚀与多样性问题^[211-212],取得了部分研究成果。

6.5 气象与气候学应用

坡度、坡向、高程等地形因子深刻影响着太阳辐射的地表分异,从而影响着局地气象气候要素的时空分布。我国学者利用数字地形分析的理论与方法在气候与气象学领域也开展了应用研究,主要包括两个方面,一是基于DEM的气象要素估算模型研究,包括曾燕、邱新法为等(2005)基于DEM建立了天文辐射分布式计算模型^[213],杨昕等(2004)建立了总辐射模型^[214-215],另有学者基于DEM对降水径流模型^[216]、区域地表蒸散发估算^[217]、山区气温的空间模拟模型等^[218]进行了研究;二是基于DEM的气象要素插值方法研究,如降水空间插值方法^[219]和陆地多年平均温度插值方法研究^[220-221]。

6.6 其他方面的应用研究

我国学者对DEM在地图的地形渲染、遥感、人文地理等方面的应用研究也多有涉及。随着图形学技术的不断发展,基于DEM的地形渲染方法除了传统的细节层次模型(LOD)^[222]、高程分层设色、光照阴影等方法,又发展了许多新的图形渲染技术,如水墨风格地形绘制技术^[223]。DEM在遥感上的应用主要体现在利用DEM对遥感影像的畸变进行校正以及与遥感影像共同作为数据源进行地貌研究。诸多研究表明,基于DEM的数字地形分析技术与遥感技术相结合,可为农、林业生产及资源调查提供多区域尺度、高更新频率、高估算精度的服务指导^[224-225]。数字地形分析在城市及人工建筑^[226-227]的空间分布与规划

方面也出现了很好的应用研究案例。

7 总结与展望

7.1 总结

随着GIS已经逐步成为地理学研究的第三代语言^[228],DEM也逐步替代等高线成为地形描述与分析的主要信息载体。由于地形地貌在地理学研究中的基础性地位,DEM及基于DEM的数字地形分析研究无疑成为地理信息科学研究的重要组成部分。我国在DEM信息特征及数字地形分析方面的研究一直紧跟国际发展前沿。近十年来,我国在该研究领域取得了突飞猛进的发展,一批在国际有重要影响的研究成果不断涌现,特别以黄土高原数字地形分析研究为代表的区域地貌研究,更在理论与方法上有重要的突破,凸显中国科学家的重要贡献。2006年,首届TADTM (Terrain Analysis and Digital Terrain Modeling) 国际会议在南京师范大学召开,2013年该国际会议(改名为Geomorphometry 2013)再次在南京师范大学举行,显示了国际同行对我国在数字地形分析研究成果的重视与肯定。

据不完全统计,近五年国家自然科学基金委对DEM及数字地形分析方面的相关研究给予了大力支持。“基于DEM的黄土高原地貌形态空间格局研究”获国家自然科学基金重点项目资助,另有面上及青年项目50项。国家863项目“数字地形分析并行计算与中间件”也取得重要成果,可望推动我国数字地形分析运算模式的全面提升。在教材建设上,目前已有《数字高程模型及地学分析的原理与方法》(2005)、《数字地形分析》(2006)、《数字地面模型》(2006)、《新数字高程模型理论、方法、标准和应用》(2007)、《数字高程模型教程》(2010)等专著与教材出版,详尽介绍了数字地形分析的理论与方法,形成了一批代表性成果。在队伍建设上,我国从事DEM及数字地形分析的研究团队不断发展,并形成了以南京师范大学、中国科学院地理科学与资源研究所、西北大学、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所以及武汉大学等特色研究群体,研究成果已被广泛应用到国家建设与科学研究的各个领域,展示方兴未艾的发展前景。

7.2 未来研究展望

随着DEM获取方式的不断发展,高分辨率DEM的获取越来越高效、便捷,我国DEM与数字地形分析的发展将面临更大的机遇与挑战。今后的研究重点一方面要丰富DEM的地学属性内涵,另一方面,要深化数字地形分析的理论与技术方法探索。研究方向实现多方面拓展,从传统的地形研究拓展到地貌研究,从侧重山丘区的研究拓展到平原河网、海底地形研究,从地形现状研究拓展到地形演变的过程与机理研究。特别是,要将数字地形分析的研究思路与方法拓展到其它地学场模型,发展通用地学场模型分析理论与方法。

参考文献 (References)

- [1] Tang Guoan, Li Fayuan, Liu Xuejun. Digital Elevation Model Course. Beijing: Science Press, 2010. [汤国安, 李发源, 刘学军. 数字高程模型教程. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [2] Zhou Qiming, Liu Xuejun. Digital Terrain Analysis. Beijing: Science Press, 2006: 268-293. [周启鸣, 刘学军. 数字地形分析. 北京: 科学出版社, 2006: 268-293.]
- [3] Liu Yue, Liang Qizhang, Cao Guifa. Computer aided drafting software research. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1981, 10(2): 118-128. [刘岳, 梁启章, 曹桂发. 计算机辅助制图软件研究. 测绘学报, 1981, 10(2): 118-128.]
- [4] Chen Shupeng, Li Huiguo. All-digital method and remote sensing applications: Congratulations to Professor Wang Zhizhuo 80th birthday. Journal of Remote Sensing, 1989, (4): 311-317. [陈述彭, 励惠国. 全数字化方法与遥感应用: 祝贺王之卓教授80寿辰. 环境遥感, 1989, (4): 311-317.]
- [5] He Jianbang, Chi Tianhe. Digital Terrain Model. Beijing: China Science and Technology Press, 1993. [何建邦, 池天河. 数字地面模型. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.]

- [6] Wang Jiayao, Cui Tiejun, Miao Guoqiang. Digital elevation model and data structure. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(3): 1-4. [王家耀, 崔铁军, 苗国强. 数字高程模型及其数据结构. *海洋测绘*, 2004, 24(3): 1-4.]
- [7] Wang Yu, Zhu Changqing, Shi Wenzhong. Application of B spline and smoothing spline on interpolating the DEM based on rectangular grid. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(3): 240-244. [王昱, 朱长青, 史文中. B样条与磨光样条在基于矩形格网的DEM内插中的应用. *测绘学报*, 2000, 29(3): 240-244.]
- [8] Wang Yaoge, Zhu Changqing, Wang Zhiwei. A surface model of grid DEM based on coons surface. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 217-222. [王耀革, 朱长青, 王志伟. 基于 Coons 曲面的规则格网DEM 表面模型. *测绘学报*, 2008, 37(2): 217-222.]
- [9] Chen Chuanfa. Grid based DEM construction by means of coons patch. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(4): 87-89. [陈传法. 数字高程模型构建的 Coons 曲面片法. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(4): 87-89.]
- [10] Lv Yan. Research of polyhedral function in digital elevation model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1981, (2): 14-27. [吕言. 数字地面模型中多面函数内插法的研究. *武汉测绘学院学报*, 1981, (2): 14-27.]
- [11] Dong Jian, Peng Rencan, Zheng Yidong. An improved algorithm of point-by-point interpolation by using local dynamic optimal Delaunay triangulation network. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 613-617. [董箭, 彭认灿, 郑义东. 利用局部动态最优 Delaunay 三角网改进逐点内插算法. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(5): 613-617.]
- [12] Li Deren, Chen Xiaoyong. Auto-generation of DTM triangulation based on mathematical morphology. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1990, 19(3): 161-171. [李德仁, 陈晓勇. 用数学形态学变换自动生成 DTM 三角形格网的方法. *测绘学报*, 1990, 19(3): 161-171.]
- [13] Liu Xuejun, Gong Jianya. Delaunay triangulation of constrained data set. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(1): 82-88. [刘学军, 龚健雅. 约束数据域的 Delaunay 三角剖分与修改算法. *测绘学报*, 2001, 30(1): 82-88.]
- [14] Hu Peng, Yang Chuanyong, Wu Yanlan et al. *New Methods, Principles and Applications of Digital Elevation Model*. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007: 56-58. [胡鹏, 杨传勇, 吴艳兰 等. 新数字高程模型理论、方法、标准和应用. 北京: 测绘出版社, 2007: 56-58.]
- [15] Yue Tianxiang, Du Zhengping, Song Dunjiang et al. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology*, 2007, 91(1/2): 161-172.
- [16] Chen Chuanfa, Yue Tianxiang. A method of DEM construction and related error analysis. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(6): 717-725.
- [17] Yue Tianxiang. Progress in earth surface modeling. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(6): 1105-1124. [岳天祥. 地球表层建模研究进展. *遥感学报*, 2011, 15(6): 1105-1124.]
- [18] Wang Chun, Tang Guoan, Liu Xuejun et al. The model of terrain features preserved in grid DEM. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(10): 1149-1154. [王春, 汤国安, 刘学军 等. 特征嵌入式数字高程模型研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(10): 1149-1154.]
- [19] Gao Yiping. Research on the DEM modeling methods of plain river network area [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010. [高毅平. 平原河网地区数字高程模型构建方法研究[D]. 南京: 南京师范大学. 2010.]
- [20] Zhu Shijie, Tang Guoan, Zhang Wei et al. Rapid modeling method for terrace digital elevation model. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011, (4): 68-70. [祝士杰, 汤国安, 张维 等. 梯田 DEM 快速构建方法研究. *测绘通报*, 2011, (4): 68-70.]
- [21] Zhao Weidong, Xu Yuan, Ma Lei et al. Research on the terraces-considered grid-TIN hybrid mesh DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(2): 11-16. [赵卫东, 徐媛, 马雷 等. 顾及梯田地形的 Grid-TIN 混合格网数字高程模型研究. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(2): 11-16.]
- [22] Yang Qinke, Shi Weijuan, Tim R McVicar. On constructing methods of hydrologically correct DEMs. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(4): 1-6. [杨勤科, 师维娟, Tim R McVicar. 水文地貌关系正确DEM的建立方法. *中国水土保持科学*, 2007, 5(4): 1-6.]
- [23] Yang Q K, McVicar T R, Van Niel T G et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: an example in the Loess Plateau, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(3): 235-246.
- [24] Shi Wenzhong. *Theory and Methods for Handling Errors in Spatial Data*. Beijing: Science Press, 1998. [史文中. 空间数据误差处理的理论与方法. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [25] Liu Xuejun. On the accuracy of the algorithms for interpreting grid-based digital terrain model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. [刘学军. 基于规则格网数字高程模型解译算法误差分析与评价[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.]
- [26] Shi Wenzhong. *Principle of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Analysis*. Beijing: Science Press, 2005. [史文中. 空间数据与空间分析不确定性原理. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [27] Wang Yaoge, Wang Zhiwei, Zhu Changqing. Analysis of digital terrain error based on spatial autocorrelation.

- Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(12): 1259-1262. [王耀革, 王志伟, 朱长青. DEM误差的空间自相关特征分析. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(12): 1259-1262.]
- [28] Liu Xuejun, Bian Lu, Lu Huaxing et al. The accuracy assessment on slope algorithms with DEM error spatial autocorrelation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 200-206. [刘学军, 卞璐, 卢华兴 等. 顾及DEM误差自相关的坡度计算模型精度分析. 测绘学报, 2008, 37(2): 200-206.]
- [29] Wu Yanlan, Hu Hai, Hu Peng et al. A Review on the issues in DEM error and DEM quality assessment. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 568-574. [吴艳兰, 胡海, 胡鹏 等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(5): 568-574.]
- [30] Tang Xinming, Lin Zongjian, Wu Lan. The discussion of precision evaluation method based on contour and elevation data on DEM. *Remote Sensing Information*, 1999, (3): 7-10. [唐新明, 林宗坚, 吴岚. 基于等高线和高程点建立DEM的精度评价方法探讨. 遥感信息, 1999, (3): 7-10.]
- [31] Tang G A. *A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models*. New York: Science Press, 2000: 278-289.
- [32] Tang Guoan, Gong Jianya. A simulation on the accuracy of DEM terrain representation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 361-365. [汤国安, 龚健雅. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365.]
- [33] Wang Guangxia, Zhu Changqing, Shi Wenzhong et al. The further study on the accuracy of DEM terrain representation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(2): 168-173. [王光霞, 朱长青, 史文中 等. 数字高程模型地形描述精度的研究. 测绘学报, 2004, 33(2): 168-173.]
- [34] Qi Xiaofei, Wang Guangxia, Ma Jun et al. An accuracy model of DEM terrain representation based on scatterplot matrices and regression analysis. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1344-1348. [齐晓飞, 王光霞, 马俊 等. 利用散点图矩阵与回归分析建立地形描述精度模型. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(11): 1344-1348.]
- [35] Zhang Yong, Tang Guoan, Peng Qi. A mathematical simulation of DEM terrain representation error: A case study in the loess hill-gully areas of China. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21(2): 252-256. [张勇, 汤国安, 彭钊. 数字高程模型地形描述误差的量化模拟: 以黄土丘陵沟壑区的实验为例. 山地学报, 2003, 21(2): 252-256.]
- [36] Liu Chun, Sun Weiwei, Wu Hangbin. Terrain complexity factor and its relationship with accuracy of DEM terrain representation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1014-1020. [刘春, 孙伟伟, 吴杭彬. DEM地形复杂因子的确定及与地形描述精度的关系. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(9): 1014-1020.]
- [37] Chen Junyong. Quality evaluation of topographic data from SRTM3 and GTOPO30. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(11): 941-944. [陈俊勇. 对SRTM3和GTOPO30地形数据质量的评估. 武汉大学学报信息科学版, 2005, 30(11): 941-944.]
- [38] MA Long, LI Ying. Elevation of SRTM DEM over China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006. IGARSS. 2006.
- [39] Liu Xuejun, Gong Jianya, Zhou Qiming et al. Research on error of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(6): 1-5, 39. [刘学军, 龚健雅, 周启鸣 等. DEM结构特征对坡度坡向的影响分析. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 1-5, 39.]
- [40] Zhou Q M, Liu X J, Sun Y Z. Terrain complexity and uncertainties in grid-based digital terrain analysis. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006, 20(10): 1137-1147.
- [41] Zhou Q M, Liu X J. Assessing uncertainties in derived slope and aspect from a grid DEM. *Advances in Digital Terrain Analysis*, 2008, 4: 279-306.
- [42] Wu Lun, Wang Daming, Zhang Yi. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(7): 998-1003. [邬伦, 汪大明, 张毅. 基于DEM的水流方向算法研究. 中国图象图形学报, 2006, 11(7): 998-1003.]
- [43] Liu Xuejun, Lu Huaxing, Bian Lu et al. Comparison of algorithms for extracting drainage network from grid-based digital elevation model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1134-1141. [刘学军, 卢华兴, 卞璐 等. 基于DEM的河网提取算法的比较. 水利学报, 2006, 37(9): 1134-1141.]
- [44] Qin Chengzhi, Zhu Xing, Li Baolin et al. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital elevation models. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 91-97. [秦承志, 朱阿兴, 李宝林 等. 基于栅格DEM的多流向算法述评. 地学前缘, 2006, 13(3): 91-97.]
- [45] Yang Xin, Tang Guoan, Liu Xuejun et al. Digital terrain analysis: Theory, method and application. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(9): 1058-1070. [杨昕, 汤国安, 刘学军 等. 数字地形分析的理论, 方法与应用. 地理学报, 2009, 64(9): 1058-1070.]
- [46] Tao Yang, Tang Guoan, Wang Chun et al. Uncertainty of terrain Information content based on grid DEM. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(3): 398-402. [陶旻, 汤国安, 王春 等. DEM地形信息量计算的不确定性研究. 地理科

- 学, 2010, 30(3): 398-402.]
- [47] Dong Youfu, Tang Guoan. Research on quantification model for elevation point's terrain information based on DEMs. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1825-1836. [董有福, 汤国安. DEM 点位地形信息量化模型研究. *地理研究*, 2012, 31(10): 1825-1836.]
- [48] Wang Lei, Tang Guoan, Liu Xuejun et al. Terrain complexity index and its derivation from DEMs. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(4): 55-58. [王雷, 汤国安, 刘学军 等. DEM 地形复杂度指数及提取方法研究. *水土保持通报*, 2004, 24(4): 55-58.]
- [49] Li Fayuan, Tang Guoan. DEM based research on the terrain driving force of soil erosion in the Loess Plateau. in *Geoinformatics 2006: Geospatial Information Science*, edited by Jianya Gong, Jingxiong Zhang, Proc. of SPIE Vol. 6420, 64201W(2006)
- [50] Liu Renjie, Zhu Hongchun, Tang Guoan et al. A study of potential factor for water erosion on loess hillslope based on DEMs. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(5): 161-165. [刘仁杰, 朱红春, 汤国安 等. 基于 DEM 的黄土坡面流水侵蚀潜能因子初步研究. *水土保持通报*, 2012, 32(5): 161-165.]
- [51] Yang Qinke, Guo Weiling, Zhang Hongming et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 203-206. [杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 203-206.]
- [52] Zhang H M, Yang Q K, Li R et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177-188.
- [53] Zhang Lei. Core topographical factor based investigation on the spatial pattern of loess terrain in the Loess Plateau [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. [张磊. 基于核心地形因子的黄土地貌形态空间格局研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.]
- [54] Liu Xuejun, Zhang Ping, Zhu Ying et al. Suitable window size of terrain parameters derived from grid-based DEM. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 264-271. [刘学军, 张平, 朱莹 等. DEM 坡度计算的适宜窗口分析. *测绘学报*, 2009, 38(3): 264-271.]
- [55] Zhao M W, Li F Y, Tang G A. Optimal scale selection for DEM based slope segmentation in the Loess Plateau. *International Journal of Geosciences*, 2012, 3(1): 37-43.
- [56] Tao Yang, Tang Guoan, Wang Chun et al. Assessment on surface roughness models based on semantics and profile characteristics matching. *Geographical Research*, 2011, 30(6): 1066-1076. [陶畅, 汤国安, 王春 等. 基于语义和剖面特征匹配的地形粗糙度模型评价. *地理研究*, 2011, 30(6): 1066-1076.]
- [57] Zhao Mingwei, Tang Guoan, Zhang Lei et al. The DEM based 5-node second-order finite difference model for slope computation. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(3): 286-291. [赵明伟, 汤国安, 张磊 等. 基于 DEM 的 5 节点二阶差分坡度算法模型与实验分析. *地球信息科学学报*, 2012, 14(3): 286-291.]
- [58] Chen Jilong, Wu Wei, Liu Hongbin. Effect of DEM interpolation on the slope and aspect. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(6): 14-17. [陈吉龙, 王伟, 刘洪斌. DEM 内插算法对坡度坡向的影响. *水土保持研究*, 2008, 15(6): 14-17.]
- [59] Lang Lingling, Cheng Weiming, Zhu Qijiang et al. A comparative analysis of the multi-criteria DEM extracted relief. *Geo-Information Science*, 2007, 9(6): 1-6, 135-136. [郎玲玲, 程维明, 朱启疆 等. 多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析. *地球信息科学*, 2007, 9(6): 1-6, 135-136.]
- [60] Xie Yiqun, Tang Guoan, Jiang Ling. Characteristics and correcting methods of errors in extraction of SOA based on DEMs. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(2): 49-53. [谢轶群, 汤国安, 江岭. DEM 提取坡向变率中的误差特征与消除方法. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(2): 49-53.]
- [61] Zhong Teng, Tang Guoan, Zhou Yi et al. Method of extracting surface peaks based on reverse DEMs. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009, (4): 35-37. [仲腾, 汤国安, 周毅 等. 基于反地形 DEM 的山顶点自动提取. *测绘通报*, 2009, (4): 35-37.]
- [62] Yi Hongwei, Tang Guoan, Liu Yongmei et al. Stream runoff nodes and their derivation based on DEM. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 108-111. [易红伟, 汤国安, 刘咏梅 等. 河网径流节点及其基于 DEM 的自动提取. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 108-111.]
- [63] Xiong Liyang, Tang Guoan, Yan Shijiang. Grading extraction method of saddles based on DEM. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(2): 181-183. [熊礼阳, 汤国安, 宴实江. 基于 DEM 的山地鞍部点分级提取方法. *测绘科学*, 2013, 38(2): 181-183.]
- [64] Zhang Wei, Tang Guoan, Tao Yang et al. An improved method to saddles extraction based on runoff concentration simulation in DEM. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(1): 158-159. [张维, 汤国安, 陶畅 等. 基于 DEM 汇流模拟的鞍部点提取改进方法. *测绘科学*, 2011, 36(1): 158-159.]
- [65] Kong Yueping, Yi Wei, Zhang Yuepeng. Extracting saddle point fast based on topological relationship. *Computer*

- Engineering and Applications, 2013, 49(16): 165-167. [孔月萍, 易炜, 张跃鹏. 利用拓扑关系快速提取鞍部点. 计算机工程与利用, 2013, 49(16): 165-167.]
- [66] Liu Tao, Zhao Jinmei. Energy accumulation based method for stream knickpoints extraction. Groundwater, 2013, 35(6): 159-160. [刘涛, 赵金梅. 基于能量累积的水系裂点提取分析. 地下水, 2013, 35(6): 159-160.]
- [67] Bi Lisi, He Honglin, Xu Yueren et al. The extraction of knickpoint series based on the high resolution DEM data and the identification of paleo-earthquake series: A case study of the Huoshan Mts. piedmont fault. Seismology and Geology, 2011, 33(4): 963-977. [毕丽思, 何宏林, 徐岳仁 等. 基于高分辨率DEM的裂点序列提取和古地震序列的识别: 以霍山山前断裂为实验区. 地震地质, 2011, 33(4): 963-977.]
- [68] Zhang Huiping, Zhang Peizhen. Initiation and recession of the fluvial knickpoints. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 1746-1753. [张会平, 张培震. 河流裂点的发育及其溯源迁移. 中国科学: 地球科学, 2012, 41(11): 1627-1635.]
- [69] Sun Changbin, Xie Xinsheng, Jiang Wali. Distribution of the knickpoints in fluvial gullies in response to the events of Holocene fault activity: A case study of the Jiaocheng fault in Shanxi. Seismology and Geology, 2012, 34(2): 254-267. [孙昌斌, 谢新生, 江娃利. 河流冲沟裂点展布对全新世断层活动事件的响应. 地震地质, 2012, 34(2): 254-267.]
- [70] Jiang Ling, Tang Guoan, Zhao Mingwei et al. Extraction and analysis of loess gully heads considering geomorphological structures. Geographical Research, 2013, 32(11): 2153-2162. [江岭, 汤国安, 赵明伟 等. 顾及地貌结构特征的黄土沟头提取及分析. 地理研究, 2013, 32(11): 2153-2162.]
- [71] Luo Mingliang. Research on terrain feature point cluster based on DEMs [D]. Chengdu: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. [罗明良. 基于DEM的地形特征点簇研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院, 2008.]
- [72] Jin Hailiang, Kang Jianrong, Gao Jingxiang. Research on the algorithm of extracting ridge and valley lines using contour data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 30(9): 809-812. [靳海亮, 康建荣, 高井祥. 利用等高线数据提取山脊(谷)线算法研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 30(9): 809-812.]
- [73] Zhang Yao, Fan Hong, Li Yu'e. A method of terrain feature extraction based on contour. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 574-580. [张尧, 樊红, 李玉娥. 一种基于等高线的地形特征线提取方法. 测绘学报, 2013, 42(4): 574-580.]
- [74] Ai Tinghua, Zhu Guorui, Zhang Genshou. Extraction of landform features and organization of valley tree structure based on Delaunay Triangulation model. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(4): 292-298. [艾廷华, 祝国瑞, 张根寿 等. 基于Delaunay三角网模型的等高线地形特征提取及谷地树结构化组织. 遥感学报, 2003, 7(4): 292-298.]
- [75] Chen Yongliang, Liu Dayou. A new method for automatic extraction of ridge and valley axes from DEM. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(12): 1230-1234. [陈永良, 刘大有. 一种新的山脊线和山谷线自动提取方法. 中国图象图形学报: A辑, 2001, 6(12): 1230-1234.]
- [76] Zhou Yi, Tang Guoan, Zhang Ting et al. A new method for the derivation of terrain skeleton lines based on wire-like analysis window in grid DEMs. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007, (10): 67-69. [周毅, 汤国安, 张婷 等. 基于网格DEM线状分析窗口的地形特征线快速提取方法. 测绘通报, 2007, (10): 67-69.]
- [77] Kong Yueping, Fang Li, Jiang Yonglin et al. A new method of extracting terrain feature lines by morphology. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8): 996-999. [孔月萍, 方莉, 江永林 等. 提取地形特征线的形态学新方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(8): 996-999.]
- [78] Li Yun, Yang Bo, Yang Zhiqiang. Extraction of ridge lines and valley lines from mountainous lidar ground point cloud. Journal of Geodesy And Geodynamics, 2013, 33(3): 111-115. [李芸, 杨博, 杨志强. 利用LIDAR数据提取山区脊谷特征线的算法研究. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(3): 111-115.]
- [79] Huang Peizhi. A new method for extracting terrain feature lines from digitized terrain data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(3): 247-252. [黄培之. 提出山脊线和山谷线的一种新方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(3): 247-252.]
- [80] Zhu Hongchun, Tang Guoan, Zhang Youshun et al. Thalweg in loess hill area based on DEM. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(5): 43-45. [朱红春, 汤国安, 张友顺 等. 基于DEM提取黄土丘陵区沟沿线. 水土保持通报, 2003, 23(5): 43-45.]
- [81] Liu Pengju, Zhu Qingke. Automated extraction of shoulder line of valleys based on flow paths from grid Digital Elevation Model (DEM) data. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 72-76. [刘鹏举, 朱清科. 基于栅格DEM与水流路径的黄土区沟缘线自动提取技术研究. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 72-76.]
- [82] Lu Guonian, Qian Yadong, Chen Zhongming. Study of automated extraction of shoulderline of valley from grid digital elevation data. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(6): 567-573. [闾国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿线技术研究. 地理科学, 1998, 18(6): 567-573.]
- [83] Yan Shijiang, Tang Guoan, Li Fayuan et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 363-367. [晏实江, 汤国安, 李发源

- 等. 利用DEM边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(3): 363-367.]
- [84] Song X D, Tang G A, Li F Y et al. Extraction of loess shoulder-line based on the parallel GVF snake model in the loess hilly area of China. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 11-20.
- [85] Zhou Yi, Tang Guoan, Xi Yu et al. A shoulder-lines connection algorithm using improved snake model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013(1): 82-85. [周毅, 汤国安, 习羽 等. 引入改进 Snake 模型的黄土地形沟沿线连接算法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013(1): 82-85.]
- [86] Zhou Yi, Tang Guoan, Wang Chun et al. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 261-266. [周毅, 汤国安, 王春 等. 基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究. 地理科学, 2010, 30(2): 261-266.]
- [87] Zhou Y, Tang G A, Yang X et al. Positive and negative terrains on northern Shaanxi Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(1): 64-76.
- [88] Chen Yonggang, Tang Guoan, Zhou Yi et al. The positive and negative terrain of loess plateau extraction based on the multi-azimuth DEM shaded relief. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(1): 105-107. [陈永刚, 汤国安, 周毅 等. 基于多方位 DEM 地形晕渲的黄土地貌正负地形提取. 地理科学, 2012, 32(1): 105-107.]
- [89] Tang Guoan, Zhao Mudan, Li Tianwen et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in loess plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824-830. [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. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.]
- [90] Wang Chun, Tang Guoan, Li Fayuan et al. Fundamental conditions of slope spectrum abstraction and application. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 587-592. [王春, 汤国安, 李发源 等. 坡谱提取与应用的基本地域条件. 地理科学, 2007, 27(4): 587-592.]
- [91] Li Fayuan, Tang Guoan, Jia Yini et al. Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy. *Geo-Information Science*, 2007, 9(4): 13-18. [李发源, 汤国安, 贾旖旎 等. 坡谱信息熵尺度效应及空间分异. 地球信息科学, 2007, 9(4): 13-18.]
- [92] Tang G A, Li F Y, Liu X J et al. Research on the slope spectrum of the Loess Plateau. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(1): 175-185.
- [93] Zhang Wei. Research of catchment profile spectrum on northern Shaanxi Loess Plateau, China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. [张维. 基于 DEM 的陕北黄土高原流域剖面谱研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.]
- [94] Zhu Shijie, Tang Guoan, Li Fayuan et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 921-932. [祝士杰, 汤国安, 李发源 等. 基于DEM的黄土高原面积高程积分研究. 地理学报, 2013, 68(7): 921-932.]
- [95] Liu Kai, Tang Guoan, Tao Yang et al. GLCM based quantitative analysis of terrain texture from DEMs. *Journal Of Geo-Information Science*, 2012, 14(6): 751-760. [刘凯, 汤国安, 陶旸 等. 基于灰度共生矩阵的 DEM 地形纹理特征量化研究. 地球信息科学学报, 2012, 14(6): 751-760.]
- [96] Sun Jinglu. Research on the loess slope-landscape structure based on DEM: Case study in Shanbei Loess Plateau [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. [孙京禄. 基于 DEM 的黄土坡面景观结构研究. 南京师范大学[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.]
- [97] Zhao Mingwei. Research on the loess slope-landscape based on DEM [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. [赵明伟. 基于DEM的黄土高原坡面景观研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.]
- [98] Liu Xuejun, Lu Huaxing. Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling. *Geographic Research*, 2007, 26(3): 433-442. [刘学军, 卢华兴. 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 2007, 26(3): 433-442.]
- [99] Wang Chun, Tang Guoan, Li Fayuan et al. The Uncertainty of slope spectrum derived from grid digital elevation model. *Geo-Information Science*, 2008, 10(4): 539-545. [王春, 汤国安, 李发源 等. 基于 DEM 提取坡谱信息的不确定性. 地球信息科学, 2008, 10(4): 539-545.]
- [100] Hu Zhuowei, Li Yang, Wang Zhiheng. Uncertainty analysis extracting from the slope of hilly area of Sichuan Province based on DEM. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(5): 636-640. [胡卓玮, 李洋, 王志恒. 基于DEM的四川省低山丘陵区坡度提取不确定性分析. 山地学报, 2012, 30(5): 636-640.]
- [101] Liu Hongyan, Yang Qinke, Wang Chunmei et al. Changes of DEM-derived slope with horizontal resolution and their spatial distribution. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, (1): 105-109. [刘红艳, 杨勤科, 王春梅 等. 坡度随水平分辨率变化及其空间格局研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, (1): 105-109.]
- [102] Liu Xuejun, Zhang Ping. Effective scale of slope and aspect derived from grid-based digital elevation model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, (12): 1254-1258. [刘学军, 张平. DEM坡度、坡向的有效尺度范围. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, (12): 1254-1258.]
- [103] Yi Weihua, Zhang Jianming, Kuang Yongsheng et al. Effect of horizontal resolution on the watershed features derived from DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(2): 34-38. [易卫华, 张建明, 匡永生 等. 水平

- 分辨率对DEM流域特征提取的影响. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 34-38.]
- [104] Yang X, Tang G A, Xiao C C et al. The scaling method of specific catchment area from DEMs. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 689-704.
- [105] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water Resour. Res., 1994, 30(4): 1019-1028.
- [106] Lin Kairong, Guo Shenglian, Xiong Lihua et al. The impact of DEM resolution on TOPMODEL simulation uncertainty. Journal of Natural Resources, 2010, 25(6): 1022-1032. [林凯荣, 郭生练, 熊立华 等. DEM栅格分辨率对TOPMODEL模拟不确定性的影响研究. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1022-1032.]
- [107] Wu S., Li J., Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. Environ Model Assess, 2005, 10(1): 33-42.
- [108] Fang Liang. A research into effect of scale on calculating terrain parameters based on DEM [D]. Xi'an: Northwest University, 2006. [房亮. 基于DEM地形参数计算的尺度效应研究 [D]. 西安: 西北大学, 2006.]
- [109] Wang Chun, Tao Yang, Jia Dunxin et al. Study on the accuracy of regular grid DEM topographical description morphology. Geomatics World, 2008, (1): 46-52, 72. [王春, 陶阳, 贾敦新 等. 规则格网DEM地形描述形态精度研究. 地理信息世界, 2008, (1): 46-52, 72.]
- [110] Liu Xuejun, Zhang Ping, Zhu Ying. Suitable window size of terrain parameters derived from grid-based DEM. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, (3): 264-271. [刘学军, 张平, 朱莹. DEM坡度计算的适宜窗口分析. 测绘学报, 2009, (3): 264-271.]
- [111] Ma Jianchao, Lin Guangfa, Chen Youfei et al. The effect of terrain heterogeneity on topographic wetness index. Journal of Geo-Information Science, 2011, (2): 157-163. [马建超, 林广发, 陈友飞 等. DEM栅格单元异质性地对地形湿度指数提取的影响分析. 地球信息科学学报, 2011, (2): 157-163.]
- [112] Tang Guoan, Zhao Mudan, Li Tianwen et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 824-830. [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. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.]
- [113] Yang D, Herath S, Musiak K. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. Hydrol Process, 2001, 15(11): 2085-2099.
- [114] Liu Xuejun, Wang Yanfang, Jin Bei. An upscaling method of digital elevation model with point spread function. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, (12): 1458-1462. [刘学军, 王彦芳, 晋蓓. 利用点扩散函数进行DEM尺度转换. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, (12): 1458-1462.]
- [115] Hu Xuemei, Qin Chengzhi. Effects of different topographic attributes on determining appropriate DEM resolution. Progress in Geography, 2014, 33(1): 50-56. [呼雪梅, 秦承志. 地形信息对确定DEM适宜分辨率的影响. 地理科学进展, 2014, 33(1): 50-56.]
- [116] Zhu A X, Burt J E, Smith M et al. The impact of neighbourhood size on terrain derivatives and digital soil mapping// Advances in Digital Terrain Analysis. Berlin and Heidelberg: Springer, 2008: 333-348.
- [117] Wan Gang, Zhu Changqing. Application of multi-band wavelet on simplifying DEM with lose of feature information. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, (1): 36-40. [万刚, 朱长青. 多进制小波及其在DEM数据有损压缩中的应用. 测绘学报, 1999, (1): 36-40.]
- [118] Wu Fan, Zhu Guorui. Multi-scale representation and automatic generalization of relief based on wavelet analysis. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, (2): 170-176. [吴凡, 祝国瑞. 基于小波分析的地貌多尺度表达与自动综合. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, (2): 170-176.]
- [119] Liu Chun, Wang Jialin, Liu Dajie. Generalization of DEM grid data based on multi-band wavelet analysis. Journal of Image and Graphics, 2004, (3): 340-344. [刘春, 王家林, 刘大杰. 多尺度小波分析用于DEM网格数据综合. 中国图象图形学报, 2004, (3): 340-344.]
- [120] Chen Renxi, Zhao Zhongming, Wang Yinxing. DEM data compression based on integer wavelet transformation. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(4): 344-347. [陈仁喜, 赵忠明, 王殷行. 基于整型小波变换的DEM数据压缩. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(4): 344-347.]
- [121] Chang Z Q, Jia E H, Wu L X. Key technique in compressing grid DEM data with discrete wavelet transform. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 3955-3961.
- [122] Yang Qinke, David Jupp, Guo Weiling et al. Generalizing the fine resolution DEMs with filtering method. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, (6): 58-62. [杨勤科, Jupp D L B, 郭伟玲 等. 基于滤波方法的DEM尺度变换方法研究. 水土保持通报, 2008, (6): 58-62.]
- [123] Fei Lifan, He Jin, Ma Chenyan et al. Three dimensional Douglas-Peucker algorithm and the study of its application to automated generalization of DEM. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, (3): 278-284. [费立凡, 何津, 马晨燕 等. 3维Douglas-Peucker算法及其在DEM自动综合中的应用研究. 测绘学报, 2006, (3): 278-284.]

- [124] Chen Yan, Tang Guoan, Qi Qingwen. Analysis of slope change atlas drawing from digital elevation models of different spatial scales. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 2004, (1): 79-82. [陈燕, 汤国安, 齐清文. 不同空间尺度DEM坡度转换图谱分析. 华侨大学学报: 自然科学版, 2004, (1): 79-82.]
- [125] Yang Q K, David Jupp, Li R et al. Re-scaling Lower Resolution Slope by Histogram Matching. Springer and Berlin: Heidelberg, 2008: 193-210.
- [126] Yang X, Tang G A, Zhang Y. Scale effect and transformation model of slope based on DEMs. *Geoinformatics 2007. International Society for Optics and Photonics*, 2007: 675322.
- [127] Xu Jing, Ren Liliang, Cheng Yuanhua et al. Topographic index calculation that is independent of the DEM spatial resolution. *J. Tsinghua Univ.: Sci & Tech*, 2008, 48(6): 983-986, 990. [徐静, 任立良, 程媛华 等. 不受 DEM 空间分辨率影响的地形指数计算. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(6): 983-986, 990.]
- [128] Xue Y, Chen Z, Xu H et al. A high throughput geocomputing system for remote sensing quantitative retrieval and a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(6): 902-911.
- [129] Wang Zongyue, Ma Hongchao, Xu Honggen et al. Method of parallel contours extraction based on cluster and multicore CPU. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(17): 5-7. [王宗跃, 马洪超, 徐宏根 等. 在集群多核CPU环境下的等高线并行提取方法. 计算机工程与应用, 2010, 46(17): 5-7.]
- [130] Huang F, Liu D, Tan X et al. Explorations of the implementation of a parallel IDW interpolation algorithm in a Linux cluster-based parallel GIS. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(4): 426-434.
- [131] Yan Changqing, Yue Tianxiang. GPU accelerated high accuracy surface modeling methods for DEM Modelling. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(22): 22-27. [闫长青, 岳天祥. GPU加速的高精度数字地面模型建模方法. 计算机应用与工程, 2012, 48(22): 22-27.]
- [132] Yi Faling, Yang Weiwei. Parallel algorithm for transforming grid into TIN. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2001, 29(6): 34-36. [易法令, 杨薇薇. GRID转换为TIN的并行算法. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 34-36.]
- [133] Wang Zhe, Gao Sanhong, Zheng Huiying et al. Design of a parallel 3D lunar terrain reconstruction system. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2013, 32(4): 345-351. [王喆, 高三红, 郑慧英 等. 并行月面三维地形重建系统设计. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 345-351.]
- [134] Lv Jianfeng, Liu Dingsheng, Jiao Weili et al. Parallel algorithms research on the interpolation of DEM. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(5): 506-512. [吕建峰, 刘定生, 焦伟利 等. DEM生成算法并行化研究. 中国图象图形学报, 2002, 7(5): 506-512.]
- [135] Huang Xianfeng, Sun Yanbiao, Zhang Fan et al. Research on DEM interpolation method and LIDAR data under multi-core computing environment. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Nature Science*, 2011, 30(1): 1-6. [黄先鋒, 孙岩标, 张帆 等. 多核计算环境下的LiDAR数据DEM内插方法研究, 2011, 30(1): 1-6.]
- [135] Huang Xianfeng, Sun Yanbiao, Zhang Fan et al. Research on DEM interpolation method and LIDAR data under multi-core computing environment. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Nature Science*, 2011, 30(1): 1-6. [黄先鋒, 孙岩标, 张帆 等. 多核计算环境下的LiDAR数据DEM内插方法研究. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(1): 1-6.]
- [136] Guan X, Wu H. Leveraging the power of multi-core platforms for large-scale geospatial data processing: Exemplified by generating DEM from massive LiDAR point clouds. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(10): 1276-1282.
- [137] Qi Lin, Shen Jie, Guo Lishuai et al. Dynamic strip partitioning method oriented parallel computing for construction of Delaunay triangulation. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(1): 55-61. [齐琳, 沈婕, 郭立帅 等. 面向D-TIN并行构建的动态条带数据划分方法与实验分析. 地球信息科学学报, 2012, 14(1): 55-61.]
- [138] Qian Chen, Do Wanfeng. Research on data partition method for parallel interpolation of discrete point cloud. *Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 13(2): 63-67. [钱辰, 窦万峰. 面向离散点云并行插值数据划分方法研究. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2013, 13(2): 63-67.]
- [139] Yu Jie, Lv Pin, Zheng Changwen. A comparative research on methods of Delaunay triangulation. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(8): 1158-1167. [余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay三角网构建方法比较研究. 中国图象图形学报, 2010, 15(8): 1158-1167.]
- [140] Zhang MingMin, Pan Zhigeng, Zheng Wenting. A distributed parallel algorithm for Delaunay triangulation of scattered data points. *Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics*, 2000, 12(7): 484-487. [张明敏, 潘志庚, 郑文庭. 散乱点集Delaunay三角剖分的分布并行算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(7): 484-487.]
- [141] Cheng G, Liu L, Jing N et al. General-purpose optimization methods for parallelization of digital terrain analysis based on cellular automata. *Computers & Geosciences*, 2012, 45: 57-67.
- [142] Ma Weifeng, Wang Xiaorui, Zeng Zhongping et al. The DEM Analysis tools based on computational grid. *Geo-Information Science*, 2008, 10(3): 377-381. [马维峰, 王晓蕊, 曾忠平 等. 基于计算网格的DEM空间分析系统. 地球信息科学, 2008, 10(3): 377-381.]

- [143] Song Xiaodong, Liu Xuejun, Tang Guoan et al. Research on the fault-tolerant algorithm of parallel digital terrain analysis. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(2): 1-5. [宋效东, 刘学军, 汤国安 等. 并行数字地形分析的容错算法研究. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(2): 1-5.]
- [144] Jiang Ling, Tang Guoan, Liu Kai et al. Study on parallel calculation method of local terrain parameters. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 14(6): 761-767. [江岭, 汤国安, 刘凯 等. 局部型地形因子并行计算方法研究. *地球信息科学学报*, 2013, 14(6): 761-767.]
- [145] Jiang Ling, Liu Xuejun, Tang Guoan et al. Parallel slope and aspect algorithm in terrain analysis. *Computing Engineering & Science*, 2013, 35(4): 18-23. [江岭, 刘学军, 汤国安 等. 地形分析中坡度坡向算法并行化方法研究. *计算机工程与科学*, 2013, 35(4): 18-23.]
- [146] Liu Kai, Tang Guoan, Jiang Ling et al. Parallel calculation and efficiency analysis for neighborhood statistic algorithm in digital terrain analysis. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(4): 91-94. [刘凯, 汤国安, 江岭 等. 数字地形分析中邻域统计型算法并行化方法及效率分析. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(4): 91-94.]
- [147] Song X D, Tang G A, Li F Y et al. Extraction of loess shoulder-line based on the parallel GVF snake model in the loess hilly area of China. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 11-20.
- [148] Liu Zhoujun, Hu Baogang. High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(2): 249-255. [刘洲俊, 胡包钢. GPU加速的高分辨率DEM图像地形特征线提取算法. *中国图象图形学报*, 2012, 17(2): 249-255.]
- [149] Su Danyang, Fu Qiang, Lou Zhanghua et al. Extracting topographic patterns based on triangulated irregular networks DEM. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17: 37-48. [苏丹阳, 富强, 楼章华 等. 基于三角网DEM的地形特征提取算法. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17: 37-48.]
- [150] Jiang Ling, Liu Xuejun, Yang Jianyi et al. Parallel algorithms for extracting drainage network from digital terrain models. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(4): 62-66. [江岭, 刘学军, 阳建逸 等. 格网DEM水系提取并行算法研究. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(4): 62-66.]
- [151] Jiang L, Tang G A, Liu X J et al. Parallel contributing area calculation with granularity control on massive grid terrain datasets. *Computers & Geosciences*, 2013, 60: 70-80.
- [152] Liu Junzhi, Zhu Axing, Liu Yongbo et al. Parallelization of a grid-to-grid routing algorithm based on grids layering. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(1): 123-129. [刘军志, 朱阿兴, 刘永波 等. 基于栅格分层的逐栅格汇流算法并行化研究. *国防科技大学学报*, 2013, 35(1): 123-129.]
- [153] Qin C Z, Zhan L J. Parallelizing flow-accumulation calculations on graphics processing units: From iterative DEM preprocessing algorithm to recursive multiple-flow-direction algorithm. *Computers & Geosciences*, 2012, 43: 7-16.
- [154] Gong J Y, Xie J B. Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(2): 337-346.
- [155] Song Xiaodong. Studies on comprehensive visibility analysis model and parallel algorithm based on DEM [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. [宋效东. 基于DEM的可视性分析综合模型及其并行算法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.]
- [156] Zhang Gang, Tang Guoan, Song Xiaodong et al. Research on distributed parallel visibility analysis algorithm based on DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(4): 81-85. [张刚, 汤国安, 宋效东 等. 基于DEM的分布式并行通视分析算法研究. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(04): 81-85.]
- [157] Chen Shaolin, Zhang Huai, Shi Yaolin. The research progress of large-scale data parallel visualization in geosciences. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2008, 25(5): 577-584. [陈绍林, 张怀, 石耀霖. 地学中海量数据的并行可视化研究进展. *中国科学院研究生院学报*, 2008, 25(5): 577-584.]
- [158] Chen Jingguang, She Jiangfeng, Song Xiaoqun et al. Parallel rendering of large-scale DEM based on multi-core CPU. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 618-621. [陈景广, 佘江峰, 宋晓群 等. 基于多核CPU的大规模DEM并行三维渲染. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(5): 618-621.]
- [159] Li Guanghui, Shao Wei, Wu Dongya. Research of large terrain multithreading fast scheduling based on OSG. *Journal of System Simulation*, 2013, 25: 282-285. [李光辉, 邵伟, 吴东亚. 基于OSG的大地形并行快速调度问题研究. *系统仿真学报*, 2013, 25: 282-285.]
- [160] Zhou Chenhu, Chen Weiming. Research and compilation of the Geomorphological Atlas of the People's Republic of China. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 970-979. [周成虎, 程维明. 《中华人民共和国地貌图集》的研究与编制. *地理研究*, 2010, 29(6): 970-979]
- [161] Zhang Fang, Tang Guoan, Cao Min et al. Simulation of positive and negative terrain evolution in small loess watershed based on ANN-CA Model. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(1): 28-31. [基于ANN-CA模型的黄土小流域正负地形演化模拟. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(1): 28-31.]
- [162] Xiong Liyang, Tang Guoan, Yuan Baoyin et al. Geomorphological Inheritance for loess landform evolution in a

- severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(2): 313-321. [熊礼阳, 汤国安, 袁宝印 等. 基于 DEM 的黄土高原 (重点流失区) 地貌演化的继承性研究. *中国科学: 地球科学*, 2014, 57(2): 313-321.]
- [163] Liu Yong, Wang Yixiang, Pan Baotian. A preliminary approach on the 3D presentation and quantitative analysis of planation surface. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 391-399. [刘勇, 王义祥, 潘保田. 夷平面的三维显示与定量分析方法初探. *地理研究*, 1999, 18(4): 391-399.]
- [164] Han Haihui, Gao Ting. Extraction of relief amplitude based on change point method. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 31(1): 101-104. [韩海辉, 高婷. 基于变点分析法提取地势起伏度. *地理科学*, 2012, 31(1): 101-104.]
- [165] Zhao Shangmin, Cheng Weiming, Zhou Chenghu et al. Analysis on the topographic gradient and geographical meaning of Mt. Konggur, in the northern edge of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 753-758. [赵尚民, 程维明, 周成虎 等. 青藏高原北缘公格尔山地区地形梯度的剖析. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 753-758.]
- [166] Yao Yonghui, Zhou Chenghu, Sun Ranhao et al. Digital mapping of mountain landforms based on multiple source data. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(1): 122-128. [姚永慧, 周成虎, 孙然好 等. 基于多源数据的山地地貌数字解译. *山地学报*, 2007, 25(1): 122-128.]
- [167] Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications. *Quaternary Sciences*, 2006, (1): 126-135. [张会平, 杨农, 张岳桥 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义. *第四纪研究*, 2006, (1): 126-135.]
- [168] Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Li Yanfu et al. Planform geometry characteristics of typical meandering rivers in Yellow River source. *Journal of Sediment Research*, 2012, (4): 11-17. [李志威, 王兆印, 李艳富 等. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征. *泥沙研究*, 2012, (4): 11-17.]
- [169] Ji Yapeng, Gao Hongshan, Pan Baotian et al. Implication of active structure in the upper reaches of Weihe river basin from stream length-gradient index (SL index) and Hack profile. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2011, (4): 1-6. [吉亚鹏, 高红山, 潘保田 等. 渭河上游流域河长坡降指标 SL 参数与 Hack 剖面的新构造意义. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011, (4): 1-6.]
- [170] Gao MingXin, Liu Shaofeng. Pleistocene paleosurface reconstruction and Holocene erosion quantity calculation for Guide-Gonghe-Tongde basin complex, Qinghai. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(1): 99-104. [高明星, 刘少峰. 青海贵德—共和—同德地区更新统最小古沉积面恢复与全新世侵蚀量计算. *国土资源遥感*, 2013, 25(1): 99-104.]
- [171] Zhao Shangmin, Cheng Weiming, Chai Huixia et al. Research on the information extraction method of periglacial geomorphology on the Qinghai-Tibet based on remote sensing and SRTM: A case study of 1:1,000,000 Lhasa map sheet (H46). *Geographical Research*, 2007, 26(6): 1175-1185. [赵尚民, 程维明, 柴慧霞 等. 基于遥感与 SRTM 的青藏高原冰缘地貌信息提取方法: 以 1:100 万标准幅拉萨幅(H46)为例. *地理研究*, 2007, 26(6): 1175-1185.]
- [172] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin et al. The global image of the moon by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography. *Sci China Earth Sci*, 2010, (3): 294-306. [李春来, 刘建军, 任鑫 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图. *中国科学: 地球科学*, 2010, (3): 294-306.]
- [173] Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Sci China Earth Sci*, 2010, (3): 281-293. [李春来, 任鑫, 刘建军 等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型. *中国科学: 地球科学*, 2010, (3): 281-293.]
- [174] Ding Xiaozhong, Han Kunying, Han Tonglin et al. Compilation of the geological map of Sinus Iridum quadrangle of the moon (LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 2012, (6): 15-27. [丁孝忠, 韩坤英, 韩同林 等. 月球虹湾幅 (LQ-4) 地质图的编制. *地学前缘*, 2012, (6): 15-27.]
- [175] Huang Qian, Ping Jingsong, Su Xiaoli et al. New features of the moon revealed and identified by CLTM-s01. *Sci China Ser G*, 2009, (10): 1362-1370. [黄倩, 平劲松, 苏晓莉 等. 嫦娥一号 CLTM-s01 模型揭示和认证的月球地形新特征. *中国科学: G 辑*, 2009, (10): 1362-1370.]
- [176] Yue Zongyu, Liu Jianzhong, Wu Ganguo. Automatic identification of circular mare craters based on object oriented classification method. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(22): 2809-2813. [岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国. 应用面向对象分类方法对月球撞击坑进行自动识别. *科学通报*, 2008, 53(22): 2809-2813.]
- [177] Yuan Yuefeng, Zhu Peimin, Zhao Na et al. Automatic identification of circular mare craters based on mathematical morphology. *Sci China Ser G*, 2013, 43: 324-332. [袁悦锋, 朱培民, 赵娜 等. 基于数学形态学的月海圆形撞击坑自动识别方法. *中国科学: G 辑*, 2013, (3): 324-332.]
- [178] Lu Yuhang, Miao Fang, Du Jun et al. An automatic mosaic method of unmanned aerial vehicle video serial images based on improved SIFT. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(5): 108-111. [鲁宇航, 苗放, 都骏. 基于特征匹配的月球撞击坑自动提取研究. *测绘科学*, 2013, 38(5): 108-111.]

- [179] Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Wan Cong et al. Analysis of spatial distribution characteristics of lunar near side impact craters. *Journal of Geoinformation Science*, 2012, 14(5): 618-626. [周增坡, 程维明, 万丛 等. 月球正面撞击坑的空间分布特征分析. *地球信息科学学报*, 2012, 14(5): 618-626.]
- [180] He Shujun, Chen Jianping, Li Ke et al. The morphological classification and distribution characteristics of the craters in the LQ-4 Area. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 83-89. [何姝珺, 陈建平, 李珂 等. 月表典型区撞击坑形态分类及分布特征. *地学前缘*, 2012, 19(6): 83-89.]
- [181] Yue Zongyu, Di Kaichang, Zhang Ping. Theories and methods for numerical simulation of impact crater formation. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 110-117. [岳宗玉, 邸凯昌, 张平. 月表撞击坑形成过程数值模拟理论与方法. *地学前缘*, 2012, 19(6): 110-117.]
- [182] Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Zhou Chenghu et al. Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 18-26. [周增坡, 程维明, 周成虎 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取. *科学通报*, 2011, 56(1): 18-26.]
- [183] Ren Liliang, Liu Xinren. Hydrological process modeling based on digital basin. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(4): 45-52. [任立良, 刘新仁. 基于数字流域的水文过程模拟研究. *自然灾害学报*, 2000, 9(4): 45-52.]
- [184] Xie Shunping, Du Jinkang, Wang Lachun. Methods for processing depression and flat areas in extracting drainage networks based on the DEM. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 535-540. [谢顺平, 都金康, 王腊春. 利用DEM提取流域水系时洼地与平地的处理方法. *水科学进展*, 2005, 16(4): 535-540.]
- [185] Xu Jingwen, Zhang Wanchang. A new method for treating the depressions and flat areas in DEM for large-scale hydrology and climate models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(12): 1414-1420. [徐精文, 张万昌. 适用于大尺度水文气候模式的DEM洼地填充和平坦区处理的新方法. *水利学报*, 2007, 38(12): 1414-1420.]
- [186] Qin C Z, Zhu A X, Pei T et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(4): 443-458.
- [187] Xiong L Y, Tang G A, Yan S. et al. Landform-oriented flow-routing algorithm for the dual-structure loess terrain based on digital elevation models. *Hydrol Process*, 2014, 28(4): 1756-1766.
- [188] Zhu Hongchun, Tang Guoan, Wu Liangchao et al. Extraction and analysis of gully nodes based on geomorphological structures and catchment characteristics. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 7-13. [朱红春, 汤国安, 吴良超 等. 基于地貌结构与汇水特征的沟谷节点提取与分析. *水科学进展*, 2012, 23(1): 7-13.]
- [189] Wang Zhonggen, Liu Changming, Zuo Qiting et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM. *Progress in Geography*, 2002, 21(5): 430-439. [王中根, 刘昌明, 左其亭 等. 基于DEM的分布式水文模型构建方法. *地理科学进展*, 2002, 21(5): 430-439.]
- [190] Gaochao, Jin Gaojie. Effect of DEM resolution of results of the SWIM hydrological model in the Changtaiguan Basin. *Geographical Research*, 2012, 31(3): 399-408. [高超, 金高洁. SWIM水文模型的DEM尺度效应. *地理研究*, 2012, 31(3): 399-408.]
- [191] Qiu Linjin, Zheng Fenli, Yin Runsheng. Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3754-3763. [邱临静, 郑粉莉, Yin Runsheng. DEM栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响. *生态学报*, 2012, 32(12): 3754-3763.]
- [192] Zhang Xuesong, Hao Fanghua, Cheng Hongguang et al. Influence of subdivision of watershed on distributed hydrological model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 7(7): 1-7. [张雪松, 郝芳华, 程红光 等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响. *水利学报*, 2004, 7(7): 1-7.]
- [193] Li Z L, Xu Z X, Shao Q et al. Parameter estimation and uncertainty analysis of SWAT model in upper reaches of the Heihe river basin. *Hydrol Process*, 2009, 23(19): 2744-2753.
- [194] Li Z L, Xu Z X, Li Z J. Performance of WASMOD and SWAT on hydrological simulation in Yingluoxia watershed in northwest of China. *Hydrol Process*, 2011, 25(13): 2001-2008.
- [195] Guo Fang, Liu Xinren, Ren Liliang. A topography based hydrological model: TOPMODEL and its widened application. *Advances in Water Science*, 2000, 11(3): 296-301. [郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型: TOPMODEL及其拓宽应用. *水科学进展*, 2000, 11(3): 296-301.]
- [196] Ren Liliang, Liu Xinren. Hydrological process modeling based on digital elevation model. *Geographical Research*, 2000, 19(4): 369-376. [任立良, 刘新仁. 基于DEM的水文物理过程模拟. *地理研究*, 2000, 19(4): 369-376.]
- [197] Wan Min. Grid DEM-based distribution hydrological modeling for Feilaixia Watershed, 2010, 43(5): 549-553. [万民. 飞来峡流域基于栅格DEM的分布式水文模拟. *武汉大学学报: 工学版*, 2010, 43(5): 549-553.]
- [198] Liu Changming, Li Daofeng, Tian Ying et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed. *Process in Geography*, 2003, 22(5): 437-445. [刘昌明, 李道峰, 田英 等. 基于DEM的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437-445.]
- [199] Wang Lili, Li Zhijia, Bao Hongjun. Application of hydrological models based on DEM in the Yihe Basin. *Journal of*

- Hydraulic Engineering, 2008, (Suppl.1): 417-422. [王莉莉, 李致家, 包红军. 基于DEM栅格的水文模型在沂河流域的应用. 水利学报, 2008, (Suppl.1): 417-422.]
- [200] Liu Jiahong, Wang Guangqian, Li Tiejian et al. Sediment yield calculation in sand and coarse sand area based on the digital watershed model. Science China: Technical Science, 2007, 37: 446-454. [刘家宏, 王光谦, 李铁键 等. 基于数字流域模型的多沙粗沙区侵蚀产沙计算. 中国科学: 技术科学, 2007, 37: 446-454.]
- [201] Zhu Axing, Pei Tao, Qiao Jianping et al. A landslide susceptibility mapping approach using expert knowledge and fuzzy logic under GIS. Progress in Geography, 2006, 25(4): 1-12. [朱阿兴, 裴韬, 乔建平 等. 基于专家知识的滑坡危险性模糊评估方法. 地理科学进展, 2006, 25(4): 1-12.]
- [202] Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Chenghu et al. Analysis on susceptibility of GIS based landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang watershed. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1500-1506. [兰恒星, 伍法权, 周成虎 等. 基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1500-1506.]
- [203] Bai Shibiao, Lv Guonian, Sheng Yehua et al., Analysis of landslide causative factors using GIS in the three Gorges Reservoir area, China. Journal of Mountain Science, 2005, 23(1): 63-70. [白世彪, 闫国年, 盛业华 等. 基于GIS的长江三峡库区滑坡影响因子分析. 山地学报, 2005(1): 63-70.]
- [204] Yang Lin, Zhu Axing, Qin Chengzhi et al. A soil sampling method based on representativeness grade of sampling points. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 938-946. [杨琳, 朱阿兴, 秦承志 等. 一种基于样点代表性等级的土壤采样设计方法. 土壤学报, 2011, 48(5): 938-946.]
- [205] Zhang Caixia, Yang Qinke, Li Rui. Advancement in topographic wetness index and its application. Progress in Geography, 2005, 24(6): 116-123. [张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于DEM的地形湿度指数及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116-123.]
- [206] Qin Chengzhi, Yang Lin, Zhu Axing et al. Computation method of topographic wetness index in low relief area. Progress in Geography, 2006, 25(6): 87-93. [秦承志, 杨琳, 朱阿兴 等. 平缓地区地形湿度指数的计算方法. 地理科学进展, 2006, 25(6): 87-93.]
- [207] Fu B J, Zhao W W, Chen L D et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China. Land Degradation & Development, 2005, 16(1): 73-85.
- [208] Yang Qinke, Zhao Mudan. Application of DEMs in regional soil erosion modeling. Geomatics World, 2009, 7(1): 25-32. [杨勤科, 赵牡丹. DEM与区域土壤侵蚀地形因子研究. 地理信息世界, 2009, 7(1): 25-31.]
- [209] Liu Hongyi. Research on the Application of DEM in area soil erosion. Journal of Jilin Agricultural University, 2004, 26(1): 73-76. [刘洪义. DEM在区域土壤侵蚀中的应用研究. 吉林农业大学学报, 2004, 26(1): 73-76.]
- [210] Guo Minghang, Yang Qinke, Wang Chunmei. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 81-89. [郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀区典型区侵蚀地形特征分析. 中国农业工程学报, 2013, 29(13): 81-89.]
- [211] Guo Hong, Gong Wenfeng, Kong Da. DEM-based quantitative analysis of soil erosion: A case study of Maoershan region. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(3): 139-145. [郭红, 龚文峰, 孔达. 基于DEM的帽儿山地区土壤侵蚀定量分析. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 139-145.]
- [212] Bi Rutian, Du Jiaying, Cai Yafei. A study on soil diversity in sushui river based on the DEM. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(2): 266-270. [毕如田, 杜佳莹, 柴亚飞. 基于DEM的洮水河流域土壤多样性研究. 土壤通报, 2013, 44(2): 266-270.]
- [213] Zeng Yan, Qin Xinfa, Liu Shaoming. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrains. Chinese Journal of Geophysics, 2005, (5): 1028-1033. [曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型. 地球物理学报, 2005, (5): 1028-1033.]
- [214] Yang Xin, Tang Guoan, Wang Lei. Modeling of radiation over rugged areas based on DEM. Geography and Geo-Information Science, 2004, (5): 41-44. [杨昕, 汤国安, 王雷. 基于DEM的山地总辐射模型及实现. 地理与地理信息科学, 2004, (5): 41-44.]
- [215] Hao Chengyuan, Xu Chuanyang, Wu Shaohong. Total solar radiation spatialization in mountainous region based on DEM and climatological calculation. Resources Science, 2009, 31(6): 1031-1039. [郝成元, 许传阳, 吴绍洪. 基于DEM模型和气候学计算的滇南山区太阳总辐射空间化. 资源科学, 2009, 31(6): 1031-1039.]
- [216] Wu Xianfeng, Wang Zhonggen, Liu Changming et al. Digital rainfall-runoff model based on DEM: The application to Xiaolangdi-Huayuankou section of the Yellow River Basin. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 671-678. [吴险峰, 王中根, 刘昌明 等. 基于DEM的数字降水径流模型在: 黄河小花间的应用. 地理学报, 2002, 57(6): 671-678.]
- [217] Liu Sanchao, Zhang Wanchang, Gao Maofang et al. Simulation of land surface evapotranspiration using distributed hydrological model, remote sensing and GIS technology. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 354-358. [刘三超, 张万昌, 高懋芳 等. 分布式水文模型结合遥感研究地表蒸散发. 地理科学, 2007, 27(3): 354-358.]

- [218] Mo Shenguo, Zhang Baiping. Simulation of temperature fields based on DEM in Qinling Mts. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(4): 406-411. [莫申国, 张百平. 基于DEM的秦岭温度场模拟. *山地学报*, 2007, 25(4): 406-411.]
- [219] Liu Zhiyong, Zhang Xin, Fang Ruihong. Analysis of spatial interpolation methods to precipitation in Yulin based on DEM. *Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.*, 2010, (7): 227-234. [刘智勇, 张鑫, 方睿红. 基于DEM的榆林市降水空间插值方法分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, (7): 227-234.]
- [220] Pan Yaozhong, Gong Daoyi, Deng Lei et al. Smart distance searching-based and DEM-informed interpolation of surface air temperature in China, *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 366-374. [潘耀忠, 龚道溢, 邓磊 等. 基于DEM的中国陆地多年平均温度插值方法. *地理学报*, 2004, 59(3): 366-374.]
- [221] Yang X, Tang G A, Xiao C C et al. Terrain revised model for air temperature in mountainous area based on DEMs. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4): 399-408.
- [222] Wang Yongjun, Gong Jianya. An approach to the management of dynamic scene in large scope virtual terrain environment. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2003, 20(3): 231-234. [王永君, 龚健雅. 用于大范围虚拟地形环境的动态场景管理方法. *测绘学院学报*, 2003, 20(3): 231-234.]
- [223] Chen Zhao. GPU-based terrain rendering in Chinese painting style [D]. Changchun: Jilin University, 2011. [陈钊. 基于GPU的水墨风格地形绘制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.]
- [224] Long En, Cheng Weiming, Zhou Chenghu et al. Extraction of landform information in Changbai Mountains based on Srtm-DEM and TM data. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 557-565. [龙恩, 程维明, 周成虎 等. 基于Srtm-DEM与遥感的长白山基本地貌类型提取方法. *山地学报*, 2007, 25(5): 557-565.]
- [225] Wang Yiting, Chen Xiuwan. Monitoring glacier volume change based on multi-source DEM and multi-temporal remote sensing images. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 126-132. [王伟婷, 陈秀万. 多源DEM和多时相遥感影像监测冰川体积变化: 以青藏高原那木纳尼峰地区为例. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 126-132.]
- [226] He Wenhui, Yang Xin, Tang Guoan et al. Research on sky view factor in urban area based on urban digital elevation model. *Journal of Geo-information Science*, 2012, 14(1): 94-100. [贺文慧, 杨昕, 汤国安 等. 基于数字高程模型的城市地表开阔度研究. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1): 94-100.]
- [227] Zhang Zuo, Li Jiangfeng, Chen Shuang et al. Spatial distribution of affordable houses in cities: A case study of Wuhan based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1309-1320. [张祚, 李江凤, 陈双 等. 经济适用住房在城市中的空间分布: 基于DEM的武汉市实例分析. *地理学报*, 2011, 66(10): 1309-1320.]
- [228] Hu Zui, Tang Guoan, Lv Guonian. The concept and characteristics of GIS language. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 867-877. [胡最, 汤国安, 闫国年. GIS作为新一代地理学语言的特征. *地理学报*, 2012, 67(7): 867-877.]

Progress of DEM and digital terrain analysis in China

TANG Guoan

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Digital elevation model (DEM) is known to be one of the most important national fundamental geographic information data. The theory, method and application of digital terrain analysis (DTA) based on GIS is a hot research issue in geography, especially in the field of geographical information science. This paper makes an overall review on Chinese scholars' contribution to the research of DEM and DTA, especially to DEM data model, uncertainty, analysis method, scaling effect and high performance computing method, as well as its application in DTA. A few research groups in this field have made great progress recently, and young scholars are playing a critical role in the process. Their research has caught up with the international forefront, and achieved fruitful results in significant innovation. Some research, like DEM based regional geomorphological research on the Loess Plateau and Tibetan Plateau of China highlighted the contribution of Chinese scientists, which have had influence in the international academia to a certain degree.

Key words: digital elevation model; digital terrain analysis; geomorphology; geomatics; geographic information science; review