

基于 DEM 的坡度研究——现状与展望

杨勤科^{1,2}, 贾大韦³, 李锐^{1,2}, 梁伟^{1,2}, 师维娟^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织大气与海洋研究所, 澳大利亚 堪培拉)

摘 要: 坡度是最基本的地貌形态指标,它对地表物质能量迁移转换具有重要影响。阐述了坡度研究的几个主要方面,包括坡度分级与坡度制图方法,DEM 建立方法和 DEM 类型对坡度的影响,DEM 分辨率对坡度的影响,坡度衰减和坡度变换研究等。指出传统坡度研究方法已与 GIS 的发展,DEM 的广泛应用不相适应,也不能满足水文和土壤侵蚀定量模拟研究的需要。指出应从改善 DEM 质量和 DEM 对地形描述能力入手,将 DEM 及其基础上提取的坡度视为空间上连续变化的表面,引入数字图形图像处理方法,以区域尺度径流与土壤侵蚀模拟及其相关的数字地形分析为服务对象,对坡度问题展开系统研究。研究重点应包括:DEM 类型对于坡度的影响,坡度衰减原理,坡度变换方法与变换结果应用等。

关键词: 坡度; 坡度图; DEM; 坡度表面

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2007)01—0146—05

中图分类号: X87, S157

Researches on DEM Derived Slope: A Review and Prospective

YANG Qin-ke^{1,2}, David Jupp³, LI Rui^{1,2}, LIANG Wei^{1,2}, SHI Wei-juan^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. CSIRO Division of Marine and Atmospheric Research, GPO Box 3023, Canberra ACT 2601, Australia)

Abstract: As an essential factor of landform, slope gradient has impacted the processes of transformation of materials and energies. The main researches on slope have been reviewed, including slope mapping, slope effects of DEM type, slope scale effects involved to DEM resolutions, and transformation of coarser resolution DEM derived slope. The main problems puzzled researchers on slope is slope mapping methods, in which slope was thought of discrete data and mapping for each of the classes. These methods were not matched to development of GIS and DEM applications, and do not meet the requirements of modeling in watershed hydrology and regional soil erosion as well. Considering the application of slope in hydrology and regional erosion modeling, the vegetation suitability assessing and mapping, main topics to be studied on slope include effects of DEMs from varied interpolation strategies, mechanisms of reduction for coarser resolution DEMs derived slopes, methods and model for coarser slope transformation, and application of scaled slope surface in studies of hydrologic and erosion models at the regional scale.

Keywords: slope, slope map, DEM, slope surface

1 引言

地面坡度(简称坡度)是对地面倾斜程度的定量描述,也是一个基本的地貌形态指标。坡度通过影响重力作用,影响地表径流和土壤侵蚀发生和侵蚀强度、影响水土保持措施布设。对于大中流域和区域尺度的分布式水文和土壤侵蚀模型而言,坡度表面是最基本的模型参数^[1-2]。

由于坡度对地表过程的强烈影响和重要的地理学意义,坡度的研究长期受到重视。从地貌学、地图学 2 个方面对坡度进行了大量研究,形成了以坡度分级和坡度制图为主的研究方法。其研究结果(坡度图和统计表格等)被广泛应用于土壤、土壤侵蚀、土地利用、植被立地条件调查和水土保持措施布设等^[3-4]。传统坡度分级与制图不是对坡度大小自身的直接制图和分析,而只是坡度陡缓程度的定性描述,因而不

收稿日期:2006-06-20

修改日期:2006-09-27

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB407203);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD09B05);黄委会治黄专项(2004SZ01—04)

作者简介:杨勤科(1962—),男(汉族),陕西省陇县人,研究员,主要从事基于遥感和地理信息系统技术的区域水土流失评价研究。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn.

便认识坡度的变化规律,不便对 DEM 的有效利用,坡度研究的诸多最新成果(如基于 DEM 的坡度提取算法),也没有得到充分和有效利用。同时水文和土壤侵蚀模型要求输入的坡度参数不再是坡度分级的代码,而是具体的坡度值^[2,4-5]。随着多种分辨率 DEM 的建成和广泛应用^[6-8]、分布式水文和土壤侵蚀模型发展^[1-2]、遥感与 GIS 的广泛应用和地理研究的定量化,传统的坡度研究方法已与科学技术的发展不相适应,传统方法下的制图成果(坡度图和统计表格)已经不能完全满足科学研究的需要。本文针对土壤侵蚀等地学模型对坡度数据的需要和 DEM 数据资源的有效利用等,总结回顾已有坡度研究,分析坡度研究存在的问题,提出新的研究思路和近期研究的重点内容,以促进坡度问题研究的发展。

2 坡度的研究现状

国内外对于坡度的研究,主要有 5 个方面的内容,包括:坡度的分级和制图;基于 DEM 的坡度信息提取方法(坡度算法);DEM 类型对坡度的影响;坡度与地形图比例尺和 DEM 分辨率的关系;区域尺度水土流失和水文模型中的坡度指标及其尺度转换。由于坡度算法比较成熟^[9],也有专门的研究报告^[10],故此不再赘述,只对其它 4 个方面逐一简要阐述。

2.1 坡度的分级与制图方法

坡度信息提取和分析方法通常有 3 种。一是利用测量仪器在野外进行实测^[11];二是利用地形图,根据等高线间距离和相应的水平距离进行计算^[12];三是利用 DEM,在 GIS 支持下利用专门的算法提取坡度(表面)^[9-12]。对于不同目的、不同空间尺度和精度的研究,坡度信息提取的方法有所不同。在坡面尺度进行土壤调查、土壤侵蚀调查、水土保持措施布设等,坡度等地形参数可以通过地面实测、大比例尺地形图(或高分辨率 DEM)量测来获取^[13]。在区域尺度水文和土壤侵蚀定量评价、植被适宜性评价等研究中,考虑到数据量和计算能力等方面的限制,坡度等地形指标只能基于中低分辨率 DEM 提取^[14-15]。

在流域或区域尺度的研究中,无论利用哪种方法提取坡度信息,传统的方法通常是将坡度划分为若干级别,然后再进行坡度的统计和制图分析^[12,16]。由于受到地图表现能力和统计分析能力的限制,坡度制图通常是对坡度级别(只是一种代码)的制图。这种方法有 2 个缺陷,一是形成通用的,供多个专业使用的坡度分级系统方案十分困难。由于缺少统一的分级系统,使不同作者和为不同目的编制的坡度图,在空间结构和相应的统计数据方面可比性较低,坡度制

图数据的共享应用受到了严重限制。二是坡度的制图不是针对坡度本身,而是坡度级别。因此坡度被表现为有限的几个值(坡度的等级数)且不连续。事实上,根据 DEM 插值原理,DEM 反映的高程及其变化率,均是空间上连续变化的表面^[17-18]。这种传统的方法与手工制图和地理学定性描述方法相适应,虽也满足了生产和科学研究的基本要求,但却与坡度的连续性不相适应,进而限制了对坡度问题的认识,包括对坡度表面结构和频率分布特点的认识。传统方法也不便 DEM 数据的使用,使坡度算法的研究成果不能得到有效利用。

2.2 DEM 建立方法及其对坡度的影响

在区域尺度的研究中,坡度只能利用 DEM 来提取。DEM 的类型和质量对坡度具有明显影响。

DEM 类型:根据 DEM 对水文特征与地貌关系的表现能力,可将 DEM 分为两类:水文增强的 DEM (Hydrologically Enhanced DEM, Drainage Enforced DEM)^[19-20]和非水文增强的 DEM。前者充分考虑或正确处理了地形与水文特征的关系^[21],后者则对此未做处理。第一类 DEM 也可称为水文关系地貌正确的 DEM (Hydrologically Correct DEM, Hc-DEM)^[17-21],如美国地质调查局(USGS)建立的 Hydro1k^[22]和澳大利亚的 DEM^[23]等。后者如我国利用 1:25 万、1:5 万和 1:1 万地形图和多要素构 TIN 方法建立的 100、25、10 m 分辨率 DEM (简称 Tin-DEM)^[6-8]。正确表现地形的形态及其与水文特征的关系,则是区域土壤侵蚀研究对 DEM 的最基本要求^[9,24]。

Hc-DEM:基于数字地形图,利用 Hutchinson 教授提出的 DEM 插值算法^[17-18,25],可以建立 Hc-DEM。这类 DEM 的特点包括:如实表现地面形态(terrain shape),如坡度和坡向等,因而正确表现地形的连续和突变;表面没有或很少有伪下陷点(sink),使地表径流能连续汇集^[20];符合水文地貌学基本原理^[21],正确反映水文要素(水流方向、水流路径、水系网络、流域界线等)与地貌特征发生和位置关系,保证提取的河流网络能相互连通。这些特征是水文模型和土壤侵蚀模型的基本要求^[20,26]。Hc-DEM 的基本概念,Hutchinson 的算法和 ANUDEM 软件在全球范围内得到广泛应用^[23,27],但在国内只是近年才有少量应用和介绍^[25,28,31]。

Tin-DEM:利用多种高程信息(等高线、高程点,骨架点),通过构建不规则三角网(triangle irregular network, TIN)建立 DEM^[6-8],是目前最常用的 DEM 插值方法。该方法的优点是不受地形类型、数

据密度限制(三角点密度可据地形复杂程度做出调整),数据冗余小。缺点是如果不加入新的高程数据而仅利用等高线和高程点,生成 DEM 将不能很好地反映河流(沟道)和流域边界等重要的人文地貌特征^[24,28-29,31]。

DEM 类型对坡度的影响:DEM 的类型(特别是着眼于其建立方法),对地形起伏及其坡度有较大影响。以基于 1:25 万地形图的粗分辨率 DEM 及其上提取的坡度为例,从其上提取的光照模拟和坡度图可见 Tin-DEM 由于其固有的小三角形使得 DEM 表面有较多的平顶(梁峁顶)存在,不能如实反映地形的形态特征,提取的坡度表面呈明显的带状结构。而利用 Hutchinson 算法建立的 Hc-DEM,对于地表具有更加真实的描述,提取的坡度反映了一种连续变化的特征。两者的差别在坡度频率曲线上具有清楚的反映^[31]。但在对坡度的研究中,不同来源 DEM(主要是插值方法)对地形表现能力及其对坡度的影响,并未引起研究者的足够重视。

2.3 DEM 分辨率及其对坡度的影响

DEM 的分辨率。单就利用地形图插值生成 DEM 而言,DEM 的分辨率是指在一定区域,与用来插值的基础数据(地形图)信息量相适应,且能较好地反映其地形特征的 DEM 栅格尺寸^[30]。根据对地理尺度的研究,分辨率对 DEM 和坡度等地形指标的影响可区分为 2 个方面,即制图综合程度的影响和取样点间距(或栅格尺寸)的影响^[32]。明确分辨率的这 2 种要素具有重要意义。一方面可保证插值过程中读取地形图上的全部地形信息,另一方面加深分辨率对坡度影响的研究,同时可使 DEM 的应用研究与遥感图像分析、与地理尺度分析等相协调。

DEM 分辨率对坡度的影响。众多研究表明,随着 DEM 分辨率的降低,在其上提取的坡度不断趋于平缓^[32-36],这种现象称为坡度衰减。这种衰减使基于中低分辨率 DEM 提取的坡度表面(中低分辨率坡度)不能如实表现地形起伏,因之也不能有效提取与坡度有关的地貌和水文参数^[33],进而影响了水文和土壤侵蚀模拟计算精度^[37]。

(1) 制图综合程度对坡度的影响。随着比例尺的缩小,地形图表示细部特征的能力降低,而只能描述宏观性、骨架性地形特征,并使其上直接求取的坡度不断趋于平缓。在较小比例尺上提取的坡度,更加是一种数学坡度而其地理学意义则不断降低,不能直接反映地形起伏^[38]。

(2) 栅格尺寸对坡度的影响。Hutchinson 认为,基于地形测绘数据(等高线、高程点和河流)进行插值

生成 DEM 时,如果栅格尺寸较大,则一个栅格内包括了较多高程点(等高线)并用这些点(线)高程的平均值代表拟合表面上该栅格的高程值。这种情况下拟合表面反映的地形比较平缓。随着栅格尺寸不断减小,各栅格值中将没有或很少对观测点进行平均,拟合表面所表现的地形起伏越来越接近其基础数据表现的起伏程度,坡度会越来越接近并最终稳定在某一个水平上^[39-40]。笔者等在黄土高原的研究结果也表明了这种影响^[29-30]。

2.4 中低分辨率 DEM 坡度变换研究

针对大区域宏观研究对坡度指标的需求和坡度衰减,研究者从地貌的分形特征^[41]、地面坡谱特征^[35]和地图学特征^[38]等方面,对坡度变换进行了探索。比较一致的意见是,有可能通过变换使基于较低分辨率 DEM 提取的坡度(中低分辨率坡度)具有基于较高分辨率 DEM 提取的坡度所具有的地表起伏表现能力^[38,42,43]。如 David 的研究表明,可根据 1 000 m 分辨率 DEM 估算具有 100 m 分辨率 DEM 精度的坡度^[32]。

为了满足区域和全球水土流失评价研究,已有研究采用了 2 种方法来处理坡度衰减问题。一是根据地貌学理论拟订替代指标,间接表示坡度的陡缓,如地形起伏度——给定窗口最大高差。用 1 000 m 分辨率 DEM,在全国不同类型区的研究表明,当计算窗口为 5 km × 5 km 时,求取的起伏度可以反映全国地形起伏的宏观特征,并能作为区域水土流失评价的最佳地形指标^[44]。第二种方针是对中低分辨率坡度进行变换(恢复),以便能使之尽可能反映地面坡度“真实”状况。汤国安研究认为通过对坡度图谱的研究可以完成 2 种比例尺之间各种坡度分级类型的统计学转换^[35]。Zhang 根据地貌分形特征,将坡度看成是分辨率和分形维数的函数,通过在典型地区高分辨率的抽样,对全球范围 1 000 m 分辨率的坡度进行了变换。变换结果是一个新的坡度表面,坡度范围从 0° ~ 17° 变换为 0° ~ 71°^[42]。

坡度变换方面存在的问题是,起伏度指标因为没有建立起与坡度的定量关系,因而不便直接利用;地面坡谱方法还不能实现对坡度空间特征的反映;而基于分形变换的方法,虽是一个值得注意的研究方法,但还需要更多高分辨率数据的验证。所以中低分辨率的坡度衰减和坡度变换,成为大中流域水文与区域土壤侵蚀模拟、DEM 数据资源高效利用必须面对和研究解决的重要理论问题。为此,笔者新近对坡度表面的尺度变换进行了新的探索^[45]。

2.5 存在的问题

综观上述研究可见,关于坡度研究,还存在以下问题。(1)研究方法上,大多依然沿用了分级制图的方法,或基于坡度表面进行分级统计,这种状况与遥感和GIS、DEM建立等科技发展,与地学模型和数字地形分析对坡度数据的需求不相适应,同时也限制了对坡度问题的认识和解决。(2)DEM类型和建立方法对于坡度的影响,也就是对于DEM是否能正确反映基本地形特征,未引起足够重视,一些研究中利用了多种方法建立的DEM^[42]。(3)在分辨率对坡度的影响方面,只注意到了坡度衰减,但对衰减原因大多未做深刻分析,也没有严格区分制图综合和采用间距2种影响。(4)对于坡度衰减的地貌学、制图学原理认识不够清楚。对于粗分辨率坡度变换方法的探讨均还比较初步。

3 研究展望

从改善DEM质量和DEM对地形描述能力入手,根据地貌学、水文地貌学、地图制图综合、DEM插值方法和分形等理论,将DEM及其基础上提取的坡度均视为空间上连续变化的表面,利用遥感与地理信息系统技术方法(包括数字图像处理 and 数字地图制图),以区域尺度径流与土壤侵蚀模拟及其相关的数字地形分析为服务对象,对坡度问题展开系统研究,近期研究重点问题包括:(1)DEM类型对于坡度影响研究。基于TIN—DEM和Hc—DEM提取坡度并进行比较,分析DEM插值方法和DEM类型对坡度特征的影响。(2)坡度衰减原理研究。考虑地形图编制中的制图综合过程和DEM插值中取样间隔对地形图和DEM表现地形能力的影响,利用地貌学、地图学、地统计学和分形理论与方法,认识坡度衰减的地貌学和地图学基础,揭示坡度衰减的内在发生机制。(3)坡度变换方法研究。利用数字图像处理方法,建立相邻分辨率坡度定量转换关系,对较低分辨率DEM提取的坡度进行变换并将其应用于区域尺度的水土流失模型等研究中,检验其实用性。

本论文撰写过程中,曾与汤国安教授和澳大利亚的Brian Lees教授讨论,谨此致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 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[J]. 地理科学进展,2003,22(5):437—445.
- [2] 徐涛. 基于GIS的区域水土流失模型研究[D]. 中国科学院水利部水土保持研究所硕士论文,2005.
- [3] McVicar T R, Wen Z M, Li L T, et al. Mapping perennial vegetation suitability and identifying targeting areas for implementing the re-vegetation program in the coarse sandy hilly catchments of the loess plateau, China[M]. CSIRO Land and Water Technical Report, Canberra, Australia, : CSIRO Land and Water. 2005. 55.
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting rainfall eesion by Water: A Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) USDA Agric. Handb. No 703[M]. 1997.
- [5] Flanagan D C, Nearing M A (eds). USDA- Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10[M]. 1995.
- [6] 唐新明,李莉,季小燕,等. 全国七大江河流域重点防范区1:1万数字高程模型(DEM)数据库的建立[J]. 测绘通报,2002(6):19—22.
- [7] 王东华,吉建培,刘建军,等. 论国家1:50000数字高程模型数据库建设[J]. 地理信息世界,2003,1(2):12—15.
- [8] 王东华,刘建军,商瑶玲,等. 全国1:25万数字高程模型数据库的设计与建库[J]. 测绘通报,2001,10:27—29.
- [9] Moore I D, Grayson R B, Landson A R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological Processes, 1991(5):3—30.
- [10] 刘学军,龚健雅,汤国安. 基于DEM坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报,2004,33(3):258—263.
- [11] Hammer R D, Young F J, Wollenhaupt N C, et al. Slope class maps from soil survey and digital elevation models[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995(59):509—519.
- [12] 汤国安. 黄土丘陵沟壑区地面坡度分级及其制图的方法研究[D]. 西北大学硕士论文,1987.
- [13] Martin P L, Lawrence W M, Geoff W K, et al. Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model[J]. Environmental Modelling & Software, 2002,17:127—136.
- [14] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于DEM的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报,2003,18(2):168—173.
- [15] de Jong S M, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data [J]. Catena, 1999, 37(3—4):291—308.
- [16] 刘元保,唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. 水土保持通报,1987,7(3):59—65.
- [17] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology, 1989,10(6):211—232.
- [18] Hutchinson, M F. ANUDEM Version 5.1[M]. The

- Australian University, Centre for Resource and Environmental Studies. Canberra, 2004.
- [19] Underwood J, Crystal R E. Hydrologically enhanced, high-resolution DEMs [J]. *Geospatial Solutions and GPS World*, 2002:8—14.
- [20] Kiss R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations [J]. *Journal of Hungarian Geomathematics*, 2004(2):16—29.
- [21] Roy C, Sidle Y O. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(4):597—602.
- [22] Verdin K L, Greenlee S K. HYDRO1k documentation, USGS EROS Data Center, Sioux Falls, SD, 1998.
- [23] Hutchinson M F, Stein J A, Stein J L. Upgrade of the 9 Second digital elevation model for Australia [M]. 2001, Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University.
- [24] Hutchinson M F, Gallant J C. Representation of terrain [M]. in: *Geographical Information Systems: Principles, Technical Issues, Management Issues and Applications*. Second Edition, Chapter 9. New York: Wiley, 1999. 105—124.
- [25] 杨勤科, Mcvicar T R, 李领涛, 等. ANUDEM—专业化数字高程模型插值算法及其特点 [J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3):36—41.
- [26] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展 [J]. *水科学进展*, 2004, 15(4):495—500.
- [27] USGS EROS Data Center. GTOPO30 Documentation [M]. Sioux Falls, SD, 1996.
- [28] 周买春, 黎子浩, Jayawardena A W. 数值地形图的生成及其水文地貌特征评价 [J]. *水利学报*, 2002(2):71—74, 78.
- [29] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 用数字地形图和 ANUDEM 建立高分辨率 DEM 方法研究 [J]. *水利学报*, 2006, 37(8):1009—1014.
- [30] 杨勤科, 张彩霞, 李领涛, 等. 基于信息含量分析法确定 DEM 分辨率的方法研究 [J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(5):21—23, 28.
- [31] Yang Q K, Van Niel T G, McVicar T R, et al. Developing a digital elevation model using ANUDEM for the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China [M]. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report, 2005.
- [32] David M W, McCabe G J. Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data [J]. *hydrological processes*, 2000, 14:987—1002.
- [33] Gao J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(2):199—201.
- [34] Thompson J A, Charles B, Butler A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling [J]. *Geoderma*, 2001, 100:67—89.
- [35] 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.
- [36] 郝振纯, 池宸星, 王玲, 等. DEM 空间分辨率的初步分析 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(5):499—504.
- [37] Cochrance T A, Flanagan D C. Effect of DEM resolutions in the runoff and soil loss predictions of the WEPP watershed model [J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(6):1—12.
- [38] 杨勤科, 李锐, 梁伟. 区域水土流失地形因子的地图学分析 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1):56—59.
- [39] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models [C]. in: *Third Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Barbara: NCGIA, University of California, 1996.
- [40] Hutchinson M F, Gallant J C. Digital elevation models and representation of terrain shape [M]. in: *Terrain Analysis, the principle and application*. Wiley: New York, 2000. 29—50.
- [41] Klinkenberg B, Goodchild M F. The fractal properties of topography: a comparison of methods [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(3):217—234.
- [42] Zhang X, Drake N A, Wainwright J. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24:763—779.
- [43] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30:1019—1028.
- [44] 刘新华, 杨勤科, 李锐. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中应用 [J]. *水土保持通报*, 2001, 21(1):57—59.
- [45] Yang Q K, Jupp D, Li R, et al. Re-scaling lower resolution slopes by histogram matching. in: *Proceedings of the First International Symposium on Terrain Analysis and Digital Terrain Modelling*, Nanjing, 2006.