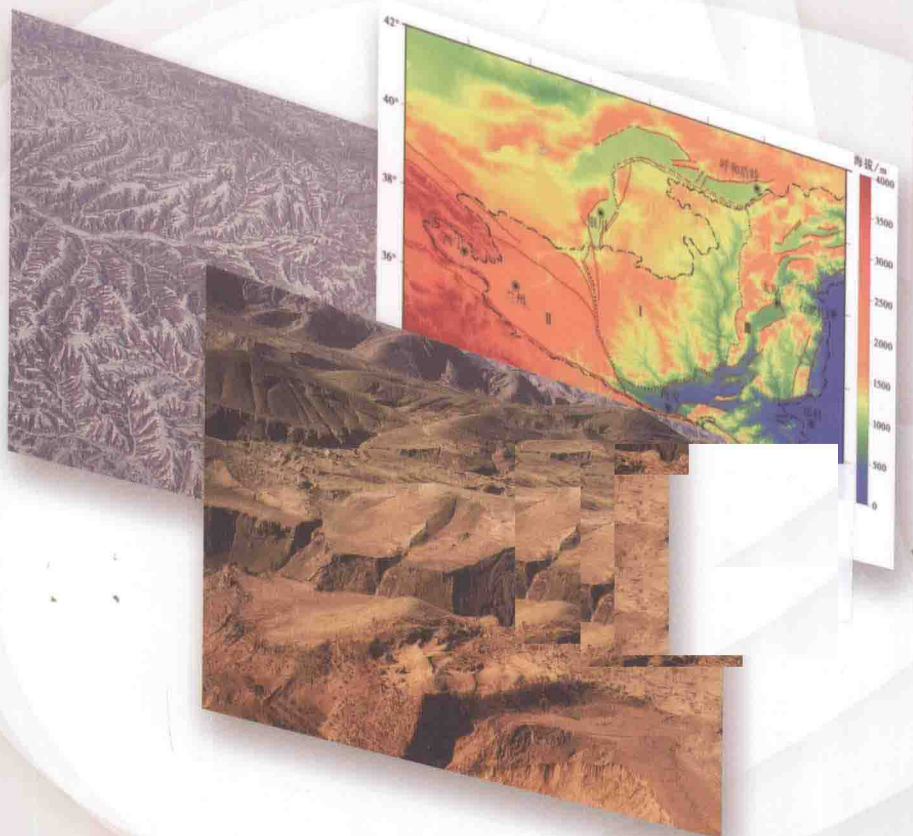




黄土高原数字地形分析

探索与实践

● 汤国安 李发源 杨昕 熊礼阳 等著



科学出版社

黄土高原数字地形分析探索与实践

汤国安 李发源 杨 昕 熊礼阳 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室 DEM 课题组多年以来对黄土高原数字地形分析研究的成果总结。课题组通过多次野外实地考察与计算机模拟相结合、典型样区研究与整体研究相结合、微观分析与宏观分析相结合、理论研究与应用拓展相结合等一系列研究方法,提出了一系列有关基于 DEM 的黄土高原数字地形分析的新理论与新方法,取得了一批有影响的研究成果。本书以专题为线索组织内容,从 DEM 构建、尺度、地形信息图谱、地形特征要素提取、地形演化模拟等方面对已有成果做了较为全面的介绍。

本书可供地理、地质、地貌、测绘、环保等专业的研究人员和专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原数字地形分析探索与实践/汤国安等著. —北京:科学出版社, 2015.3

ISBN 978-7-03-043034-2

I. ①黄… II. ①汤… III. ①数字技术-应用-黄土高原-形态分析-研究 IV. ①P942.407.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 009466 号

责任编辑:朱海燕 李秋艳 / 责任校对:张小霞 赵桂芬

责任印制:赵博 / 封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:23 3/4

字数:563 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国黄土高原所发育的黄土地貌，在新生代以来全球变化的深广背景中，以其厚大的黄土堆积、富于变化的黄土地貌类型、触目的土壤侵蚀，以及自然-人类活动交互作用下所造就的独特地貌景观而闻名于世，被誉为全球最具有地学研究价值的地理区域之一，也是我国地球科学工作者做出国际一流研究成果的重要舞台与基础。目前，我国在黄土成因、黄土高原古地理环境、黄土微观物质特性、黄土土壤学特征与土壤侵蚀特征等多方面的研究都已处于世界的前列。在黄土地貌的研究上，也已取得了丰硕的成果。近年来，现代地理信息科学与技术的形成与发展，给传统的地学分析方法带来了一场革命性的变革。其中数字地形分析技术研发与应用，基于数字高程模型 (DEM) 已可实现对各类坡面地形因子、特征地形要素的自动提取与分析，从而为进行深层次地学知识发现奠定了新基础和开辟了道路，从根本上改变了传统的基于地形图的地形分析方法。同时，我国基础地形数据库的建立，也为开展黄土高原地区多尺度的数字地形分析研究提供了极好的条件。

以汤国安教授为带头人的数字地形分析课题研究组，近 20 年来一直潜心于数字高程模型及数字地形分析的理论与方法研究。21 世纪初，他在西北大学地质系从事博士后研究期间，就已首先提出了黄土地貌坡谱分析的新方法。近年来，他在国家自然科学基金重点项目、国家 863 计划重点课题等研究项目的支持下，对黄土高原数字高程模型的构建，以及黄土高原数字地形分析方法进行了更深入系统的探索。在综合分析黄土高原地形与地貌、微观与宏观、定性与定量、解析与综合、表象与机理诸多问题的基础上，进一步提出了一整套黄土地貌量化研究的新方法。特别是在黄土高原高保真 DEM 及信息特征、黄土高原数字地形分析的尺度效应、黄土高原地形特征要素提取与分析、黄土高原地形信息图谱分析方法等方面，取得了重要的理论创新与方法突破。本专著《黄土高原数字地形分析探索与实践》就是对以往部分研究成果的凝练与概括总结，由科学出版社出版。作者一直采用通过野外实地调查与虚拟实验相结合、典型样区剖析与区域差异性研究相结合、理论研究与应用拓展相结合等一系列综合研究方法，对黄土地貌的微观形态、宏观分异格局、地貌演化机理等做了深入的调研、分析与探索，深化了对黄土高原地貌及发育规律的认识，为该黄土区水土流失治理与生态修复重建工程的实施提供了科学依据。本专著也是基于基础地理数据和 GIS 空间分

析方法对深层次地学问题进行探索研究的成果，可望充实和发展地球系统科学的理论与方法体系。

目前，以数字地形分析为基础发展形成的地貌计量学(Geomorphometry)已成为地貌学的重要分支学科。在已经召开的四届国际地貌计量学大会中，有两届都由汤国安任大会主席在南京师范大学召开，显示我国在该领域的研究已得到国际同行的认可。我希望作者能始终抓住黄土高原这个富有特色的重点区域不放，紧扣学科前沿和国家重大需求，锐意进取，积极推进数字地形分析乃至地貌计量学研究向深度和广度拓展，进一步提升我国科学家在黄土高原研究上的国际领先地位，为GIS能够真正扎根、服务并发展地球系统科学做出我国科学家应有的贡献。

中国科学院院士 

2015年2月1日

Foreword

Loess landform in the Loess Plateau of China is famous for its thick loess deposits, various landscape types, serious soil erosion and unique geomorphology formed by human-nature interaction under the background of globe change during the Cenozoic Period. Therefore, the Loess Plateau is hailed as one of the most valuable areas for earth science research of the world, it is also been regarded as the important stage for Chinese earth science researchers to make world-leading research achievements, which can be exemplified as formation and micro properties of loess, paleo environment of the Loess Plateau, pedology characteristics of loess and loess geomorphic features. At the same time, outstanding achievements have been made in loess geomorphology research. In recent years, the formation and development of modern geographical information science and technology has brought a revolutionary change in traditional geo-science analytical methods. All kinds of land surface derivatives and terrain features can be derived automatically using the technology of digital terrain analysis (DTA) based on digital elevation model (DEM) . Thus, it laid the foundation and opened a new way for in-depth knowledge discovery in geo-science, which fundamentally changes the traditional methods of terrain analysis based on topographic maps. Meanwhile, the establishment of national basic terrain topographic database also provides advantageous conditions for multi-scale digital terrain analysis in the Loess Plateau.

The research team led by Professor Tang Guoan has been studying the theory and methods of digital elevation model and digital terrain analysis in the past 20 years. In the beginning of this century, he had taken the lead to propose a slope spectrum analysis method for the investigation of loess landform, when he was a postdoctoral fellow in the Department of Geology, Northwest University. In recent years, under the support by projects of the National Natural Science Foundation of China, National High Technology Research and Development Program of China (863) etc. , he has made more deeply and systematically explorations in the construction of DEM and method of DTA for the study of the Chinese Loess Plateau. The group has made important theoretical innovation and methodological breakthroughs, especially in the high fidelity DEM, scale effect on DTA, extraction and analysis of topographical features and terrain information spectrum in loess landform. This monograph, *Exploration and Practice of digital terrain analysis in the Loess Plateau* is the summary of previous research results, and will be published by Science Press. The authors have been exploring and investigating loess landform spatial variation from micro to macro scale as well as the landform evolution, through a combination method of field surveys and virtual experiments, typical sample

area and regional differences, theoretical research and applicable extension. This study has deepened the understanding of loess landform formation and evolution in the Loess Plateau of China, and provided a scientific basis for the implementation of the loess soil erosion conservation and ecological reconstruction. This monograph is also an important study of earth scientific issues based on basic geographic data and GIS spatial analysis, and is expected to enrich the theory and methodology of earth system science.

Nowadays, Geomorphometry, developed on the basis of digital terrain analysis, has been an important sub-discipline of geomorphology. Among the total 4 times of Geomorphometry International Conference, 2 of them were hosted by Prof. Tang Guo'an and his research team in Nanjing Normal University, which shows the research achievements in the Geomorphometry field are accepted by the international experts. I hope the authors can focus on the Loess Plateau, keep up closely with academic frontiers and national major demands, actively promote digital terrain analysis and Geomorphometry, in order to enhance our research leading position of the Loess Plateau in the world and make due contributions to a well combination between GIS and earth system science.

Zhang GuoWei

Feb 1st, 2015

前 言

我国的黄土高原被誉为全球最具有地学研究价值的独特地理区域之一。它是中华民族的摇篮、华夏文明的发祥地。它以连续分布的巨厚黄土地层、典型的黄土地貌、严重的水土流失、独特的自然地理景观和光辉灿烂的文化历史而闻名于世界。对黄土的研究也是当代地理学研究的热点之一。一个多世纪以来,各国学者在黄土成因、黄土高原古地理环境、黄土微观物质特性、黄土土壤学特征与土壤侵蚀特征等方面的研究都取得了许多重要成果,凸显了在世界地学研究中的重要地位。黄土地貌是经过 200 余万年黄土搬运和堆积,在风力和水力交互作用下,在承袭下伏岩层的古地貌基础之上,按特有的发育模式形成了当今复杂多样且有序分异的地貌形态组合。由于第四纪以来黄土高原新构造运动总体表现为内部大面积整体、间歇性抬升,而其四周的坳陷或地堑则在不断下沉,更由于黄土物质及降雨侵蚀力在南北向的有序分异,以致黄土地貌呈现明显的空间分异。黄土高原地貌形态空间格局的研究对于揭示物质、能量在塑造地面形态中的作用,揭示黄土地貌的形成与土壤侵蚀的内在机理,指导黄土高原生态修复与区域可持续发展,都具有重要的意义。

自 20 世纪 50 年代以来,人们对黄土地貌的研究进行了长期探索。从构造、侵蚀、形态特征等不同的角度在定性或半定量层次探讨了黄土地貌的分类与分区;根据综合成因分类和形态分类的原则,完善了黄土地貌的分类系统,编制了多种比例尺尺度的黄土高原地貌类型图,明确了黄土地貌发育的基本模式,从定性的角度,分析了黄土地貌的组合特征及区域分布规律,提出了黄土地貌定量研究的基本方法,建立了划分流域地貌系统发育阶段的理论模型,对流域侵蚀强度随流域地貌演化而变化的规律展开了详细的剖析。

以遥感和地理信息系统为主要标志的现代空间信息技术的发展,为黄土高原的研究揭开了崭新的一页。特别是近年来不同空间尺度数字高程模型(DEM)数据源的建立与数字地形分析应用中技术方法的不断完善与提高,为开展黄土高原数字地形分析,深入揭示黄土地貌的空间分异规律奠定了坚实的基础。DEM 概念于 1958 年由 Miller 首次提出,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。

南京师范大学地理科学学院多年来一直致力于基于 DEM 的黄土高原数字地形分析工作,早在 20 世纪 90 年代,就致力于基于 DEM 的黄土沟沿线、黄土沟头等方面的研究。21 世纪以来,研究团队进一步凝聚了来自全国从事数字地形分析的研究力量,在多项国家自然科学基金项目及国家 863 项目的支持下,在数字地形模型构建与不确定性分析、特别是黄土高原数字地形分析的理论与方法上进行了深入的探索,凝练了地形因子提取、特征要素提取、地形统计分析及地学模型分析四类主要的数字地形分析方法。在复杂黄土地貌条件下高保真 DEM 的构建、黄土特征地形要素高精度提取与不确定

性、基于地形信息图谱的黄土地貌分析等方面进行了重要的探索，取得了重要的研究成果。

然而，由于 DEM 本质上是不同采样方式的离散点记录地面海拔高程表示的数据集合，所反映的地貌特征也仅仅是地面形态及其空间变化。能否基于 DEM 数据，通过创新的数字地形分析方法，研究黄土地貌成因机理特征及深层次的地貌学科学问题，是摆在我们面前的难题。特别是，现有的数字地形分析方法，大多为基于栅格分析窗口的算法。如何突破这种“近视眼”分析法，真正实现面向区域尺度的宏观黄土地貌的分析，是摆在我们面前的难点问题。为解决以上问题，2009 年在国家自然科学基金重点项目《基于 DEM 的黄土高原地貌形态空间格局研究》支持下进行了深入的研究，提出了黄土地貌核心地形因子体系、坡谱分析法、地形特征点簇分析法、地形纹理分析法、坡面景观分析法、面积高程积分分析法、地貌继承性分析法等全新的黄土地貌数字地形分析方法。在一个全新的视野下揭示了黄土地貌的空间格局及成因机理特征。

本书通过对已发表的主要研究论文的系统整理，以期对近年来上述研究工作做较全面的总结。全书的编撰工作由汤国安、李发源、杨昕、熊礼阳完成，其中各章的编撰工作人员如下，第一章：汤国安、李发源；第二章：李发源、杨昕；第三章：王春、董有福、张婷、詹蕾、赵卫东、祝士杰、江岭、熊礼阳；第四章：汤国安、杨昕；第五章：汤国安、李发源、王春、张维、陶旻、刘凯；第六章：李发源、朱红春、罗明良、熊礼阳、周毅、宋效东、晏实江、张磊；第七章：袁宝印、熊礼阳、曹敏、王春、祝士杰。

本书的完成特别感谢中国科学院地质与地球物理研究所袁宝印研究员、中国科学院生态环境研究中心陆中臣研究员、中国科学院地理科学与资源研究所周成虎研究员、西北大学杨勤科教授和李昭淑教授、奥地利萨尔茨堡大学 Josef Strobl 教授、陕西师范大学甘枝茂教授、长江水利委员会张平仓研究员，他们给予研究团队诸多具体的指导与帮助。本书还得到了黄河中上游管理局、绥德水土保持试验站、西峰水土保持试验站等单位的大力支持，使我们的野外工作得以顺利开展。南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室闾国年教授、谢志仁教授、黄家柱教授、刘学军教授、韦玉春教授、龙毅教授都给予了诸多帮助，在此一并致谢。

汤国安

2014 年 7 月于南京师范大学仙林

Preface

The Loess Plateau of China has been regarded as one of the most unique geographic region for geo-research in the world. It is the cradle of the Chinese nation and the birth-place of Chinese civilization. The Loess Plateau is famous for its continuous distributed and thick loess strata, typical loess landforms, severe soil erosion and brilliant history. The loess research also arouses wide interest in modern geographical research. For more than a century, researchers from all over the world have achieved many important results, such as loess origin, paleogeographic environment of the plateau, micro-material properties of loess, pedogenic environment of loess and the characteristic of soil erosion. After more than two million years of loess deposition and sculptured by water and wind erosion forces, the loess landform, with complex and diverse landscape as well as specific spatial distribution pattern, has been formed on the basis of the inheriting of the underlying palaeotopography. During the Quaternary period, the tectonic activity within the Loess Plateau performed integrated and intermittent uplift in the middle, but ongoing depression on the edge, and the spatial variance of soil erosion condition from north to south, which contribute together to the unique and specific loess landform combination. The research on the spatial pattern of loess landform has important theoretical significance and broad application prospects in revealing how the material and energy shaped the landscape, the spatial variance of loess terrain characteristics and the inner mechanism of the formation and soil erosion process of loess landform. This research also plays an important role in guiding the ecological restoration and regional sustainable development on Loess Plateau.

Since the 1950s, many scholars have been engaging in the loess landform research. Loess landform classification has been investigated qualitatively or semi-quantitatively from the perspective of tectonic, erosive, morphological characteristics. On a basis of the loess landform genes and its morphology, the classification system of loess landform has been improved and perfected, geomorphic maps with multiple scales have been compiled, and the development pattern of loess landform has been cleared. They also analyzed the combination and distribution of loess landform, proposed the basis methods of loess landform research quantitatively, established a theoretical model to classify the developmental stage of watershed landform, and studied how erosion intensity changes accompany with the evolution of watershed landform.

With the development of RS and GIS, the researches on the Loess Plateau opened a brand new page. Especially in recent years, the establishment of DEM dataset with different scale and the continuous improvement of DTA methods laid a solid foundation on

revealing the spatial regulation and distribution of the landform in the Loess Plateau. The concept of DEM was put forward by Miller for the first time in 1958. After decades of development, many basic theoretical issues such as the DEM data model, the method of digital terrain analysis, the accuracy and scale problems of digital terrain analysis were studied thoroughly. The theories and methods of digital terrain analysis based on DEM become gradually mature.

The school of Geographical Sciences in Nanjing Normal University has been engaged in the research of DEM based digital terrain analysis in the Loess Plateau of China. Back in the 1990s, our research team has already done the research of the loess shoulder lines and loess gully heads. Since the 21st century, the team has attracted scholars majored in digital terrain analysis from the country. With the support of a number of National Natural Science Foundation and the National 863 Project, the team carried on a deep research on digital terrain model construction and uncertainty analysis, especially the exploration of the theory and methods of digital terrain analysis used in the Loess Plateau of China. And finally, the team summarized four major digital terrain analysis method including terrain derivatives extraction, terrain feature extraction, terrain geo-statistical analysis and geo-modeling. The research team also made several significant achievements like fidelity DEM building in a complicate loess terrain, accuracy and uncertainty of loess terrain feature extraction, loess landform analysis based on terrain information TUPU et al.

However, the DEM is essentially a discrete point cluster with different sampling methods to record the elevation of surface. The geomorphologic features showed from DEM can only represent the surface morphology and spatial variation. It is a clear and difficult problem that whether we can on a basis of DEM data and innovative digital terrain analysis method, to investigate the loess landform formation mechanism and the scientific problems fluvial geomorphology. In particular, the existing digital terrain analysis methods are mostly based on the calculation method of 3 by 3 grid window analysis. It is a difficult problem in front of us to break this “myopia” analysis method and implement a macro loess landform analysis method for regional scale. To solve aforementioned problem, under the support of the key project of National Natural Science of China named “DEM based research on the spatial pattern of loess landform in the Loess Plateau”, we has made a further study on the DTA method used in loess landform. We have proposed a list of new DTA methods, such as key terrain derivatives system in loess landform, slope spectrum analysis, terrain feature point cluster analysis, terrain texture analysis, slope-landscape analysis, hypsometric integral analysis, landform inheritance. We try to reveal the spatial pattern and genetic mechanism of loess landform under a new vision.

This book is a comprehensive summary of the research work composed of a list of published papers in recent years. This entire book is compiled by Tang Guoan, Li

Fayuan, Yang Xin and Xiong Liyang. The compilers of each chapter are as follows: the first chapter are Tang Guoan and Li Fayuan; the second chapter are Li Fayuan and Yang Xin; the third chapter are Wang Chun, Dong Youfu, Zhang Ting, Zhan Lei, Zhao Weidong, Zhu Shijie, Jiang Ling and Xiong Liyang; the fourth chapter are Tang Guoan and Yang Xin; the fifth chapter are Tang Guoan, Li Fayuan, Wang Chun, Zhang Wei, Tao Yang and Liu Kai; the sixth chapter are Li Fayuan, Zhu Hongchun, Luo Mingliang, Xiong Liyang, Zhou Yi, Song Xiaodong, Yan Shijiang and Zhang Lei; the seventh chapter are Yuan Baoyin, Xiong Liyang, Cao Min, Wang Chun and Zhu Shijie.

Finally, we would like to express our gratitude to all those who gave our team a lot of specific guidance and help during the writing of this book. They are Prof. Yuan Baoyin from the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences; Prof. Lu Zhongchen from the Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences; Prof. Zhou Chenhu from the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences; Prof. Yang Qinke and Li Zhaoshu from the Northwestern University; Prof. Josef STROBL from the University of Salzburg; Prof. Gan Zhimao from the Shanxi Normal University; Prof. Zhang Pingcang from the Yangtze River Water Resources Commission; Prof. Lv Guonian, Xie Zhiren, Huang Jiazhu, Liu Xuejun, Wei Yuchun and Long Yi from the Virtual Geographic Environment of Nanjing Normal University. We also thanks to the field work support from Upper and Middle Yellow River Bureau, Suide Soil and Water Conservation Experimental Station and Xifeng Soil and Water Conservation Experimental Station.

Tang Guoan
July 2014

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 黄土高原数字地形分析的方法体系	1
1.1.1 坡面地形因子分析	2
1.1.2 特征地形要素分析	2
1.1.3 面向对象的地形分析方法体系	3
1.2 黄土高原数字地形分析的研究内容	4
1.2.1 黄土高原 DEM 精细建模	4
1.2.2 黄土高原地形特征要素提取与分析	4
1.2.3 黄土高原地形信息图谱研究	4
1.2.4 基于 DEM 的黄土地貌发育机理研究	5
1.3 研究展望	6
参考文献	7
第 2 章 研究样区与实验数据	10
2.1 黄土高原地貌基本特征	10
2.2 实验样区	11
2.3 模拟小流域	14
参考文献	17
第 3 章 黄土高原 DEM 构建及信息特征研究	18
3.1 特征嵌入式数字高程模型研究	18
3.1.1 引言	18
3.1.2 F-DEM 的提出	19
3.1.3 特征地形的类对象表达	20
3.1.4 F-DEM 数据结构与地形模拟效果	25
3.1.5 小结	26
3.2 格网 DEM 地形模拟的形态保真度研究	26
3.2.1 现有 DEM 地形模拟的失真现象	27
3.2.2 DEM 地形模拟失真的直接原因	29
3.2.3 DEM 地形模拟失真的根源	30
3.2.4 DEM 地形形态保真度的基本概念	33
3.2.5 顾及地形形态保真的高保真 DEM 的构建	35
3.2.6 小结	36

3.3	梯田 DEM 快速构建方法研究	36
3.3.1	引言	36
3.3.2	梯田地形的基本特性	37
3.3.3	梯田 DEM 建模方法	38
3.3.4	小结	40
3.4	DEM 点位地形信息强度及量化模型研究	40
3.4.1	引言	40
3.4.2	DEM 地形信息强度概念的提出	41
3.4.3	DEM 地形信息强度量化方案	42
3.4.4	DEM 地形信息强度提取	44
3.4.5	结论与讨论	49
3.5	利用地形信息强度进行 DEM 地形简化研究	50
3.5.1	DEM 点位地形信息强度	50
3.5.2	实验样区与实验数据	51
3.5.3	地形简化方案与过程	51
3.5.4	地形简化效果分析与评价	55
3.5.5	小结	57
3.6	地形描述因子的分类与整合研究	58
3.6.1	地形因子分类与整合的需求	58
3.6.2	地形因子分类整合原则	59
3.6.3	地形因子分类整合方案	59
3.6.4	小结	66
3.7	黄土丘陵沟壑区地形定量因子的关联性分析	67
3.7.1	BP 神经网络实验方法	68
3.7.2	实验方法与结果	69
3.7.3	小结	73
3.8	SRTM DEM 高程精度评价	73
3.8.1	引言	73
3.8.2	实验过程	74
3.8.3	小结	76
3.9	顾及坡面汇流特征的混合流向算法研究	77
3.9.1	黄土地貌二元地形结构	78
3.9.2	实验数据与方法	79
3.9.3	实验与结果分析	81
3.9.4	小结	86
	参考文献	86
第 4 章	黄土高原数字地形分析的尺度问题研究	92
4.1	DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述	92
4.1.1	尺度的概念与类型	93

4.1.2	DEM 地形分析的尺度效应	93
4.1.3	研究方法与存在问题	95
4.1.4	研究重点与趋势	97
4.1.5	小结	98
4.2	不同分辨率 DEM 提取地面坡度的不确定性	98
4.2.1	引言	98
4.2.2	实验样区与信息源	99
4.2.3	实验结果与分析	101
4.2.4	小结	105
4.3	基于直方图匹配的地面坡谱尺度下推模型	106
4.3.1	研究基础	106
4.3.2	实验过程	107
4.3.3	模型评价	110
4.3.4	结论与讨论	112
4.4	DEM 提取单位汇水面积的尺度效应及尺度转换	112
4.4.1	引言	112
4.4.2	单位汇水面积及其计算	113
4.4.3	实验样区及数据处理	114
4.4.4	尺度效应	114
4.4.5	尺度转换模型	118
4.4.6	尺度转换结果分析	120
4.4.7	小结	123
4.5	DEM 分辨率对太阳辐射模拟的敏感性分析	124
4.5.1	实验样区与实验数据	124
4.5.2	实验方法	125
4.5.3	模拟结果分析	126
4.5.4	小结	129
	参考文献	130
第 5 章	黄土高原地形特征要素提取与分析	135
5.1	基于地貌结构与汇水特征的黄土高原沟谷节点提取与分析	135
5.1.1	沟谷节点的概念模型及提取方法	135
5.1.2	实验过程与结果分析	137
5.1.3	小结	141
5.2	基于 DEM 的地形特征点提取及空间分异研究	141
5.2.1	地貌认知及空间剖分的山顶点提取	141
5.2.2	基于 DEM 的山地鞍部点分级提取方法研究	145
5.3	黄土地貌沟沿线的形成及类型划分	150
5.3.1	黄土地貌沟沿线研究综述	150
5.3.2	黄土地貌沟沿线类型划分	154

5.4	基于 DEM 的黄土地貌沟沿线提取研究	161
5.4.1	基于并行 GVF Snake 模型的黄土地貌沟沿线提取	161
5.4.2	基于 DEM 边缘检测的黄土地貌沟沿线自动提取算法研究	169
5.4.3	引入改进 Snake 模型的黄土地貌沟沿线连接算法	176
5.5	黄土高原谷脊线展布特征及沟谷密度空间分异特征研究	181
5.5.1	地形谷脊线空间展布格局特征研究	181
5.5.2	黄土高原沟谷密度空间分异特征研究	186
5.6	基于 DEM 黄土高原正负地形研究	193
5.6.1	基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究	193
5.6.2	基于多方位 DEM 地形晕渲的黄土地貌正负地形提取	198
5.7	基于 DEM 的黄土高原坡面景观结构研究	203
5.7.1	研究基础	204
5.7.2	黄土高原坡面景观空间格局分析	205
5.7.3	小结	210
	参考文献	211
第 6 章	黄土高原地形信息图谱研究	217
6.1	黄土高原地面坡谱研究	217
6.1.1	引言	217
6.1.2	坡谱的概念	218
6.1.3	实验样区与实验数据	219
6.1.4	坡谱的提取及其稳定的地域尺度	220
6.1.5	实验结果与讨论	221
6.1.6	小结	225
6.2	黄土高原坡谱稳定的临界面积及其空间分异	226
6.2.1	引言	226
6.2.2	坡谱稳定临界面积的提取方法	227
6.2.3	结果分析	229
6.2.4	小结	233
6.3	坡谱信息熵尺度效应及空间分异	234
6.3.1	坡谱信息熵的概念	234
6.3.2	实验数据及方法	235
6.3.3	实验结果及讨论	235
6.3.4	小结	239
6.4	基于 DEM 提取坡谱信息的不确定性	240
6.4.1	坡谱不确定性的过程分布	240
6.4.2	影响坡谱不确定性的关键因素	241
6.4.3	小结	245
6.5	基于 DEM 流域边界剖面谱研究	246
6.5.1	引言	246

6.5.2	实验区域	247
6.5.3	基于 DEM 的流域边界谱提取方法	247
6.5.4	流域边界剖面线的特征	248
6.5.5	流域边界谱	254
6.5.6	小结	254
6.6	基于 DEM 的地形纹理特征研究	255
6.6.1	引言	255
6.6.2	实验样区	256
6.6.3	基于 DEM 的灰度共生矩阵	257
6.6.4	地形纹理特征量化	261
6.6.5	小结	266
6.7	基于语义和剖面特征匹配的地表粗糙度模型评价	267
6.7.1	问题的提出	267
6.7.2	原理与算法	268
6.7.3	实验	271
6.7.4	小结	276
	参考文献	276
第 7 章	黄土高原地形演化模拟与空间分异格局	282
7.1	新生代构造运动对黄土高原地貌演化及分异的控制作用	282
7.1.1	黄土高原黄土地貌的形成机制与分区	282
7.1.2	黄土高原区黄河河道的发育	287
7.1.3	小结	289
7.2	基于 DEM 的黄土高原重点流失区地貌演化的继承性研究	290
7.2.1	实验基础	291
7.2.2	实验结果与分析	291
7.2.3	小结	299
7.3	基于元胞自动机的黄土小流域地形演变模拟	300
7.3.1	基于 Fisher 判断的元胞转换规则	301
7.3.2	模型应用及分析	302
7.3.3	小结	306
7.4	黄土模拟小流域降雨侵蚀中地面坡谱的空间变异	306
7.4.1	引言	306
7.4.2	实验条件和过程概述	308
7.4.3	地貌形态发育过程再现	308
7.4.4	地面坡度提取及结果分析	309
7.4.5	小结	313
7.5	基于 DEM 的黄土高原面积高程积分研究	313
7.5.1	研究基础	314
7.5.2	面积高程积分的地学含义及指标拓展	315