

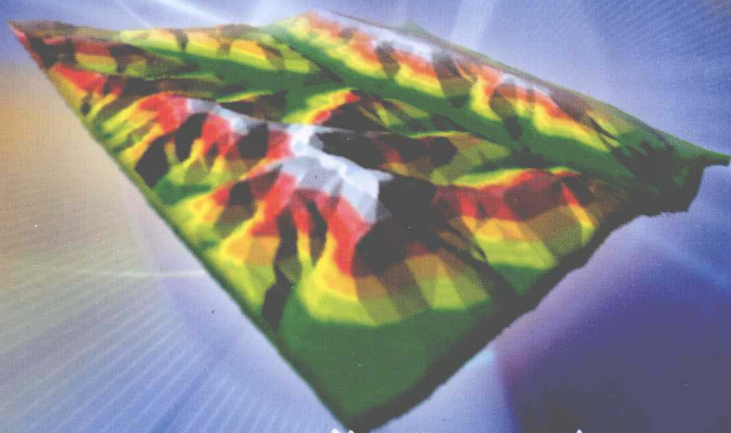


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字高程模型教程

(第二版)

汤国安 李发源 刘学军 编著



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字高程模型教程

(第二版)

汤国安 李发源 刘学军 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

DEM是地理数据库中的核心数据,是进行地形分析的基础,广泛应用于测绘、遥感以及资源、环境、城市规划、农林、灾害、水电工程、军事等领域。本书系统介绍了DEM的基本概念、DEM的数据组织与管理、DEM数据获取方法、DEM的建立与处理和DEM的可视化表达及精度分析等基本理论与关键技术;从坡面地形因子提取、特征地形要素提取、地形统计分析以及地学模型分析四个不同方面,阐述了DEM数字地形分析的基本理论与方法。全书每章都配有一定量的思考题与练习题,还配有教学课件及实验数据光盘,便于学生复习与练习。

本书可作为高等院校地理、地质、海洋、气象、测绘、环保等专业本科生和研究生教材,也可供其他相关学科的各类专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字高程模型教程/汤国安,李发源,刘学军编著.—2版.—北京:科学出版社,2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-026892-1

I. ①数… II. ①汤…②李…③刘… III. ①高程系统-地形测量-数学模型-高等学校-教材 IV. ①P216

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第035229号

责任编辑:杨红 刘希胜/责任校对:宋玲玲

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年5月第二版 印张:17 1/4

2010年5月第六次印刷 字数:350 000

印数:8 701—11 700

定价:35.00元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的概念由 Miller 于 1958 年提出, 经过 40 多年的发展, 关于 DEM 的诸多基础理论问题都得到了深入的研究, DEM 以及基于 DEM 数字地形分析的理论与技术方法体系正在形成。作为地理信息系统地理数据库中最为重要的空间信息资料和赖以进行地形分析的核心数据系统, 国家测绘部门将其作为国家空间数据基础设施 (national spatial data infrastructure, NSDI) 建设的重要内容之一。随着全国多尺度 DEM 的相继建立, 其正在科学研究、生产与国防建设中发挥越来越重要的作用。在理论研究方面, DEM 的不确定性、DEM 的尺度效应、DEM 的地学分析、基于 DEM 的数据挖掘都取得了很大的突破。在应用方面, 也从一般的地形因子提取、支持三维漫游等简单应用向更多样的形式、更广泛的领域发展。可以说, 在很多应用者看来, DEM 所代表的已经不仅仅是一般的记录海拔的空间数据, 还包括一种空间分析的思路、一种地学处理的方法。

近年来, 高等院校有关专业, 特别是自然地理学、地图学与地理信息系统、地图制图与地理信息工程、摄影测量与遥感、大地测量学与测量工程等专业都纷纷将数字高程模型作为本科生、研究生的必修或选修课。现在迫切需要在内容上既强调基本概念与基本理论又融合最新研究成果、在方法上既注重培养学生基本能力又强化培养创新思维能力的教材。

南京师范大学地图学与地理信息系统学科是国家重点学科, 数字地形分析是该学科的重点研究方向之一。近年来, 作者先后承担了 3 项国家科技部“863”项目及 6 项国家自然科学基金课题的研究, 还承担了数字高程模型方面的本科生与研究生的教学工作。本书力求实现基础理论与最新研究成果、科学性与实用性、系统性与可读性的有机结合。全书由两大部分构成, 共 10 章。第 1~6 章为 DEM 数据篇, 着重介绍 DEM 的概念、数据获取、数据组织与管理、建立与处理、可视化及数据的不确定性; 第 7~10 章为 DEM 分析方法篇, 通过抽象与提炼, 将基于 DEM 的数字地形分析方法归纳为坡面地形因子的提取、特征地形要素的提取、DEM 地形统计分析、DEM 地学模型分析四种基本类型, 并附以大量的例证, 归纳出 DEM 地学分析的原理与方法。为增加可读性, 全书配置了大量的插图。全书每章都配有一定量的思考题与练习题, 还配有教学课件及实验数

据光盘*，便于学生复习与练习。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目（40930531、40801148、40901185）以及地理信息系统国家特色专业、国家精品课程建设项目的资助。全书从构思到完成编写，承蒙奥地利萨尔茨堡大学 Josef Strobl 教授的指导与帮助。在此一并表示最衷心的感谢！

DEM 理论及应用研究的发展非常迅速，本书虽力求全面并紧跟其发展趋势，但由于作者水平和时间有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2009 年 10 月于南京师范大学仙林校区

* 如有任课教师需要教学 PPT，请与科学出版社高等教育出版中心教材营销部联系：010-64034548；
zhangqianl@mail.sciencep.com。

目 录

前言

1 概论	1
1.1 地表形态表达：从模拟到数字	1
1.2 数字高程模型：概念与理解	3
1.2.1 数字高程模型的定义	3
1.2.2 数字高程模型的研究内容	7
1.2.3 数字高程模型的类型	8
1.2.4 数字高程模型的特点	10
1.3 数字高程模型的信息特征：从 DEM 到 DTM	11
1.4 数字高程模型的系统结构与功能	12
1.4.1 DEM 建立	13
1.4.2 DEM 操作	14
1.4.3 DEM 分析	14
1.4.4 DEM 可视化	15
1.4.5 DEM 应用	15
1.5 数字高程模型与地理信息系统的关系	16
1.6 数字高程模型的应用范畴与前景	18
1.6.1 科学研究应用	19
1.6.2 商业应用	20
1.6.3 工业、工程应用	21
1.6.4 管理应用	22
1.6.5 军事应用	24
1.6.6 数字地球应用	24
1.6.7 DEM 功能与应用需求关系	25
思考及练习题	27
2 DEM 数据组织与管理	28
2.1 DEM 数据模型	29
2.1.1 镶嵌数据模型	29
2.1.2 规则镶嵌数据模型	29
2.1.3 不规则镶嵌数据模型	31

2.1.4	特征嵌入式数据模型	31
2.2	DEM 数据结构	33
2.2.1	规则格网 DEM 数据结构	33
2.2.2	不规则三角网 DEM 数据结构	36
2.2.3	格网与不规则三角网结构混合结构	36
2.2.4	格网 DEM 与 TIN 的对比	37
2.3	DEM 数据库管理	38
2.3.1	DEM 数据库内容	38
2.3.2	DEM 数据库结构	39
2.3.3	DEM 数据库数据组织	39
2.3.4	DEM 元数据	41
2.3.5	DEM 数据库系统功能	42
	思考及练习题	44
3	DEM 数据获取方法	45
3.1	DEM 数据源特征	45
3.1.1	地形图数据及其特征	45
3.1.2	摄影测量/遥感影像数据及其特征	46
3.1.3	地面测量数据及其特征	48
3.1.4	既有 DEM 数据	48
3.2	DEM 数据采样理论基础	48
3.2.1	地形曲面几何特征	48
3.2.2	地形的复杂程度	49
3.2.3	地貌单元类型	50
3.3	DEM 数据采样策略与采样方法	51
3.3.1	数字高程模型数据源的三大属性	52
3.3.2	采样的布点原则	53
3.3.3	DEM 数据采集方法	54
3.3.4	DEM 数据采集方法的对比分析	61
3.4	DEM 数据采集质量控制	63
3.4.1	原始数据粗差检测与剔除	63
3.4.2	原始数据的滤波处理	65
3.5	DEM 数据共享和利用	66
3.5.1	我国 DEM 数据交换格式标准	67
3.5.2	我国不同比例尺 DEM 的特点	68
3.5.3	美国 USGS DEM 的特点	70

3.5.4 SRTM 与 ASTER-gdem 数据的特点	71
思考及练习题	72
4 格网 DEM 建立	73
4.1 从散点到连续表面	73
4.1.1 DEM 地形表面重建的地理内涵和数学机理	73
4.1.2 DEM 质量评价标准	74
4.1.3 DEM 建立的一般步骤与方法	75
4.2 规则格网 DEM 建立的基本思路	76
4.3 DEM 内插数学模型	78
4.3.1 整体内插	78
4.3.2 局部分块内插	79
4.3.3 逐点内插法	80
4.4 DEM 建立过程	82
4.4.1 基于不规则分布采样点的 DEM 建立	82
4.4.2 基于规则格网分布采样点的 DEM 建立	87
4.4.3 基于等高线分布采样点的 DEM 建立	89
4.5 不规则三角网 TIN 的基本概念	91
4.5.1 TIN 的概念	91
4.5.2 TIN 的基本元素	91
4.5.3 数据和 TIN 的类型	92
4.5.4 TIN 的三角剖分准则	92
4.6 TIN 与 DEM 之间的相互转换	94
4.6.1 Grid 至等高线和 TIN 至等高线的转换	94
4.6.2 TIN 至 Grid 和等高线至 Grid 转换	94
4.6.3 Grid 至 TIN 和等高线至 TIN 的转换	95
思考及练习题	95
5 DEM 的可视化表达	97
5.1 概述	97
5.1.1 地形可视化概念	97
5.1.2 地形可视化表达的基本类型	98
5.2 地形一维可视化表达	99
5.3 地形二维可视化表达	100
5.3.1 等高线法	100
5.3.2 明暗等高线法	101
5.3.3 分层设色法	103

5.3.4	地形晕渲法	105
5.4	地形三维可视化表达	107
5.4.1	立体等高线模型	108
5.4.2	三维线框透视模型	109
5.4.3	地形三维表面模型	110
5.5	地形三维景观模型	110
5.5.1	纹理映射概述	110
5.5.2	基于分形的地形三维景观	112
5.5.3	基于纹理映射算法的地形三维景观	114
5.5.4	基于遥感、航空影像的地形三维景观	115
5.5.5	基于地物叠加的 DEM 可视化	117
5.5.6	基于虚拟现实的地形三维可视化	118
5.6	地形场景漫游与动画	120
	思考及练习题	123
6	DEM 精度分析	124
6.1	DEM 的误差源与误差分类	124
6.1.1	误差、精度与不确定性	124
6.1.2	DEM 误差源分析	125
6.1.3	DEM 误差分类体系	127
6.2	DEM 精度描述指标和精度体系	127
6.2.1	DEM 精度的数学模型	127
6.2.2	常用 DEM 精度描述指标	129
6.3	DEM 精度评定方法和精度模型	132
6.3.1	检查点法和 DEM 中误差模型	133
6.3.2	逼近分析和地形描述误差	134
6.3.3	等高线套合分析和 DEM 定性评价模型	134
6.3.4	实验方法和 DEM 经验模型	134
6.3.5	理论分析与理论模型	135
6.4	DEM 精度模型分析	135
6.4.1	基于等高线数据的 DEM 精度分析	136
6.4.2	基于格网数据的 DEM 精度分析	137
6.5	DEM 地形描述误差分析	138
	思考及练习题	139
7	坡面地形因子提取	141
7.1	概述	141

7.1.1	坡面因子的分类及提取方法	141
7.1.2	坡面因子提取的算法基础	144
7.1.3	坡面因子提取常用的分析窗口	146
7.2	坡度、坡向	147
7.2.1	坡度的提取	148
7.2.2	坡向的提取	149
7.3	坡形	151
7.3.1	宏观坡形因子	152
7.3.2	地面曲率因子	153
7.3.3	地面变率因子	157
7.4	坡长	159
7.5	坡位	160
7.6	坡面复杂度因子	162
7.6.1	地形起伏度	162
7.6.2	地表粗糙度	162
7.6.3	地表切割深度	163
7.6.4	高程变异系数	165
7.6.5	实际应用例证	165
	思考及练习题	167
8	特征地形要素的提取	168
8.1	地形特征点的提取	168
8.2	山脊线、山谷线的提取	170
8.2.1	谷脊特征线提取方法概述	170
8.2.2	基于规则格网 DEM 数据提取山脊与山谷线的典型算法	171
8.3	沟沿线的提取	173
8.4	水系的提取	176
8.4.1	水系提取概述	176
8.4.2	基于地表径流漫流模型的水系提取算法	178
8.5	流域的提取	185
8.6	可视性分析	189
8.6.1	判断两点之间的可视性的算法	189
8.6.2	计算可视域的算法	189
8.6.3	可视性分析最基本的用途	191
	思考及练习题	192

9 DEM 的地形统计分析	193
9.1 概述	193
9.2 基本统计量	195
9.2.1 代表数据集中趋势的统计量	196
9.2.2 代表数据离散程度的统计量	197
9.2.3 代表数据分布形态的统计量	199
9.2.4 其他统计量	200
9.3 分级统计分析	200
9.3.1 分级的概念与目的	200
9.3.2 分级的原则	200
9.3.3 分级统计的方法	201
9.4 相关分析	209
9.4.1 空间自相关	209
9.4.2 地形因子相关分析	212
9.5 回归分析	215
9.5.1 直接利用 DEM 数据的回归	215
9.5.2 地形因子参与的回归	216
9.5.3 地形因子与非地形因子的回归	219
9.6 趋势面分析	220
9.7 系统聚类分析	223
思考及练习题.....	225
10 DEM 的地学模型分析	226
10.1 概述.....	226
10.1.1 地学模型的类型和特点	226
10.1.2 地学模型中引入 DEM 的必要性	227
10.1.3 基于 DEM 的地学模型分析方法	228
10.2 DEM 模型分析	229
10.2.1 DEM 直接建模.....	230
10.2.2 DEM 多信息复合建模	232
10.3 DEM 辅助模型分析	233
10.3.1 DEM 直接应用.....	233
10.3.2 DEM 扩展应用.....	240
思考及练习题.....	254
主要参考文献	255

1 概 论

1.1 地表形态表达：从模拟到数字

地球是人类生活和活动的承载体。千百年来，人们为了认识自然和改造自然，不断地尝试着用各种方法来描述、表达周围的环境信息，利用地形图进行地形表面形态的表达便是其中之一。

早期由于测量知识的缺乏，对地形表面形态的描述主要采用象形绘图方法进行。例如，山体用岩石堆符号表达，山体范围用一系列的“鱼鳞”符号或类似的锥形符号表达（图 1.1）。17 世纪以后，人们逐步意识到地面起伏变化对气温、植被、环境等的深刻影响，对地面形态的表达成为人们越来越关心的问题。而在同期出现的浪漫主义表现手法又把自然景观作为其主要的表现形式之一，因此以写景方式进行地形刻画成为这一时期的主流，如先后出现的透视写景图、晕渲图、斜视区域图、地貌写景图、地貌形态图、地貌单元图等（图 1.1）。虽然这些方式实现了在二维介质上对三维地形表面的表示和描述，在人类对自身环境认识过程中也发挥了重要作用，但由于写景方式不具备可量测性，并不是进行地表形态描述的理想方式。

18 世纪，随着测绘技术的发展，高程数据和平面位置数据的获取成为现实，对地形的表达也由写景式的定性表达逐步过渡到以等高线为主的量化表达。用等高线进行地表形态描述具有直观、方便、可量测等特性，是制图学历史上的一项最重要的发明。在等高线地形图上，地形起伏、地物等的描述不再是象形符号、色彩或明暗的变化，而是用正交投影在水平面上、由相邻高程相等的点连接而成的闭合曲线来表示地形起伏特征和形态结构、线划符号表示按比例缩小的地物（图 1.1）。

19 世纪初期，平板印刷技术的发展使得用连续色调变化和阴影变化模拟不规则的地表形态特征成为可能。但直到 19 世纪后期，才将地貌晕渲作为一种区域符号广泛地应用于地形表达之中，阴影变化具有显示斜坡的能力（图 1.1）。

因为等高线地形图具有可量测性，地貌晕渲表示地形结构具有三维可视化效果，所以，这两种方法成为自 20 世纪以来地形图的主要表示方法和手段。

与各种线划图形相比，用影像记录景观现象无疑具有更大的优点，如地形特征表达细节丰富、直观逼真、图形获取快速等，因此摄影技术一经出现就被广泛地用来记录丰富多彩、千姿百态的自然景观现象。从 1849 年开始，就出现了利用地面摄影测量进行地形图编绘的技术。20 世纪初期航空技术的发展，使得摄

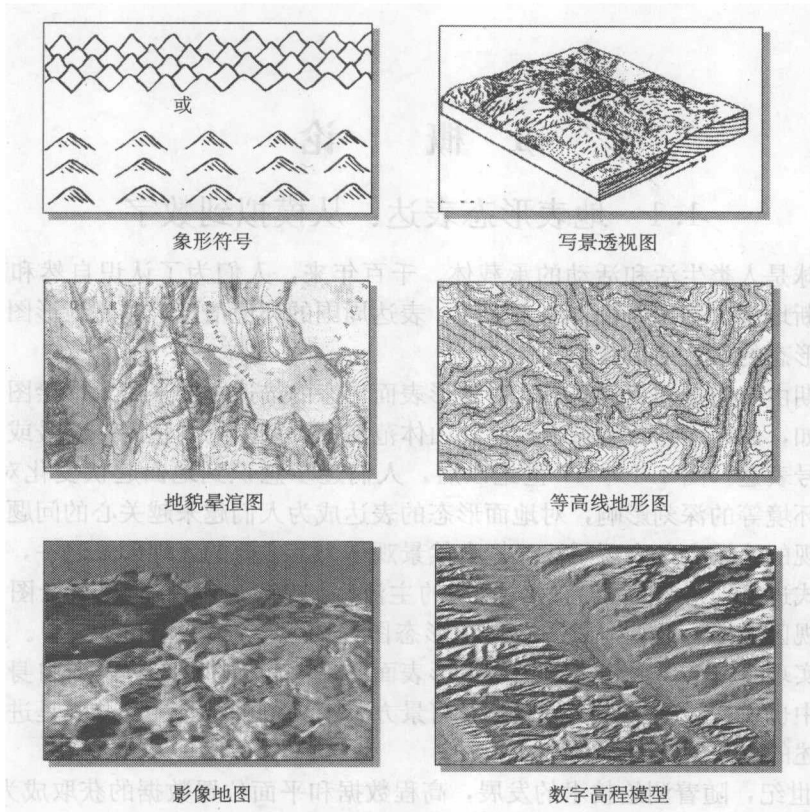


图 1.1 模拟地形与数字地形

影测量从地面走向空中，航空摄影测量技术从此诞生。利用航空摄影测量相片，不仅可获取地面景观的平面影像图像，而且通过多张具有一定重叠度的航空摄影测量相片还可以重建实际地形表面的立体模型并在仪器帮助下进行精确的三维量测，如同在缩小的地形模型上进行实地测量一般。航空摄影测量技术的出现，使得影像数据获取在周期、覆盖面、应用范围等方面大幅度提高。

20 世纪 60 年代以后，空间技术、通信技术等的迅速发展，在航空摄影测量、航空地质探矿、航空像片判读应用发展的基础上诞生了遥感科学技术。伴随着 70 年代美国地球资源卫星 (LandSat) 的升空，摄影测量从航空发展到航天，遥感技术获得极为广泛的应用。在遥感技术中，除使用对可见光摄影的框幅式黑白摄影机外，还使用了彩色或彩红外摄影机、全景摄影机、红外扫描仪、多波段扫描仪、雷达扫描仪、微波扫描仪、成像光谱仪、CCD 推扫式逐行扫描仪、矩阵数字摄影机等，比常规黑白像片能提供更为丰富的几何、物理等影像信息。

无论是等高线地形图、地貌晕渲图还是影像，都是在二维环境中对三维现实世界的模拟和表达。对地形表达而言，一方面我们尽可能地几何模型角度去理解和描述，以解决实际应用中的可量测性；另一方面它本身是一种三维景观现象，对它的描述要考虑视觉生理感受。这是一对矛盾体，也就是说二维表达的可量测性和三维的立体模型表达之间在本质上是不能共存的。也正因为如此，寻找一种既能符合人们视觉生理习惯、又能恢复真实地形而又具有可量测性的地形表达方法是几千年来在制图、测绘等领域孜孜不倦的研究目标。等高线地形图、地貌晕渲图、分层设色图、影像等单一表现手法都不能从根本上解决这一矛盾，而早些年出现的地貌晕渲和等高线相配合的地形表示方法（图 1.1），虽既可满足视觉上的立体效果也具备量测性，但由于制作工艺复杂而使其应用受到限制。

20 世纪 40 年代计算机技术的出现和蓬勃发展，以及相关技术如计算机图形学、计算机辅助制图、现代数学理论等的完善和应用，使各种数字地形表达方式得到迅速发展。计算机技术在制图、测绘领域中的应用，不但推动着制图、测绘逐步向自动化与数字化、实时处理与多用途的方向发展，改变着地图制图的生产方式，也改变着地图产品的样式和地图应用的概念。借助于地形的数字化表达，现实世界的三维特征以及可量测性能够得到充分而真实地再现。1957 年，Roberts 首次提出将计算技术应用到摄影测量中。1958 年，美国麻省理工学院摄影测量实验室主任 C. L. Miller 教授对计算机和摄影测量技术的结合在计算机辅助道路设计方面进行了实验。他在用立体测图仪所建立的光学立体模型上，量取了设计道路两侧大量的地形点三维空间坐标，并将其输入计算机，由计算机取代人工进行土方计算、方案比选等繁重的手工作业。Miller 教授在成功地解决道路工程计算机辅助设计问题的同时，也证明了用计算机进行地形表达的可行性、巨大的应用潜力与经济效益。随后 Miller 和 LaFamme 在 *Photogrammetric Engineering* 杂志上发表了题为“*The digital terrain model: theory and application*”的论文，首次提出了计算机化的地形表达概念：数字地面模型（digital terrain model, DTM）。在随后的 40 余年间，数字地面模型在测绘和遥感、农林规划、土木工程、军事、地学分析等领域得到广泛的应用。地形表达从模拟表达时代走向数字表达时代。

1.2 数字高程模型：概念与理解

1.2.1 数字高程模型的定义

高程常常用来描述地形表面的起伏形态，传统的高程模型是等高线，其数学意义是定义在二维地理空间上的连续曲面函数，当此高程模型用计算机来表达时，称为数字高程模型。计算机化的高程模型要考虑三个因素：一是计算机容

量,建立完整的连续三维表面模型需要无数个点,也就需要无限的计算机存储容量,如同传统的地形测图,连续曲面必须进行离散;二是计算机只认识数字,只有将模拟数据(如地形图等图形数据和文字数据)转化为数字数据,才能为计算机所接受;三是模型化表达,将用数字表达的有限的地形高程数据在计算机中按一定的规则进行组织,才可重建地形表面。因此简单地讲,数字高程模型是通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟或者说是地形表面形态的数字化表示。由于高程数据常常采用绝对高程或海拔(即从大地水准面起算的高度),DEM也常常称为DTM。要说明的是由于“Terrain”一词的含义比较广泛,不同专业背景对“Terrain”的理解也不一样,DTM趋向于表达比DEM更为广泛的内容。

自DTM概念提出以来,许多学者在不同的时期都对DEM进行过定义(表1.1),而不同机构和地区所采用的术语也不太一致(表1.2)。在术语表达上,虽然词义比较接近,如Elevation和Height为同义词、Ground和Terrain为近义词,但含义不太相同,代表着不同特色的地形数字化产品。各种定义在表述上虽有差异,但基本观点都是一致的,即从模型和结果形式角度出发讨论DEM的概念。事实上,随着地理信息系统、空间数据基础设施等的发展和建设,DEM已作为一个独立的产品而存在,并越来越广泛地用来代替传统地形图中等高线对

表 1.1 数字地面模型、数字高程模型定义

Miller 和 Laflamme (1958)	数字地面模型是利用一个任意坐标场中大量选择的已知 X 、 Y 、 Z 的坐标点对连续地 面的一个简单的统计表示
Doyle (1978)	数字地面模型是描述地面诸特性空间分布的有序数值阵列,在一般情况下,所记录 的地面特性为高程值,它的空间分布由 X 、 Y 平面坐标系来描述,也可通过经度 和纬度进行描述海拔分布。在新近文献中,称上述高程或海拔分布的数字地面模型 为数字高程模型,以与描述其他地面特性的数字地面模型有所区别。DTM 可以是每 三个三维坐标值为一组的散点结构,也可由多项式或傅里叶级数确定的曲面方程。 另外,数字地面模型可以包含除高程外的其他地面特性,如地价、土地权属、土壤 类型、岩层深度等
王之卓 (1979)	数字地面模型是地形表面用 X 、 Y 、 Z 坐标的数字形式的一种表达
Burrough (1986)	A digital elevation model is a quantitative model of a part of the earth's surface in digit- al form. Also digital terrain model (DTM)
Weibel 和 Heller (1991)	A DTM is a digital representation of a portion of the earth's surface
龚健雅 (1993)	数字地面模型 DTM 是定义在二维区域上地形特征空间分布及关联信息的一个有限 n 维向量系列 $\{X_i\}$, 数字高程模型 DEM 是 DTM 的一个子集,它表示地形空间分布 的一个有限三维向量系列 $\{X, Y, Z\}$, 其中 X 、 Y 表示地形点的平面位置, Z 表示 相应点的高程

表 1.2 数字地面模型有关术语

术 语	全 称	特点与含义
DEM	digital elevation model	以绝对高程或海拔表示的地形模型
DHM	digital height model	以任意高程表示的地形模型，包括绝对高程和相对高程，为德国所使用
DGM	digital ground model	具有连续变化特征的地表实体模型，为英国所使用
	digital geomorphology model	除高程外的其他地貌形态模型，如坡度、坡向等
DTM	digital terrain model	泛指地形表面自然、人文、社会景观模型
DTED	digital terrain elevation model	为美国国防制图局所使用的地形模型，强调模型的格网结构特征

地形的描述，成为空间数据基础设施中的“4D”产品之一和地理信息系统的核心数据库以及进行地学分析的基础数据库。DEM 已经成为地形数字化表达的专有名词。虽然 DEM 的表现形式是一个产品，但同时它还代表着一种地形的数字建模过程。DEM 的基本理论和数据处理方法，全面反映了地理信息系统空间分析的基本思路和方法。其建模过程也不再局限于地形，也可用于模拟其他二维表面上连续变化的非地形特征。另外，从应用角度看，各种基于 DEM 的应用已不再满足于常规等高（值）线的地形分析，而是上升到地表过程模拟、地学建模等更高层次。显然仅从模型角度并不能完全概括 DEM 丰富多彩的内容，数字高程模型不仅是一种产品，更代表着一种方法，对 DEM 的定义应顾及这些因素，数字高程模型应该是数据和数据处理、表达和分析方法的统一体。

考虑到 DEM 的研究对象与应用范畴，对其有狭义和广义两种不同的理解和定义。

从狭义角度定义：DEM 是区域地表面海拔的数字化表达。这种定义将描述的范畴集中限制在“地表”、“海拔高程”及“数字化表达”内，意义较为明确，也是人们一般能理解与接受的 DEM 概念。但是，随着 DEM 的应用向海底、地下岩层及某些不可见地理对象（如等气压面）的延伸，有必要提出更为广义的定义。

从广义角度定义：DEM 是地理空间中地理对象表面海拔的数字化表达。该定义中描述对象不再局限于“地表面”，因而具有更大的包容性，如海底 DEM、下伏岩层 DEM、大气等压面 DEM 等。

数学意义上的数字高程模型是定义在二维空间上的连续函数 $H=f(x, y)$ 。由于连续函数的无限性，DEM 通常是将有限的采样点用某种规则连接成一系列的曲面或平面片来逼近原始曲面，因此 DEM 的数学定义为区域 D 的采样点或内插点 P_i 按某种规则 ζ 连接成的面片 M 的集合

$$DEM = \{M_i = \zeta(P_j) \mid P_j(x_j, y_j, H_j) \in D, j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m\} \quad (1.1)$$

式中, x_j 、 y_j 为 P_j 点的地理坐标; H_j 为 P_j 点的高程。

连接规则 ζ 构成 DEM 的数据结构, 可以是呈规则分布的格网或不规则分布的格网。特别地: 当 ζ 为正方形格网时, 这时的 DEM 称为基于格网的 DEM (Grid based DEM), 由于正方形格网的规则性, 格网点的平面位置 (x, y) 隐含在格网的行列号 (i, j) 中而不记录, 此时的 DEM 就相当于一个 n 行 m 列的高程矩阵 (图 1.2)

$$DEM = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m} \quad (1.2)$$

由于采样点分布的不规则性, 规则格网 DEM 一般通过内插方式得到。

当 ζ 为三角形时, 这时实质上是用互不交叉、互不重叠的连接在一起的三角网络逼近表面 (图 1.2), 这时的 DEM 称为基于不规则三角网的 DEM (irregular triangulated network based DEM, TIN based DEM), 基于 TIN 的 DEM 表示为三角形 T 的集合

$$DEM = \{T_i, T_i = \tau(P_j, P_l, P_k)\} \quad (1.3)$$

式中, τ 为三角剖分准则。

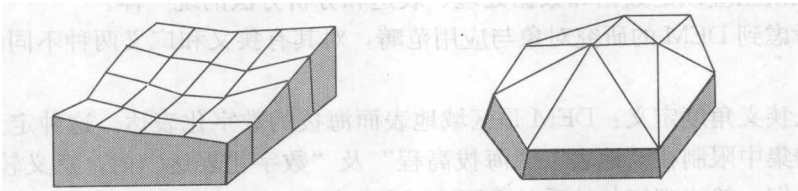


图 1.2 规则格网 DEM 和不规则三角网 DEM

基于规则格网 DEM 和基于 TIN 的 DEM 是目前数字高程模型的两种主要结构。由于规则格网 DEM 在生成、计算、分析、显示等诸多方面的优点, 因此获得了最为广泛的应用, 以至于一提到 DEM, 人们往往认为就是 Grid DEM, 从目前的发展趋势看, DEM 已经成为规则格网 DEM 的代称, 而事实上二者并不一致。同时人们也将基于 TIN 的 DEM 简记为 TIN。

地形表面是一个三维空间表面, 但人们往往通过投影将三维现象表达描述在二维平面上, 如等高线对地形起伏的表示。对 DEM 也不例外, 它是在二维平面