

本著作受国家自然科学基金资助（项目编号：51278411）

许五弟 魏诺 ©著

河谷聚落之分形

——理论模型与现实引导途径

Fractals in Settlements in the Valleys:
Theoretical Model and Realistic Guide

中国建筑工程出版社

河谷聚落之分形

——理论模型与现实引导途径

许五弟 魏诺 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

河谷聚落之分形：理论模型与现实引导途径/许五弟，
魏诺著. —北京：中国建筑工业出版社，2017.2
ISBN 978-7-112-20218-8

I. ①河… II. ①许…②魏… III. ①黄土高原-聚
落地理-研究 IV. ①K928.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 004569 号

责任编辑：石枫华 李 杰

责任校对：陈晶晶 李欣慰

河谷聚落之分形
——理论模型与现实引导途径

许五弟 魏诺 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：16 字数：410 千字

2017 年 10 月第一版 2017 年 10 月第一次印刷

定价：66.00 元

ISBN 978-7-112-20218-8

(29656)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前言

陕北黄土高原地貌显示出清晰的分形特征,这已基本成为相关领域研究的共识。然而,陕北城镇空间形态是否与分形地貌相耦合,这是一个有意义的研究课题,对于黄土高原乃至其他山地河谷地区城镇空间与自然环境的适应性协同发展具有启示。本课题组承担国家自然科学基金课题“耦合于分形地貌的陕北能源富集区城镇形态适宜模式研究(51278411)”,从分形角度对陕北地貌和城镇形态开展研究,对相关问题进行了有价值的探索。

研究依托GIS平台,以陕北地形、水系、城镇等的点图图层为对象,采用地理信息分形处理技术,对地图图层表达的地理信息对象进行测度,在此基础上按照分形理论的分维数计算方法进行分维计算,获得了一些有价值的结果,对于陕北城镇形态的现状认识和规划引导,具有一定的意义。

研究过程中,探讨了新的数据处理技术和方法,提高了计算效率。其中,对于分形测度,只需要测尺大小和测度数量,而在地理信息系统中,每进行一个尺度的计算,都会生成一个新的图层,分形计算一般要采用数十个不同的尺度进行测度,加上中间数据处理,形成大量的数据冗余,同时耗费大量的时间和计算机资源。本课题研究中,对于图层栅格化方式的测度,测试一种用一个最小尺度形成一个栅格图,然后通过属性表进行相邻栅格的不同尺度的相邻栅格合并和统计,这种方法获得成功,减少了新图层的生成,极大提高了数据处理效率和系统消耗。

河流长度在三维和二维情况下有区别,这种区别反映到地貌形态和水文特征上。在河流上游,河床比降大,水流湍急,中下游,河床比降降低,水流速度降低。因此,对河流进行三维测度,才能够充分揭示这个特征。通常的河流测度都采用二维方法,本课题研究采用三维测度方法,揭示河流不同河段的分形特征。

对于地貌测度,本研究提出了对于地貌单元的体积和表面积关联测度方法。把反映地貌的这两个因素进行综合,反映地貌分形特征。

本研究首次提出了维数耦合方法、城镇体系空间结构维数耦合原理。据此,构建出城镇体系分形耦合模型和陕北地区城镇体系空间结构分形模型,以此解析陕北城镇形态与地貌形态、人口分布及经济分布的耦合关系,为陕北地区的分形规划提供理论依据,使分形规划从理论走向实用。

本书作为研究成果之一,首先简要介绍分形问题和进行地图测度的地理信息系统技术,在此基础上,论述与分形有关的地图数据处理的技术和方法,并通过对陕北自然地理要素和城镇数据的分形计算,说明研究的具体方法和过程。课题研究的基本成果,可作为相应研究的借鉴。

目 录

前言

第1章 概念简述	1
1.1 分形理论	2
1.1.1 分形基本概念	2
1.1.2 分形测度依据	2
1.2 数据类型	4
1.2.1 地理数据类型	4
1.2.2 地理数据表达	6
1.2.3 数字高程模型	7
1.3 地理信息分析	8
1.3.1 地形分析	8
1.3.2 矢量分析	9
1.3.3 地理网络分析	10
1.3.4 几何网络分析	11
1.3.5 栅格距离分析	12
1.3.6 邻近分析	14
1.4 地理数据处理技术	16
1.4.1 栅格运算	17
1.4.2 地图代数	18
1.4.3 数据转换	19
本章小结	20
参考文献	21
第2章 GIS 中的分形测度	23
2.1 各种分维数	24
2.1.1 维数测度	24
2.1.2 对分维数的直观认识	26
2.1.3 Hausdorff 维数	27
2.1.4 信息维数	28
2.1.5 关联维数	30
2.1.6 相似维数	31
2.1.7 填充维数	32
2.2 分维数计算方法	33
2.2.1 测度问题	33
2.2.2 改变观察尺度求维数	35
2.3 用 GIS 计算维数	36

2.3.1	用 GIS 进行测度	36
2.3.2	盒维数—矢量栅格化	38
2.3.3	表数据统计	39
2.4	分形计算的 GIS 技术	40
2.4.1	同心圆的方法	41
2.4.2	同心圆改进——点间距离分析	42
2.4.3	循环与迭代	43
2.5	分形分析数据组织	44
2.5.1	数据关联	44
2.5.2	空间几何属性	46
本章小结		47
参考文献		47
第 3 章	三维分形测度	49
3.1	三维盒子构建	50
3.1.1	三维测度问题	50
3.1.2	三维测度的过程	51
3.1.3	建立三维测度对象	52
3.1.4	构建三维盒子	54
3.1.5	脚本运行	58
3.1.6	三维盒子生成优化	59
3.2	三维渔网分割	60
3.2.1	测度原理	60
3.2.2	三维分割计算	62
3.2.3	图元编码	65
3.2.4	渔网网格合并	71
3.2.5	三维线图元合并	73
3.2.6	线分割方法	76
3.3	三维测度实施	78
3.3.1	三维测度	78
3.3.2	案例	81
3.3.3	三维线盒维数测度操作过程	83
本章小结		87
参考文献		87
附录：几何计算		87
第 4 章	地貌分形	91
4.1	地貌发育理论	92

4.1.1	地貌营力	92
4.1.2	侵蚀循环学说	93
4.1.3	地貌发育的时空特征	95
4.1.4	地貌面积高程分维数	96
4.1.5	地貌发育的分形特征	101
4.2	黄土地貌类型	103
4.2.1	黄土地貌	103
4.2.2	流水地貌	107
4.3	地貌测度方法	109
4.3.1	等高线分形计算	109
4.3.2	表面积体积法	114
4.3.3	地貌体积与表面积的关系分维数	115
4.3.4	地貌分形计算	117
4.4	地貌三维填充测度	120
4.4.1	地貌体三维测度操作	120
4.4.2	地貌三维测度示例	124
	本章小结	126
	参考文献	126
第5章	水系分形	129
5.1	河流的形态特征	130
5.1.1	河流地貌发育	130
5.1.2	水系构成	131
5.1.3	河网分级	132
5.2	GIS的水文分析	134
5.2.1	水文分析过程	134
5.2.2	水文分析原理	135
5.2.3	水文分形分析内容	137
5.3	河流分形计算方法	139
5.3.1	河流分形计算基本原理	139
5.3.2	河流面积长度分维数	140
5.4	水系分形 GIS 数据处理样例	142
5.4.1	基本数据处理	142
5.4.2	区域水文分析	144
5.4.3	河流网	148
5.5	河流三维与二维分形比较	150
5.5.1	二维测度	151
5.5.2	三维盒子测度	153

5.5.3	测度比较	155
5.5.4	流域面积—主流长度分维数	156
5.5.5	河流的信息维数	157
本章小结		158
参考文献		158
第6章	城镇分形	159
6.1	城市分形方面	160
6.1.1	城市分形层次	160
6.1.2	城镇空间分布分形	162
6.1.3	城市交通分形	163
6.1.4	城市总体形态	164
6.1.5	城市分形问题	165
6.2	地貌对城市形态的制约	166
6.2.1	优化城市的形态机制	166
6.2.2	自动元胞机与城市形态演化	167
6.2.3	城镇形态分形问题	169
6.3	城镇空间分形结构计算方法	171
6.3.1	同心圆方法	171
6.3.2	点距离	173
6.3.3	交通分布的网络分析	177
6.4	城镇社会经济分形	178
6.4.1	人口分形	178
6.4.2	交通分析	179
6.4.3	要素关联分形	180
6.5	城市分形	185
6.5.1	城市形态分维的基本步骤	186
6.5.2	城市人口分形维数	187
6.5.3	城市维数类型	188
6.5.4	城市形态分维分析研究	189
本章小结		191
参考文献		191
第7章	城镇体系分形耦合模型	193
7.1	问题的发现与原因分析	194
7.1.1	Koch 曲线的分维数	194
7.1.2	Koch 雪花的分维数	194
7.1.3	问题的出现	195

7.2 解决方案与计算方法	196
7.2.1 正三角形分维数的计算	196
7.2.2 Koch 雪花分维数的计算	198
7.2.3 正方形分维数的计算	199
7.2.4 两个互相垂直的生成元的耦合	201
7.3 城镇体系分形耦合模型的构建	202
7.3.1 城镇体系分形耦合模型的依据	202
7.3.2 城镇体系分形耦合模型	202
7.4 陕北城镇体系分形耦合模型	203
7.4.1 陕北地区地貌—人口二维耦合模型	203
7.4.2 陕北城区地貌—人口二维耦合模型	208
本章小结	220
参考文献	220
 第8章 实证应用——陕北地貌与城镇分形耦合研究	 223
8.1 陕北地貌分形特征	224
8.1.1 陕北黄土高原地貌的分形维数特征	224
8.1.2 陕北黄土高原地貌的图形分形特征	227
8.2 陕北城镇空间形态的分形特征	228
8.2.1 陕北城镇体系的分形特征	229
8.2.2 城镇用地形态边界的分形特征	232
8.2.3 城镇用地构成结构的分形特征	233
8.3 陕北地貌与城镇空间形态的耦合分形特征	235
8.3.1 分形地貌与城镇边界形态的分形耦合关系	235
8.3.2 分形地貌与城镇用地形态的分形耦合关系	237
附录	241
后记	245

第1章

概念简述

分形的基本特征是自相似性和尺度不变性等,采用的方法是测度,通过循环和迭代,进行对象测度并计算分维数。对于地理空间问题,测度的对象是地理要素,具体是针对地图进行的测度。对地图要素测度采用地理信息系统(Geographic Information System, 简为GIS)技术。本章介绍分形的基本理论和与分形测度有关的GIS技术。

1.1 分形理论

分形理论的出发点是:客观事物具有自相似的层次结构,局部与整体在形态、功能、信息、时间、空间等方面具有统计意义上的相似性,称为自相似,所以自相似性是分形结构的基本特征。分形理论的核心是用分形维数描述分形结构的自相似性,揭示复杂现象的基本特征及其运动规律。

1.1.1 分形基本概念

分形维数的定义基本上都是基于“用尺度 δ 进行量度”的思想,在测量时忽略尺寸小于 δ 时的不规则性,观察当 $\delta \rightarrow 0$ 时这些测量值的状况。其方法是用线元、面元或体元去覆盖它。比如,对于一条有限长的曲线 L_0 ,用线元 r 去覆盖它,如果用 $N(r)$ 次正好覆盖了整个线段,那么, $r \rightarrow 0$ 时,其分形维数可表示为

$$d_f = \frac{\lg N(r)}{\lg \frac{1}{r}} \quad (1-1)$$

式中 d_f 称为Hausdorff维数,它可以是分数,也可以是整数,简称分维数。

其他分维数的定义和算法均由Hausdorff维数的定义和算法演化或发展而来,例如:盒维数、相似维数、信息维数、关联维数、容量维数、填充维数、网格维数、边界维数、沟网维数、水系维数、交通网维数、等高线维数、人口分布维数、经济分布维数等等。

1.1.2 分形测度依据

分形测度采用特殊的方法,这种方法以自相似性和尺度不变性为基础,通过循环和迭代,计算测度对象的分维数。

1.1.2.1 自相似性

自相似性是分形的一个重要特征,也是分维数计算的一种理论和方法基础。自相似性指部分与整体在不考虑尺度下的形态相似或近似。

所谓自相似性在分形中的含义指的是,若把图形的一部分放大,其形态与

整体是相似的。掰开一颗花椰菜，其与花椰菜整体看来是相似的。从图形角度，如果把从整体分割出来的一部分放大到整体大小，分形事物甚至看不出哪个是整体，哪个是分割出来的部分(图 1-1)。

虽然是一种绘制图形，但是自然图形的自相似性也是基本的。并且不是如绘制图形那么规则，这正说明自然分形的复杂形。

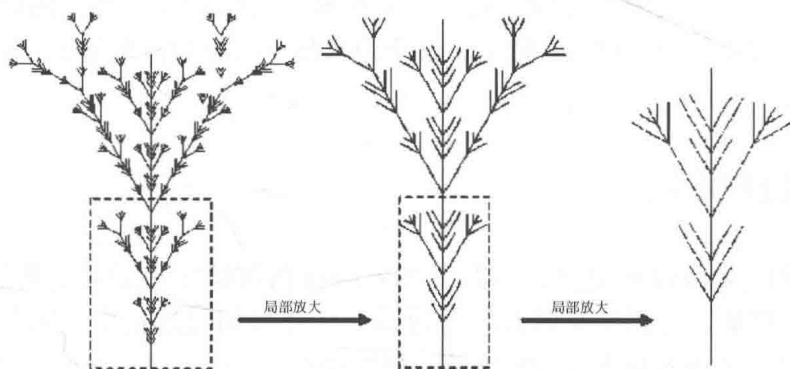


图 1-1 自相似性

自相似性是分形的精髓，由于自相似性，对于分形事物的认识，可以从自相似性角度分析事物的构成、结构、形态；也由于自相似性，可以用简单的迭代和循环来构造分形图形和模拟分形结构。

这样，问题归结为自相似性的识别。不幸的是，在自然界，一般并不存在严格的自相似性，而是一些“似是而非”的自相似性，这就构成分形问题的复杂性，也是分形研究的价值所在。

自相似性作为分形的一个特征，是片段研究对象是否具有分形特征的一个判据：具有自相似性的可能就是分形体，不具备自相似性的一定不是分形体。在此需要进一步强调，自相似性的情况极为复杂，有统计相似性，形态相似性等。

自相似性表示简单的迭代和重复，为此把自相似性作为分形的一个重要特性。

1.1.2.2 尺度不变性

自相似性的基础是尺度不变性，尺度不变性也称为伸缩不变性。尺度不变性是说，不考虑实际尺度，把不同尺度的图形放到同样大小来观察，可以发现其具有相似性。

尺度不变性决定了分形的另一种特征，分形具有一定的尺度范围。这从另一个角度意味着要对某对象进行分形分析，需要从尺度角度确定分形的尺度范围，因为超出这个尺度分形就不存在了。

1.1.2.3 区间性

所谓区间性指的是分形特征存在与要等的区间范围，是有界的。由于区间性，因此分形分析只适宜一定的范围。

沙漠的分维表现为相连的山丘构成沙丘链，沙丘链与沙丘上的沙波纹有一定的相似性，构成相似区间范围，沙漠之外，沙波纹一类的分形结构就不存在了。

分形并不是无限的，虽然在分析尺度时，把尺度大小定为无穷小，但是，对于分形对象，是处于一定范围的。因此，在进行分析测度时，首先需要确定测度范围。以变尺度测度为例，对于一个对象，当尺长大于某一值以及小于某一值后，测度结果不再变化，这时，这个最大最小尺度为对象的分维区间。

1.2 数据类型

对于地图图形的分形分析，需要对地图数据做特定的处理，如坐标转换，栅格化等，还要对分析结果进行统计计算，如计算某种特定要素的分割形成的栅格数量等。这些需要依赖 GIS 技术。利用 GIS 技术可以对地图按照分形要求进行数据处理。

1.2.1 地理数据类型

对于图形数据，在计算机中有两种表达方式，一种是采用栅格数据形式，形成一种栅格数据结构，另一种采用矢量数据形式，形成另一种矢量数据结构。矢量数据是用矢量形式表达的图形数据。

1.2.1.1 矢量数据

矢量又称为向量，是指一种有方向的度量，如力、速度等。对于矢量，不但需要表示大小，还要表示方向。在数学坐标系中，原点是度量表达的起点，位置与原点的连接，形成一个有方向有大小的量。由于所有量的坐标表达都是以原点为依据，因此在具体表达上，只需要表达量的特征值即坐标点就可以表达矢量。矢量数据分为点线面类型，见图 1-2。

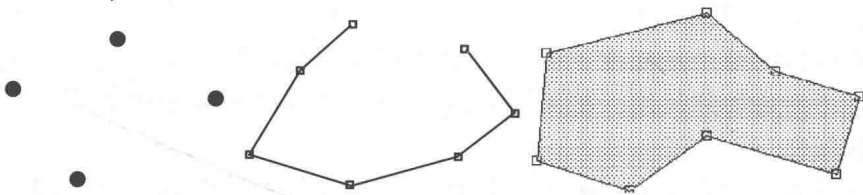


图 1-2 矢量数据

对于矢量数据组织，在 GIS 中有图层文件组织方式，有地理数据库组织方式。对于图层文件，一个要素类形成一个数据文件集，如对于 shp 格式文件，要素类包括 shp、dbf、shx 等多个数据文件，其中 shp 为主文件，在应用中，通过

shp 文件以及关联文件来调用和使用其他数据文件。在地理数据库中,要素组织在数据库中。基于数据库的强大数据处理和组织功能,对于数据可以做文件组织体系中不能进行的一些特别操作。例如,对于网络分析,只有在地理数据库中组织体系下的数据,才能进行网络流向追踪分析。

1.2.1.2 栅格数据

栅格数据是图形数据的另一种表达格式,栅格数据组织结构相对规则、简洁,生成方便,通常通过扫描、照相方式都可以生成栅格数据。对于作为地理信息的栅格数据,一般以遥感图像数据为主,也包括从矢量数据转换而来的栅格数据以及其他方法和途径生成的数据。

栅格数据是把空间划分为规则的格网,一个格网为一个单元,称为栅元(Cell),表达该范围内的地理事物的信息。通常用格网位置记录地理事物的空间位置,用格网值记录地理事物的某种属性,这种属性采用编码形式,实际是一种分类。栅格数据采用矩阵表达方式,数据结构规则,便于数据处理。图 1-3 中,把左图部分放大,可见到清楚的马赛克形态,这就是栅格数据的直观形态。

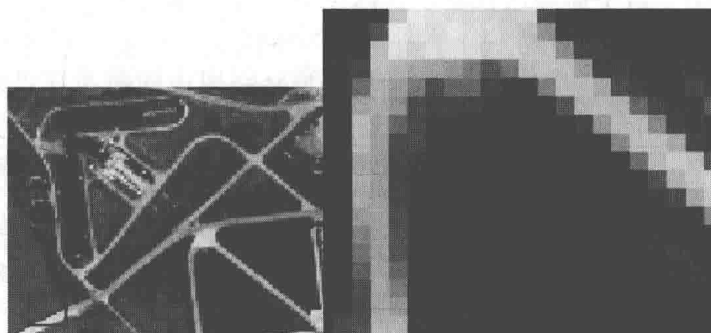


图 1-3 栅格数据直观

栅格数据的常见类型有图像数据,它是以矩阵来表示的。从矩阵角度,每一个元素占据一定的行列位置,元素用数值表达。在作为地理信息的栅格类型中,矩阵的行列位置体现栅格图形的坐标位置,因此栅格的位置隐含了坐标,而矩阵元素值作为栅格值,本身是事物分类特征代码。对于地形,栅格值是高程值。在 GIS 中,栅格分为连续栅格和离散栅格,其中连续栅格没有属性表,离散栅格有属性表。但栅格属性表与矢量数据属性表不同的是,前者属性以编码值的统计为记录。

1.2.1.3 图像数据

图像数据也是栅格数据,在 GIS 中,图像尤其是遥感图像,是重要的地理信息源。虽然图像也是栅格数据,但与一般栅格数据还是有一定区别,这就反映到对于图像数据的处理技术和方法。

遥感的波段并不是一个单一频率,而是相对接近的一个频率范围,称为波段,一个波段的颜色深浅随波的强度变化,因此形成的图像的颜色深浅有别,

并且这个级别具有一定的连续性，为了方便应用，把颜色分为灰度级。

图像分成不同的波段，每一个波段反映对象的某一方面的电磁波特征，比如遥感波段分别选择对叶绿素、水体、土壤岩石敏感的波段。

1.2.2 地理数据表达

地理信息是关于地理事物的信息，地理信息最典型的表达是地图，在计算机系统中，地理信息被抽象为数据表达，在数据的基础上，可以进行信息分析。

1.2.2.1 地理信息表达

地理事物有几何形态和性质特征，分别被抽象表达为图形和属性两部分。图形以地理空间位置和形状来表达，属性记录地理事物的特征方面。如一个地块的属性包括面积、土壤类型、植被类型、承包人员、种植类型等一类非地理空间方面的信息。

在 GIS 中，地理信息在计算机中分用两种数据表达，一为图形，另一为属性表。在 GIS 中，对于地理信息需要具体识别、查询和选择等，因此需要把每一条信息具体明确地表达出来，对于地图的一个图元，需要有一个唯一的标识，同样，对于属性，也需要逐条表达。图形和属性的表达见图 1-4。



图 1-4 地理信息的地理视图和表视图

需要强调的是，图 1-4 右表中的形状字段是一种形象的示意表达，在实际的属性表中，这个字段并不直接显示图形样式，仅仅在内部采用一种图形元素链接标识，在 ArcGis 中，属性表的这个字段的记录仅仅是点(针对点图)、折线(针对线图层)等的单一相同记录值。

1.2.2.2 图形与属性连接

由于图形和属性是作为一个具体地理事物的表达，因此应当是一个完整的集合体。但是在计算机中，由于数据组织和结构的不同，形成了表达的分离。这种分离是基于数据类型、数据结构和数据模式不同采取的一种高效表达方式。但是，这种表达方式也必然形成了一定的数据复杂性，在技术中，为了完整表达地理信息，采用数据关联的方式，建立图形和属性之间的连接，以进行相互识别(图 1-5)。

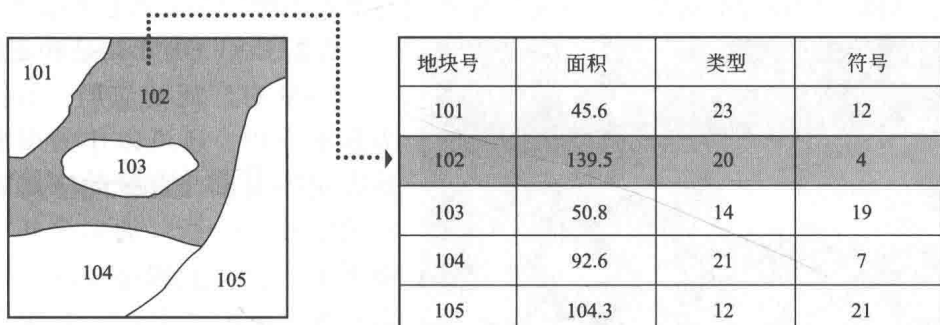


图 1-5 地理信息图形和属性及其连接

需要说明的是, CAD 数据由于不考虑复杂的查询、空间分析等问题, 因此对数据不用复杂的结构来表达, 甚至对于属性也是简单表达。

1.2.3 数字高程模型

数字高程模型 (Digital Elevation Model, 简为 DEM) 是地形三维模型, 这种模型是一种用高程数据插值生成的三维地形面, 作为以地形为基础的三维分析数据集, 是 GIS 的一个极为重要的数据类型, 是地貌和水文等的分形分析和计算的数据基础。

1.2.3.1 数字高程模型概念

DEM 是一种数字化地形高程模型, 这种模型有广义与狭义之分, 广义的 DEM 指具有三维表面特征的地形数据, 包括不规则三角网 (Tangle Irregulate Network, 简为 TIN) 和 Terrain 等, 狭义的指以方格网表达的栅格地形数据。

虽然 DEM 指地形, 但是可以以之作为一种认识 and 解决问题方法的数据扩展, 即把非地形的但有类似地形特征的要素表达为 DEM, 借助于 DEM 分析方法进行分析应用。例如, 可以用非地形的数据如气温、降雨量等生成专业的类似 DEM 三维专题数据, 这时的 DEM 不再是数字高程, 而是数字温度、数字降水或者其他模型, 其从数据构成方面与地形 DEM 的数据没有差异, 可以按照地形状况进行分析, 如坡度分析、坡向分析、剖面分析、填挖分析。另外, 还可以做更专业的分析, 例如对于降水进行时空分布和变化的状况分析。从数据加工角度, 可以应用各种分析方法和工具, 不过对于这些分析需要对于分析结果做非地形的专业解释, 例如, 温度的坡度反映温度的区域空间变化。

1.2.3.2 DEM 生成

三维地形面一般利用地面高程点或等高线生成, 由于测量采点密度原因和插值程序的智能化水平问题, 在地形生成过程中对于河道和沟谷地点会有一些问题, 使生成的地形出现不合理状况, 因为程序只是机械的插值, 而实际地形可能是河道, 程序并不能简单的予以识别。另外, 单纯的高程点或等高线也缺

乏相应河流、沟谷等的信息，因此造成流水线地形有不符合水文状态的起伏。

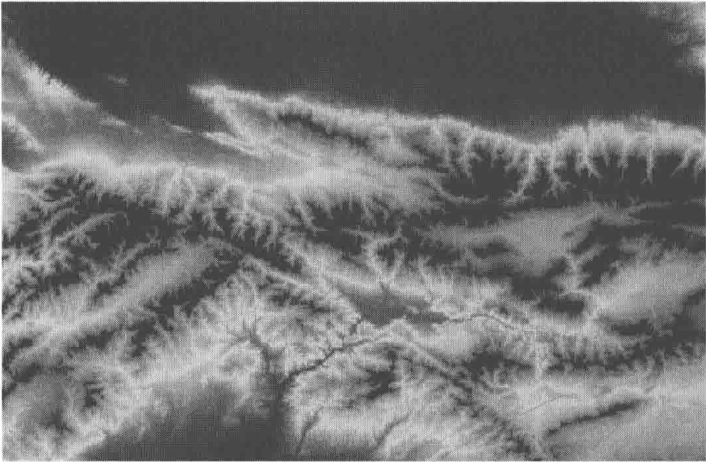


图 1-6 DEM 样例

1.2.3.3 DEM 特征和应用

DEM 有广泛的应用，不仅作为基本应用，还可以作为很多其他应用的基础。直接的应用有进行地形坡度分析、坡向分析、剖面图生成、生成坡度变率图、山影分析、填挖方分析等；在水文分析方面，可以生成地表径流流向图、地表汇流图、分水岭、盆地、河网生成等；可见性分析：天际线、视线、视通、视域等。DEM 样例见图 1-6。

1.3 地理信息分析

地图虽然表达的是基本的地理事物内容，但是含有极为丰富的地理信息，不同的专业、不同的应用，都可以从其中获得需要的某些信息，但是，这些信息一般并不是明显的“在哪儿”，而是通常“隐藏”起来的，因此，获得需要采用一定的技术方法和手段来获取这些隐含信息，满足专业应用需要，这个方法和手段就是地理信息分析。地理信息分析是分形计算的基本方法。

1.3.1 地形分析

地形是自然地理要素中的主导因子，因此地形分析是地理信息分析的一个重要方面。对于地貌分形分析，采用地形分析的一些方法组织和建立分析数据。例如，用 DEM 进行坡度分析，可以生成坡度图，作为坡度分形分析的基础数据。

1.3.1.1 坡度分析

地形坡度指地面起伏的坡度大小。在 GIS 中，坡度分析利用 DEM 数据和坡度分析工具，生成地形坡度图，反映地形的坡度大小及空间分布。对于分形而言，坡度也具有分形特征，因此坡度分析为坡度分形分析提供数据基础，同时，在 GIS 中，可以用有关的工具和数据处理方式进行坡度分形分析。

1.3.1.2 坡向分析

坡向指坡面法线的水平投影方向，起始方向为北，顺时针从 0 到 360°变化。坡向是地面光照、太阳辐射能量计算的依据。而光照和太阳辐射能量对于作物