

SANWEI

CHENGSHI MOXING KONGJIAN
DINGLIANG FENXI JI FUZHU KONGJIAN
JUECE YINGYONG

三维城市模型空间 定量分析及辅助空间 决策应用

李朝奎 编著

中国
环境
出版
社



国家自然科学基金项目资助 (No. 41273190)

湖南省自然科学基金项目资助 (No. 12JJ9023)

湖南科技大学学术出版基金资助

三维城市模型空间定量分析 及辅助空间决策应用

李朝奎 编著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

三维城市模型空间定量分析及辅助空间决策应用/
李朝奎编著. —北京: 中国环境出版社, 2014.7
ISBN 978-7-5111-1865-3

I. ①三… II. ①李… III. ①地理信息系统—应用—城市空间—空间规划—研究 IV. ①TU984.11-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 104943 号

出 品 人 王新程
责任编辑 李卫民
责任校对 唐丽虹
封面设计 金 喆

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 7 月第 1 版
印 次 2014 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 6.5
字 数 98 千字
定 价 14.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

地理信息系统 (GIS) 区别于非地理信息系统的本质特点是 GIS 具有强大的空间分析功能, 分析目的是辅助决策者进行空间决策, 这也是建设 GIS 的根本目的和出发点。然而目前 GIS 在辅助决策支持方面的功能尚不尽如人意, 尤其是以三维城市模型 (3DCM) 为核心内容的三维城市地理信息系统 (3DUGIS)。3DCM 的嵌入改变了城市空间信息的分布, 影响了空间信息的传播规律, 因而显著地增加了空间分析的难度。本书在分析设计过程、用户需求、典型程序及相应的计算机环境的基础上, 以日照分析、电磁波传播为例, 研究了基于 3DCM 的空间定量分析模型与辅助空间决策支持方法, 提出了新的模型概念、决策支持所需要的数据内容和形式, 并在此基础上开发了日照分析软件模块。本书研究的主要结论如下:

(1) 三维城市地理信息系统 (3DUGIS) 的核心内容是三维城市模型 (3DCM), 3DCM 的增值应用是 3DUGIS 建设的瓶颈问题。

(2) 大众化应用是 3DUGIS 的根本目的, 公众广泛参与的交互式辅助决策支持是大众化应用的有效方式。

(3) 3DCM 的辅助空间决策支持实质是 3DCM (如地形起伏模型、三维建筑及其属性模型、Voronoi 邻域模型和三维切面模型等)、数学模型 (如空间统计模型、聚类分析模型和模糊分析模型等)、专题应用模型 (如风场模型、电磁波与声波扩散模型和水流模型等) 的集成应用。

(4) 3DUGIS 中的空间分析如距离、通视、日照、网路 (道路、电力、通

信)、统计等方面的分析,3DCM对专题空间信息如噪声、大气污染等的影响分析是提供决策支持证据的有效手段。

(5) 3DCM 辅助空间决策支持证据的获取可以借助空间信息的挖掘技术实现。

(6) 辅助空间决策支持系统的设计采用模型库、数据库、方法库与 GIS 高度集成的模式,即开发基于 GIS 平台的 3DCM 辅助决策支持系统,以提高数据链接速度和决策效率。

GIS 的大众化应用是 GIS 的生命力所在。本书旨在激励业内人士对三维 GIS 的增值应用的研究兴趣,从而促进三维城市模型的深度研究与广泛应用。

本书在编撰过程中得到湖南科技大学科研助理冯志元和湖南科技大学研究生殷智慧、严雯英等的大力支持,他们在本书图表绘制与书稿校对过程中做了大量工作,在此深表感谢。

本书可作为地图学与地理信息系统专业研究生、城市规划专业和测绘及地理信息科学专业高年级本科生及工程技术人员的教学与工作参考资料。限于作者水平,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 7 月 5 日

目 录

第 1 章	3DCM 空间定量分析及辅助决策概述.....	1
1.1	研究意义与进展	1
1.2	研究内容及研究方法	5
1.3	本章小结	9
第 2 章	3DCM 空间定量分析及辅助空间决策基础.....	10
2.1	数据、信息与知识的概念.....	10
2.2	空间数据挖掘与知识发现技术.....	10
2.3	3DCM 辅助空间决策证据的挖掘与发现.....	15
2.4	本章小结	16
第 3 章	3DCM 空间定量分析方法与辅助空间决策模型.....	17
3.1	3DCM 辅助空间决策的相关概念	17
3.2	基于 3DCM 的辅助空间决策证据获取模型.....	20
3.3	顾及 3DCM 的辅助空间决策模型.....	27
3.4	本章小结	30
第 4 章	3DCM 辅助空间决策支持方法.....	31
4.1	3DCM 辅助空间决策支持的概念模型.....	31

4.2	3DCM 辅助空间决策支持的结构模型.....	32
4.3	数学模型、3DGIS 与决策证据的集成模式	37
4.4	本章小结	38
第 5 章	基于 3DCM 的空间定量分析典型应用领域.....	39
5.1	概述	39
5.2	基于 3DCM 的无线信号场强覆盖预测.....	39
5.3	基于 3DCM 的日照分析及其辅助空间决策.....	49
5.4	基于 3DCM 的辅助城市空间设计.....	63
5.5	本章小结	69
第 6 章	3DCM 空间定量分析方法及应用.....	70
6.1	基于.NET Remoting 的射线跟踪并行计算	70
6.2	基于镜像理论的射线跟踪改进方法.....	76
6.3	本章小结	85
第 7 章	研究结论与展望.....	87
7.1	研究结论	87
7.2	研究展望	89
参考文献		90

第 1 章 3DCM 空间定量分析及辅助决策概述

1.1 研究意义与进展

1.1.1 研究意义

一方面,随着三维城市模型(Three Dimension City Model, 3DCM)的图形生成技术、多传感交互技术及高分辨显示技术的逐渐成熟,人们迫切要求在虚拟城市地理环境下进行 3DCM 的辅助空间决策应用,例如城市景观分析、房屋拆迁分析、台站设计、监视器位置设计、公安兵力布置等,使之成为城市规划、突发事件应急处理、反恐以及科学决策的重要手段;另一方面,以 3DCM 为基础的数字城市工程全面建设,使得 3DCM 的增值应用已经成为制约数字城市建设快速发展的“瓶颈”,迫切需要解决 3DCM 辅助空间决策支持证据的获取、证据表达与决策模式等应用基础理论问题。

3DCM 辅助空间决策支持要解决两个基本的理论问题:一是辅助决策信息/证据的获取;二是空间决策信息/证据的表达。对于上述两个问题,目前国内外的研究主要集中在非三维空间信息的获取与表达。虽然研究已经取得丰富的成果,但提供的证据模型与决策模型均未涉及空间数据的高程属性,因而存在着两个明显的缺陷:①没有顾及几何 3DCM 及其对三维空间专题信息分布的影响;②没有建立三维空间辅助决策支持信息/证据的表达方法与决策模式。因此,国内外很多学术组织与学术会议都把 3DCM 辅助空间决策支持的研究作为一个重要研究方向^[1-3]。但是 3DCM 的辅助空间决策支持研究面临许多困难,首先是顾及 3DCM

的辅助决策信息的获取，其次是基于辅助决策信息的空间决策模型与方法。要解决上述问题，必须开展两个方面的研究工作：① 研究 3DCM 辅助空间决策支持证据的获取方面的基础数学模型；② 研究基于上述辅助空间决策证据的表达方法与决策模式。

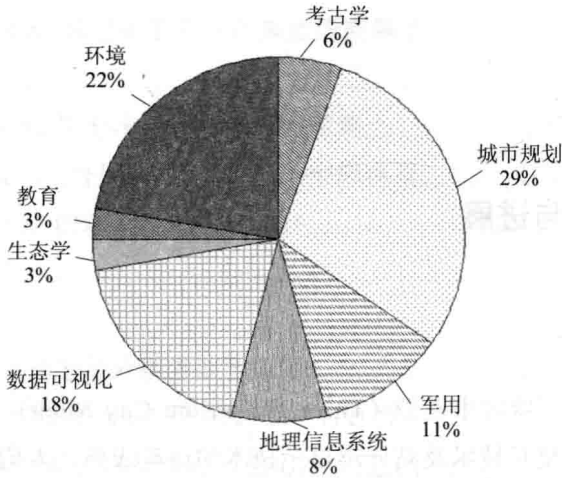


图 1-1 虚拟现实与 GIS 项目覆盖的应用领域

因此，“基于空间数据挖掘与知识发现 (Spatial Data Mining and Knowledge Discovery, SDMKG) 技术的 3DCM 辅助空间决策支持证据的获取方法”课题针对当前三维 GIS 研究的薄弱环节及功能缺陷，选择关系到 GIS 生命力的辅助决策支持问题进行研究，突出解决三维城市模型辅助空间决策支持的证据获取、证据的表达方式与决策模式、数学模型、专业应用模型与 3D GIS 的集成方法等基础理论问题，这对提升现有 3DCM 的增值应用功能，特别是增强数字城市建设的生命力具有非常重要的理论意义和紧迫的现实意义。

1.1.2 研究进展

现有的 GIS 都缺少对复杂空间问题决策的有效支持能力^[4]。20 世纪 80 年代中后期以来，以 GIS 和 DSS 为基础形成的新型空间决策支持系统 (Spatial Decision Support System, SDSS) 备受国内外学者的广泛关注与重视。其中针对二维空间

数据辅助决策支持的研究成果较多,主要集中在如下几个方面:

(1) 模型库的建立。模型是 SDSS 的核心,包括决策模型和空间分析模型。不同的应用对象、不同决策层次的模型不一。这方面的研究中,国内学者黄跃进等^[4]研究了空间决策支持系统中模型的存储与组织方式,讨论了基于 Agent 的模型自动生成、运行与修改方法;在 GIS 领域,荷兰学者利用 2D 空间数据,借助电子地图建立销售、建筑物影响、车辆导航等决策模型,相关的研究成果总结在文献^[5-8]中;陈崇成等^[9]针对 SDSS 的特点提出模型群组—模型体系—模型库的建模方法,为模型库的组织与生成提供崭新思路。这方面进一步的研究是顾及空间数据高程属性的模型库的建立。

(2) 知识/证据的获取与建库。知识/证据是决策的基础,它包括与空间信息相关的数据、数值、文字、图表、图形、图像、知识、规律等。证据不同于 GIS 中的源数据,其来源有三:①从源数据中获取;②决策人的先验知识、效用与偏好;③借助模型分析获取。因此,一方面要借助相关的分析方法和技術,比如 SDMKD 技术获取相关的辅助决策证据;另一方面要对多种类型的决策证据进行转化、融合与集成以形成新的证据库。这方面的研究中,英国伦敦大学学院 (University College London, UCL) 的高等空间分析中心在 JISC 的资助下进行了 VENUE 项目的研究。该中心的 Dr Bin Jiang 和 Martin Dodge^[10]研究了辅助决策支持的分析设计^[11]、形态分析^[12]方法。R. Sivacoumar, K. Thanasekaran^[13]详细研究了公路附近车辆污染的统计模型,用高斯有限元线源模型(类似神经网络)描述公路附近汽车尾气的扩散,给出建模方法及所需的相关数据;Yilmaz Yildirim, Nuhi Demircioglu, Mehmet Kobya, Mahmut Bayramoglu^[14]研究了城市二氧化硫的污染问题,建立了城市空气质量评估的非线性模型;德国斯图加特大学的“景观规划与生态研究所”专门从事基于 3D GIS 的生态与环境规划研究。该所 Dipl. Geogr. Markus Müller^[15], Monika Ranzinger 和 Gunther Gleixner 等^[16]详细讨论了大气污染、风场及污水流动等模型建模所需要的 3D 空间数据,给出了相应的建模步骤;日本 Tsuyoshi Horiguchi 和 Takehito Sakakibara^[17]研究了交通流量模型的数字仿真问题,通过建立交通流量模型,辅助分析交通高峰期的车速;加拿大学者^[18]讨论了城市密度对电磁波传播的影响。我国学者王桥等^[19]借助 GIS 建立区域规划模型,

讨论了二维模型的建模方法及各种预测模型；张伟等^[20]从城市规划的角度研究了区域模型系统，实现了人口、经济、城市增长的模型功能；马爱军等^[21]研究了决策支持信息的集成问题，给出多源、多尺度、不同格式和不同生命周期的决策支持信息的融合方法。该领域的进一步研究方向是如何获取 3DCM 环境下辅助决策支持的证据（信息），因为 3DCM 的引入，改变了空间信息的分布规律，例如建筑物改变了噪声在自由空间的传播规律；要从海量的原始信息中寻找上述规律/知识，必须利用 SDMKD 的有关理论与方法。

(3) GIS 与应用模型的集成。应用模型的存在形式有四：① 源代码形式；② 函数库形式；③ 可执行程序；④ 模型库形式。相应的集成方式有：源代码方式、函数库方式、可执行程序方式、模型库方式以及 DDE 和 Active X 方式。对于该问题的研究，我国学者徐冠华^[22]提出将证据模型、决策模型集成于 GIS 以建立分析型 GIS；闫国年等^[23]实现了将数据库、模型库、知识库融入 GIS 的方法；本书作者^[24]将太阳运动方程与数码城市 GIS (CCGIS) 集成，研究了三维城市模型辅助日照分析。该方向有待深入研究的问题是：3DCM、数学模型、专题应用模型的集成模式。

(4) 基于 GIS 的 SDSS 平台的开发与应用。GIS 的元数据和综合分析数据是辅助决策的基础，SDSS 是在 GIS 的基础上融入了模型库和方法库后形成的决策支持系统。SDSS 是一个非常复杂的系统，除了上述问题外，还要解决多种数据集成、空间数据的相互转化、空间数据基础设施及专题信息的动态加载、模型库与数据库的通信机制等问题。我国学者阎守邕^[25]、王挺^[26]等开发并初步实现了 SDSS 的功能；意大利、中国台湾、中国澳门学者从不同的角度研究了 GIS、SDSS 中模型的集成问题^[27-30]。这里的关键问题是如何实现在 GIS 与 SDSS 之间进行空间数据、模型、专题数据的互操作问题。

由此可以看出：尽管二维空间数据的辅助空间决策支持已经在多个国家、从不同的侧面广泛开展研究，但真正意义上的 GIS 辅助决策支持功能还有待进一步完善。

3DGIS 环境下的辅助决策支持是一个比 2DGIS 环境下的辅助决策支持更为复杂的问题，其原因是：① 3DCM 的建立完全扰乱了城市空间专题信息比如日照、

噪声的正常分布规律,从而使得辅助空间决策信息/证据的获取更加困难;②专题数据如电磁波、大气污染物等的引入,使得3DCM的辅助空间决策支持需要多学科交叉研究,因而增加了应用建模分析的难度。针对3DCM辅助空间决策支持的研究,目前尚无相关成果报道。本课题的研究,旨在建立一种顾及3DCM的3DGIS辅助空间决策支持的新方法。这种方法的特点是:借助空间数据挖掘与知识发现技术,寻找3DCM影响下专题空间信息的分布规律,运用三维可视化技术将上述分布规律进行可视化表达,据此进行可视化决策。

空间数据挖掘与知识发现(SDMKD)是一种基于空间统计理论、证据理论等的规律寻找方法,如统计方法、神经网络方法、遗传算法、可视化方法等^[31]。SDMKD起源于对数据库的研究。1989年第十一届国际联合人工智能学术会议上首次提出数据挖掘与知识发现(Data Mining and Knowledge Discover, DMKD)概念。国外,DMKD方法已经在金融、保险、电信及市场营销等领域成功运用。1994年,李德仁院士^[32]首次提出SDMKD概念,随后在他和李德毅院士的倡导和指导下国内学者开展了相关研究工作。SDMKD适用于在3DGIS中发现3DCM与多种空间专题信息的耦合规律,从而定量地描述不同空间位置的信息分布,有望成为3DCM辅助空间决策证据发现的新方法。

可见,3DCM辅助空间决策支持除了需要继续完善上述四个方面的工作外,还应重点解决以下两个问题:①3DCM辅助空间决策支持证据获取的基础数学模型;②空间决策证据的表达方法及辅助决策模式。

1.2 研究内容及研究方法

1.2.1 研究内容

(1) 决策证据获取的数学模型研究

证据是决策的基础。3DCM的引入,改变了空间信息如噪声、电磁波的分布规律,为了获取现有城市空间环境中的信息分布,必须建立3DCM对空间信息分布影响的数学模型,比如空间统计分析模型、时间序列模型等,从而解决具有空

间关联的数量问题,如空间自相关模拟与分析。由于 3DCM 是在 2D 图形的基础上加入高程属性,因此在现有模型如拟合推估模型、配置模型、非线性时间序列模型、马尔柯夫模型等的基础上扩展,使之适合于描述空间信息的分布规律。

(2) 决策证据的表达与决策模式

决策模式包括可视化决策、优化决策等。优化决策是基于多证据指标,以决策者的偏好与效用为目标进行决策方案寻优。这种模式的决策可以分为三类:

① 结构化决策;② 非结构化决策;③ 半结构化决策。基于知识与证据的决策是人机交互的过程,也就是从半结构化向结构化转化的过程。可视化决策是借助三维可视化技术、虚拟现实技术、工业仿真技术,将得到的辅助决策证据进行三维可视化表达,从视觉上辅助决策。空间决策涉及空间关系,因此要给出 3DCM 影响下空间信息分布的变化情况,例如与噪声源距离不同区域声强的分布变化,所以对决策证据进行三维可视化表达,建立一种可视化的决策模式是本课题研究的主要内容之一。

(3) 专业应用模型、基础数学模型与 3D GIS 的集成

三维城市模型(3DCM)是城市虚拟地理环境的主要内容,它包括地形起伏模型、三维建筑及其属性模型、Voronoi 邻域模型和三维切面模型等,3DCM 在 3D GIS 中可以实现无缝漫游;专业应用模型涉及具体物理量的变化规律,描述这种规律的模型是嵌入 GIS 还是独立于 GIS,取决于决策效率;数学模型是描述专业应用模型被 3DCM 污染或损伤后的模型。上述模型与 GIS 的集成方式主要有三种形式:① 决策支持模型嵌入 GIS,作为决策分析的模型库;② GIS 嵌入决策支持模型库,作为决策分析支持的源数据库;③ GIS 与决策支持模型紧集成,即 GIS 与模型库共享源数据库。3D GIS 数据量大,因此要研究支持快速、高效决策分析的决策数学模型、专业应用模型与 3D GIS 的集成方式。

(4) 证据获取方法在噪声污染及电磁波传播中的应用

将研究得到的模型编写成可执行代码,封装成组件引擎挂接在 CCGIS 中。将获取的 3DCM、噪声信息、模型信息输入 CCGIS,研究噪声信息分布的特征及受 3DCM 影响的变化,由此检验模型的可靠性与灵敏性、系统集成的效率等。本书作者通过参与的数字深圳示范工程获取了丰富的三维空间数据,结合本书研究成

果可以检验大气噪声污染、电磁波传播等空间模型的有效性。

1.2.2 研究方法

(1) 决策支持证据的获取模型

SDMKD 技术涉及空间统计、证据理论、时间序列等基本支持理论。将 SDMKD 方法的理论模型进行改造,并应用于空间决策支持证据的获取,即描述 3DCM 对专题信息空间分布的影响规律,从而获取不同空间位置的专题信息量,辅助空间决策。三维城市模型(3DCM)包括 DEM、3DBM(三维建筑模型)、三维植被模型等,均是以数据(模型)的方式存储在 GIS 中;三维空间专题信息可以描述为: $V=f(x, y, h, t)$,当平面坐标 x, y 恒定时,信息量 v 随高度 h 、时间 t 的变化而变化,例如大气污染物的浓度分布。因此可以借助时间序列模型描述 V 与 h, t 之间的关系,然后利用函数拟合与空间插值等方法获取 V 。由于空间信息很难被重复采样,且信息间的依赖性强,因此可以借助空间统计理论研究用随机过程模型描述的以空间位置为自变量的专题信息的随机分布。3DCM 的材质、线度、结构不同,其对空间信息分布的影响具有明显的不确定性、随机性和非线性等特点,因此本课题的研究还将借助证据理论研究城市大气噪声传播、电磁波传播等多源辅助决策信息的合成问题,通过建立相应的空间统计分析模型,运用证据合成理论求解决策支持证据。

(2) 决策证据的表达方式与决策模式

决策证据的表达方式取决于决策模式。借助地形的三维可视化技术、虚拟现实技术、仿真技术,针对辅助空间决策支持证据的特点,重点研究将空间决策证据进行三维可视化表达,利用 Open GL 的拾取机制实现在 3D 场景中对 3DCM 的交互操作,从不同的角度观察 3DCM 对专题信息分布的影响,据此进行可视化决策;如与噪声声源距离不同的区域,其噪声强弱不同,且噪声的空间分布随 3DCM 的几何尺度、密度、空间位置、材质、考察域的高度、考察时间、声源强度、声源空间位置的不同而异。由上述参数构建的空间动态分布函数能描述噪声在空间每一点的强度,对该强度赋予一定的灰度值,用一种或多种色彩进行表示,决策者就可借助既有的经验和偏好,辅助视觉决策。

(3) 数学模型、专业应用模型与 3DGIS 集成

这里有三个基本问题：① 多种数据与模型的标准化问题；② 模型库与数据库的通信机制问题；③ 模型的共享与安全问题。数学模型用于描述被 3DCM 破坏下的专题空间信息的分布规律，专业应用模型是对专业信息的空间分布的描述，例如电磁波传播方程。3DGIS 中包含有多源、多尺度、不同结构、不同生命周期的数据。数据库与模型库是独立存取，但模型与数据之间存在不同的映射关系，因此要通过一定的组织结构的存储形式，将多个模型和海量三维数据组织起来，提高模型与数据的组合能力，采用组件化方法实现数学模型、专业应用模型、3DCM、专业信息与 GIS 数据库的有效集成，使模型、方法和数据融为一体。

(4) 典型应用与模型检验

可基于本书提出的模型与方法，研究方法与模型的具体应用，特别是研究决策证据获取模型的检验和专业模型、数学模型、3DGIS 的集成方法，实验可以采用国产三维 GIS 软件 CyberCity 平台（缩写为 CCGIS），检验相应的应用功能。理论检验包括方差检验、可靠度检验、灵敏性检验等；实践检验要利用已有的三维空间数据（模型）和决策对象的相关信息，反演模型参数，提高模型的准确度。

上述研究思路可以直观地表达为图 1-2。

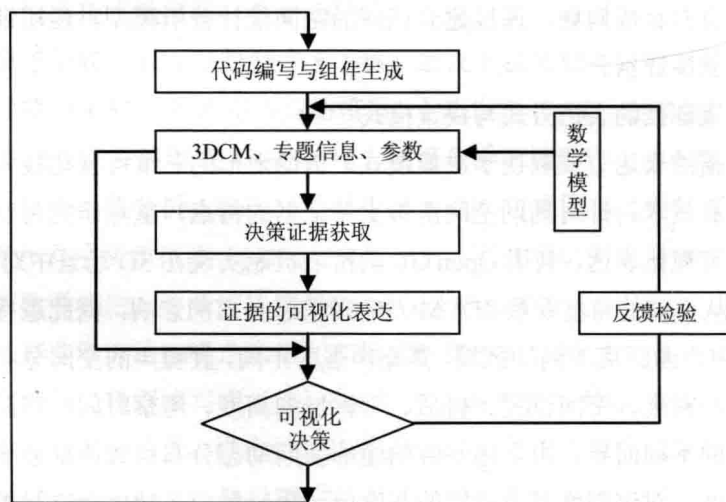


图 1-2 3DCM 辅助空间可视化决策研究路线

1.2.3 关键问题

(1) 3DCM 辅助空间决策证据获取模型的建模问题。该问题是 3DCM 辅助空间决策支持从理论走向实用的关键。

(2) 空间决策模式与决策支持证据的表达方法。该问题是 3DCM 辅助空间决策支持理论走向完善、实用的重要环节。

1.3 本章小结

本章详细介绍了 3DCM 空间定量分析及辅助决策研究的意义及国内外研究现状。针对目前研究存在的不足,提出了本书的研究内容及研究方法,并对研究中的关键问题进行了详细阐述。

第2章 3DCM空间定量分析及辅助空间决策基础

2.1 数据、信息与知识的概念

数据、信息、知识是目前流行的科技术语，然而三者之间既有联系，又有明显的区别。数据（Data）是关于客观事物的属性、数量、位置及其相互关系的符号描述，是信息的载体，相同的数据可以代表不同的信息，例如重 20 kg、长 20 km 等。信息是对数据进行的具体解释，同一个信息在不同的场合下可以用不同的数据进行表示。例如高个子这一信息，对于不同的参照标准，其具体数据不同；知识（knowledge）是一个或多个信息关联在一起形成的有应用价值的信息结构，例如月亮绕地球运动就是人类在获取的多个信息的基础上得出的结论性知识。从数据到信息是一个数据处理过程，包括查询、统计、特征提取等，在数据库管理系统中通过查询和统计功能实现；从信息到知识则是一个认知过程，例如通过长期的认知和总结，人类发现地球自转一周需要一天时间，公转一周为一年时间。数据、信息、知识三者间的关系如图 2-1 所示。

2.2 空间数据挖掘与知识发现技术

数据挖掘（Data Mining，DM）一般是指从大型数据库的数据中提取隐含的、事先未知的、潜在有用的知识。这些知识表现为概念、规则、模式等形式。DM 出现的技术背景是：① 计算机技术、互联网技术快速发展；② 数据库技术成熟，且数据资源非常丰富。当人们感到传统数据分析方法无法应对海量数据时，DM