

三维 GIS 的基本问题探讨

肖乐斌^{1),2)} 钟耳顺²⁾ 刘纪远³⁾ 宋关福²⁾

¹⁾ (中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

²⁾ (中国科学院地理信息产业发展中心, 北京 100101)

³⁾ (中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 回顾与评述了三维 GIS 的相关发展情况, 探讨了三维 GIS 的有关基本问题, 如数据获取、大数据量存贮与处理、三维空间分析, 同时指出科学计算可视化、数据库系统管理、数字影像处理等技术的成熟和二维 GIS 长期发展提供的理论实践经验等为三维 GIS 的发展提供了良好的基础。最后为三维 GIS 实际系统的开发提出了几个值得注意的要点。

关键词 三维 GIS 基本问题 数据结构

中图法分类号: P208 TP311 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)09-0842-07

A Discussion on Basic Problems of 3D GIS

XIAO Le-bin^{1),2)}, ZHONG Er-shun²⁾, LIU Ji-yuan³⁾, SONG Guan-fu²⁾

¹⁾ (Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

²⁾ (Center for GIS Industry Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

³⁾ (Institute of Geographic Science and Resource, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract This paper reviews 3D GIS's characters and related software development, discusses its some basic problems such as data acquisition, 3D data storage and handling, 3D spatial analysis, etc. and points out that on one hand currently 3D GIS's development is restricted by inefficient 3D data model and data structure, difficulties of 3D data acquisition, large amount 3D data procession and storage, and 3D spatial analysis, on the other hand, 3D GIS can be facilitated by mature Visualization of Scientific Computation, Database, Digital Image Procession technique and 2D GIS's theories and experience. At last, four important points about 3D GIS software development are presented in this paper: ① At present 2D data model and structure is still one basis of GIS software, and 3D data structure is only one secondary part; ② Boundary Representation must be used as one primary method in 3D modeling, Raster structure and integrated or hybrid Vector-raster structure can only be auxiliary method; ③ Some special data structure and spatial algorithm need to be researched to support efficient 3D spatial analysis; ④ 3D city modeling is becoming one more and more important aspect of 3D GIS research and development.

Keywords 3D GIS, Basic problems, Data structure

0 引言

二维 GIS 始于 20 世纪 60 年代的机助制图。今天它已深入到社会的各行各业, 如土地管理、电力、电信、城市管网、水利、消防、交通以及城市规划等。

但二维 GIS 存在着自身难以克服的缺陷, 它本质上是基于抽象符号的系统, 不能给人以自然界的本原感受。随着应用的深入, 作为第三维的高程信息显得越来越重要。一些二维 GIS 和图象处理系统虽已能处理高程信息, 但它们并未将高程变量作为独立的变量来处理, 而只是将其作为附属的属性变量对待,

虽然能够表达出表面起伏的地形,但地形下面的信息却不具有,因此它们在国际国内也被俗称为 2.5 维的系统。考虑到 2.5 维这一概念并不严密,故在此称之为“地形面三维”或简称面三维。我们认为,面三维的 GIS 本质上仍然是二维 GIS 系统。

二维 GIS 只能处理平面 $X-Y$ 轴上的信息,不能处理铅垂方向 Z 轴上的信息。它在表达上通常是将 z 值投影到二维平面上进行处理,因此对于同一 (x, y) 位置的多个 z 值不能表达。

地形面三维的表达将 z 值投影到一个模型上,显示时 $X-Y-Z$ 3 个轴均被显示,其模仿人类从某点观察的视觉,使三维对象看起来像真正的三维对象一样。但是面三维技术有两个明显的缺点,即它表达的对象内部是空的,不具备应有的信息;虽然它能表现邻近的多个表面,但对于表面交叉的情况,则难以进行交叉表达和管理。只有将这类现象置于真正的三维空间中考虑,才能灵活高效地处理各种三维问题,如三维内部属性和拓扑关系,三维空间索引和管理等。这是三维空间表达与二维 GIS 地形面三维表达的本质区别之一。

三维空间表达考虑多个 z 值的出现,将多个 (x, y, z) 观测点结构化为实体域,这种处理是对人类居住空间的较为接近的近视^[1]。

1 三维 GIS 发展评述

世界的本原是处在三维空间中的,二维 GIS 将现实世界简化为平面上二维投影的概念模型注定了它在描述三维空间现象上的无能为力,克服这一缺陷迫切需要真正的基于三维空间的 GIS 的问世。因此在过去的一段时间里,人们很早就开始了三维 GIS 理论和实际系统方面的探索。

1.1 三维 GIS 的研发思路与相关软件的发展

随着 GIS 应用的深入,人们越来越多地要求从真三维空间来处理问题。在应用要求较为强烈的部门如采矿、地质、石油等领域已率先发展了具有部分功能的专用三维 GIS,如加拿大 LYNX Geosystems 公司的 LYNX 软件。但由于它们一般都是针对自己的领域开发的,没有从理论上加以系统完整的研究,没有面向通用平台进行设计,因此具有较强的局限性。这是由当时的应用要求、数据获取手段及相关的计算机技术发展条件决定的。

随着二维 GIS 数据模型与数据结构理论和技术成熟,图形学理论、数据库理论技术及其他相关计算机技术的进一步发展,和应用需求的强烈推动,三维 GIS 的大力研究和加速发展现已成为可能。

1.1.1 三维 GIS 研发思路

当前研究和开发三维 GIS 的思路可归纳为两种:

(1) 由于三维 GIS 首先要将地理数据变为可见的地理信息,因此人们从三维可视化领域向三维 GIS 系统扩展,这一点同早期的二维 GIS 来源于计算机制图管理一样,是从可视化角度出发的^[2-4]。

(2) GIS 需要存储和管理大量的空间信息和属性信息,因此人们又从数据库的角度出发向三维 GIS 发展。他们从商用数据库向非标准应用领域扩展,将三维空间信息的管理融入 RDBMS 中,或是从底层开发全新的面向空间的 OODBMS,如 GODOT^[5], GeoO2^[6], GEO++^[7], SmallWorld GIS。一个新的发展方向是将三维可视化与三维空间对象管理耦合起来,形成集成系统。

1.1.2 三维 GIS 相关软件发展概况

迄今为止,国际国内还没有一个成熟完整的三维 GIS 系统,与三维 GIS 相关的系统大多集中在三维可视化方面,如 EVS, Vis5D, Voxel, 医学可视化及各种 CAD 软件等,也有一些部分实现了三维 GIS 的功能,比较有名的软件有: LYNX, IVM (Interactive Volume Modeling), GOCAD, I/EMS, SGM 等^[8,9]。

1.2 三维 GIS 数据模型和数据结构

上述软件的共同缺点是仅重视表达三维对象本身,对各对象间关系的表达没有足够的重视,因此管理大批量三维空间对象的能力较弱,也不能做一些 GIS 需要的空间分析。LYNX 软件能够处理和表达三维地质数据,但它们不容易在其他领域推广使用, MGE 系统有一些简单的三维模块,但也远不能满足三维 GIS 应有的要求。总起来说,这些软件在构造表达三维对象上具有较强的能力,但管理和分析能力较弱。出现这种情况的一个主要原因是三维空间数据模型理论和技术的不成熟,另外空间数据库技术正处于发展中,它不像 RDBMS 那样具有成熟的理论和技术,因此导致了三维空间建模能力的薄弱。为此,许多学者和研究人员在这方面作了很多的努力^[10-27],但仍然没有形成完整的三维 GIS 理论和开发出成熟的三维 GIS 系统。

在完整的三维 GIS 系统研究和开发方面,

BREUNIG 曾经进行过较为系统的研究与实践^[28]. 他为三维 GIS 提出了一个空间信息集成模型, 该模型以所谓的扩展复杂要素 (e-complex) 为内核, 表达三维空间地学对象的几何性质、度量属性及对象间的复杂拓扑关系. 以此为基础, 他又进一步定义了拓扑操作, 并将各种 e-complex 对象融入地学建模和管理的模型框架中, 并给出了一个地质应用的例子. 该模型以矢量模型为基础, 对象及对象间的拓扑关系表达较为精确, 但各种操作复杂费时, 空间分析不易.

国内李清泉也做过较为系统的三维 GIS 研究^[9]. 他以八叉树和不规则四面体为基础提出了三维 GIS 的混合数据模型. 该模型以栅格结构的八叉树作为对象描述的总体框架, 控制对象空间的宏观分布; 以矢量结构的不规则四面体描述变化剧烈的局部区域, 较为精确地表达了细碎部分, 并将这两种模型进行有机地结合. 这种混合模型是一种矢量栅格三维结合的有益尝试, 在一些情况下比较合适, 但还需要其他表达模型的补充, 以提高表达、访问和操作的效率.

由于地学对象赋存形态各异, 千变万化, 各种模型又都有其优缺点, 因此为三维 GIS 表达和分析服务的各种数据模型和数据结构设计, 应当针对不同的数据获取方式、地学对象本身的大致形态和主要的应用目的设计不同的数据模型与结构^[29]. 以此将各种模型的长处充分发挥, 进一步提高三维 GIS 表达和分析的效率.

1.3 三维空间分析

三维空间分析在计算机图形学领域做得较多, 但往往偏重于几何图形与算法性能, 例如边界追踪检测^[30~32]、邻居寻找^[33~34], 很少考虑为地学目的服务的分析. 地学领域曾有人在三维地质表面模拟中提出过三维边界搜索算法^[35], 但其算法较为复杂. 作者曾提出过结构较为简单的邻域寻找算法^[36], 能在线性四叉树和线性八叉树中直接确定单元的邻居. 三维空间分析中还有很多问题需要研究, 例如三维拓扑关系的描述与构造, 三维查询与统计分析等.

2 三维 GIS 的定义、特点及功能

2.1 三维 GIS 的定义

从不同的角度出发, GIS 有 3 种定义:

(1) 基于工具箱的定义 GIS 是一个从现实世界采集、存贮、转换、显示空间数据的工具集合;

(2) 数据库定义 GIS 是一个数据库系统, 在数据库里的大多数数据能被索引和操作, 以回答各种各样的问题;

(3) 基于组织机构的定义 GIS 是一个功能集合, 能够存贮、检索、操作和显示地理数据, 是一个集数据库、专家和持续经济支持的机构团体和组织结构, 提供解决环境问题的各种决策支持.

基于工具箱的定义强调对地理数据的各种操作, 基于数据库的定义强调用来处理空间数据的数据组织的差异, 而基于组织的定义强调机构和人在处理空间信息上的作用, 而不是他们需要的工具的作用.

TURNER 认为 “Geographical Information System 主要用来区分纯粹的二维 GIS 与三维 GIS^[2]. 为强调在三维任务如地质或地貌应用上的扩展, 人们创造了术语 “Geoscientific Information System” (GSIS)^[28]. 这个词后来被修改为一个缩写形式 “Geo-Information System” (GIS)^[24, 28]. 为区分三维 GIS 与现今世界上比较成熟的流行的各种二维商业 GIS, 这里倾向于 BREUNIG 的观点^[28], 用 GIS 指代 “Geo-Information System”, 认为三维 GIS 是布满整个三维空间的 GIS, 与传统的基于平面的二维 GIS 或 2.5 维 GIS 明显不同, 尤其体现在空间位置与拓扑关系的描述及空间分析的伸展方向上.

三维 GIS 加上时间维方面的处理即为四维 GIS.

2.2 三维 GIS 的特点

在三维 GIS 中, 空间目标通过 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴来定义, 它与二维 GIS 中定义在二维平面上的目标具有完全不同的性质. 在目前二维 GIS 中已存在的 0、1、2 维空间要素必须进行三维扩展, 在几何表示中增加三维信息, 同时增加三维要素来表示体目标^[9]. 空间目标通过三维坐标定义使得空间关系也不同于二维 GIS, 其复杂程度更高. 二维 GIS 对于平面空间的有限、互斥、完整划分是基于面的划分, 三维 GIS 对于三维空间的有限、互斥、完整划分则是基于体的划分, 因而, 通过分析基于 (单一) 体划分的三维矢量结构 GIS 几何成分之间的拓扑关系, 李青元提出了五组简化的拓扑关系^[37]. 三维 GIS 的可视表现也比二维 GIS 复杂得多, 以致于出现了专门的三维可视化理论、算法和系统.

总的来说, 与二维 GIS 相比, 三维 GIS 对客观世界的表达能给人以更真实的感受. 它以立体造型

技术给用户展现地理空间现象,不仅能够表达空间对象间的平面关系,而且能描述和表达它们之间的垂向关系;另外对空间对象进行三维空间分析和操作也是三维 GIS 特有的功能.而与 CAD 及各种科学计算可视化软件相比,它具有独特的管理复杂空间对象能力及空间分析的能力.三维空间数据库是三维 GIS 的核心,三维空间分析则是其独有的能力.与功能增强相对应的是,三维 GIS 的理论研究和系统建设工作比二维 GIS 更加复杂.

2.3 三维 GIS 的功能

RHIND 基于二维 GIS 的发展状况提出了三维 GIS 可能包括的 10 项功能:数据采集和检验有效性;数据结构化和转化为新的结构(包括创建拓扑关系和从一种拓扑关系转化为另一种拓扑关系);各种变化(平移、旋转、比例、剪切(shear));选择;布尔操作(交、并差、或及切割断面、开隧道(tunneling)、建筑 building);计算(体积、表面积、中心、距离、方向);分析;可视化;系统管理^[23]. KELK 为三维地学模拟提出过 14 项功能^[24].从其他系统中引进数据和部分分析功能;保存和操作真三维坐标数据;无原始坐标信息损失地变化方向;保存和显示地理对象内部组分的信息;能够方便地进行交互式修改,可针对地理对象及其数据库;允许满足不同数据模型要求的模型重建;将断层等特征作为事件考虑,允许它们影响地学对象;处理大的比例尺差异;处理内部流体运动和其他时间方面的事件;和其他定量公式交互;允许局部细节和更广的软中心(soft-focus)图片显示;视觉上使用户满意;析各种建模趋势、模式及与其他 GIS 模块的联系;在主要的数据库中存贮模型和导出报表.

BREUNIG 从空间信息集成的角度为三维 GIS 的发展提出了 3 项必备的功能:复杂地学对象的管理和处理;能够对由各种空间对象表达形式表示的地学复杂对象进行有效的空间存取;能够对各种空间对象进行有效的空间操作^[25]. ALEXANDER 和 SIGRID 在城市三维 GIS 的设计者中提到了三维城市 GIS 应该具备的另两项功能:应能受益于现代数据获取方法的进步;三维城市 GIS 应面向未来的技术^[38]. 三维 GIS 也必须解决一些传统问题:不确定性;误差定位和消除;处理数据模型的不连续;处理时态数据;处理在不同数据结构中的不同类型和不同比例尺数据^[18]. 三维 GIS 除了具备二维 GIS 的传统功能以外,还应该具有如下独有的功能:

(1) 包容一维、二维对象

三维 GIS 不仅要表达三维对象,而且还要研究一维、二维对象在三维空间中的表达.三维空间中的一维、二维对象与传统 GIS 二维空间中的一维、二维对象在表达上是不一样的.传统的二维 GIS 是将一维、二维对象垂直投影到二维平面上,存储它们投影结果的几何形态与相互间的位置关系.而三维 GIS 是将一维、二维对象置于三维立体空间中考虑,存储的是它们真实的几何位置与空间拓扑关系,这样表达的结果就能区分出一维、二维对象在垂直方向上的变化.二维 GIS 虽然也能通过附加属性信息等方式体现这种变化,但存储、管理的效率就显得较低,输出的结果也不直观.

(2) 可视化 2.5 维、三维对象

三维 GIS 的首要特色是要能对 2.5 维、三维对象进行可视化表现.在建立和维护三维 GIS 的各个阶段中,不论是对三维对象的输入、编辑、存储、管理,还是对它们进行空间操作与分析或是输出结果,只要涉及到三维对象,就存在三维可视化问题.三维对象的几何建模与可视表达在三维 GIS 建设的整个过程中都是需要的,这是三维 GIS 的一项基本功能.

(3) 三维空间 DBMS 管理

三维 GIS 的核心是三维空间数据库.三维空间数据库对空间对象的存储与管理使得三维 GIS 既不同于 CAD 商用数据库与科学计算可视化,也不同于传统的二维 GIS.它可能由扩展的关系数据库系统也可能由面向对象的空间数据库系统存储管理三维空间对象.

(4) 三维空间分析

在二维 GIS 中,空间分析是 GIS 区别于三维 CAD 与科学计算可视化的特有功能,在三维 GIS 中也同样如此.空间分析三维化,也就是直接在三维空间中进行空间操作与分析,连同对空间对象进行三维表达与管理,使得三维 GIS 明显不同于二维 GIS,同时在功能上也更加强大.

(5) 应能及时受益于现代数据获取方法的进展和大数据量处理技术的发展

目前,由于科技水平的限制,人类获取地学三维数据的能力的弱小是阻碍三维 GIS 迅速发展的一个重要原因.一旦三维地学数据变得像遥感数据获取那样及时、广泛与普及,三维 GIS 将会有更迅猛的发展.因此现时的三维 GIS 设计与开发应充分考虑未来三维地学数据获取能力的提高,以便及时受益于现

代数据获取方法的进步.另外,三维GIS要处理的数据量往往很大,计算机软硬件技术的飞速发展无疑能提高三维GIS的性能,这一点也是三维GIS设计必须要考虑的.总起来说,三维GIS应该留有易于扩展的接口,具有及时吸收外部先进技术的功能.

3 三维GIS发展面临的有利因素与困难

3.1 三维GIS当前面临的有利因素

三维GIS现在正面临着有利的发展时机,这表现在以下几个方面:

(1) 在二维GIS领域已经具备比较成熟的理论和技术,例如在数据获取、处理、管理、输出、数据模型与数据结构等方面有很多较为成熟的理论和方法;在实践上已有几十年的发展经验,被广泛应用于各个部门和领域.二维GIS方面的很多理论、技术和经验都能为三维GIS借鉴.

(2) 三维可视化技术在生物、医学、地质、大气等领域已有很多成功的应用.三维GIS与二维GIS的一个重要不同之处在于它有一个三维对象的视觉表现问题,这也是它的一个基本要求.现在成熟的科学计算可视化技术已经为这一要求打下了较为坚实的理论技术基础.三维GIS工作者要做的是对各种地学对象的本质特征进行分析,找出它们与其他领域对象的不同点,进行合适的概念建模和几何建模,利用相应的三维可视化技术对之进行视觉表现.

(3) 在数据存储工具方面,关系数据库已有较成熟的理论技术和广泛的应用,为支持空间数据管理的扩展关系数据库系统和面向对象的空间数据库系统已经被研制出来并商业化,目前还在进一步完善.例如,现在流行的关系数据库系统基本上都支持空间数据的存储,支持变长记录,因此它们也都是扩展的关系数据库系统.面向对象的数据库系统有:GEO⁺^[7], SmallWorld, Geo2^[6]和 GODOT^[5]等.

3.2 三维GIS当前面临的困难

上述已有的研究成果只是三维GIS领域的一部分,由于三维GIS涉及的专业领域很广,随着应用的深入,它还有很多问题需要解决. KELK曾经描述过三维地学模拟面临的问题:复杂的空间关系;不容易找到像医学领域那样易于“解剖”的地学对象;稀疏的、随机的不充足的采样数据;来自于遥感的预示性或模糊性数据的比例尺太小;充足采样数据的获得需

要昂贵的代价;岩石块内岩性变化较大;时间和地质过程的动态本质^[24].根据已有的知识和经验,认为当前三维GIS发展需要解决的关键问题如下:

(1) 三维数据实时廉价获取

KELK曾把三维地学数据获取作为几个主要的困难之一,“一般情况下只有很不完整的,有时是相互冲突的信息可以获取……”,“经济条件不允许为解决不确定性而进行的充足采样”^[24].地学三维表达与分析医学可视化有很多相似的地方,但医学可视化在实际应用中比较成功,而地学可视化却显得困难.其中一个重要的原因是地学三维数据采样率很低,难以准确地表达地学对象的真实状况.另一个原因是医学领域的研究者对他们研究中期望看见的对象一般都有较为准确的印象模式,而地学领域的研究者因为地学对象的复杂变化性不能准确地确定研究对象的各种属性^[2, 24].正因为地学对象在自然界的纷繁复杂,使得此一地的经验模型不能移植到另一地的地学研究对象中,因此三维数据实时获取在地学领域显得尤为重要.

(2) 大数据量的存储与快速处理

在三维GIS中,无论是基于矢量结构还是基于栅格结构,对于不规则地学对象的精确表达都会遇到大数据量的存储与处理问题.除了在硬件上靠计算机厂商生产大容量存储设备和快速处理器外,还应该研究软件方面的算法以提高效率,例如针对不同条件的各种高效数据模型设计、并行处理算法、小波压缩算法及在压缩状态下的直接处理分析等.

(3) 完整的三维空间数据模型与数据结构

三维空间数据库是三维GIS的核心,它直接关系到数据的输入、存储、处理、分析和输出等各个环节,它的好坏直接影响着整个GIS的性能.而三维空间数据模型是人们对客观世界的理解和抽象,是建立三维空间数据库的理论基础.三维空间数据结构是三维空间数据模型的具体实现;是客观对象在计算机中的底层表达;是对客观对象进行可视表现的基础.虽然有很多人展开过相关方面的研究与开发,但还没有形成能为大多数人所接受的统一理论与模式,还有待于进一步研究与完善.

(4) 三维空间分析方法的开发

空间分析能力在二维GIS中就比较薄弱,目前大多数的GIS都不能做到决策层次上来,只能作为一个大的空间数据库,满足简单的编辑、管理、查询和显示要求,不能为决策者直接提供决策方案.其中

很大一个原因就是现有的 GIS 中, 空间分析的种类及数量都很少. 在三维 GIS 中, 同样面临着这个问题^[1]. 因此, 研究开发 GIS 的基本空间分析及将各领域的专家知识嵌入 GIS 中, 是三维 GIS 发展的一个重要方面.

4 当前三维 GIS 研发的几个注意点

当前三维 GIS 研发应该注意以下几个方面.

(1) 目前应以开发二维为主、三维为辅的混合型 GIS 为主要目标, 不宜单纯开发三维 GIS. 原因有二: 一是需求上的决定, 在当前 GIS 产业界, 二维 GIS 已经能够满足大部分实际需求, 对三维 GIS 的需求仍然只占少部分; 二是技术上的限制, 当前在三维数据获取、大数据量处理与存储、三维可视化、三维空间分析方面还不能以较好的性价比满足大规模商业应用的需要, 如果完全采用三维 GIS, 势必将花费高昂的系统建设费用, 在二维 GIS 能够满足需要的情况下, 用户没有必要去一味追求高性能. 当然, 这里并不排除部分单位研制完全的三维 GIS 以满足一些行业的特定需要, 如军事、采矿、石油勘探、地质结构研究等工作. 在具体实现时, 建议在一般情况下进行二维显示与分析, 当有特殊需要时可以调出三维结构作相应处理.

(2) 在数据结构上要以边界表达法 (BR) 为主, 不要认为三维 GIS 一定要进行三维空间分析. 事实上虽然三维空间分析是三维 GIS 的特色, 但实际需求仍然以三维可视化和数据管理为主, 因此在三维 GIS 系统中要以矢量结构为主体数据结构, 而在需要时再转换为栅格结构. 当然, 这与研究基于 3D 栅格框架的三维集成数据结构并不矛盾, 相反, 集成数据结构反而为矢量栅格的快速转换提供了便捷的通道.

(3) 对于需要进行三维空间分析的地方, 要专门研究支持快速分析的数据结构与空间分析算法. 在这些方面曾做过一些探讨, 如集成矢量与栅格特征的四层矢量化八叉树结构^[39]、基于该数据结构的空间数据模型与空间分析等^[40].

(4) 城市三维现在已成为当前三维 GIS 中研究与开发的一个重要方面. 信息化目前正成为社会发展的主流, 城市作为信息存在与传播的主体, 理所当然地也成为三维 GIS 表达的一个重要对象. 国内外已有人作出了较好的探索^[38, 41, 42], 但在实际系统的开发与应用上还需要加大力度.

参 考 文 献

- 1 Raper J F. Key 3D modelling concepts for geoscientific analysis [A]. In Turner A K (ed), Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems [M], NATO ASI 354, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992 215~ 232.
- 2 Turner A K. Three-dimensional modeling with geoscientific information systems [M]. NATO ASI 354, Dordrecht Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 3 Mallet J L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications [A]. In Turner K. (ed), Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems [M], NATO ASI 354, Dordrecht Kluwer Academic Publishers, 1992 123~ 142.
- 4 Pflug R, Klein H, Ramshorn C H *et al.* 3D visualization of geological structures and processes [A]. In Lecture Notes in Earth Sciences 41 [C], Berlin: Springer, 1992 29~ 39.
- 5 Gaede V, Riekert W F. Spatial access methods and query processing in the object-oriented GIS GODOT [A]. In Proceedings of the 6th International GIS Workshop on Advanced Geographic Data Modelling, AGDM [C], Delft, 1994.
- 6 David B, Rayal L, Schorter G *et al.* Geo2: Why objects in a geographic DBMS [A]. In The 3rd International Symposium on Large Spatial Databases [C], Singapore, 23rd-25th June, 1993, 264~ 276.
- 7 Van Oosterom P, Vijlbrie T. Building a GIS on top of the open DBMS "postgres" [A]. In Proceedings EGIS 91 [C], 1991, 775 ~ 787.
- 8 龚建华. 地学可视化——理论、技术及其应用 [R]. 北京: 中科院地理所, 1997.
- 9 李清泉. 基于混合数据结构的三维 GIS 数据模型与空间分析研究 [博士学位论文] [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998.
- 10 Houlding Simon W. 3D geoscientific modeling computer technique for geological characterization [M]. Hongkong South Sea Int Press Ltd, 1994.
- 11 De Hoop S, Van Der Meij L, Van Hekken M *et al.* Integrated 3D modeling within a GIS [A]. In Proceedings of the 6th International GIS Workshop "Advanced Geographic Data Modeling", AGDM 94 [C], Delft, 1994.
- 12 Pigot S. Topological models for 3D spatial information systems [A]. In Proceedings of Auto-Carto [C], Baltimore, 1991.
- 13 Pigot S. General singular 3-cell complexes [A]. In Proceedings of the 6th International GIS Workshop "Advanced Geographic Data Modeling", AGDM 94 [C], Delft, 1994.
- 14 PILOUK M, TEMPFLI K, MOLENAAR M. A tetrahedron based 3D vector data model for geoinformation [A]. In Proceedings of the 6th International GIS Workshop "Advanced Geographic Data Modelling", AGDM 94, Delft, 1994.
- 15 李德仁, 李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究 [J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 128~ 133.
- 16 郭薇, 陈军. 基于点集拓扑学的三维拓扑空间关系形式化描述

- [J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 122~ 127.
- 17 郭薇. 基于流形拓扑的三维空间实体形式化描述 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 201~ 206.
 - 18 李清泉, 李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(2): 128~ 133.
 - 19 龚健雅. GIS中面向对象的时空数据模型 [J]. 测绘学报, 1997, 26(4).
 - 20 龚健雅. 矢量与栅格集成的三维数据模型 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 7~ 15.
 - 21 Bak P, Mill A. Three dimensional representation in a geoscientific resource management system for the minerals industry [A]. In Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems [M], London Taylor & Francis, 1989 155 ~ 182.
 - 22 Molenaar M. A topology for 3D vector maps [J]. ITC Journal, 1992, (1): 25~ 33.
 - 23 Rhind D W. Spatial data handling in the geosciences [A]. In Turner A K (ed), Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems [M], NATO ASI 354, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992 13~ 27.
 - 24 Kelk B. 3-D modelling with geoscientific information systems the problem [A]. In Turner A K (ed), Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems [M], NATO ASI 354, Dordrecht Kluwer Academic Publishers, 1992 29~ 37.
 - 25 Abel D, Ooi B C (eds). Advances in spatial databases [A]. In Proceedings of the Third International Symposium, SSD 93 [C], LNCS, Berlin Heidelberg Springer, 1993.
 - 26 Bruzzone E, De Floriani L, Pellegrinelli M. A Hierarchical spatial index for cell complexes [A]. In SSD 93 [C], Singapore, LNCS 692, Berlin Heidelberg Springer, 1993 105~ 122.
 - 27 Wang X, Bai S. An easily integrated three-dimensional data structure in strata modeling [A]. In Lai Poh-chin, Leung Yee, Shi Wen-zhong (Eds). Proceedings of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with Geographical Information Systems [C], Hong Kong, 1998, 844~ 849.
 - 28 Breunig M. Integration of spatial information for geo-information systems [M]. Berlin Heidelberg Springer-verlag, 1996.
 - 29 肖乐斌, 谢传节, 李连发等. GIS中三维数据结构的分析与设计 [J]. 地理研究 (增刊地球信息科学专辑), 1998 131~ 139.
 - 30 QU X, LI X. A 3D surface tracking algorithm [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 64(1): 147~ 156.
 - 31 ARTZY E, FRIEDER G, HERMAN G T. The theory, design, implementation and evaluation of a three-dimensional surface detection algorithm [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15 1~ 24.
 - 32 LIU H K. Two-and three-dimensional boundary detection [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1977, 6 123~ 134.
 - 33 SAMET H. Neighbor finding techniques for image represented by quadrees [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 18(3): 37~ 57.
 - 34 SAMET H. Neighbor finding in images represented by octrees [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1989, 46 367~ 386.
 - 35 Li Rongxing, Xu Changshi. An algorithm for searching boundary octants in 3-D geological subsurface modeling [J]. Geographic Information Sciences, 1995, 1(1): 23~ 33.
 - 36 肖乐斌, 龚建华, 谢传节. 线性四叉树和线性八叉树邻域寻找的一种新算法 [J]. 测绘学报, 1998, 27(3): 195~ 203.
 - 37 李青元. 三维矢量结构 GIS拓扑关系研究 [博士学位论文] [D]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1996.
 - 38 Alexander K, Sgird B. 3D-GIS for urban purposes [J]. Geoinformatics, 1998, 2(1): 79~ 103.
 - 39 Xiao L, Zhang Y, Luo J et al. A 3D GIS four-level vectored octree structure integrating vector and raster features [A]. In The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], 1999, 32(4W 12): 265~ 272.
 - 40 肖乐斌. 基于栅格框架的三维 GIS集成数据模型与空间分析研究 [博士学位论文] [D]. 北京: 中国科学院地理研究所, 1999.
 - 41 杨必胜, 李清泉, 梅宝燕. 3维城市模型的可视化研究 [J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 149~ 154.
 - 42 孙敏, 陈军, 张学庄. 基于表面剖分的 3DCM 空间数据模型研究 [J]. 测绘学报, 2000, 29(3): 257~ 265.



肖乐斌 1970年生, 1999年获中国科学院地理所资源与环境信息系统国家重点实验室地图学与地理信息系统专业博士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所博士后. 目前的研究方向为 GIS数据模型、三维数据结构和 GIS软件开发.

钟耳顺 1956年生, 1991年获北京大学理学博士学位, 1992年进入中国科学院地理研究所博士后流动站工作两年, 现为中国科学院地理科学与资源研究所知识创新基地研究员、博士生导师, 中国科学院地理信息产业发展中心主任. 主要研究领域为地理信息系统基础软件及 3S应用.

刘纪远 1947年生, 现为中国科学院地理科学与资源研究所所长、研究员、博士生导师. 主要研究领域为资源与环境信息系统.

宋关福 1969年生, 1998年获中国科学院地理研究所理学博士学位, 1998年~ 2000年在中国科学院遥感应用研究所博士后流动站工作, 现为中国科学院地理科学与资源研究所知识创新基地副研究员. 主要研究领域为地理信息系统基础软件及 3S应用.