

虚拟地理环境的多维数据模型与地理过程表达

李 爽^{1,2}, 姚 静¹

(1. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:该文通过剖析虚拟地理环境所表达的地球表层空间与其在计算机空间的映射之间的关系, 定义了一维、二维、三维及多维虚拟地理环境; 指出虚拟地理环境与传统地图、GIS 的区别及联系。阐述近年来虚拟地理环境研究对地理学乃至地球科学研究方法和手段的影响以及对地理科学思维方式和重点研究领域的影响。

关键词:虚拟地理环境; 多维数据模型; 地理过程

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 0504(2005)04 - 0001 - 05

虚拟地理环境 (Virtual Geographical Environments, VGE) 是地球表层空间——“地理环境”在计算机空间的映射。地球表层空间是大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和土壤圈交互作用的区域, 是地球上物理过程、化学过程、生物过程和生物地球化学过程作用最复杂的区域^[1]。VGE 定义为包括作为主体的化身人类社会以及围绕该主体存在的一切客观环境, 包括计算机、网络等软硬件环境、数据环境、虚拟图形镜像环境、虚拟经济环境和虚拟社会、政治、文化环境, 其中化身人类表示现实世界中的人与虚拟世界中的化身相结合后的集合整体^[2,3], 它与现实地理环境一样, 将是一个包含空间系统、生态系统和社会系统的开放、复杂性巨系统。对于地理科学而言, 最初 VGE 只是作为地理学研究成果的展示部分, 随着 VGE 研究的深入, 它已在很大程度上影响了地理学研究的方法、手段和思维方式, 即 VGE 多维和动态的空间分析参与到地理过程研究中, VGE 已在一定程度上影响到地理学的研究范式^[4,5]。

1 虚拟地理环境的表达

近年来, 计算机图形学、科学计算可视化和虚拟现实技术的发展为研究者提供了直观处理研究结果的技术方法, 被公认为是科学研究过程的重要组成部分。它在计算机空间 (Cyberspace) 中为研究者开辟了一个具有沉浸感的虚拟环境, 实现了三维空间和时态数据的可视化, 并使研究者既能在虚拟环境中交互地操控研究对象, 又可以在仿真模拟等科学计算过程中实时地得到正在处理的动态过程的反馈。随着地理科学各分支学科、地理信息科学、地球系统科学的发展, 科学计算可视化和虚拟现实技术

也在地理科学研究中得到巨大发展^[6-9], 具体表现在 VGE 学科研究进展上。

建立 VGE 系统的关键在于其空间数据模型的建立^[10-12]。VGE 主要由建立地球表层空间数值模拟的地理环境可视化与虚拟现实模型、空间数据模型和专业模拟数学模型三大子系统组成 (图 1)。其中, 空间数据模型是专业模拟数学模型和可视化模型的基础。在二维地理信息系统时代, 基础软件平台研制和应用系统设计开发一直沿用 20 世纪 70 年代以来提出的传统空间数据模型与建模方法, 在现实世界空间实体和相互间关系及时空变化的描述与表达、计算机环境下的数据组织、空间分析等方面均有较大的局限性。VGE 是以真三维空间数据表达为目标, 其空间数据组织不仅是点、线、面目标间有限的简单拓扑关系, 而是要真实有效地表达现实三维空间实体及其相互间的拓扑关系。因此探索能够有效进行空间关系表达和空间数据动态存取的空间数据模型成为 VGE 表达的重要研究方向^[13,14]。

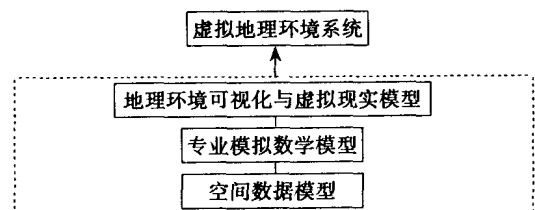


图 1 虚拟地理环境的组成
Fig. 1 Components of virtual geographic environments

2 一维与二维虚拟地理环境

广义上 VGE 包括一维、二维、三维及多维虚拟地理环境。一维 VGE 是指 20 世纪 50 年代末地理学研究开始计量运动以来, 地理学研究领域引入统

收稿日期: 2005 - 01 - 12; 修订日期: 2005 - 05 - 08

基金项目: 科技部基础性工作专项资金“中国地球系统科学数据共享试点项目”(2004DKA201800)

作者简介: 李爽(1974 -), 男, 讲师, 博士研究生, 从事虚拟地理环境、遥感与 GIS 应用研究。E-mail: lis@igsnr.ac.cn

计学方法,通过构造一系列统计量来定量描述地理要素的空间分布特征,如较普遍地应用各种概率分布函数、平均值、方差、标准差、变异系数等统计特征参数以及简单的一元线性回归分析方法等。用数学方法对地球表层空间进行量化表达是当时地理学研究的一个新发展,逻辑思维在地理研究中达到一个新高峰,并构建了一个不可视的VGE。60年代末期到70年代末期,电子计算机和相关学科的发展使人类最擅长的形象思维和逻辑思维得到很好的结合,基于统计学应用的地理要素空间分布特征,按照时间序列或空间序列以散点图、折线图等方式进行表达,从而完成一维VGE的构建。

一维VGE的表达模型与其所反映的地球表层空间相比,存在高度的抽象、离散和简化。通常将时间序列离散化为万年、年、月、日等时间断面粒度;将空间范围规定在一定尺度内,即在某一尺度讨论的事物在另一尺度转变为另一种现象;将地理过程离散为若干个互不连续的地理快照(snapshot),其表达模型离散为二维表格。

地图是二维VGE的代表,与人类文明一样有着悠远的历史。地图是地学研究中时空分析与表达的有效手段,是科学深加工后的创新知识载体^[15],更是人类空间形象思维的再现,是最早实现“可视化”的VGE。从长沙马王堆三号汉墓出土的公元前168年以前编制的地图到近几十年方兴未艾的GIS电子地图,地图将三维真实世界抽象到二维平面,在地理要素的空间分布和相互作用及地理过程研究发挥了重要作用。

二维VGE的表达模型是以计算机图形化要素与相应的属性数据关联实现对地球表层空间的表达。20世纪60年代,计算机图形学发展之初,地理学者就尝试利用计算机图形完成对土地利用数据的表达,随后GIS的发展为地图这一古老的研究工具赋予了新的生命力,出现了地图代数(map algebra)与地统计学(geo-statistics),使地学进入了可计算时代。地统计学将一维VGE表达的地理过程通过确定其空间变异性、空间自相关性及多项空间统计学参数,采用不同的空间数据内插方法将离散点上的数据扩展到二维平面;地图代数则实现了地球表层空间不同图层矢量数据的空间交、并运算和栅格数据的若干图层代数运算,从而实现了在二维平面上将地理要素与现象可视化及不同空间要素的空间运算。

3 三维虚拟地理环境表达模型

三维VGE描述的是真三维地球表层空间,比二维GIS复杂得多,这不仅是增加一个第三维坐标的问题,而且涉及计算机图形学的三维图形显示、空间的三维拓扑建立与维护等复杂操作。三维VGE的研究对象可以归纳为点、线、面、体,其中线不仅包括二维GIS中的平面曲线,还包括三维特有的空间曲线,面不仅包括二维平面,还有三维中的空间曲面,而体则是三维中特有的研究对象^[16,17]。在三维VGE中,体的表达尤其复杂,其中规则体元包括结构实体集合(CSG-tree)、体素(voxel)、八叉树(octree)、针体(needle)和规则块体(regular block)5种模型,规则体元通常用于水体、污染和环境问题建模。非规则体元包括四面体格网(TEN)、金字塔(pyramid)、三棱柱(TP)、地质细胞(geo-cellular)、非规则块体(irregular block)、实体(solid)、3D-Voronoi和广义三棱柱(GTP)8种模型,非规则体元均是有采样约束的、基于地层界面和地质构造的面向实体的三维模型,一般应用于较复杂的地球表层空间三维对象及地理过程计算中涉及的不规则、不均匀的几何实体^[18]。

三维VGE空间模型建模方法研究是目前虚拟现实和VGE领域研究的热点,其主要建模方法有准三维模型和真三维模型;模型构建有面模型(facial model)、体模型(volumetric model)和混合模型(mixed model)。其中,准三维模型是指地球表层空间某点 $F=f(x,y,z)$,任一对 (x,y) 的 z 有多个值 (z_1, z_2, \dots, z_n) ,此类模型属面元模型,其表达对象只具有面属性,而没有体内属性值存在,一般多用于城市三维建模;真三维模型是指地球表层空间某点 $F=f(x,y,z)$,任一对 (x,y) 的 z 不但有多个值 (z_1, z_2, \dots, z_n) ,而且其表达采用三维矢量体元数据结构,表达对象有体内属性值,一般用于地质矿山等复杂地质体的表达。

3.1 面表达模型

VGE处理的对象是地理空间数据,这些空间数据的来源是多种多样的,数据中包含很多地理现象和地理过程的科学规律和现象。这些科学数据都是离散的采样数据,它们有很多属性,主要有空间范围、投影信息、数据来源、维数、定义域的维数、组织形式、时间特性及数据量等。其中数据的时间特性表示数据是否与时间相关,是否表示随时间变化的地理过程;数据的维数表示标量数据、向量数据及高维的张量数据等;数据定义域的维数分为一维、二

维、三维数据等,具有时间属性的数据具有第四维特征;数据的组织形式分为有网格数据和无网格散乱数据等。

VGE中基于面模型的建模方法侧重于三维空间实体的表面表示,如地形表面(DEM)、地质层面、城市构筑物(建筑物)及矿山开采的轮廓与空间框架,面表达模型比较注重三维面纹理的表达。面表达模型所模拟的表面可以是封闭的或非封闭的。基于采样点的TIN模型、Lattice模型和基于数据内插的Grid模型,通常用于非封闭表面模拟;而B-Rep模型和Wire Frame模型通常用于封闭表面或外部轮廓模拟。Section模型、Section-TIN混合模型及多层DEM模型通常用于地质层面之间内部构模。通过表面表示形成三维空间目标轮廓,其优点是便于显示和数据更新,缺点是没有区域拓扑描述和所表达面内部属性的记录而难以进行三维空间查询与分析,多用于三维空间演示系统。

3.2 体表达模型

在自然环境和计算模型中,许多对象和现象只能用三维数据场表示,对象体不是用几何曲面和曲线表示的三维表面模型,而是以体素为基本造型单元。例如,泥石流或山体滑坡不仅是地层表面构造发生变化,其深层地质构造十分复杂,如果仅用几何表面表示,不可能完整显示各种表层下山体构造内部不规则、不均匀的几何实体,则只能用于泥石流或山体滑坡三维演示而不能用于对其地理过程的描述和演化机理的研究。在三维空间数据场中,空间实体坐标由(X, Y, Z)表示在一种数据结构中,而不是把垂直方向的第三维信息简单抽象成一个单一属性值来处理,即通常的假三维与真三维的区别。体绘制(volume rendering)的目的在于提供一种基于体素的绘制技术,它有别于传统的基于面的绘制技术,能显示出对象体丰富的内部细节。从计算机图形学角度看,体绘制直接研究光线穿过三维体数据场时的变化,得到最终的绘制结果,所以体绘制也被称为直接体绘制;从体表达模型来讲,体绘制技术要求的是基于三维空间数据的体数据模型,三维空间体被剖分成基于规则或不规则的体元加以描述;从结果图像质量上,体绘制优于面绘制,但从交互性能和算法效率上,面绘制优于体绘制,这是因为面绘制采用传统的图形学绘制算法,其数据量远远小于体绘制所需要的数据量,现有的交互算法和图形硬件以及图形加速技术能充分发挥作用。从地理学研究的地理过程与地理变量之间的关系来讲,基于体元的体表

达模型远优于面表达模型,通过对体元的描述可以对三维空间任意点赋予与其在自然环境中相同的属性、方法和事件,这有利于构建基于数理模型的虚拟三维空间。

3.3 多维数据模型的转换与构建

VGE是一个真实的三维环境,需要对三维空间点、线、曲面和体对象进行描述、分析和表现。无论是面表达模型还是体表达模型,都既有能明确描述空间拓扑关系的矢量数据模型,又有基于栅格的镶嵌数据模型。其中面数据模型侧重于三维空间表面纹理的表示,如起伏地形表面,通过表面纹理的表示形成三维空间目标构建与表达,其优点是计算速度快,便于空间对象的表现和数据更新。由于除组成表面的点外,其余空间点不具有属性值,不利于三维空间分析和对象体内部细节的表达,而地理过程和地理要素更多是基于对象体内部空间结构和地理变量之间的相互作用,因此对地理过程研究而言,三维体模型数据更有利于提示地理变量间的相互关系与作用。体数据模型侧重于三维空间体的表示,如滑坡、潮流、气流、云团等。通过对体细节的描述实现三维空间目标表示,其优点是适于空间操作和分析,简单的空间代数运算和拓扑分析易于进行,但不利于空间对象的表现,需要占用大量的计算和显示资源,计算复杂且空间运算过程中会产生大量分布零碎的无用体细胞。因此,在VGE中需要综合面表达模型和体表达数据模型的优点,形成能同时描述空间点、线、面、体对象的综合数据模型,实现各种数据模型之间的相互转换。

数据模型是GIS软件的基础,也是VGE工程的核心,数据模型的转换是高效率完成各种运算、实现多种应用功能的基石。与二维空间数据模型的相互转换相比,三维空间数据模型之间的相互转换要复杂得多,尤其是表面模型与体模型的相互转换,这需要通过三维剖分、三维内插、曲面拟合、体元追踪等技术予以实现,而这些技术是有待研究的难题。

4 基于地理过程的三维及多维虚拟地理环境表达

4.1 地理过程

地理过程是指地理事物随时间的推移而出现的动态变化过程。反映这种“时间断面”上地理事物动态演化过程的基本事实、概念、原理、规律等的知识,即地理过程知识。地理过程主要包括地理循环过程、地理演变过程、地理波动性变化过程和地理扩散

过程4方面。

(1)地理循环过程是指地理事物在一定空间领域内周而复始地运动或变化的过程。表现形式主要有:1)“运动式循环”:即地理事物在循环过程中,按“初始位置—一系列运动环节—系统发展到新的位置”这一模式进行,如大气环流、水循环、大洋环流等。2)“演替式循环”:即地理事物按“初始状态—一系列新旧更替的变化阶段—“恢复”原来的状态”这一模式进行,如地壳中的物质循环、生态系统的物质循环等。地理循环过程的VGE表达关键是结合地理循环发生的空间区域,认清构成地理循环过程的运动环节或变化阶段;同时联系构成地理循环过程的运动环节或变化阶段,阐明地理循环过程产生的原动力、条件及循环过程的地理意义。

(2)地理演变过程是指地理事物随时间的推移而出现的新旧更替、盛衰消长等的变化过程。地理演变过程既有经历时间尺度较长的渐变型演变过程(如湖泊的演变过程、岩石的风化过程等),也有经历时间尺度较短的骤变性演变过程(如气团的变性、锋面的生长与消亡等)。VGE中地理演变过程的表达离不开两个基本要素:1)地理事物在一定时间尺度内新旧更替、盛衰消长的顺序或阶段;2)发生地理演变过程的原因或条件。

(3)地理波动性变化过程是指地理事物的数量在一定时间尺度内持续变化的过程,如河流流量的月变化与年变化、气温的日变化和年变化、农作物产量(某一时间内)的变化等。地理波动性变化包含了时间和地理数量两个要素,一般情况下其变化以时间、地理变量以及若干个要素间的相互依存关系的角度进行。传统地理表达采用文字或统计图表加以描述;在VGE下将时间轴作为主控制轴,表达地理波动性变化可以清晰地表达地理变量与时间及地理变量相互之间的复杂关系。

(4)地理扩散过程是指地理事物由某一中心或源地向四周扩散的过程,如污染物质由源地向周围的扩散、洪水演进过程等。地理扩散过程主要由以下因素组成:1)扩散的中心或源地;2)扩散的方向;3)扩散的范围或强度;4)发生扩散的驱动力。

4.2 地理过程的虚拟地理环境表达

基于地理过程的VGE表达就是将上述4种地理过程在计算机空间用数理模型加以描述,用VGE方法加以表达,从而为研究地理过程提供一个创新平台和研究角度,使研究人员沉浸在可重复实验的地理环境中。

地理学问题的研究往往是依据知识积累和已有的经验,依靠研究人员的感知和认知能力全方位地获取研究对象的信息。在VGE中计算机能够处理研究主体所能感受到的、在思维过程中接触到的地理过程。地理学尤其需要专家图形图像思维能力和想像力,虚拟现实与科学可视化(visualization)技术相结合,可将抽象的地理数据转换成直观易解的图形、图像,迅速地建立不同数据之间的空间联系和物理关系,以达到研究的目的。虚拟地理实验则将使长时间尺度和空间尺度的地理过程在虚拟空间中实现重复和模拟检验,从而加速地理学理论的成熟和发展。

近年不少学者围绕VGE空间数据模型做了大量研究,提出了许多创新性的三维空间数据模型。但一般囿于各自的专业领域,鲜有针对描述地理过程,尤其是自然地理过程的空间数据模型,也限制了VGE在地理学研究中的应用。如李德仁等提出了基于八叉树和四面体格网的混合数据模型;李青元借鉴二维GIS和三维几何造形理论,提出了基于点、边、环、面、体的3D矢量数据模型;陈军等摒弃基于四面体的三维矢量数据结构模型的弊端,提出了基于单纯形剖分的拓扑空间数据模型;针对地质钻孔和地层分布特点,Houlding提出了适于层状地质体建模的三棱柱(TP)模型、三棱柱体(TPV)模型、广义三棱柱模型(GTP)以及似直棱柱(ARTP)模型等^[19]。上述关于地学建模的研究大多集中在对研究客体的建模方面,对地理过程建模考虑较少,即使涉及也是把两者割裂开来,没有实现一体化建模。因此,针对地理要素空间分布与地理过程的特殊性构建以描述地理过程为目的的三维地学模型是VGE发展的当务之急。

在应用方面,城市规划和建筑设计发展较为成熟,VGE技术和GIS技术紧密结合,实现了三维计算机图形图像处理技术的不断深入发展。GIS是数字地球的核心技术之一,它综合、集成不同自然与区域的空间数据和属性数据,根据事物的地理坐标对其进行管理、检索、评价分析、结果输出等处理;在图像分析、拓扑空间查询、三维实体叠加分析等方面有自身优势。

5 结语

地理科学研究气候过程、水文过程、地貌过程、生态—环境过程等基本自然地理过程,以及地带性、地域分异规律等基本地理规律。其中许多重要的地理现象和地理过程比较抽象,如何在VGE中从机理

角度阐述地理现象的发生、发展和演变,从最初的关于地理分布形态的简单数学分析与表达(如数字地形模型,DTM)到利用现代理论地理学注重地理过程与地理系统的模式阐述,是VGE研究发展的趋势。

虽然VGE研究主要是随着计算机科学和计算机图形学的崛起发展起来的,但基础地理过程的VGE表达却要注重对自然地理过程和规律的分析。地理变量和地理要素是地理过程发展的内在驱动力,其表达形式以经验公式、确定的数理模型或不确定的概率分布描述,其中有些地理过程在地球表层空间的自然环境中是可视的,VGE就是将可视的地理过程用地理变量和地理要素在计算机空间表达出来,同时将自然环境中不可视的地理过程用可视化的方法进行表达,从而给地理科学研究以新的实验手段和方法。

参考文献:

- [1] 陈述彭,鲁学军,周成虎.地理信息系统导论[M].北京:科学出版社,2000.15.
- [2] 龚建华,林琨.虚拟地理环境——在线虚拟现实的地理学透视[M].北京:高等教育出版社,2001.60.
- [3] 林琨,龚建华.论虚拟地理环境[J].测绘学报,2002,31(1):1-6.
- [4] 管群,刘浩吾.基于VR-GIS地质景观的三维重建[J].岩土工程学报,2001,23(4):499-501.
- [5] 侯恩科,吴立新.三维地学模拟几个方面的研究现状与发展趋势[J].煤田地质与勘探,2000,28(6):5-8.
- [6] 肖乐斌,钟耳顺,刘纪远,等.三维GIS的基本问题探讨[J].中国图形图像学报,2001,6(9):842-848.
- [7] BREUNIG M. Integration of spatial information for geo-information systems[M]. Berlin Heidelberg:Springer2 verlag,1996.
- [8] 鲁学军,周成虎,龚建华.论地理空间形象思维——空间意象的发展[J].地理学报,1999,54(5):401-408.
- [9] 鲁学军,承继成.地理认知理论内涵分析[J].地理学报,1998,53(2):132-140.
- [10] 郝海森,吴立新.基于强约束Delaunay-TIN的三维地学模拟与可视化[J].地理与地理信息科学,2003,19(2):15-18.
- [11] 吴立新,史文中,GOLD C.3D GIS与3D GMS中的空间构模技术[J].地理与地理信息科学,2003,19(1):5-11.
- [12] 傅国康,赵荣椿.三维地质模型的分形学研究[J].西北工业大学学报,1996,14(3):406-409.
- [13] BAUDRILLARD J. Simulacra and Simulation[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press,1994.1-42.
- [14] HENDRIC A H C,VEEN V,HARTWIG K D,et al. Navigating through a virtual city:using virtual reality technology to study human action and perception[J]. Future Generation Computer Systems,1998(14):231-242.
- [15] 廖克.现代地图学[M].北京:科学出版社,2003.
- [16] 李青元.三维矢量结构GIS拓扑关系及其动态建立[J].测绘学报,1997,26(3):235-240.
- [17] 吴立新,陈学习,史文中.基于GTP的地下工程与围岩一体化真三维空间构模[J].地理与地理信息科学,2003,19(6):1-6.
- [18] 王彦兵,吴立新,史文中.GTP模型中四面体的引入及其空间模型扩展[J].地理与地理信息科学,2003,19(5):16-19.
- [19] 李朝峰,史明寅,王桂梁.地学三维模型光照与动态显示[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):14-17.

The Multi - Dimension Data Model of Virtual Geographic Environments and Its Expression in Geographical Processes

LI Shuang^{1,2}, YAO Jing¹

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The mapping relation between the earth's surface spaces expressed by virtual geographic environments and the spaces of computer had been analyzed. The virtual geographic environments of one dimension, two dimensions, three dimensions and multi - dimensions had been defined, and along with the advancement of computer graphics, the virtual geographic environments (VGE) changed the methods, instruments and paradigm of geographic sciences and earth sciences. Today, the data models of the virtual geographic environments were still limited to the surface models and volume models, and there were many perplexing operations during the transformation. The issues of data model had become major obstacle of the VGE development. It was the urgent business to build a multi - dimensional data transform model that could have the ability to exert effect in the research of geographic process and geographic variables. In other words, the initial function of VGE is just an extensive part of the geographic sciences, now it gets through the course of simple spatial analysis. As a method or a paradigm of geographic sciences the VGE made a great visualization of geographic process and geographic variables in computer space whether they could be seen or not.

Key words: virtual geographic environments; multi - dimensional data model; geographic process