中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 4 期: 549 ~ 561
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

地理分析导向的虚拟地理环境: 框架、结构与功能

闾国年

南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046
E-mail: gnlu@njnu.edu.cn

收稿日期: 2010-12-06; 接受日期: 2011-03-09
国家自然科学重点基金(批准号: 40730527)资助

摘要 针对目前虚拟地理环境侧重表达、忽略地理分析的现状, 从现代地理学研究与发展前沿需求出发, 探讨了可支撑地理分析与模拟的虚拟地理环境的框架、结构与功能. 围绕虚拟地理环境的构建理论和实现技术, 分析了面向地理分析的虚拟地理环境的建设目标, 构建了虚拟地理环境整体框架; 将虚拟地理环境分为数据环境、建模环境、表达环境与协同环境四个子环境, 深入解析了各子环境的功能、关键技术与研究思路, 为虚拟地理环境进一步发展及虚拟地理环境平台研制与开发提供参考.

关键词
虚拟地理环境
数据环境
建模环境
表达环境
协同环境

现代地理学在揭示区域自然、经济和社会诸要素及其相互作用的时空结构、动态过程与形成机制, 在研究人类活动与资源环境和社会经济间的协调与可持续发展, 在为国家和地方社会、经济发展提供科学依据与决策支持等方面具有不可替代的作用. 地理系统的整体性、综合性和复杂性特征, 要求在全球/区域系统研究框架中, 对相关学科领域的理论、模型与方法进行整合、集成与发展, 进而开展全球变化背景下的全球/区域地理环境的再现表达、集成建模、模拟调控、预测预报及影响评价, 揭示地理环境的演化过程、时空特征、驱动机制及其演变趋势. 以"3S"技术为代表的现代科技进步, 极大地拓展了地理学研究的对象、内容和任务, 推动其由实体世界进入信息世界, 由现实世界进入虚拟世界, 由描述世界进入数字化世界, 由物理空间进入赛博空间, 从而能在虚拟时空中再现过去、表达现在与预测未来[1~5].

虚拟地理环境 (Virtual Geographic Environment, VGE)旨在实现地理环境的模拟分析与表达, 改变传统的空间知识表达与获取方式. 相对于GIS空间分析, 虚拟地理环境更注重通过多源数据整合、共享、集成与信息挖掘, 借助地理分析模型与多感知表达技术, 实现地理问题分析、地理规律提炼、地理现象模拟、地理环境变化再现与预测以及人类活动影响评价, 并通过分布式协同交互, 实现人在虚拟环境中对地理目标与地理现象的交互操作, 最终形成新的地学研究技术方法和研究平台. 开展融表达地理环境、研究地理问题、提炼地理规律、设计和改造自然工程、再现和模拟地理现象于一体的虚拟地理环境建设, 是地理学发展的必然需求, 对地理学乃至地球科学研究方法与研究手段, 以及对地理科学思维方式和重点研究领域都有着巨大的影响[6~8]. 本文梳理和总结了虚拟地理环境研究的现状、目标及关键问题, 探讨了面向地理分析的虚拟地理环境的整体框架与结构功能, 进而分析了数据环境、建模环境、表达环境与协同环境的目标、功能与实现思路, 以期为虚拟地理环境进一步发展及虚拟地理环境系统平台研制与

英文引用格式: Lü G N. Geographic analysis-oriented Virtual Geographic Environment: Framework, structure and functions. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 733−743, doi: 10.1007/s11430-011-4193-2

开发提供参考.

1 虚拟地理环境研究现状、目标与关键问题

1.1 研究现状

近年来, 地理学研究的重点已从传统的观测数据采集、基于特定观测数据与具体实验的特征、过程及机理解析逐步转变成从理论分析出发, 对海量地学数据进行集成、共享、同化、信息挖掘以及多重表达, 并开展模拟、预测以及评估研究. 虚拟地理环境在这一背景下应运而生. 其初期主要研究方向有: ① 认知、概念与理论方法; ② 关键技术研发与软件设计; ③ 可视化或分布式应用系统开发. 总体上, 虚拟地理环境概念初步清晰, 结构与功能也初具轮廓, 在虚拟地理环境的基本理论、数据模型、表达与建模方法、关键技术与应用平台等方面均取得了显著的进展[9~15]. 虚拟地理环境作为新一代的地理学语言, 必将突破现有地理信息系统以数据共享为核心的框架, 走向以数据库和模型库为双核心的知识共享平台, 从基于现实地理世界的观测、总结型研究向依托地学理论的信息挖掘、模拟推理研究, 并形成新的知识生成环境[4~7].

由于认识水平及技术本身的限制, 目前虚拟地理环境研究在创建机制、创建方法及空间决策支持方面的研究尚不够深入, 缺乏面向地学分析与模拟的整体框架与结构化的设计方案. 其不足主要表现在: ① 在数据模型和空间数据组织方式方面, 尚不能同时支持真实三维地理空间实体和现象的描述、表达、分析和模拟; ② 地理模型库缺乏分布式服务支持, 缺乏由模型组件构建复杂地理分析模型的机制; ③ 缺乏分布式网络地理场景中多用户交互的协调和调度机制, 难以实现协同工作和群体决策; ④ 多从数字城市或虚拟社区角度研究和理解虚拟地理环境, 其研究思路较难移植到宏观尺度地理演变过程机理的建模与模拟研究; ⑤ 现阶段研发的虚拟地理环境平台只针对单一用户群, 缺乏综合贯通及各类用户协同交互的思想与机制.

1.2 建设目标与关键问题

地理建模与模拟是现代地理学的重要研究方法, 面向地理分析的虚拟地理环境建设将有力地促进地理研究者与公众的相互协作探索: 研究者利用定量分析与数值模拟方法以及交互协同技术对地理问题进行协作建模, 模拟地理现象, 对地理环境变化进行再现和预测; 而公众则利用所构建的虚拟地理空间, 感受和认识自然与人文要素的时空关系, 提供虚拟环境下的空间认知及生存选择, 协助开展地理分析与模拟. 从整体观、全球观视角, 从多尺度、多层次角度建立整合各类影响要素、有机集成地理环境演化物理背景和动力机制的综合模型与模式, 研究不同模型的运行需求、结构特征、参数率定、流程控制以及耦合机制, 构建面向地理环境模拟的高复用、可定制的多用户协同分布式的虚拟地理环境, 可为地理科学研究提供新的研究平台, 并可能形成新的地理学研究范式.

目前虚拟地理环境建设, 受地理模型的异构性和专业性、数据模型的领域局限性和不兼容性、真三维表达的真实感与设备依赖性和分布式协同交互性与实时性等方面的限制. 其关键问题主要有: ① 对多源、多尺度、异构数据无缝集成与共享机制研究不够, 缺少可有效支撑地理分析与模拟的通用地理数据模型; ② 缺少可辅助协作式地理建模的分布式地理建模工具与平台, 缺乏可有效利用网络环境中地理分析模型资源的多源异构地理分析模型重用与共享方法; ③ 专业的三维展示系统运行效率难以提高、实时分析困难、建模成本高, 缺少大众化的真三维展示系统; ④ 多用户协同决策工作机制尚不成熟, 研究者与公众还不能作为“主体”进入虚拟环境进行分布式环境下的协作分析. 上述突破将有助于推动虚拟地理环境从概念界定阶段向系统实现阶段, 从面向应用开发阶段向开放式服务阶段发展, 最终构建可支撑地理学研究的虚拟地理环境.

2 地理分析导向的虚拟地理环境体系架构

2.1 整体框架

现实世界的地理环境指人类生存与发展的地球表层, 是由自然环境和人文环境(经济环境和社会文化环境) 相互联结、相互作用的系统整体. 而虚拟地理环境则是对现实地理环境进行抽象与表达, 基于网络空间和计算机所形成的虚拟实验环境[5~8,16]. 虚拟地理环境建设, 需要在地理空间认知理论与方法

基础上将现实地理环境转化为虚拟地理环境, 需要网络技术、分布式技术、虚拟现实技术等的综合运用, 需要与真三维数据模型及地理分析模型进行集成, 需要强大的协同、交互能力的支撑. 因此, 虚拟地理环境构建需要面向地学分析需求, 从地理学研究和系统平台构建两个层面出发, 综合考虑地理系统、地理问题以及地理模型特性, 有效连接现实地理环境与虚拟地理环境, 并实现数据环境、建模环境、表达环境以及协同环境的有机融合, 进而基于计算机软件及分布式网络平台形成完备的虚拟地理环境软件平台. 面向地理分析的虚拟地理环境的体系架构如图 1 所示.

地理学研究包括历史反演、过程模拟、规律揭示与未来预测等方面, 地理模型是表达地理过程和揭示地理规律的有效手段. 然而地理系统的综合性、区域性、时空多尺度性等特征, 决定了地理模型的复杂性及模型通用性不强. 不同的领域模型在数据格式、网格离散、时空分辨率、运行结构以及模拟边界条件等方面存在差异, 表现为分散性和异构性特征. 地理问题的复杂性、尺度依赖性及区域关联性要求虚拟地理环境能支撑复杂的过程和机理建模, 并可有效实现模型的解析、移植与重用, 从而支撑从单要素向多要素、从领域模型、不同时空尺度模型等向全球/区域系统模型的发展. 地理模型多样性、异构性以及领域适用性等特点, 不仅导致很多地理学家无法深入参与建模过程, 更造成模型共享与集成的困难. 因此, 虚拟地理环境平台设计, 必须有效体现地理数据采集、地理现象与地理过程分析与解释、概念化与数值建模以及地理模型验证与预测这一地理分析思路.

面向地理分析的虚拟地理环境体系架构首先需要有效连接现实地理环境与虚拟地理环境, 并基于各子环境建设构建一个开放式地理分析平台. 在地理数据获取与数据组织、地理模型运行、多感知表达、

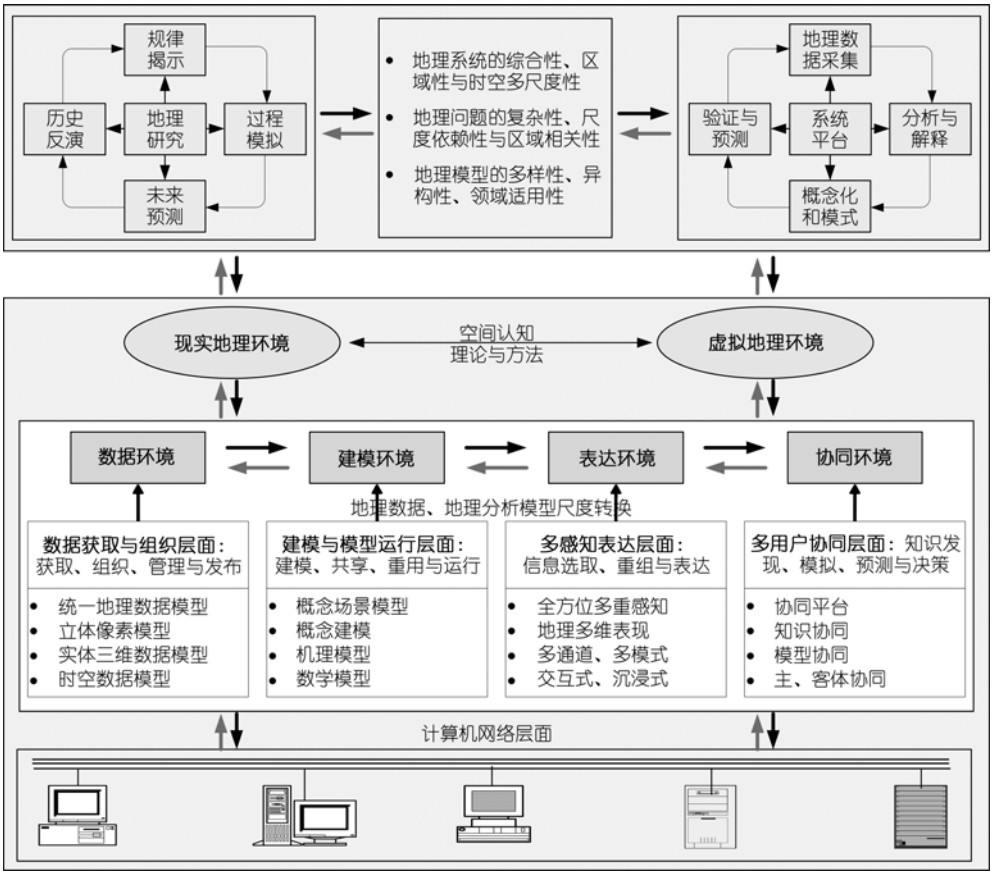


图 1　面向地理分析的虚拟地理环境的体系架构

多用户协同工作等四个层面上整合相关模型、方法与研究范式, 进而形成以地理问题为驱动、以模型共享为基础、以概念建模为桥梁以及以分布式计算为手段的新型地理分析环境与研究平台. 此外, 虚拟地理环境应是一个多用户参与的开放式地理分析研究平台, 专家构造地理分析模型, 公众可以化身人方式参与其中, 进而模拟对社会、环境等方面的影响, 并利用公众参与的活动对地理现象及过程进行模拟与预测.

2.2 研究思路

面向地理分析的虚拟地理环境建设思路如图 2 所示. 基于对客观世界及地理规律的认识, 结合概念三维空间场景模式形成概念地理模型. 在空间认知理论与方法、计算机及网络技术支撑下, 依托于虚拟地理环境所提供数据环境、建模环境、表达环境及协同环境进行地理分析, 探讨地理现象格局特征、演化过程、成因机制以及预测调控, 进而实现空间决策支持. 在数据环境层面, 需要有效整合多源异构数据, 构建可支撑且适用于不同空间尺度、大规模、分布式地理分析所需的数据模型、数据组织与表达形式、共享与集成方式以及融合与同化机制; 在建模环境建设层面, 对领域模型的结构、适用性、运行模式进行解析, 实现地理模型粒度分割、共享、集成与分布式调用, 从而实现地理模型建模、共享与协同; 在协同环境层面, 通过构建有效的协同机制, 实现数据协同、模型协同以及用户协同三大类协同模式, 实现可同时支持地理学家、建模专家以及普通用户的分布式、多用户协同建模. 对上述环境的数据流程及相关信息进行整合, 实现场景管理、场景重构及场景输出等场景控制功能, 进而利用三维显示器、三维鼠标、漫游/触感头盔等设备实现沉浸式的、多感知交互的虚拟地理环境表达环境与人机交互.

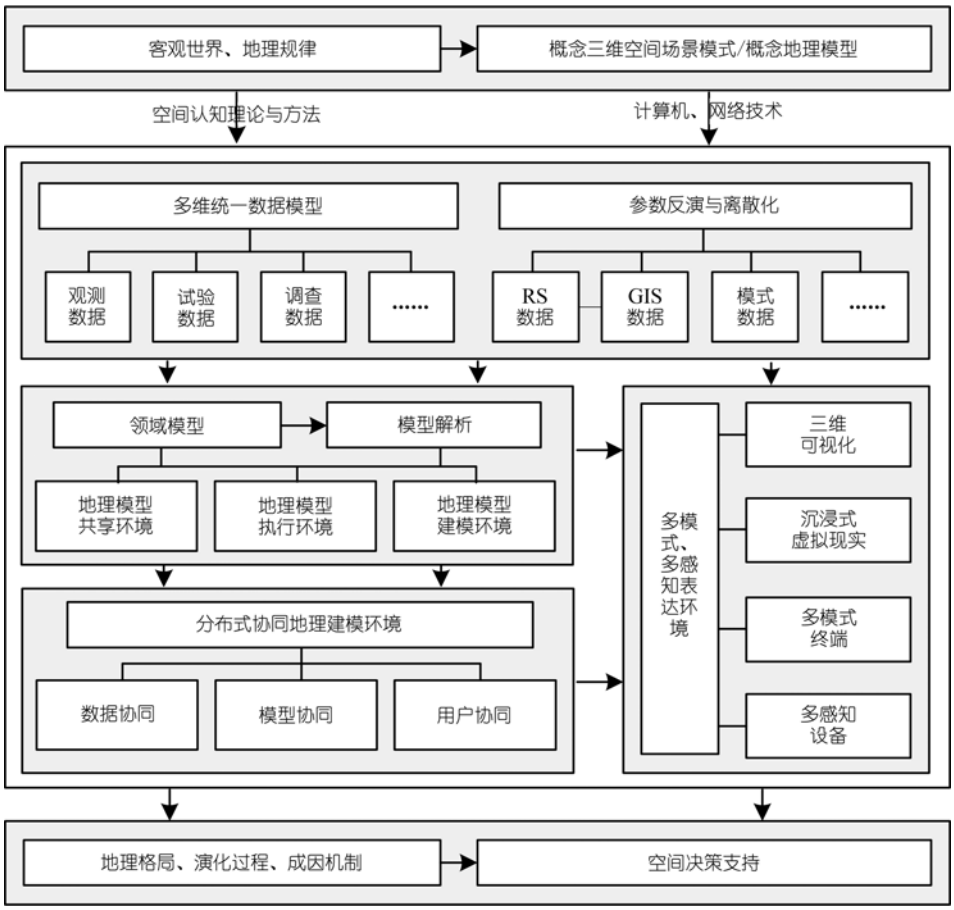


图 2　虚拟地理环境建设思路

3　地理分析导向的虚拟地理环境功能框架

3.1　数据环境

数据环境主要负责多源异构数据的组织与管理、整合与集成, 为地理场景构建、地理模型运行、可视化表达及地学分析提供数据支撑. 地理空间具有复杂性和多样性特点, 既存在着具有明确边界、离散分布的空间实体, 又存在着无明确边界、连续分布的空间现象. 传统的三维矢量空间数据模型(如三维对象表面模型[17~19]、体元模型或镶嵌模型[20~23]、混合数据模型[24,25]等)主要侧重于领域应用, 虽具备了一定的空间分析能力, 但在数据处理、分发和显示等方面的效率亟待提高, 难以支撑地理空间一体化描述. 以 Google Earth 为代表的系统在影像数据网络分发与共享的社会化应用方面具有优势, 但其空间分析能力弱. 不同 GIS 数据模型由于各自对空间数据理解、描述及表达方法和体系的差异, 已成为当前地理数据共享和互操作的障碍[26]. 因此, 数据环境建设需解决的关键问题有: 地理数据的一体化组织与表达; 多源异构数据的集成与共享.

虚拟地理环境一体化数据模型应能兼顾数据高效分发处理及支撑复杂空间分析, 需要从全要素建模、多视角观察和理解空间实体和现象以及有效开展地学分析和模拟角度, 从空间数据要素描述、关系描述、操作描述、规则描述等多方面来规范并抽象空间数据模型, 建立统一、多层次、开放的空间数据模型体系. 虚拟地理环境作为一个综合性地理分析与模拟平台, 需要建立开放式统一空间数据模型框架体系, 协调好开放性和统一性的矛盾; 需要构建可定制多维空间数据表示与交换模型, 以实现对多源异构数据的有机集成; 进而在通用表达规范基础上, 实现各类空间数据模型的表达、无缝联接与统一高效利用, 并为系统内多模型耦合运行提供支撑.

数据环境的功能框架如图 3. 构建融合基于场及基于对象两种地理现象表达方式, 构建新型虚拟地理环境一体化数据模型, 基于立体像素模型实现虚拟地理场景的快速构建与多分辨率实时拆分, 实现体元模型、表面模型的一体化表达、多维度地理对象及地理过程的一体化表达, 地理空间数据可定制及自适应表达及对复杂地学分析的有效支撑; 构建可有效支持地理空间数据快速存取、转换及分析的空间数据引擎, 实现海量地学数据传输、压缩、分析和表达; 针对网络带宽、计算效率和海量数据处理, 研制 GIS 加速器解决数据传输和显示效率问题; 基于多元数据适配器有效整合多源、异构地学时空数据; 通过对空间要素和实体关系, 即各种图形、图像、视频等要素进行归纳、甄别和分类, 探究能够统一描述要素和关系的基本因子及彼此间作用的约束规则, 形成元数据、元操作、元关系、元约束等的空间数据元模型技术; 建立空间要素和关系的约束规则知识库,

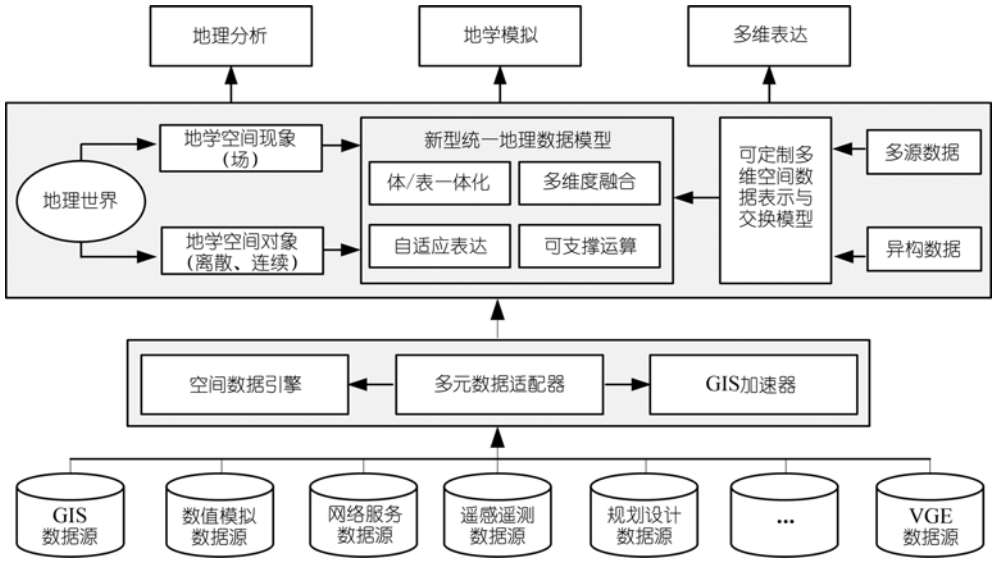


图 3　数据环境的功能框架

建立基于统一空间数据模型体系的空间数据建模工具和基于空间数据完整性等约束规则对空间数据的自适应建模技术; 通过构建空间数据表达与交换模型, 从语义和结构层对现有的异构数据进行解析与表达, 实现数据交换与数据共享.

3.2 建模环境

虚拟地理环境建设的根本目的是对地理现象、地理机理与过程进行抽象与表达, 进而对地理环境进行分析、模拟与预测, 地理模型构建与运用至关重要. 目前国内外在地理建模、地理模型共享与集成研究方面取得了一些进展[27], 在分布式地理建模环境研究方面则仍处于起步阶段, 与虚拟地理环境建设要求相距甚远, 主要体现在: ① 现有地理建模环境实质上仍是通用计算机建模环境, 地理特色不鲜明, 广大地理研究者难以理解和参与; ② 集中式地理模型集成环境有助于集中优势资源解决重大的地理建模与地理模拟问题, 但集中性难以满足广大研究者的需求; ③ 针对特定建模目标、特定区域和不同时空尺度的地理建模重复工作多, 地理研究者不能集中关注地理问题本身; ④ 构建的地理模型多表现为多源异构特征, 而且散布于网络空间, 成为模型"孤岛", 无法共享重用.

为使地理学家能根据研究目标、研究区域及时空尺度, 在网络空间灵活、交互地建模, 方便快捷地实现地理分析与过程模拟功能, 就必须突破现有地理建模环境的建模模式, 构建新技术条件下的地理建模范式, 形成不受时间与地域限制、可充分参与、在网络空间进行地理建模的新方法, 最终实现网络空间地理模拟平台. 建模环境作为虚拟地理环境中最重要的子环境, 其中的关键问题有: ① 多源异构地理模型的共享与重用; ② 图标引导式的地理建模; ③ 分布式地理模型的服务与执行. 建模环境建设可分为: 从地理模型的元数据规范化入手, 对地理模型进行规范化表达, 为模型构建、解析、重用与共享提供统一的表达与描述标准; 基于地理模型的建模环境、共享环境与运行环境建设构建完整的虚拟地理环境建模环境. 其中的建模环境负责地理概念模型、概念场景及计算模型构建; 模型共享环境用于解决多源、异构、散布在网络空间的地理模型共享; 运行环境负责管理分布式地理模型资源, 支持地理计算模型在网络环境下高效运行.

面向地理分析的虚拟地理环境建模环境功能框架如图 4. 首先对地理模型进行系统分析, 构建地理模型的分类体系, 对建模语义进行抽象形成面向地学领域应用的地理模型语义元数据规范, 对模型运行结构与耦合集成方式进行抽象与解析形成模型运行元数据规范. 构建地理模型共享环境、运行环境以及建模环境. 在地理模型共享层面上实现对模型的粒度分割, 对异构模型进行有效封装, 并构建模型库、方法库和算法库; 在地理模型运行环境中, 构建分布式模型执行代理、执行引擎、模型执行容器, 进而实现模型的参数略定与运行交互; 而在地理模型建模环境中则面向多用户分布式协同建模, 提供引导式建模环境、模型注册与模型分发机制, 根据用户的建模需求生成模型运行配置脚本, 并在线提供模型运行控制以及状态监控机制.

3.3 表达环境

虚拟地理环境通过构建虚拟地理空间, 让地学研究者通过多感知或者化身进入到三维虚拟地理空间, 在虚拟空间中观察地学现象分布及其演化过程. 表达环境不仅是用户与系统交互的窗口, 是模型模拟与分析结果表达的工具, 也是用户通过各种方法(如头盔、手套等)参与并体现虚拟地理环境的途径. 现有虚拟地理环境表达环境建设仍多关注数字城市、数字地球的可视化表达上, 试图以从全球到局部逐渐精细方式展现地理现象与地理实体(如 GoogleEarth, VirtualEarth, Skyline 等). 一方面主要侧重于视觉展示, 缺乏对多模式、多感知及多设备的有效支持; 另一方面也将视觉展示与地学模拟割裂, 难以支撑地理分析与过程表达. 面向公众支持的虚拟地理环境表达, 必须综合考虑客户端、信道和服务器性能的整体传输与绘制策略.

在认知和实践层面上, VGE 作为地理环境的表达平台, 应该有效兼顾 "外观察"与"内观察"方式, 并应用多感知观察和体验方式, 实现观察空间、感知空间与三维虚拟空间融合, 人作为参与者可在虚拟空间中观察地理现象的分布及其演化过程. 在实现技术层面上, VGE 可以采用头盔、手套等传感器和穿戴设备, 实现投入型虚拟 VGE; 也可以用表达用户身份的三维化身, 进入虚拟环境, 增强人对虚拟空间的投入感, 以及系统的实时交互能力. 在分布式应用环境上, 需要综合考虑异质环境不同的设备/信道能力, 研究面向多模式终端和多感知设备的交互控制、

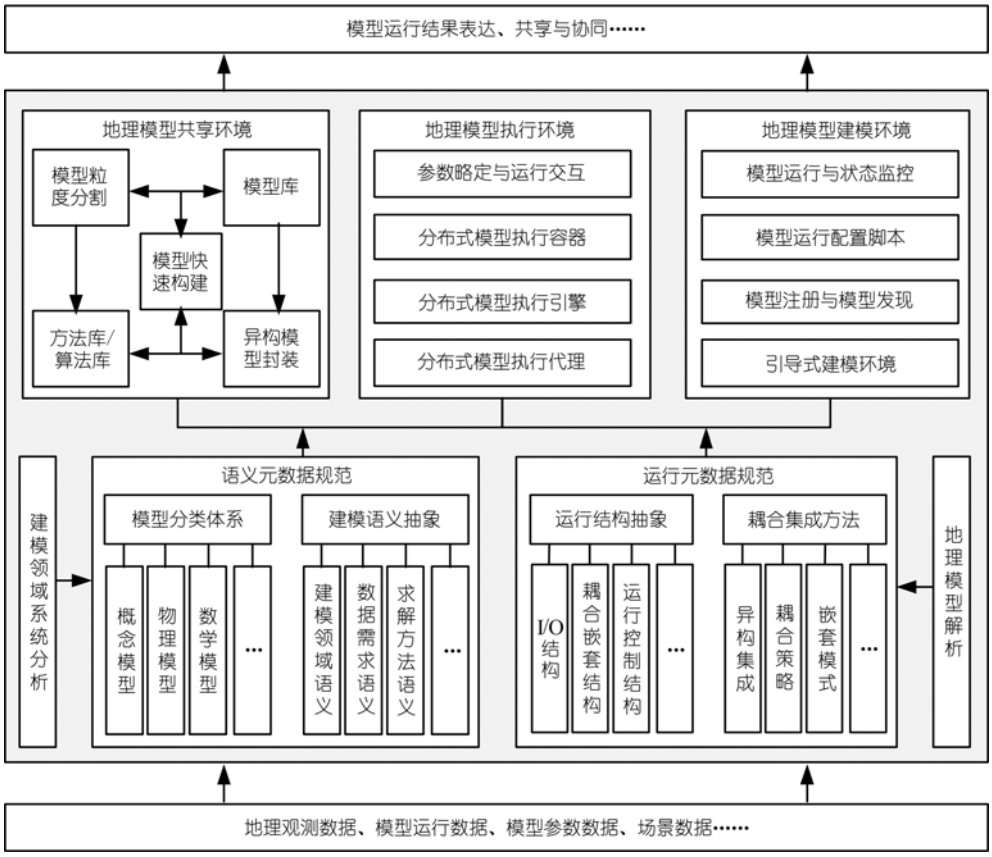


图 4　建模环境的功能框架

数据传输、表达策略及负载平衡技术, 实现传输内容、传输格式和绘制策略的多模式自适应表达.

面向地理分析的虚拟地理环境表达环境的功能框架如图 5. 基于 GIS 软件以及其他专业应用软件(如 CAD 等)的分析及数据输出结果的虚拟现实化, 实现场景管理、场景重构以及场景输出等场景控制功能; 利用场景与模型的耦合机制, 实现地理场景与地学模型的有效融合, 通过将不同尺度的地理模型运算与结果展示构建到真三维数字地球上, 实现从宏观到微观多尺度地理现象展示、分析与预测; 在融合数据索引与加速技术基础上, 研究异质环境下设备/信道能力和绘制形态/质量间的关联关系, 构建多感知数据分离与调度引擎, 实现不同感知数据的识别、分离、调度与同步, 针对在不同设备性能、网络带宽条件上可视化流畅性需求, 自适应地调整输出内容、输出格式和绘制质量; 最终实现专业虚拟现实环境、高性能工作站、移动设备以及三维显示器、三维鼠标、漫游/触感头盔等多感知设备的协同运作, 实现沉浸式、多感知交互的虚拟地理环境表达与人机交互.

3.4　协同环境

地理协同是虚拟地理环境相对于 GIS 的一个显著特征, 地理协同是指本地或异地人员在同一时间或不同时间内对地理空间现象的协作探索与认知过程[28,29]. 龚建华等[30]实现了“虚拟香港中文大学”系统, 用户以“化身人”的方式进行社会活动, 完成协作式的生存体验. 地理学研究与应用需要不同领域专家与公众的普遍参与, 协同环境既能模拟真实的现实世界, 又能在其中进行交互与协作. 虚拟地理环境应在电话会议、视频会议、可视电话、移动手机、视频聊天等技术基础上, 建立协同会商的模式, 为网络中分散的用户提供高效、灵活的沟通与协作的协同环境, 支持人与人之间顺畅自如的沟通与交流, 实现信息与资源共享. 现有 VGE 协同环境建设虽取得了较显著的进展, 但仍存在如下问题: ① 不能有效支持 GIS 集成, 难以实现图文表一体化流转; ② 难以在任

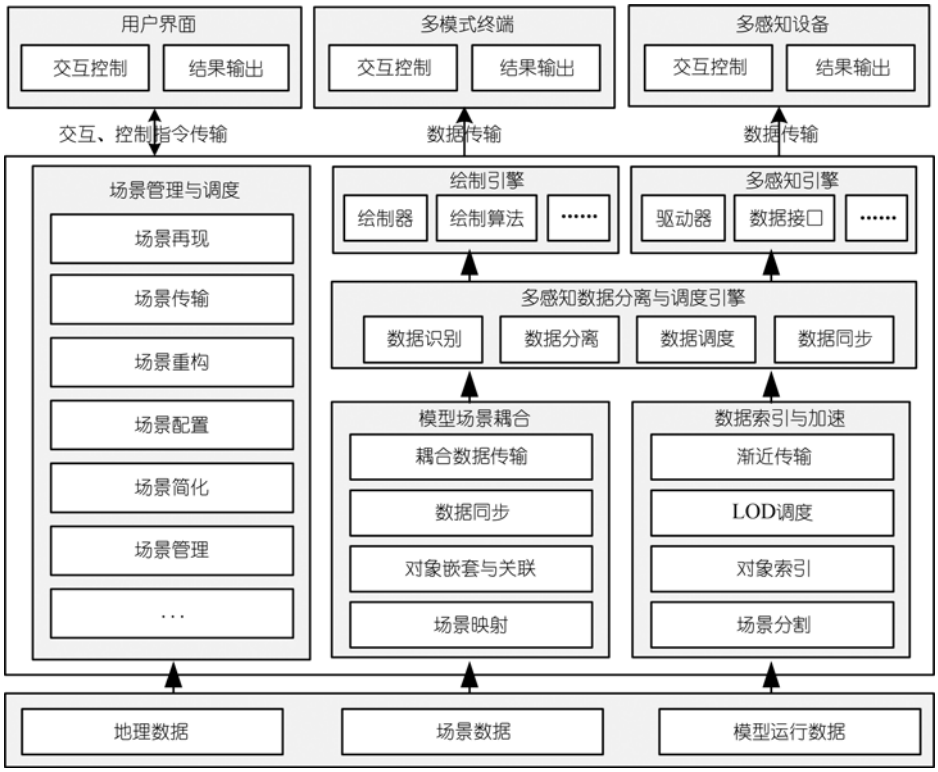


图 5　表达环境的功能框架

意节点上进行会商协同; ③ 在空间数据尤其是矢量数据并发操作和并发控制方面仍存不足.

虚拟地理环境的协同环境关注虚拟环境中人与人、人与地理实体、地理实体与地理实体之间的虚拟交互, 包括以下两种协同方式: ① 虚拟环境中的协同. 该方式可向用户提供沉浸式体验, 使不同地区的用户(协作者)产生身临其境的感觉, 可以接受用户输入并产生相应的反馈信息, 相互协作的成员间在虚拟共享空间中可通过 3D 化身进行协同感知与协同交互. ② 协同分析与决策. 该方式不需要用户沉浸, 但支持协商分析功能. 如可通过提供虚拟会议系统, 利用音/视频通信提供面对面的交流效果, 提供文字交流工具、白板、文件传输分发、应用程序共享等功能.

针对上述两类协同模式, 面向地理分析协同环境的功能框架如图 6. 首先针对虚拟地理环境平台的各类用户需求, 对地理研究任务及其流程进行分解

与控制, 实现对地理分析任务的分解、分派、封包与传输, 实现对模型运行的流程分割、权限及访问控制以及优先级监控; 定义各类数据、模型以及用户交互指令的传输协议与接口规范, 构建分布式虚拟地理环境协同平台, 通过数据匹配/更新/同步、模型分解/综合/分派、任务与角色的发现/匹配/协同会商, 进而建立合作契约, 构建协作团队, 在整体上实现数据、模型和用户三者间的协同.

4　典型功能示范

作者及其研究团队长期致力于虚拟地理环境研究, 提出“虚拟地理环境是一个没有围墙的 GIS 实验室”[16], 并针对虚拟时空地理认知理论、三维空间数据的快速获取与一体化数据模型、地理分析模型及其与虚拟地理环境系统的集成、分布式地理建模环境、可视化环境等方面进行了一系列研究[31~41], 为面向地理分析的虚拟地理环境建设及平台研制与开发提供了实现思路与关键技术支撑(图 7).

4.1　虚拟地理环境数据模型研究

Wu 等[31]在分析了地理空间现象尺度、模型尺度、采样尺度和表达尺度的含义与内在联系的基础上, 综合“对象”模型和“场”模型的特点, 采用 2D/3D Delaunay 约束算法实现地上、地下和地表对象和场的集成, 实现了表面三维与体三维的转换, 并能对地上

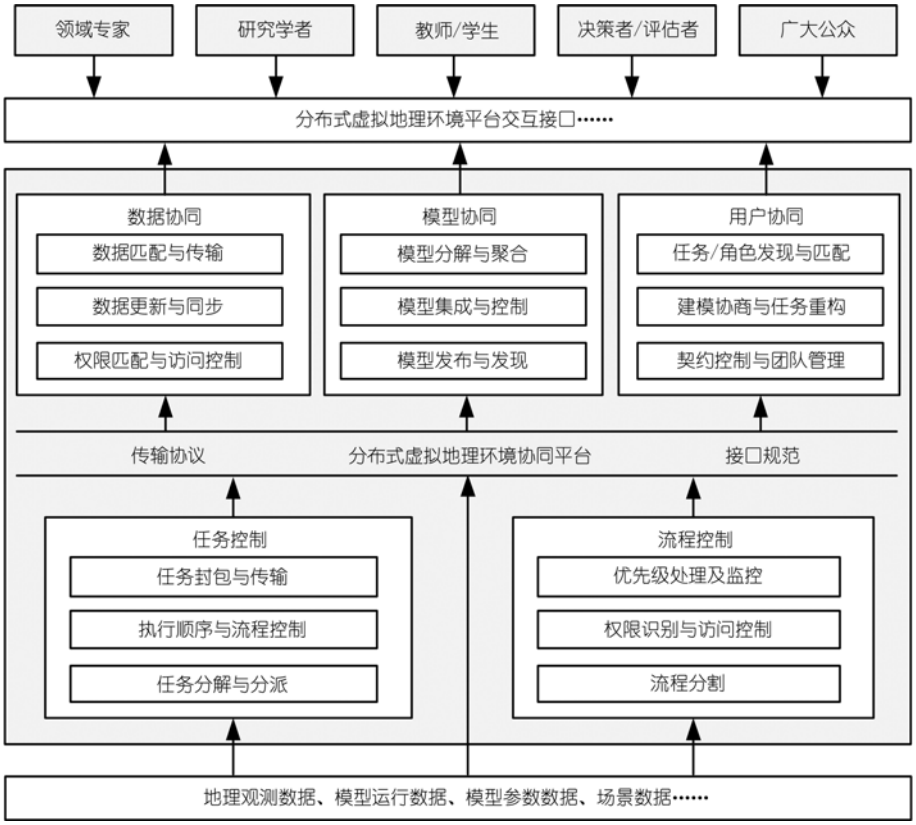


图 6 协同环境的功能框架

建筑、地表和地下实体进行统一表达; 袁林旺等[32,33]将共形几何代数引入 GIS 数据模型研究, 基于多维统一分析框架, 构建了可支撑复杂几何形体的多维统一表达、度量及空间关系运算的三维 GIS 数据模型及时空融合分析框架. 借鉴 SEDRIS[42]的思想, Wang 等[34]开展了可定制的多维空间数据集成模型研究, 从图形要素、关系要素等几方面对空间数据进行定制, 实现空间数据的统一表达, 建立多维空间数据之间的映射和集成体系, 实现点、线、面、体、格元、体元的一体化表达; 苏红军等[35]、陈旻等[36]提出了通用空间数据表达模型, 通过对空间数据的结构与语义进行解析, 显式表达空间数据的结构与语义, 在结构清晰、语义明确的情况下实现多源异构数据的重构与组织. 上述在虚拟地理环境数据模型、数据结构以及数据压缩与传输方法等方面的进展, 可以极大地提高数据存储、传输与分析效率.

4.2 图标引导式概念建模环境

我们提出了地理模型分类体系(草案)和地理模型元数据规范(草案)(http://www.vgekl.com/), 用于地理模型数据集的全面描述、数据集编目及信息交换网络服务, 为地理模型结构解析与可重用粒度分析奠定基础. 在模型资源的集成与共享方面, 一方面通过建模模式抽象, 挖掘模型结构化特征, 研究模型解析及可重用粒度分割方法; 另一方面探索对地理模型输入、输出和控制参数的解析方法, 构建通用地理模型库、算法库和方法库. 为了仿真地理建模思路, 在多用户协同建模时显式地交流思想, 陈旻等[37]、陶虹[38]提出了图标式地理概念建模方式, 可根据所研究的地理问题、地理区域和时空尺度, 利用地理图标建立地理要素之间的相互关系, 利用要素关联规则创建地理概念模型. 对多源异构地理模型实现共享与重用. 对地理模型行元数据与语义描述表达, 研究了地理模型的规范化服务描述与封装机制, 以模型的输入/输出以及流程控制为切入点, 屏蔽网络上地理模型资源的异构性, 并利用网络环境下支持地理模型分布式计算的地理计算模型处理流程脚本语言规范, 实现地理模型的分布式调用与网络环境下的协同执行.



图 7　面向地理分析的虚拟地理环境核心功能示意

4.3　真三维立体显示与可视化系统

陈旻等[39]设计了虚拟地理环境的可视化系统VirtualGloble，该系统支持高精度地形、影像、地理实体模型、图片、文字标注以及多种矢量数据格式，支持分布式数据服务以及数据的压缩传输，实现了影像纹理的快速浏览、大规模地形的实时漫游，标记避让等基本网络三维地理信息浏览器的功能．并在三维环境中有效集成了满足地学建模模拟分析所需的各种空间离散网格，以满足虚拟地理环境中地学建模与模拟需要．传统的沉浸式可视化需借助于专业设备获得立体感知，缺少大众化的真三维感知技术，阻碍了虚拟地理环境的大众化发展．通过在三维

可视化程序到显卡之间采用植入式渲染数据拦截技术, 利用矩阵的捕获与解析、场景的变化、视点位置变换等技术实现了真三维立体显示与观测, 实现了将单通道透视显示技术拓展为双目视觉真三维立体显示的方法. 在对地理模型表达上, 构建了多尺度、多细节的三维空间场景动态可视化方法, 并实现了地上、地下的一体化三维表达以及空间分析过程与结果的可视化表达.

4.4　可会商协同的图文一体分布式协同建模环境

孙亚琴[40]基于对可会商协同的图文一体化工作流、群组协同会商决策、协同过程反演等关键技术研究, 构建了可会商协同的图文一体化工作流平台, 初步实现了基于工作流的地理协同, 为地理学家在虚拟地理环境中协同会商、决策提供了有效途径. 进而发展了基于 Holon 的多用户分布式协同建模的概念模型, 设计并实现了分布式协同地理建模的原型系统[41]. 依据计算复杂性、组织多方性、尺度定义、模型联结、层级等地理模型特征因素, 以 SWAT 模型为例, 以其构建过程中所采取的"流域—子流域—水文响应单元"空间离散方案作为划分各个模型 Holon 层次的基准. 考虑地理建模团队组织的形成和演化过程, 以及该过程中各个建模成员自治的、能动的建模管理过程. 将分布式协同地理建模过程进行流程分解, 构建了分布式协同建模的主要步骤. 研究了地理建模团队组织的产生、扩展和调整等过程, 并提供了文字交谈、语音交谈、影像交流等多种多媒体通信途径, 实时地交换建模思想、探讨建模过程中所涉及到的各种规划方案. 通过契约管理器设置并管理"演算契约", 将演算建模任务执行的责任和相应的控制权转赋给建模者, 并由建模者负责启动子建模任务管理过程.

5　结论与讨论

虚拟地理环境作为地理学与地理信息科学的一个新兴的研究方向, 在虚拟地理环境的理论、技术、应用及系统设计等方面均取得了明显突破. 但总体上仍存在重视表达、忽略地理分析的倾向, 在体系架构上有待完善, 关键技术上亟需突破. 作为新一代 GIS 的虚拟地理环境应具有系统运行高效性、地理模拟便捷性、环境表达虚拟性、系统交互协同灵活性等特征. 本文从现代地理学研究视角出发, 探讨了地理分析导向的虚拟地理环境的架构、功能、实现思路与方法, 深入分析了数据环境、建模环境、表达环境和协同环境等四个子环境的目标、功能与实现思路. 并结合本团队的研究进展, 探讨了多源、多维、多分辨率、动态地理空间数据采集与管理、统一数据模型、分布式建模环境、真三维表达环境以及协同、共享与互操作等相关理论与关键技术问题, 以期为虚拟地理环境进一步发展及虚拟地理环境平台的研制与开发提供参考. 地理分析导向的虚拟地理环境平台建设, 可为表达地理环境、研究地理问题、提炼地理规律、再现和模拟地理现象提供了平台支撑, 对创新地理学乃至地球科学研究的思路、方法和手段具有重要意义.

面向地理分析导向的虚拟地理环境建设的最终目标是形成新的地学研究技术方法和研究平台, 未来研究重点主要有: ① 在数据环境建设中, 重点开展空间数据结构、数据组织方法、数据压缩传输方法空间数据引擎研究, 解决二维、表面三维、体三维一体化数据模型问题, 形成可定制、可集成、多维度融合的虚拟地理环境统一数据模型; ② 在建模环境建设中, 重点研究分布式地理模型共享、地理模型构建和地理模型运行问题, 发展在网络空间中可充分参与的地理建模新方法, 实现多源异构地理模型在网络环境下的共享、重用与分布式集成, 构建分布式地理建模与模拟平台; ③ 在表达环境建设中, 研究基于自然语言与系统的交互, 增加发声语言和文本语言的用户驱动, 强化虚拟现实功能建设, 将具有三维图形功能的软件和数据系统向虚拟现实系统转化; ④ 在协同环境建设中, 重点研究可会商协同的多媒介一体化的工作流协同环境, 实现地理建模与模拟的分布式协同交互, 实现人在虚拟环境中对地理环境、地理问题及地理现象的交互操作、虚拟试验与情境体验.

致谢　作者衷心感谢香港中文大学林珲教授、中国科学院遥感与应用研究所龚建华研究员、武汉大学朱庆教授以及虚拟地理环境教育部重点实验室的相关同仁在虚拟地理环境研究领域多年来的交流与合作. 感谢审稿人提出的修改建议.

参考文献

1 Batty M. Virtual geography. Future, 1997, 29: 337–352
2 Crang M, Crang P, May J. Introduction. In: Crang M, Crang P, May J, eds. Virtual Geographies: Bodies, Space, and Relations. London and New York: Routledge, 1999. 1–20
3 龚建华, 林珲. 虚拟地理环境: 在线虚拟现实的地理学透视. 北京: 高等教育出版社, 2001
4 张之沧, 闾国年, 刘晓艳. 第四世界——一种新时空的创造与探索. 北京: 人民出版社, 2009
5 林珲, 龚建华. 论虚拟地理环境. 测绘学报, 2002, 31: 1-6
6 林珲, 黄凤茹, 闾国年. 虚拟地理环境研究的兴起与试验地理学新方向. 地理学报, 2009, 64: 7–20
7 林珲, 朱庆. 虚拟地理环境的地理学语言特征. 遥感学报, 2005, 9: 158–165
8 Cappelle C, El Najjar M E, Pomorski D, et al. Intelligent geolocalization in urban areas using global positioning systems, three-dimensional geographic information systems, and vision. J Intell Transp Syst, 2010, 14: 3–12
9 李爽, 孙九林. 基于虚拟地理环境的数字黄河研究进展. 地理科学进展, 2005, 24: 91–100
10 李爽, 姚静. 虚拟地理环境的多维数据模型与地理过程表达. 地理与地理信息科学, 2005, 21: 1–5
11 陈小钢. 虚拟地理环境和地学认知检验——以澳大利亚维多利亚省卡集洼汇水盆地为例. 地理研究, 2003, 22: 245–252
12 徐丙立, 林珲, 朱军, 等. 面向珠三角空气污染模拟的虚拟地理环境系统研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34: 636–640
13 吴娴, 李树军, 龚建华, 等. 网格虚拟地理环境体系结构研究. 海洋测绘, 2006, 26: 71–74
14 Ishida T. Digital city Kyoto. Commun ACM, 2002, 45: 76–81
15 Rheingold H. The Virtual Communities: Homesteading on the Electronic Frontier. London: MIT Press, 2000
16 夏秋勤, 张宏, 闾国年. 没有围墙的 GIS 实验室. 地球信息科学, 2002, 4: 17–22
17 李青元. 三维矢量结构 GIS 拓扑关系及其动态建立. 测绘学报, 1997, 26: 235–240
18 孙敏, 陈军. 基于几何元素的三维景观实体建模研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25: 233–237
19 Coors V. 3D-GIS in networking environments. Comput Environ Urban Sys, 2003, 27: 345–357
20 Attaway S W, Brown K H, Mello F J, et al. A parallel contact detection algorithm for transient solid dynamics simulations using PRONTO3D. Comput Mech, 1981, 22: 143–159
21 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用. 中国图形图像学报(A 辑), 2001, 6: 285–290
22 吴立新, 张瑞新, 戚宜欣, 等. 3 维地学模拟与虚拟矿山系统. 测绘学报, 2002, 31: 28–33
23 Pilout M, Tempfli K, Molenaar M. A tetrahedron-based 3D vector data model for geoinformation. In: Molenaar M, de Hoop S. Advanced Geographic Data Modelling: Spatial Data Modelling and Query Languages for 2D and 3D Applications. Netherlands Geodetic Commission Publ Geod, 1994, (40): 129–140
24 李德仁, 李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究. 测绘学报, 1997, 26: 128–133
25 Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. Comput Geosci, 2005, 31: 35–43
26 张哲, 宋敏, 刘大昕, 等. 一种支持分布式系统集成的数据模型. 系统仿真学报, 2009, 21: 818–822
27 冯敏, Liu S-G, Euliss Jr. N H, 等. 基于开放互操作标准的分布式地理空间模型共享研究. 遥感学报, 2009, 13: 1067–1073
28 石松, 陈崇成, 王钦敏, 等. 一种面向协同虚拟地理环境的并发控制机制. 系统仿真学报, 2009, 21: 7180–7184
29 Lin H, Zhu J, Gong J H, et al. A grid-based collaborative virtual geographic environment for the planning of silt dam systems. Int J Geogr Inf Sci, 2010, 24: 607–621
30 龚建华, 林珲, 谭倩. 虚拟香港中文大学校园的设计与初步试验. 测绘学报, 2002, 31: 39–43
31 Wu M G, Shen J W, Wen Y N. A hybrid data structure for integrated modeling of geographic 3D data. Proceeding ICISE '09, 1943-1946. doi: 10.1109/ICISE. 2009.48
32 袁林旺, 俞肇元, 罗文, 等. 基于共形几何代数的 GIS 三维空间数据模型. 中国科学: 地球科学, 2011, 40: 1740–1751
33 Yuan L W, Yu Z Y, Chen S F, et al. CAUSTA: Clifford Algebra based Unified Spatial-Temporal Analysis. Trans GIS, 2010, 14(S1): 59–83
34 Wang Y J, Che W T, Cao R. An object-oriented spatial data model for virtual geographical environment. Proceeding Geoinformatics 2008, Guangzhou. 1432I: 1–8
35 苏红军, 盛业华, 温永宁, 等. 面向虚拟地理环境的多源异构数据集成方法. 地球信息科学学报, 2009, 11: 292–298

36　陈旻, 盛业华, 温永宁, 等. 面向地理问题求解的数据表达模型研究. 地球信息科学报, 2009, 11: 333–341
37　陈旻, 盛业华, 温永宁, 等. 语义引导的图标式地理概念建模环境初探. 地理研究, 2009, 28 : 705–715
38　陶虹. 基于场景的可视化地理概念建模方法研究. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2008
39　陈旻, 温永宁, 王永君, 等. 面向虚拟地理环境的三维可视化架构研究. 系统仿真学报, 2006, 18(增 1): 349-351, 355
40　孙亚琴. 可会商协同图文工作流研究. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2007
41　温永宁, 闾国年, 杨慧, 等. 面向服务的分布式地学模型集成研究框架. 遥感学报, 2006, 10: 160–168
42　杨森, 战守义, 费庆. 使用 SEDRIS 的环境数据表示与交换. 计算机工程, 2002, 28: 71–73