

引文格式: 闫国年, 袁林旺, 俞肇元. 地理学视角下测绘地理信息再透视[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1549-1556. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170338.

LÜ Guonian, YUAN Linwang, YU Zhaoyuan. Surveying and Mapping Geographical Information from the Perspective of Geography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1549-1556. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170338.

地理学视角下测绘地理信息再透视

闫国年^{1,2,3}, 袁林旺^{1,2,3}, 俞肇元^{1,2,3}

1. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 江苏 南京 210023; 2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 江苏 南京 210023; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023

Surveying and Mapping Geographical Information from the Perspective of Geography

LÜ Guonian^{1,2,3}, YUAN Linwang^{1,2,3}, YU Zhaoyuan^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographical Environment Evolution, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: It briefly reviewed the history of geographic information content development since the existence of geographic information system. It pointed out that the current definition of geographic information is always the extension from the “spatial+ attributes” basic mapping framework of geographic information. It is increasingly difficult to adapt to the analysis and application of spatial-temporal big data. From the perspective of geography research subject and content, it summarized systematically that the content and extension of the “geographic information” that geography needs. It put forward that a six-element expression model of geographic information, including spatial location, semantic description, attribute characteristics, geometric form, evolution process, and objects relationship. Under the guidance of the laws of geography, for geographical phenomenon of spatial distribution, temporal pattern and evolution process, the interaction mechanism of the integrated expression, system analysis and efficient management, it designed that a unified GIS data model which is expressed by six basic elements, a new GIS data structure driven by geographical rules and interaction, and key technologies of unstructured spatio-temporal data organization and storage. It provided that a theoretical basis and technical support for the shift from the surveying and mapping geographic information to the scientific geographic information, and it can help improving the organization, management, analysis and expression ability of the GIS of the geographical laws such as geographical pattern, evolution process, and interaction between elements.

Key words: geographic information; six-element expression model; data model; data structure; database

Foundation support: The Nation Natural Science Foundation of China(Nos. 41231173; 41625004)

摘 要: 系统回顾了地理信息系统产生以来地理信息内涵发展与拓展的主要历程, 指出地理信息的定义一直是在“空间+属性”的地图信息基本框架下逐步扩展, 其发展历程经历了地图 GIS、语义 GIS、时空 GIS 和大数据 GIS 4 个不同的阶段, 但仍无法满足时空大数据的分析和应用需求。从地理学研究的对象和内容出发, 对地理学所需要的“地理信息”的内涵和外延进行了系统的梳理总结, 提出了涵盖“空间定位”“语义描述”“属性特征”“几何形态”“演化过程”“要素相互关系”的地理信息六要素表达模型。在地理定律和地理规律的指导下, 面向地理现象空间分布、时空格局、演化过程、相互作用机理的集成表达、系统分析和高效管理, 设计了六要素集成表达的几何代数统一 GIS 数据模型、地理规律与相互作用

驱动的新型 GIS 数据结构、非结构化时空数据组织与存储等关键技术,为测绘地理信息走向地理科学信息提供了另一个理论基础与技术方法支撑,有助于提升 GIS 对地理格局、演化过程和要素相互作用等地理规律的组织、管理、表达和分析能力。

关键词:地理信息;六要素表达模型;数据模型;数据结构;数据库

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2017)10-1549-08

基金项目:国家自然科学基金(41231173;41625004)

1 地理信息内涵发展回顾

自 1963 年文献[1]提出并建立了世界上第 1 个地理信息系统软件以来,地理信息的内涵经历了大致 4 个不同阶段的演变(见图 1)。早期的地理信息以地图数据管理和计算机辅助制图为目标,对现实世界的抽象主要基于几何和属性进行概括,从连续和离散视角分别发展形成了矢量、栅格等数据模型。该阶段地理信息表达方法主要从对象的坐标、形状和属性的角度进行对象描述。其中对象语义、属性等信息均存储于属性表中,并通过 ID 与对象关联,在数据组织和数据结构上以分层、分要素的拓扑模型等为代表,而空间关系及过程性的信息通过空间分析计算加以体现。该阶段 GIS 发展更多地继承了传统地图学的发展,“定位+几何+属性”成为测绘地理信息基本框架,在对地理环境进行抽象表达时抽象程度高且主要面向数据管理,难以对地理对象和地理现象过程和规律进行表达,也难以表达其细节层次。

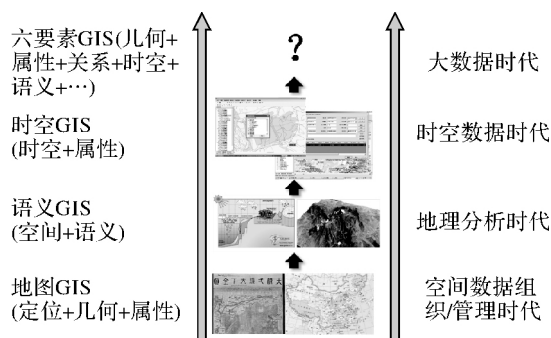


图 1 地理信息发展的历程

Fig.1 The course of geographic information development

文献[2—3]在 20 世纪 90 年代提出了地理信息科学的概念,促进其从数据管理系统向地理信息处理系统转变,发展了诸如叠加分析、空间自相关、空间统计等新的分析方法。伴随着 GIS 在地理学诸多领域的广泛应用和空间分析功能的不断加强,对地理对象语义的分析和描述日渐增强。

文献[4]从语义原子角度提出了一种 GIS 的表达范式;文献[5]则首次提出了本体论驱动的地理信息系统,利用本体表达特定的地理世界,利用概念范式组织数据库中信息的存储,从而得到较关系数据库更为丰富的语义表达。地理信息的定义开始进入以本体为基础的语义 GIS 阶段[6]。本阶段的地理信息表达从哲学本体论出发,试图用地理语义统一地理对象、现象与规律的表达,构建了“语义+空间+属性”的基本表达框架,尝试以语义为基础进行地理对象特征、关系和规律的集成表达。以语义为基础的 GIS 在多重表达等方面具有一定优势,但并未提出将属性、时间、关系、过程特征统一表达的操作性数据模型,使得其在实际应用中难以推广。虽然语义 GIS 在学界讨论较多,但至今未见成熟的、广泛商用的语义 GIS 平台。

随着地理空间观测数据、连续器测数据,各类模式模拟数据的不断积累,地理数据在时间维上不断扩展,时空数据集大量生成,时空地理信息的表达与分析也逐渐得到重视。文献[7—9]分别从面向对象、时空语义和时空拓扑的角度对时空数据模型进行研究。随着数据更新频次的快速增加,动态 GIS、实时 GIS 等概念被提出并得到广泛应用,从而发展出了面向事件和面向过程的时空信息组织方法[10]。这一阶段的地理信息被表达为“时间+空间+属性”或“时空+属性”,但对关系和语义的表达仍存不足。在数据组织和数据结构上,以基于文件系统和版本数据库的时空数据存储为代表[11-12],多是在原有空间数据结构与空间数据库的基础上扩展,导致对高动态、海量数据的管理和分析效率不高[13-15]。当前诸如 ArcGIS 等商用 GIS 平台虽然在不断改进其时空数据分析能力,但总体上仍然多只能支撑以离散的时空切片形式对时空数据进行管理和分析,未见有对连续时空演化过程、时空多尺度分析以及动态地理模式的有效支撑。

伴随着大数据时代的到来,各类应用对地理信息统一表达的需求日渐强烈。在大数据时代,空间信息(定位/几何)、属性信息、语义信息、关系

信息、过程信息处于相对均等的地位,并表现出动态性、社会性、公用性等特征^[16]。大数据时代的地理信息的内涵应从以几何、空间、关系等为基础,转变为综合自然、人文、社会等信息,涵盖了包含人类社会世界、多媒体信息世界和现实地理世界的人机物三元世界^[17]。地理信息的来源由传统的空间数据全面转变为时空大数据,相对于现有 GIS 系统,大数据时代的 GIS 在数据表达、对象建模、属性描述、语义推理以及模型模式高效分析和计算等多个方面均有更为复杂的需求。过去的地理信息表达侧重于时空定位、几何结构和属性特征的方式导致 GIS 面向大数据管理与分析时受到较大的掣肘。如何以时空大数据为支撑,从多重尺度、多重维度、多重属性、多重空间等视角表达真实地理世界,为复杂地理系统的建模模拟与预测调控提供计算支撑,进而实现对地理知识和地理规律的提取、描述与应用,是大数据时代 GIS 面临的重大挑战和关键问题。

从地理学和地理认知的视角出发,对地理信息的内涵及其表达、分析的形式进行重新思考,是大数据时代对 GIS 发展的重要需求,也是提升 GIS 对大数据时代适用性的关键途径之一。本文从地理认知和地理学视角,将地理场景视作多尺度嵌套、动静耦合、多要素相互作用的整体,对地理场景的空间定位、几何形态、属性特征、要素相互关系、演化过程和语义描述“六要素”进行规范化表达,构建遵循地理规律的地理场景数据模型和数据结构,进而发展地理场景数据的自适应整合和集成方法,以及场景数据的按需定制、优化调度与配置方法。

2 地理学视角下的地理信息六要素表达

地理信息是描述和表达地理对象和现象的空间分布及其时空分异、演化过程及其要素相互作用等的信息。地理信息应充分考虑复杂地理数据所呈现海量多维、时空相关、多维关联、实时感知、动态更新与非结构化等特征、空间关系的复杂性、数据量的海量性、数据使用的快捷性,有效支撑复杂地理大数据的组织、模型计算和多方位、多途径的地理分析与多模态表达。结合地理信息在 GIS 演变不同阶段的定义,笔者从地理学视角提出地理信息内涵的定义为:地理信息是以地理场景为基础,通过几何图形、代数方程、时间序列、信息图谱等多种描述手段实现对地理对象和地理过程的空间定位、几何形态、属性特征、要素相互关系、演化过程和语义描述“六要素”综合性、集成性的表达和描述,是从地理学视角实现人机物三元世界向计算机世界的抽象映射,是地理观测、地理模型分析和地理计算的主要输入和输出,是地理规律的数字化表达与再现。六要素的基本内涵及其表达如表 1 所示,其中空间定位是对地理对象或现象位置的描述;几何形态是对地理对象形状、结构的描述;属性特征则是通过定性或定量的方式对地理对象与现象固有描述的描述;要素相互关系用于描述对象与对象间时间或空间上的关系,也是构建地理空间计算的基本组成;演化过程用于描述地理现象产生和演化过程;语义描述是经过人类处理和认知的地理场景中对象与现象的地理特征,它多具有间接性并通过推理得到。

表 1 地理场景表达的 6 个基本要素
Tab.1 Six basic elements for geographical scene representation

场景要素	描 述	举 例
空间定位	地理对象或现象发生、发展的空间节点	格林威治天文台,北京
几何形态	用于描述场景中地理对象的静态组成结构和动态演化结构	三角网,多面体,台风眼
属性特征	场景中地理对象与现象固有的属性特征	高度,风速,岩性
要素相互关系	用于描述场景中对象间或现象间的定性或定量关系	接壤,距离 100 km,同时发生
演化过程	场景中地理现象的发生与演变过程	城市演化,台风过程
语义描述	场景中对象与现象的基于人类认知的地理特征	地震高发区,厄尔尼诺时期

3 地理学视角下的地理信息表达、建模与分析

3.1 地理六要素集成表达的几何代数 GIS 统一数据模型
时空数据模型是对现实世界的抽象,其核心

是建立地理时空数据向特定的数学空间或数据空间映射与关联。基于地理学视角的 GIS 数据模型应能有效整合代数和几何表达,有机集成属性、语义、时空关系等信息,实现多维对象表达、存储结构、拓扑关系维护以及时空过程表达上的一致性^[18]。几何代数理论有效利用数学结构所内蕴

的对复杂结构表达能力实现对高维数据表达的原生支持,尝试复杂地理对象和地理过程在非欧空间的统一表达,实现对兼顾平面与球面、欧氏空间与曲面空间中不同维度的流形对象与非流形对象,以及连续对象与离散对象的统一表达^[19]。因此以科学的时空观为指导,引入几何代数这一现代数学方法进行 GIS 数据模型构建,可建立时空统一的地理对象的描述框架,并有望在地理对象和地理现象的多维表达、分析与建模方面取得突破。

笔者研究了几何代数时空表达中几何、语义、关系及属性信息的特征及约束的结构化描述方法,建立语义结构、属性信息与空间关系的嵌入与映射方法,实现几何、语义、关系、属性信息的整体表达,构建多重信息融合、连续-离散一体化的时

空统一数据模型(见图 2)。通过代数空间构建、对象抽象以及空间转换等方法实现几何对象表达与数据组织,利用几何代数空间中的运算规则与算子算法实现对象运算,进而实现多重信息融合的代数化表达^[20]。几何代数对不同空间的统一与集成简化了不同坐标系统下几何对象表达与转换的复杂度,相关空间数据的组织、存储与运算可同时兼容平面及球面坐标系统从而可实现地理对象坐标系统自适应的多维统一表达与构建。几何代数在基本运算层面直接内蕴包含了几何对象的统一运算,使得基于几何代数的对象表达可从底层直接支撑计算^[21]。几何与代数相统一的表达与计算方式可为复杂、动态环境下的空间关系计算提供新的理论及方法^[22]。

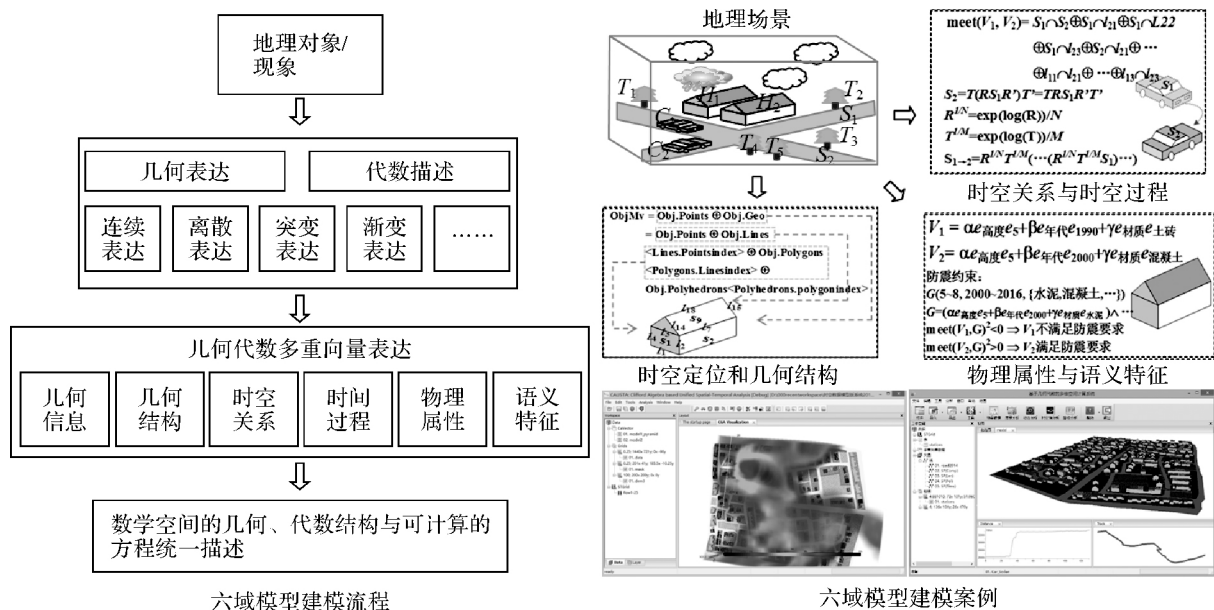


图 2 基于几何代数的六要素数据模型

Fig.2 Six-element expression model based on geometric algebra

3.2 地理规律驱动与相互作用驱动的 GIS 数据结构

数据结构是连接高维地理时空数据与现有计算机体系的关键性桥梁,也是直接决定数据的组织、检索、分析与表达的关键所在。当前 GIS 数据结构的构造主要从计算机视角加以构建,较少涉及地理规律的整合表达。基于此,笔者提出以地理学第一、第二定律为基础的空间数据组织模式^[23]。从地理数据的分布特征和结构出发,构建启发式的空间数据探测规则,引入时间距离、空间

距离、对象距离的表达以及空间相似/异质的定量描述方法,建立多目标优化数据划分方法,构建可表征数据内蕴地理规律的层次空间索引树及时空数据增量更新方法,可以很好地在顾及空间分布模式的前提下,实现对空间临近、数据均衡、空间重叠度等条件的均衡。进而构造数据应用情景驱动的内外存一体化的时空数据结构及与之对应的时空索引存储结构和调度方法,有效提升海量的具有时空特征地理数据的组织、管理、调度、分析和可视化能力。

传统的 GIS 数据结构以点线面为基础,未能考虑不同交互界面上的非对称性与耦合关系的差异。在地理模型中,以格点、格边、格元为基础的模型格网则通过不同界面上的耦合作用结构来支撑对复杂地理相互作用影响过程的描述和表达。如何以统一的空间数据框架有效地组织与管理这些不同分辨率、类型多样的海量空间数据,与覆盖全球的地球系统模式相耦合,进而实现对地理模型的有效支撑依然是当前地理要素相互作用表达以及 GIS 数据结构设计的难点所在。在面向地理相互作用的数值模型构造方面,笔者扩展了现有全球离散格网系统的编码表达结构^[24],将其从单一的格元表达扩展至格点、格边与格元的统一表达,以此作为综合表达不同类别的地理现象、对

象演化过程的基础格网系统。将空间填充曲线引入现有的格网系统上,通过对各类格网组成要素的编码,实现面向多尺度空间数据的全球离散格网系统与地球系统模式中的底层数据结构的统一。此外,针对三维空间中数值模型的集成,研究了三维表面模型的空间离散方法,充分顾及实体外部边界及内部点、线、面、洞等特征约束,将空间对象离散为优化的四面体、规则六面体及不规则六面体网格,为三维 GIS 支持地理计算提供了支持。同时,球面 MEC 格网系统直接支持海洋数值模式,实现了全球三维板块数据建模与可视化,并采用二维垂向平均潮波运动方程组建立中国近海潮波数学模型,实现了对中国近海潮波运动的模拟与可视化表达(见图 3)。

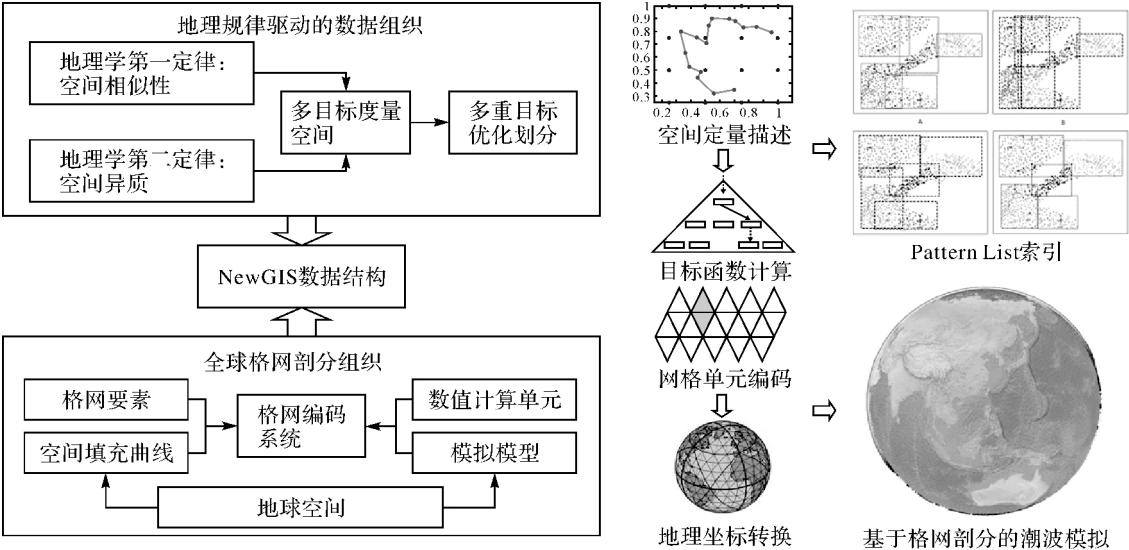


图 3 数据组织
Fig.3 Data organization

3.3 非结构化时空数据的组织与存储技术

时空数据的组织与存储也是新一代 GIS 构建的重要需求。由于地理数据多具有显著的非结构特征,导致高维的空间数据与计算机一维线性寻址和存储方式间的矛盾、非结构化空间数据与结构化内外存单元间的矛盾以及非均匀地理空间分布与匀质的内外分布之间的矛盾成为难以调和的矛盾。非关系数据库摒弃了关系数据库的 ACID 模型,利用松散的、非结构化的方式进行数据的组织与存储,这种数据存储不需要事先设计好表的结构,也不会出现表之间的连接操作和水平分割,因而具有高可用性、高可靠性和高性能。

基于非关系数据库和空间数据的特点,充分

应用云计算的软硬件技术,突破多模式海量空间数据的一体化表达、并行组织、分布式存储和快速访问等技术瓶颈,可以有效提升海量时空数据组织的表达的效率与水平。对面向大数据应用的 Hadoop、BigTable、MongonDB、Memcached 等新兴数据组织与管理技术进行改造与扩展,针对不同类型地理时空数据的内蕴特征与新兴数据库技术进行适应性分析、适配与改造,构建基于非关系型数据库的空间数据分布式存储方法。从探测空间数据内蕴的空间分布和分异规律出发,综合使用空间填充曲线、半变异函数、QA、KDE 等定量分析方法构建 Pattern List 空间索引,解决了内外存一体化的快速空间索引^[25]。在数据更新中,

通过引入“量变”与“质变”策略,避免空间索引频繁重构,优化批量插入效率,采用能够适用于各种分布数据类型的空间分布模式进行驱动,初步形

成了一种全新的 GIS 数据模型、数据结构,以及新型的数据压缩、数据传输方法,极大地提高了数据存储、数据传输、数据分析的效率(图 4)。

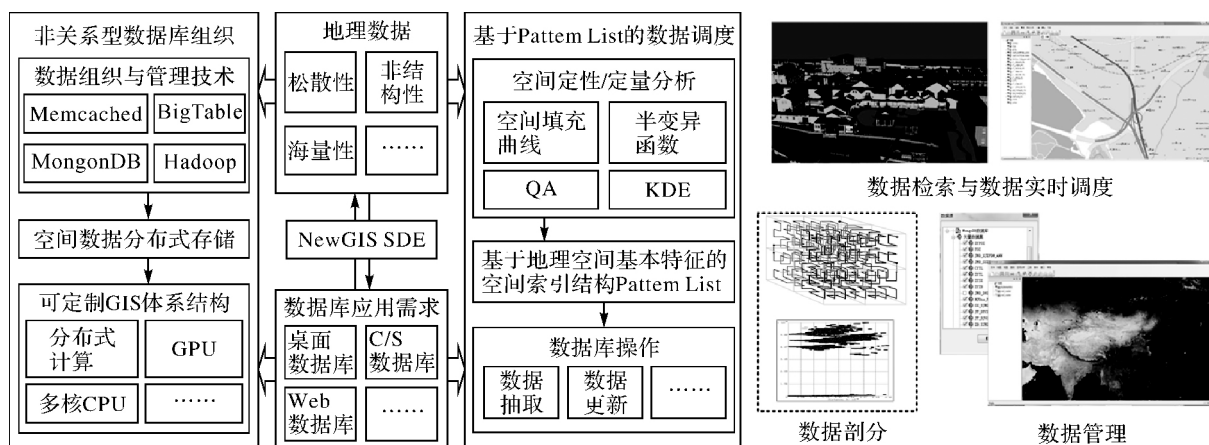


图 4 数据组织与存储技术

Fig.4 Data organization and storage technology

4 地理学视角下的地理信息全息地图表达

数字空间、电子载体的出现,使得地图正向着三维空间、实时动态、虚实融合的方向发展,物理全息或计算机全息技术得到广泛应用,地图语言正实现从地理学语言到大众交流的普适性语言的转变。以地图模型为基础的 GIS 对地理信息的表达主要集中在地理空间格局上,对地理过程、要素相互作用以及地理规律的表达相对薄弱。基于地理学视角的地理信息表达不仅需要综合考虑不同层次、不同尺度、动静耦合、全局和局部嵌套的地理场景的整体表达,更要强调在地理场景中各种地理规律的表达,既能对地理与社会的全方位、多模式三维动态可视化提供支撑,又具有各类地图、场景 GIS 分析与应用功能。地理学视角下的地理信息再透视及相关信息表达、建模与分析技术为以全视角、全要素、全信息、全内容,以及地理规律表达为基本特征的基于场景的地理信息全息地图表达提供基础。

全息地图需要对场景中的全地理、全社会信息进行“地图”表达,是数字化世界的全方位解读,从而实现地理或社会现象及其规律的地图表达或地理场景表达。以地理六要素为基础建立统一的场景数据模型,将地理空间的连续性与离散性,时间与空间,地理空间关联性与分异性特征进行集

成,构建全息地图数据表达和统一的球体空间网格框架,为开展地理格局分析、过程模拟和要素相互作用提供重要基础。此外,在全息地图表达中,需要以地理规律为基础,设计多维度场景中兼顾时空分布、演化过程和要素相互作用的场景自适应综合与多模式展示方法。在六要素表达模型基础上研究以地理语义为基础,地理规律为驱动的全息地图三维符号、动态符号等符号表达方法与理论,建立虚/实、静/动、连续/离散、低维/高维场景融合的全息地图融合表达模型,是进行全息地图地理时空格局、演化过程和要素关系表达的重要基础。最后利用数字地图、虚拟现实和全息成像等多种形式对地理过程、要素相互作用以及地理规律加以综合呈现,实现地理学视角下的地理信息全息表达

5 结论与展望

从地理学视角进行地理信息的构建需要同时兼顾数据表达、数据分析和数据交换的目标,需要在数据模型、数据结构、数据组织、压缩、传输和共享等方面进行综合平衡与整合统一,需要构建统一的数据模型,有效整合数据分析模型、数据表示模型、数据编码规范、空间参考模型、接口规范 API、传输格式等^[26]。从全要素建模、多视角观察和理解空间实体和现象的角度,有效开展地学分析和模拟,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化空间数据抽象模型,建立统一的、多层次的、开放的空间数据模型体系。该数据模型体系应能兼顾数据高效分发处理及支撑复杂空间分析,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。

从地理学对世界的描述出发,在综合地理时空数据分布特征、地理学规律以及地理知识和规则的基础上进行地理信息基础理论和关键技术的创新有助于突破传统 GIS 更偏重于测绘、地图和计算机图形学的学科羁绊。在底层数学理论基础上,构建地理世界向数学空间的抽象模式,进而构建可支撑复杂地理对象和地理现象的时空统一表达空间,形成多重要素融合的时空统一数据模型、地理规律驱动的时空索引以及可以有效利用现代计算机体系架构的数据组织与运算模式。以地理规律和地理相互作用为基础,利用数学空间的构造弹性进行新型数据结构和计算引擎设计,进而为以地理场景为基础,融合数字地图、虚拟现实和全息成像的全息地图表达提供基础,有望提升 GIS 空间计算、分析与表达的弹性和适应性,为时空大数据的管理和分析奠定理论、方法和技术基础。

致谢:南京师范大学地理科学学院吴明光副教授、周良辰副教授、罗文博士参与了本文部分内容的撰写,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] BERRY J K. Map Analysis-Understanding Spatial Patterns and Relationships[M]. Denver: Press of University of Denver, 2007.
- [2] GOODCHILD M F. Geographical Information Science[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6(1): 31-45.
- [3] LONGLEY P A, GOODCHILD M F, MAGUIRE D J, et al. Geographical Information Systems and Science[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [4] GOODCHILD M F, YUAN M, COVA T J. Towards a General Theory of Geographic Representation in GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007, 21(3): 239-260. DOI: 10.1080/13658810600965271.
- [5] FREDERICO T, EGENHOFER M. Ontology-driven Geographic Information Systems[C]// MEDEIROS C B. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. Kansas City, MO: ACM, 1999: 14-19.
- [6] 李德仁, 崔巍. 地理本体与空间信息多级网格[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 143-148.
LI Deren, CUI Wei. Geographic Ontology and SIMG[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 143-148.
- [7] WORBOYS M F. Object-oriented Approaches to Georeferenced Information[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1994, 8(4): 385-399.
- [8] PEUQUET D J, DUAN Niu. An Event-based Spatiotemporal Data Model (ESTDM) for Temporal Analysis of Geographical Data[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9(1): 7-24.
- [9] EGENHOFER M J, AL-TAHA K K. Reasoning About Gradual Changes of Topological Relationships [M] // FRANK A U, CAMPARI I, FORMENTINI U. Theories and Methods of Spatio-temporal Reasoning in Geographic Space. Berlin: Springer, 1992: 196-219.
- [10] 龚健雅, 李小龙, 吴华意. 实时 GIS 时空数据模型[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 226-232, 275. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0033.
GONG Jianya, LI Xiaolong, WU Huayi. Spatiotemporal Data Model for Real-time GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(3): 226-232, 275. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0033.
- [11] LANGRAN G. Time in Geographic Information Systems [M]. London: Taylor & Francis, 1992.
- [12] 陈军, 陈尚超, 唐治锋. 用非第一范式关系表达 GIS 时态属性数据[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(1): 12-17.
CHEN Jun, CHEN Shangchao, TANG Zhifeng. Representing Temporal Attributes in GISs Using Non-1NF Approach [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995, 20(1): 12-17.
- [13] FREKSA C, HABEL C, WENDER K F. Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [14] MARK D M, EGENHOFER M, HORNSBY K. Formal Models of Commonsense Geographic Worlds: Report on the Specialist Meeting of Research Initiative 21[EB/OL]. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. [1997-02-15][2017-08-16]. <http://www.geog.buffalo.edu/ngia/i21/i21report.html>.
- [15] 孙敏, 陈秀万, 张飞舟. 地理信息本体论[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 6-11, 39.
SUN Min, CHEN Xiuwan, ZHANG Feizhou. Geo-ontology [J]. Geography and Geo-information Science, 2004, 20(3): 6-11, 39.
- [16] MANYIKA J, CHUI M, BROWN B, et al. Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition and Productivity[R]. New York: McKinsey & Company, 2011.
- [17] 周成虎. 全空间地理信息系统展望[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 129-131.

- ZHOU Chenghu. Prospects on Pan-spatial Information System[J]. Progress in Geography, 2015, 34(2): 129-131.
- [18] DIJST M. Space-time Integration in a Dynamic Urbanizing World: Current Status and Future Prospects in Geography and GIS Science [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2013, 103(5): 1058-1061.
- [19] YUAN Linwang, YU Zhaoyuan, CHEN Shaofei, et al. CAUSTA: Clifford Algebra-based Unified Spatio-temporal Analysis[J]. Transactions in GIS, 2010, 14(S1): 59-83.
- [20] YUAN Linwang, YU Zhaoyuan, LUO Wen, et al. A 3D GIS Spatial Data Model Based on Conformal Geometric Algebra[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54(1): 101-112.
- [21] YUAN Linwang, LÜ Guonian, LUO Wen, et al. Geometric Algebra Method for Multidimensionally: Unified GIS Computation[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(7): 802-811.
- [22] YU Zhaoyuan, LUO Wen, YUAN Linwang, et al. Geometric Algebra Model for Geometry-oriented Topological Relation Computation[J]. Transactions in GIS, 2016, 20(2): 259-279.
- [23] 吴明光. 一种空间分布模式驱动的空间索引[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 108-115. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130245.
- WU Mingguang. A Spatial Distribution Pattern-driven Spatial Index[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 108-115. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130245.
- [24] 周良辰, 盛业华, 林冰仙, 等. 球面菱形离散格网正二十面体剖分法[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1293-1299. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0192.
- ZHOU Liangchen, SHENG Yehua, LIN Bingxian, et al. Diamond Discrete Grid Subdivision Method for Spherical Surface with Icosahedron[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1293-1299. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0192.
- [25] 吴明光. Hilbert 填充曲线与空间分布模式探测的点数据集空间划分方法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(10): 1336-1342.
- WU Mingguang. Hilbert Space-filling Curve and Spatial Pattern Detection-based Spatial Partitioning Approach to Point Geospatial Data[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(10): 1336-1342.
- [26] LÜ Guonian, YU Zhaoyuan, ZHOU Liangchen, et al. Data Environment Construction for Virtual Geographic Environment [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(10): 7003-7013.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2017-06-23

修回日期: 2017-07-27

第一作者简介: 闫国年(1961—),男,教授,博士生导师,研究方向为地理信息系统理论与应用。

First author: LÜ Guonian (1961—), male, professor, PhD supervisor, majors in geographic information science theory and applications.

E-mail: gnlu@njnu.edu.cn