

时空数据模型综述

陈新保^{1,2}, Songnian Li¹, 朱建军², 陈建群²

(1. 瑞尔森大学土木工程系, 加拿大多伦多; 2. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083)

摘 要:虽然相对传统的 GIS 数据模型而言,人们对时空数据模型的研究起步较晚,但是大量的时空数据模型已经被提出了。在综述已有时空数据模型时,就如何区别时空数据模型的异同,众多研究人员和学者更多地是比较模型优缺点或罗列和陈述各模型针对某一案例的实践和应用,而没有阐述模型间的本质区别,没有过多地解释模型扩展及其关联性,也就无法跟踪已有模型的扩展、变异和发展趋势,最终导致在选择模型的应用、实践和整合其他非-时空数据模型时,不能做出最优抉择。与众多相关时空数据模型的综述文献不同,本文进一步提升和归纳已有模型,主要集中叙述众多相关时空数据模型的扩展和关联性,阐述模型间的本质区别,呈现模型的演变过程,从而为人们在应用和实践时空数据模型时提供科学的指导,为模型的扩展和新模型的研究提供理论依据和参考。

关 键 词:时空数据模型;扩展;关联性

1 引言

近 20 年来,随着以空间数据库为基础的 GIS 研究和应用的不断深入,随时间而变化的信息越来越受到人们的广泛关注^[1]。而时态 GIS 的提出及实践,在诸如地籍变更^[2]、环境监测、城市演化、交通管理、地震救援、全球或区域气候^[3]、军事战场态势分析、国家大型基础地理数据库建设^[5,6]等领域都得到了大量的应用,有效保存和管理了历史变化数据,并能模拟和实现历史状态、跟踪变化、预测未来等过程和功能。

作为时态 GIS 的核心研究内容——时空数据模型,是时态 GIS 的最重要的组成部分,是能否实现时态 GIS 良好应用的前提条件。正因如此,国内外研究者和技术人员对此展开了大量的研究和实践,并由此产生众多时空数据模型的综述性文献。国外有代表性的有 Langran^[7,8]、Peuquet^[9,10]、Yuan^[11]和 Pelekis et al.^[12]等。其中 Langran^[7]最早就前人关于时空模型的成果进行了文献性总结和讨论,主要从计算机模型入手,总结了 4 种模型,即立方体模型(space-time cube model)、快照模型(snapshots)、基态修正模型(the base state with amendments model)和

时空组合模型(space-time composites)等,其后在其专著——也是最早一部时空著作,被学者认为是时态 GIS 研究的正式标志的书籍《Time In Geographic Information Systems》中,作了更详细的回顾和阐述;Peuquet^[10]则从时间所要表达的本质和特性出发,对已有的模型进行归纳和评述,即它们是基于位置的时空表达、基于实体的时空表达、基于时间的时空表达和基于事件的时空表达等;Yuan^[11]对基于时间标签(包括快照模型、时空复合模型、时空对象模型^[37])的模型和基于事件或过程的时空模型(包括 ESTDM(Peuquet & Duan,1995)、地形空间模型(OO-geomorph, Raper & Livingstone, 1995)和三域模型(the three domain model,Yuan 1994;A process-oriented or semantics approach, Yuan 1996))两大类的相关模型进行了论述。Pelekis et al.^[12]则用图来实例化模型的方式详细说明了 11 种模型。

国内学者对时空模型的综述性文献,主要多参照国外的综述成果,多从时空数据模型的应用领域出发,对其进行总结。其中尹章才和李全^[13]以土地划拨案例,对时空数据的存储管理和语义表达,总结和阐述了国内外比较实用的 10 种时空数据模型,这些时空数据模型有时空立方体模型、连续快照模

收稿日期:2008-03;修订日期:2008-09.

基金项目:国家留学基金项目(2007-3020)。

作者简介:陈新保(1980-),男,湖南桂阳人,加拿大瑞尔森大学访问博士生,现从事时空模型、高级时空分析和协作式下的网络分析等方面的研究,已发表论文 4 篇。E-mail:chenxinbao_520@hotmail.com

通讯作者:朱建军(1965-),教授,博导,主要从事空间误差分析及模型构建等研究。E-mail:zjj@mail.csu.edu.cn

型、基态修正模型、时空复合模型、第一范式(1NF)关系时空数据模型、非第一范式(N1NF)关系时空数据模型、基于事件的时空数据模型、面向对象的时空数据模型、基于 Voronoi 图的时空数据模型和基于图论的时空数据模型等。黄照强和冯学智^[14]从模型的基本原理、特点和缺陷等方面,采用列表的形式对主要的时空数据模型进行了归纳,认为应该充分考虑地理现象的特征类型,标志特征类型的属性、关系及操作,建立基于特征的时空数据模型,有利于克服其他数据模型地理分层所带来的无缝连接等一系列问题和局限性。姜晓轶等^[15]从地学中的时空观应用出发,论述了时空数据模型的研究现状与发展趋势,就几类有代表性的模型原理和特点进行了详细介绍,并建议从系统理论角度出发,分析、模拟地学现象的基本变化与过程,建立面向对象和过程的、基于时空语义的、符合人类逻辑思维的时空数据模型方法。王贺封^[16]对早期主要的 TGIS 模型(空间时间立方体模型、序列快照模型、基态修正模型、空间时间组合体模型、面向对象的时空数据模型等)进行了讨论和评价,但对后来所发展或扩展的时空模型,如 N1F 时空模型(陈军 1997)、基于网络

时空规划模型(Ed Nash)和基于语义的时空数据模型(Yuan 1995;徐志红等 1997)等没有论述。

就众多时空数据模型的综述文献来看,可以发现,人们只注重罗列和比较已有模型的优缺点和案例应用分析,更多的是在阐述某种模型的特征,而很少涉及该种模型与其他模型的关系和本质区别;而区别模型的异同,又更多的是从表面入手,不能从本质上提出更好的分类方法,来阐述模型间的本质区别,从而无法跟踪已有模型的扩展、变异和发展趋势。最终在选择模型的应用、实践和整合其他非-时空数据模型时,不能做出最优抉择。

为了更好地阐述众多模型的关系和本质区别,本文在参考李玉兰^[17]的分类方法基础上,增加了‘侧重于时空目标本身和时空关系描述’一项,即根据所描述的时空目标本身情况不同,分成三类。完善后的此方法能在覆盖大多数模型的同时,从本质上区别各类模型的异同(表 1)。下面主要梳理各类时空数据模型的特征和模型关联性,比较优缺点的同时,重在阐述各类模型的扩展和变异,从本质上解释众多模型的异同。

表 1 时空数据模型分类方法和归类情况表
Tab.1 The classification methods and category of the spatiotemporal data model

| 分类方法 | 类别 | 模型归类 | 适合范围 |
|--------|------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|
| 时空数据模型 | 侧重于对时空实体状态本身的描述 | 如序列快照模型,基态修正模型,时空立方体模型,时空复合模型以及陈军的非一范式关系时空模型等 | 矢量数据,但更适合栅格数据,可以跟CA模型进行扩展 |
| | 侧重于时空实体变化过程 | 如基于事件驱动的时空数据模型、定性因果模型、基于图论的时空数据模型和基于过程(Voronoi)的时空数据模型等 | 栅格或矢量数据,可以做时空推理分析 |
| | 侧重于时空实体本身和时空关系描述 | 如时空立体模型,面向对象时空数据模型,面向特征和地理本体时空数据模型等 | 矢量数据,可以做时空规划分析 |

2 主要时空数据模型的扩展

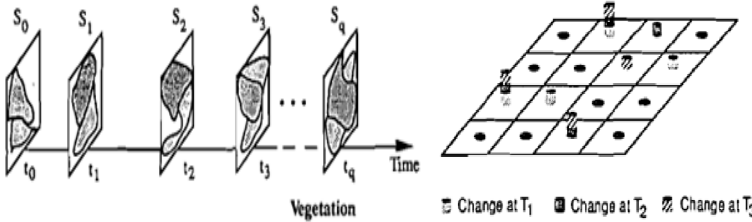
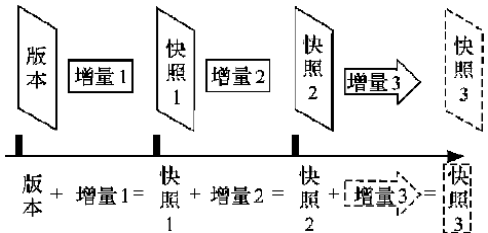
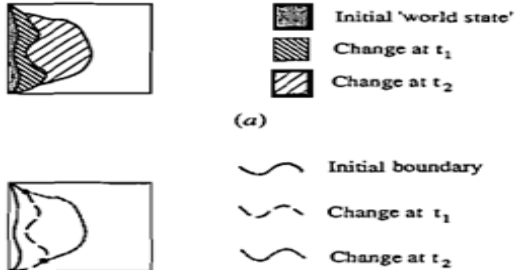
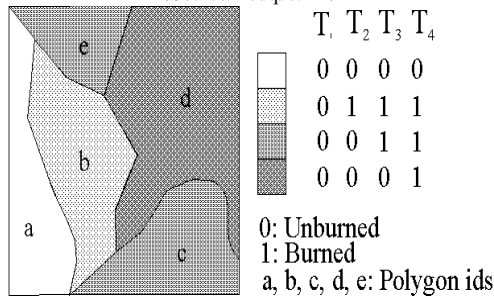
2.1 侧重状态描述的时空数据模型

侧重状态描述的时空数据模型,也称为基于时间标志的时空模型,是基于早期所提出的时空数据模型,是 GIS 空间数据模型(矢量与栅格模型)的扩展,包括时空立方体模型、快照序列模型、基态修正模型和时空复合模型等(表 2)。Langran^[7]和 Peuquet^[9]对早期所提出的侧重状态描述的时空数据模型进行了描述和综述:状态是指描述地理现象的空间分布;时空立方体模型、快照序列模型是对整个数据集的快照,是不同于数据集的硬拷贝,冗余量大,而

基态修正模型、时空复合模型只保存数据库中变化的内容,对于没有更新变化内容,只物理存储一次,冗余量小。此类模型的共同特征是侧重对时空现象或目标状态本身的描述,把时间作为空间对象的一个属性,众多变化通过累积的方法以状态的方式呈现。空间信息技术特别是多源遥感方法的使用,为土地利用动态监测提供了快速、高效的手段,从不同时相的影像中,可比较快捷、准确地提取土地利用的变化,因此,从遥感影像直接或间接提取的变化信息,多采用此类基于状态(栅格)的时空模型表达和存储^[18]。然而,此类模型无法表达时空对象关系和变化过程是其最大缺点。

表 2 侧重状态描述的主要时空数据模型

Tab.2 The main spatiotemporal data models focused on the states

| 模型图 | 模型描述 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div><p>(a) 序列快照模型 (Source: Peuquet^[10])</p><p>(b) 基于快照-增量的时空模型 (Source: 尹章才等^[18])</p></div> | <p>(3) 序列快照模型 (Series Snapshot Model)及其扩展</p> <p>最早由 Armstrong [1988]提出的, 如左图(b)所示, 每一层(S_i)是在时刻(t_i)一系列数据状态的集合, 其缺点是无法确定任意两层间隔里的变化对象以及由未变化数据的也产生累加所造成的大量数据冗余。</p> <p>此模型的一种改进, 就是基于时态栅格模型^[8], 如左图(b)所示, 阵列格网的每个位置以变长列表的形式来表示空间随时间变化的累积的空间变化量, 其优点就是它只存储特定位置上的变化, 可避免数据冗余, 非常适合栅格数据的时空分析。缺点就是数据库实现复杂。</p> <p>国内学者尹章才等^[18]所提出的基于快照-增量的时空模型, 如左图(c)所示, 采用版本表示地理现象的状态, 用增量表示基于版本的时空现象变化, 此模型是序列快照模型和基态修正模型的扩展, 是两种模型优势互补的结果。但是, 随着时间的推移, 增量数据越来越大, 查找快照与版本之间的增量是非常困难的, 需要建立基于增量的时空索引机制。另外田娇娇等^[5]提出的动态‘版本-差量’模型, 本质类同。</p> |
| <div><p>(a) 基态修正模型 (Base State with Amendments Model) (Source: Peuquet^[10])</p><p>(b) 时空复合模型 (Space-time compound model) (Source: May^[11])</p></div> | <p>(2) 基态修正和时空复合模型</p> <p>基态修正模型, 只存储基态 (初态) 和累积变化的对象, 如左图(a)所示。由于基态修正模型, 每次变化时存储的量是基态和累积变化的对象, 存储量大, 而时空复合模型, 如左图(b)所示, 存储的是基态和此次变化的对象, 存储量小, 但变化增多导致碎片加大。两者的本质是一样的, 只是它们存储对象不同而已, 所以说时空复合模型是基态修正模型的扩展和改进。此两种模型都存在‘无法处理时空对象的空间关系和检索效率低’等缺点。</p> <p>国内相关人员, 如李勇等^[20]就传统的基态修正时空数据模型对历史数据的存储和检索效率较低的问题, 采用对象变化临界指数确定基态距的方法, 对传统的基态修正模型进行改进, 提高了历史数据的存储和检索效率。但对时空数据的空间关系问题并没有解决, 需通过对基态修正模型进一步的扩展研究。又于郑扣根等^[21]提出了一个基于状态和变化的统一时空数据模型 (SCUDM), 由时空复合模型发展而来, 用对象域、空间域和时间域来表达状态, 该模型能较好支持状态和变化的表达的同时, 也能支持时间拓扑和空间拓扑的表达。刘勇和李成名^[6]提出了较完整的基于基态修正模型的空间数据库组织和完整的更新流程, 并给予验证。</p> |

2.2 侧重过程描述和因果分析的时空数据模型

为了能重现地理现象的变化过程, 许多基于单体变化或事件的时空数据模型被提出, 此类模型的主要特征: 描述时空变化 (事件) 过程, 并对触发这种变化 (事件) 的原因和结果进行表达和分析。其中, 基于事件的时空数据模型最具有代表性, 基于

图论的时空数据模型则居其次 (表 3)。基于事件的时空数据模型能显式存储事件序列, 顾及了状态与因果关系, 此类时空模型最早由 Peuquet^[9]提出, 将某一空间区域 (location) 的每次状态变化 (形状、属性等) 视为一个事件, 用一维时间轴上的事件序列 (event list) 表示时空过程。之后, 国内外大量的模型

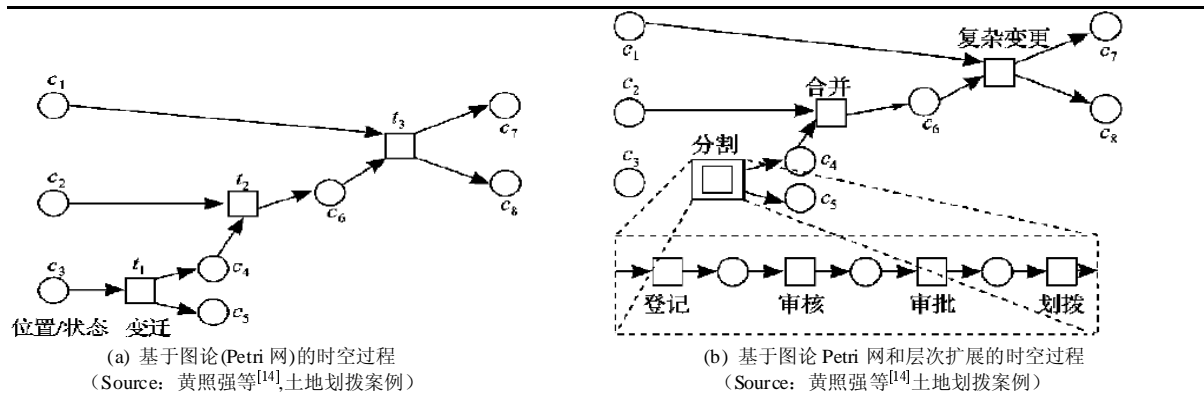
表 3 侧重过程描述和因果分析的主要时空数据模型

Tab.3 The main spatiotemporal models focused on process and causal analysis

| 模型图 | 模型描述 |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(a) 基于事件的时空数据模型 (Source :Peuquet^[9])</p> | <p>(1) 基于事件的时空数据模型及其扩展</p> <p>EBSTDM 模型，即基于事件的时空数据模型。最早由 Peuquet 于 1994 年提出，如左图 (a) 所示，将某一空间区域 (location) 的每次状态变化 (形状、属性等) 视为一个事件，用一维时间轴上的事件序列 (event list) 表示时空过程，但其用事件表示的是空间目标状态的变化，而不是其变化的原因。</p> |
| <p>(b) 基于事件的改进基态修正时空数据模型 (Source: 程昌秀^[26])</p> | <p>针对 EBSTDM 模型的时空数据查询效率低的问题，程昌秀^[26]提出了基于事件的改进基态修正时空数据模型，如左图 (b) 所示；另外王艳波^[27]引进中间态和基态，余志文等^[28]提出了变粒度基态因子，引进多态，都有效改进了时空数据的检索效率。</p> |
| <p>(c) 基于事件和特征的时空数据概念模型 (Source: 陈秋计等^[30])</p> | <p>蒋捷和陈军^[25]扩展了‘事件’的范畴，认为‘事件’不但是时空目标状态终结或开始的标志，而且是引发状态变化的原因，增强了此类模型的驱动‘事件’原因分析。</p> <p>基于事件和特征的时空数据概念模型^[29]^[30]是 EBSTDM 模型的扩展，如左图 (c) 所示，认为特征是指具有公共特性的地理现象和特征实例，多个特征构成一个事件，特征的变化是引发事件的原因，特征的引入，有利于维护数据的完整性，适合现有 GIS 软件组织时空数据。但就如何更好地组织和分析连续变化的地理特征，需要进一步研究。</p> |
| <p>(d) ESTDM 扩展模型 (Source: 陈秀万等^[31])</p> | <p>陈秀万等^[31]就如何描述同地理事件关联以外的属性以及 ESTDM 模型采用栅格结构所导致的多属性描述局限性，对模型进行了改进，提出了通过模型的属性索引来访问“外部”属性数据的方法，如左图 (d) 所示。但由于时态序列本身就是采用栅格结构，而对于矢量格式的数据，该模型进行关联和分析比较困难。</p> <p>总之，EBSTDM 模型在引发过程变化的原因分析和表达方面，有待加强。</p> |

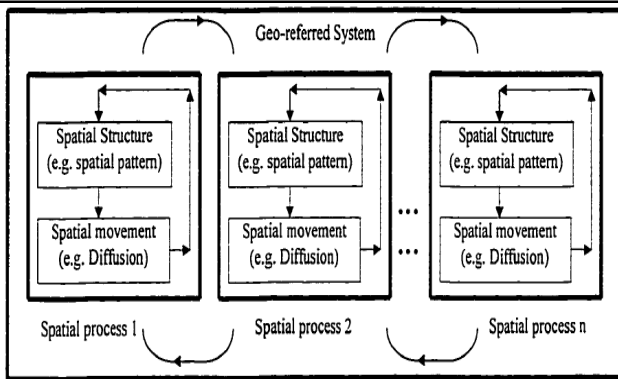
都对此模型进行了扩展和赋予新的“事件”意义。Claramunt C 等人^[23]将事件定义为改变实体的处理 (Processes), 以空间目标的版本 (object version) 变化来描述事件。Allen 等人^[24]亦将事件定义为空间对象

状态改变, 提出“因果联系”模型 (causal model); 其局限性在于未定义事件之间的因果关联。国内学者蒋捷和陈军^[25]在前人的基础上, 对土地划拨过程的分析, 针对审批事件的特点及其对时空地块状态变



(2) 基于图论的时空数据模型(The history Graph Model)

基于图论 (Petri 网) 的时空模型记录了空间信息的位置状态和变迁(事件/活动),把位置状态和变迁作为描述时空变化的同样重要的两个方面,显式地表达了时空数据及时空拓扑关系,提供了丰富的语义,另外通过将 Petri 网转换为马尔科夫链,对地理信息系统时空分析的性能可进行定量分析。Petri 网以研究模型系统的组织结构和动态行为为目标,它着眼于系统中可能发生的各种状态变化以及变化之间的关系。Petri 网易于表示系统变化发生的条件及变化发生后的系统状态。国内学者尹章才等^[32]和黄照强等^[14]作了类似描述和相关扩展,如上图 (a) (b) 所示。此模型极大增强了因果关系的表达和丰富了时空拓扑语义。



(a) 时空过程系统 (Source: Pang^[33])

(3) 面向过程的时空数据模型

(Process-based Spatiotemporal Data Model)

时空对象的特征变化过程、空间关系以及时序关系的表达在时空数据模型的研究中讨论得比较广泛而深入,但是针对时空中的相互作用过程及存在于其中的时空因果联系研究目前仍显不足,需要进一步研究。于是人们又提出了面向过程 (Process-oriented)或面向对象过程的时空数据模型^{[33][34]}。

化的影响规律,提出了层次结构土地划拨事件及其与时空地块状态因果关系的描述方法。

2.3 侧重时空对象及其关系描述的时空数据模型

侧重时空对象描述及其时空关系的时空数据模型以时空对象描述为主体,以面向对象技术为基础,模拟和描述现实世界地理空间的复杂对象,克服了传统地理数据模型的局限性,改进和提高了系统的性能。虽然面向对象技术在建模概念、理论基础和实现技术上还没有达成共识,不够成熟,但它以更自然的方式对复杂的时空实体和现象模型化,是支持时空复杂对象建模的最有效手段^[35]。该类模型的核心思想,以描述时空对象为主体和时空关系为目的,是以面向对象的基本思想来描述和组织地理时空现象,将时间、空间及属性在每个时空对象中置于同等重要的地位;其中对象是独立封装的具有惟一标识的概念实体;每个地理时空对象中封装了对象的时态性、空间特性、属性特性和相关的行为操作及与其他对象的关系。

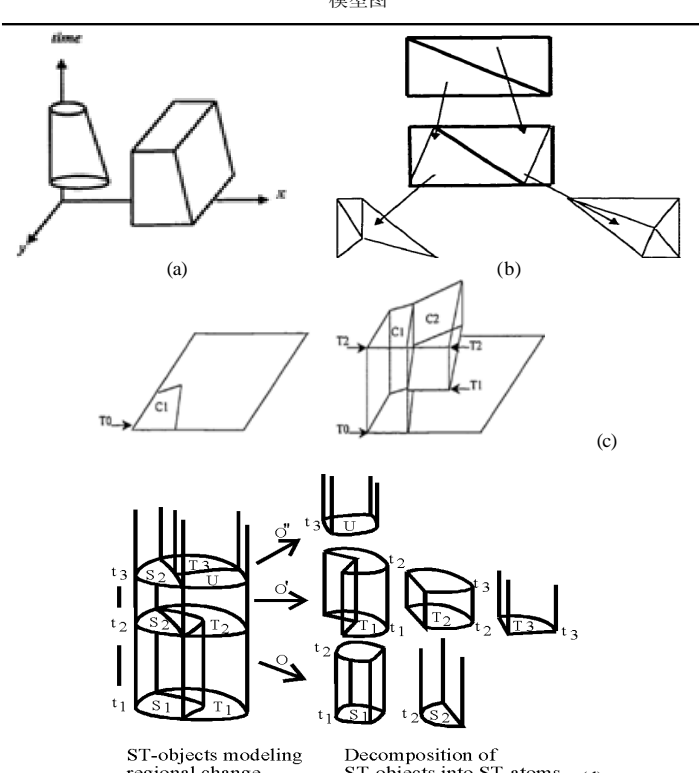
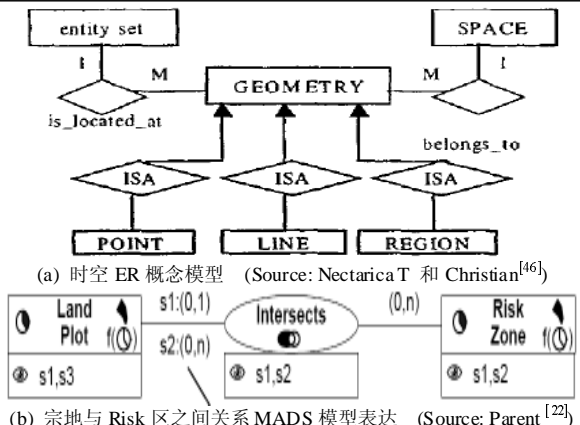
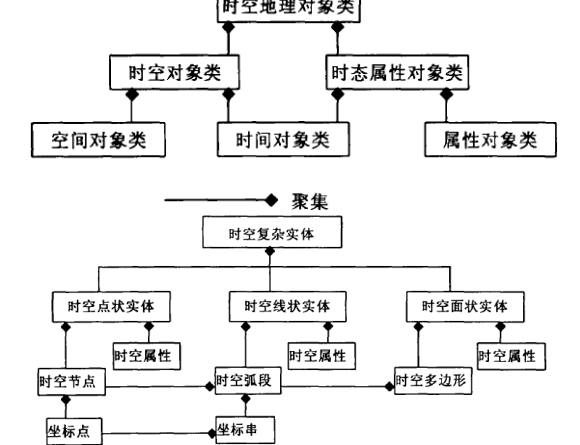
Worboys^[36]较早总结和提出一个实用的面向对

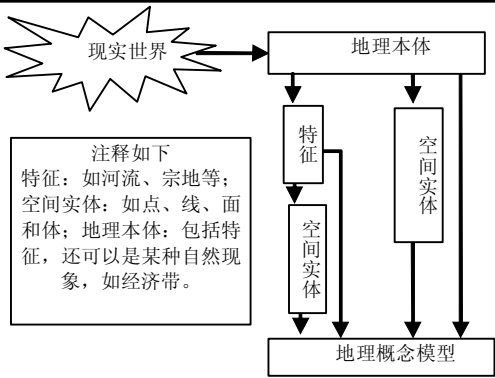
象时空数据模型(ST-objects),他认为世界是由众多的分离的单体构成,这些单体可以是整合了时间及二维空间的个体。随后,由于面向对象的构模,能表达丰富的语义、能描述复杂对象的功能以及有很强的数据抽象能力等优点,吸引了大量的研究人员和学者,将研究的兴趣放在利用面向对象技术进行时空数据模型的建立上。国外的 Worboys^[37]、Renolen^[38]、Limpouch^[39]、Li^[40]、国内的龚健雅^[41]、舒红^[42]、曹志月^[35]、林广发^[43]、张山山^[44]、金培权^[45]等对面向对象的时空数据模型进行了扩展研究。相关侧重时空对象及其关系描述的主要时空数据模型和其扩展描述见表 4。

侧重时空对象及其关系描述的时空数据模型采用面向对象的思想,语义表达和建模能力都得到了很大的加强。面向对象的时空数据模型利用 OOP 技术,将目标抽象为对象(空间对象和地理对象)的同时,将时间维引入到对象,连同对象的属性和操作进行封装,这样有利于打破传统关系模型范式的限制,直接支持对象的嵌套和变长记录。然而,

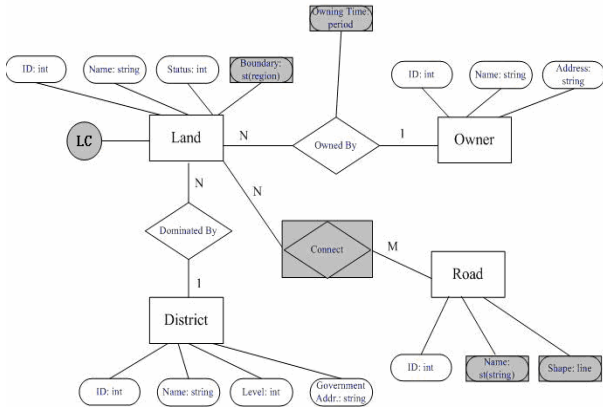
表 4 侧重时空对象及其关系描述的主要时空数据模型

Tab.4 The main spatiotemporal data models focused on ST-objects and relations

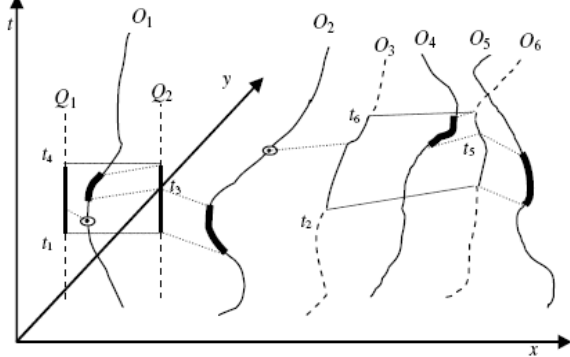
| 模型图 | 模型描述 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>(a) (b) (c) (d)</p> <p>ST-objects modeling regional change Decomposition of ST-objects into ST-atoms (d)</p> | <p>(1) 时空立体模型 (Space-Time Cube Model) (左图 a,b,c 来源: Pang^[33]; d 来源: Worboys^[36]) 最早由 Hagerstrand 于 1970 年提出,如左图(a)所示,用几何立方体表示二维或三维的时空对象,空间对象的每次变化都会重生成一个新的时空对象,用 3D/4D 对象链来表达区域历史变化。此模型另外一种变异,如左图(b)所示,T_0 刻的 $C1$ 为基态(不变)和高度各表示空间和时间。时空立体模型缺点有冗余量大,对象 Id 无约束,操作复杂。如左图(c)为地形时空模型的金字塔式立体表示。 Worboys^[36]所提出的面向对象的时空数据模型就是时空立体模型的原型,如左图(d)所示。之后, Wochowicz 和 Healy 建立了一个面向对象的时空数据模型来反映现实世界的现象和事件。现实世界的现象用几何、拓扑和专题属性表达成复杂的版本对象。模型为对象的过去、现在和未来建立了层次结构,为每个对象版本建立一个带有不同标识的新的对象实例。事件是激发更新过程的体现。时间被表达为独立的线性的维; Ramachandran 发展了一种时态变化数据模型^[25]。</p> |
|  <p>(a) 时空 ER 概念模型 (Source: Nectarica T 和 Christian^[46]) (b) 宗地与 Risk 区之间关系 MADS 模型表达 (Source: Parent^[22])</p> | <p>(2) 面向对象的时空概念模型 Nectarica 和 Christian^[46]提出一种时空 ER 概念模型,如左图(a)所示,它能很好描述复杂时空对象的空间和时间语义及其关系,却无法描述时空对象的变化过程以及说明空间对象是静态还是动态。MADS 模型[Parent. Et al 2006]^[22]是一种面向对象-关系的概念模型,整合了时间和空间概念,但它没有涉及变化过程的描述,如左图(b)所示。 国内研究人员或学者,更多的是从面向对象的时空逻辑模型作了一定的扩展和实践工作;如龚健雅^[41]对时空对象模型中的数据结构实现进行了研究,建议将版本标记和字段时间标记相结合设计对象类型的数据结构。杜道生^[47]提出基于同步数据项组和碎分拓扑弧段时间标记的时态地理数据模型。随后,张山山^[44]提出了时空对象扩展模型,为时空应用概念设计提供了有力的工具。宋玮等^[48]将地理空间抽象为由时空属性对象几何组成,形成了面向对象的时空属性概念模型,并利用面向对象的图示表达语言对各对象类之间的关系进行了表达,形成了面向对象的时空属性概念模型并对时空对象约束条件及其操作进行了初步研究。姜晓铁等^[15]提出了一种通用的面向对象的时空数据模型,即 GOO-STDm。张保刚等^[50]发展了面向对象的规划道路中线时空数据模型,给出了某个时态规划路中线的数据模型定义、组成元素表结构定义以及表示规划道路时空变化记录信息的表结构。</p> |
|  <p>(d) 时空对象扩展模型 (Source: 张山山^[44])</p> | |



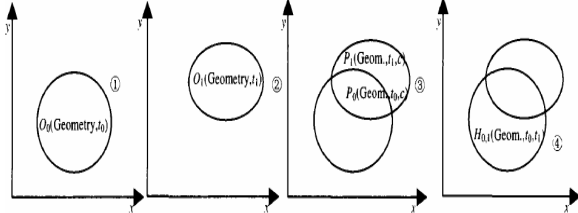
(a) 地理本体、特征、空间实体关系



(b) 基于地理本体的时空数据模型（案例）（Source: Frederico^[49]）



(a) 行驶在路上的汽车（图中加粗线为汽车行驶轨迹）



(b) 观测时刻 $[t_0, t_1]$ 移动对象的 OPH 表示（Source: 易善桢^[55]）

(3)面向特征和本体的时空数据模型

发展为两种：基于特征的时空数据模型和面向地理本体的时空数据模型，左图(a)给出两者在构模过程中的异同。两者是近年来研究热点,实质是一种面向对象的技术，以类及其实例来表达时空对象。针对时空的特殊性，对时空对象给予增强时空语义的表达能力。

陈秋计^[30]在李小娟等^[29]的基础上，提出了基于事件和特征的时空数据模型，对基于特征的时空模型进行了扩展和应用。薛存金和周成虎^[51]从时空过程的线过程入手，在分析线过程特性的基础上，分析探讨线过程时空类型，得出空间维、时间维和时空维 3 类线过程和 12 个线过程类别，进一步提出基于特征的线过程时空数据模型，但该模型缺乏对线变化过程的语义及变化成因表达。

而基于地理本体(Ontology)的时空数据模型与基于特征的时空模型，在表达时空对象本质是一样的。舒红等^[42]认为地理本体指与地理空间位置有关的任何不可再进行同一类型个体区分的事物（如油井和河流等）或某种自然现象（如行政区划、经济带）。为了深化多时态地理信息系统 (TGIS)研究，王晓栋等^[52]以时空地理实体为出发点,根据土地监测信息系统的特点将基图修正模型和组合体模型结合起来形成综合时空数据模型。

(4) 面向移动对象的时空数据模型
(Moving Objects Spatiotemporal Data)

此类模型主要研究移动对象，如行驶在路上的汽车（点），板块的移动（面）等，随时间变化的规律，移动对象的研究开始于 20 世纪 90 年代末,Wolfson 等^[1997]首先提出，以时空数据库为出发点研究空间几何对象的时间序列变化，先后提出基于时空数据库存储和查询移动对象的框架。更多的研究人员或学者主要集中于移动对象的数据库的时空检索^[53] ^[54]。

为了更好的表达移动对象的时空拓扑语义，易善桢等^[55]单独针对矢量的二维欧氏空间的平面移动对象(MO)的变化（几何对象的形状、大小等几何特性），提出 OPH 时空数据模型，该模型能反映几何时空数据的动态演化特征，以及时空拓扑关系。在移动对象的数据类型的建模方法以及在时空分析数据库管理系统 STADBS 中，陈倩等^[56]提出了基于 Realms 的二级平衡二叉树的时空数据模型。

目前真正纯面向对象的 GIS 模型比较少,仍有许多理论问题尚未得到解决^[57]。如时空变化的语义,在理论上,缺乏一种支持变化(涉及时空实体的属性、位置、形状以及拓扑关系的变化)的统一的数据表达模型。

3 小结

由于能够体现时间和空间结构的时空数据模型对时空分析具有根本的重要性,导致国内外大量的研究都集中在时空数据模型上，因此，近 20 年来,出现了二十几种重要的时空数据模型,还不包

括其扩展和变异。人们在归纳、总结已有的模型时,忽略了众多模型的本质描述和模型间的区别,没有过多地阐述模型扩展及其关联性,也就无法跟踪已有模型的发展趋势和变异,在就如何更好地去跟其他模型结合,产生更好的效果,最终在模型应用和实践上,也就无法做出正确选择。本文在比较各模型的优缺点时,重点从时空数据模型的扩展和模型间的关联性,阐述时空数据模型的发展历程和各类模型的本质区别,从而为人们在应用时空数据模型时提供科学的指导,为模型的扩展和新模型的研究提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] Arui. 时空数据模型简介 (EB/OL). <http://www.gispark.com/html/jichu/2006/1117/579.html>.
- [2] 常征,陈军,杜道生. 顾及地块时空特点的地籍数据组织及查询. 武汉测绘科技大学学报,1997,22 (3): 216~221,228.
- [3] 阎洪. 气候时空数据的样条插值与应用. 地理与地理信息科学,2003,19(5).
- [4] 陈彦君,尹迪,包磊. 海战场时空数据建模. 自动化技术与应用, 2007,26(6):53~55.
- [5] 田娇娇,唐新民,杨平等. 动态数据库模型的研究与应用. 测绘科学,2006, 31(1):123~125.
- [6] 刘勇,李成名. 城市基础空间数据库更新方法研究. 测绘科学,2006,31(4):103~105.
- [7] Langran G. A review of temporal database research and its use in GIS applications. International Journal of Geographical Information Science,1989,3(3):215~232.
- [8] Langran G. Time in Geographic Information System. Washington, DC, Taylor&Francis London,1992.
- [9] Peuquet D J. Representations of geographic space: Toward a conceptual synthesis. Annals of the Association of American Geographers, 1994, 78: 375~94.
- [10] Peuquet D J, Niu D. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. International Journal of Geographical Information Science, 1995,9(1): 7~24.
- [11] Yuan M. Temporal GIS and SpatioTemporal Modeling. 1996, http://www.ncgia.ucsb/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/yuan_may/may.html.
- [12] Pelekis N, Theodoridis B, Kopanakis I, Theodoridis Y. Literature Review of Spatio Temporal Database Models [J/OL]. 2004, <http://www.unipi.gr/faculty/ytheod/pubs/journals/ker05.pdf>
- [13] 尹章才,李全. 土地划拨中的时空数据模型研究. 国土资源遥感,2002,54(4):70~76.
- [14] 黄照强,冯学智. 基于 PETRI 网的土地变更时空过程建模. 测绘学报,2005,34(3):239~245.
- [15] 姜晓轶,周云轩,蒋雪中. 基于 OGC 简单要素规范的面
- 向对象时空数据模型. 技术应用,2006,(5):10~15.
- [16] 王贺村. 时空数据模型及 TGIS 研究. 测绘与空间地理信息,2006, 29(4):11~13.
- [17] 李玉兰. 时空数据模型的研究进展. 湖南工业职业技术学院学报, 2007,7(1):21~23.
- [18] 尹章才,李霖. 基于快照-增量的时空索引机制研究. 测绘学报,2005,34(3):257~261.
- [19] 李勇,谭建军,陈少沛等. MDA 与事件驱动的面向对象时空数据建模研究. 地球信息科学,2007,9(3): 91~96.
- [20] 李勇,陈少,陈少沛等. 基于基态距优化的改进基态修正时空数据模型研究. 测绘科学,2007,32(1):26~29.
- [21] 郑扣根,谭石禹,潘云鹤. 基于状态和变化的统一时空数据模型. 软件学报,2001,12(9):1360~1365.
- [22] Parent C, Stefano S, Esteban Z. Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications: The MADS Approach, 428~431, Springer, 2006.
- [23] Claramunt C, Marlus T. Management time in GIS: An event-oriented approach. Clifford J, Tuzhilin A. Recent Advances in Temporal Databases. New York: Springer-Verlag, 1995. 23~42.
- [24] Allen E, Geoffrey E, Yvan B. Qualitative Causal Modeling in Temporal GIS [A: ANDREWU, FRANK, KUH NW. Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS. New York, Springer-Verlag, 1995. 397~417.
- [25] 蒋捷,陈军. 基于事件的土地划拨时空数据库若干思考. 测绘学报, 2000, 29(1): 64~70.
- [26] 程昌秀,周成虎,陆锋. 对象关系型 GIS 中改进基态修正时空数据模型的实现. 中国图象图形学报, 2003,8 (6A):687~702.
- [27] 王燕波. 时态 GIS 数据的动态压缩. 工程地球物理学报, 2005,2(1):60~63.
- [28] 余志文,张利田,邬永宏. 基态修正时空数据模型的进一步扩展. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(1):100~103.
- [29] 李小娟. 基于特征的时空数据模型及其在土地利用动态监测信息系统中的应用. 中国科学院遥感应用研究所, 1999.
- [30] 陈秋计, 谢宏全. 矿区土地复垦信息系统中时态数据组织方法. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(5):717~710.
- [31] 陈秀万,吴欢等. 基于事件的土地利用时空数据模型研究. 中国图象图形学报,2003,8(8):958~964.
- [32] 尹章才,李霖,艾自兴. 基于图论的时空数据模型研究. 测绘学报,2003,32(2):168~172.
- [33] Pang Y C. Development of Process-based Model for Dynamic Interaction Process in Spatiotemporal GIS. The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [34] 杨骏,李永树,蔡国林. 面向过程的时空数据模型实现研究. 测绘科学, 2006, 12(6):22~25.
- [35] 曹志月,刘岳. 一种面向对象的时空数据模型. 测绘学报,2002,31(1):87~93.
- [36] Worboys M F. Object-oriented models of spatiotemporal information. The Proceedings of The GIS/LIS. Allanta GA: ASPERS/ACSM, 1992, 825~834.

- [37] Worboys M F. Object -oriented approaches to geo -referenced information. IJGIS, 1994, 8(4): 385~399.
- [38] Renolen A. Conceptual Modeling and Spatiotemporal Information System: How to model the Real World. ScanGIS, 1997.
- [39] Limpouch A. Object -oriented GIS for the future. International Archives of ISPARS Congress B3. 1996.
- [40] Blanchard B M, Lovert J K. Parcel Management: A Cadastral Data Model. GIS.LIS 94, 1994, 1623~1634.
- [41] 龚健雅. GIS 中面向对象时空数据模型. 测绘学报, 1997, 26(4): 289~298.
- [42] 舒红, 陈军, 杜道生, 周勇前 等. 面向对象的时空数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(3): 229~233.
- [43] 林广发, 冯学智, 王雷 等. 以事件为核心的面向对象时空数据模型. 测绘学报, 2002, 31(1): 71~75.
- [44] 张山山. 地理信息系统时空数据建模研究及应用. 西南交通大学, 2001.
- [45] 金培权, 岳丽华, 龚育昌. 基于历史拓扑和描述子的时空数据模型. 测绘学报, 2004, 33(3): 274~278.
- [46] Tryfona N, Jensen C S. Using Abstractions for Spatiotemporal Conceptual Modeling. Proceedings of the 2000 ACM Symposium on Applied Computing, Como, Italy, 2000.
- [47] 杜道生, 舒红. 基于同步数据项组和碎分拓扑弧段时间标记的时态地理数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997: 22(2): 96~101.
- [48] 宋玮. 时空数据模型及其在土地管理中的应用研究. 解放军信息工程大学, 2005.
- [49] Frederico F, Clodoveu D, Gilberto C. Bridging ontologies and conceptual schemas in Geographic Information Integration. Geoinformatica, 2003, 7(4), 355~378.
- [50] 张保刚, 艾廷华. 通用时空数据模型研究. 测绘通报, 2007, (5): 14~15.
- [51] 薛存金, 苏奋振, 周成虎. 基于特征的海洋锋线过程时空数据模型分析与应用. 地球信息科学, 2007, 9 (5): 50~54.
- [52] 王晓栋, 毛其智. 基于综合时空数据模型的包头市郊区土地监测信息系统. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(6): 810~813.
- [53] Elias F, Kostas G, Nikos P, et al. Nearest neighbor search on moving object trajectories. Advances in Spatial and Temporal Databases. Berlin: Springer, 2005. 328~345.
- [54] 陈碧宇, 陈晓玲, 陈慧萍 等. 网络中移动对象的 2 维时空数据模型. 测绘学报, 2007, 36(3): 329~334.
- [55] 易善桢, 张勇, 周立柱. 一种平面移动对象的时空数据模型. 软件学报, 2002, 13(8): 1657~1665.
- [56] 陈倩, 秦小麟. 时空数据库中数据建模的研究. 计算机工程, 2004, 30(20): 56~58.
- [57] 王春波, 张军, 蒋涛. 基于事件的时空数据模型应用研究. 测绘科学, 2005, 30(2): 67~69.

Spatiotemporal Data Models and Their Extensions: A Review

CHEN Xinbao^{1,2}, LI Songnian¹, ZHU Jianjun², CHEN Jianqun²

(1. Dept. of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Canada;

2. School of Info-physical and Geometrics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Comparing to the traditional GIS data models, research on spatiotemporal data modeling, although still in its early stage, has generated a large number of data models. In reviewing these spatiotemporal data models, many researchers focused more on pros and cons or applications of the models, but ignored their inherent differences, expansions and associations; thus losing tracks of their expansions, variations and development trends. This eventually results in non-optimized choices when selecting applications, practices and integration of the model. This paper further enhances and induces the existing models, mainly focusing on 1) describing the expansions and associations of the related spatiotemporal data models, 2) analyzing the inherent differences between models, and 3) presenting the model's evolvement. The results should provide guidelines for the applications of the models and theoretical bases for model expansions and the research of new data models.

Key words: spatiotemporal data model; model's extension; model's associations