

# 面向富语义复杂事件的时空数据建模

刘 凤, 钟志农, 贾庆仁, 景 宁, 马梦宇, 杨 飞

(国防科技大学, 长沙 410073)

**摘要:** 时空是事件的基本特征, 复杂事件是多个事件的综合过程, 具有多尺度时空特征、多层次语义特征。如何依托时空数据模型, 从事件的基本特征出发对复杂事件建模、分析, 是实现事件时空演变知识挖掘与模拟推理的关键途径。由于现有模型难以捕捉事件中跨时空粒度多实体对象间的演变轨迹与时空演化因果关联, 缺乏对复杂事件语义动态变化的刻画, 无法满足对复杂事件的建模需求。本文主要: ① 分析复杂事件中事件的概念, 提出富语义事件时空数据模型, 拓宽了时空数据模型所表达的事件维度。依据事件的多维度特征, 实现了对跨时空粒度的多实体对象伴随事件演变的状态与行为特征描述; ② 以事件特征聚合事件层次结构, 建立事件由繁至简、由事件本身到其组成要素的多级逻辑框架; ③ 刻画复杂事件中事件与事件、实体与实体的关联关系, 以时空关系、属性关系的演变推动对事件潜在因果关系的分析; ④ 以人类社会历史战争为例, 阐述富语义事件时空数据模型的建模与分析方法, 依托GIS平台阐述模型表达内容在事件实例中的应用, 解释了伴随事件推进引起实体属性演变、实体与实体关系演变, 再由上述变化引发新的事件发生的知识推理过程, 验证了模型的可行性与实用性。

**关键词:** 复杂事件; 富语义; 事件时空数据模型; 多时空; 时空演化因果关联

DOI: 10.11821/dlxb202407005

## 1 引言

时空是任何事件的基本特征之一, 复杂事件是多个事件的综合过程, 具有多尺度时空特征、多层次语义特征, 且其发展受诸多因素的影响, 具有多维、多变的特点, 充满不确定性。为对复杂事件历史变化过程的动态认知与时空演变内在逻辑的知识挖掘, 以及对尚未发生但计划要进行, 且存在不确定性的行动的模拟评估与推理预测, 参考当前地理信息科学领域对事件的研究, 以一定的时空数据模型完成对事件的建模, 再分析事件之间的相互影响与作用机制, 是认识事件的关键途径之一。因此, 如何以事件的时空特征为基础, 挖掘复杂事件的本质特征及关联影响, 采用适宜的时空数据模型完成对复杂事件数据建模显得尤为关键<sup>[1]</sup>。时空数据模型自20世纪60年代诞生以来, 涌现了众多时空表达域建模的方法与理论, 如时空立方体模型<sup>[2]</sup>、序列快照模型<sup>[3]</sup>、基态修正模型<sup>[4]</sup>、时态复合模型<sup>[5]</sup>、面向对象时空数据建模<sup>[6]</sup>、事件时空数据模型<sup>[7]</sup>、基于特征的时空数据模型<sup>[8]</sup>、图论时空数据模型<sup>[9]</sup>、过程时空数据模型<sup>[10]</sup>、动态对象存储模型<sup>[11]</sup>、基于Agent的模型<sup>[12]</sup>、构建全空间信息系统<sup>[13-14]</sup>、多粒度时空对象建模<sup>[15-17]</sup>、地理系统仿真研究<sup>[18-19]</sup>、地学知识图谱<sup>[20]</sup>等, 以及基于前述模型衍生的改进模型。上述模型从不同维度描述实体时空变化过程的动态性质, 如时间戳、变化、状态、事件、过程、动作、运动、动态对象、

收稿日期: 2023-07-13 修订日期: 2024-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(U19A2058) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U19A2058]

作者简介: 刘凤(1990-), 女, 博士生, 主要从事地理信息系统研究。E-mail: liufeng@nudt.edu.cn

通讯作者: 钟志农(1975-), 男, 教授, 主要从事地理信息系统研究。E-mail: zhongzhinong@nudt.edu.cn

1700-1717 页

多粒度时空对象等<sup>[21-23]</sup>,再以时间切片方式实现对时空变化过程的描述。在众多时空数据模型中,基于事件的时空数据模型被认为是研究时空动态演化过程最有力的工具,因为事件本身是时空动态过程的重要驱动因素<sup>[24-27]</sup>。然而,存在一类事件,如历史战役、一个人的生平事迹、接触型疾病的传播等,伴随事件语义的演变,事件推进既有连续过程也有离散过程,发展过程涉及的实体数量、类型繁多,实体存在方式、实体活动间的耦合交互、实体受外界环境的影响均是不确定的,已有事件时空数据模型由于研究重点不同,构建的模型对这种不存在离散时间线的事件,通过时间切片方式不能实现对事件的刻画,无法满足复杂事件研究。综上,描述此类复杂事件应结合已有事件数据模型研究基础,着眼于不同事件语义的动态变化规律、层次结构与时空演变逻辑,关注事件之间的动态时空交互、因果联系,事件组成要素之间的时空演化关系,以不同领域事件表达的丰富语义特征为基础,重构事件时空演变序列。

事件的时空变化是多样、复杂的,具有高度不确定性,但其内部的时空发展过程又存在潜在的演变逻辑与因果联系,如何以事件的语义为线索,构建事件时空演变过程,对于提高对复杂事件的解构能力,深入理解复杂事件内各要素间的动态演变机制具有重要意义。本文从事件的基本特征出发,提出以“事件语义、可变时空分辨率、实体、实体存在特征、实体存在特征之间的耦合关系”为框架的富语义事件时空数据模型,依据不同领域事件语义的丰富程度表达事件特征,以事件的多维度特征、关联关系聚合事件发展的层次结构,实现对事件时空演变的重构。与已有事件时空数据模型相比,本文模型延拓了事件时空数据模型对事件描述的语义丰富性,实现了对事件、实体跨时空粒度的多维描述,构建了以事件组成层级结构为基础的事件之间的演化逻辑,描述了事件、实体之间的关联关系及随着事件语义转变的实体变化、实体间关系的演变等。为验证所提出模型对复杂事件建模的可行性与创新性,本文基于所提模型构建了伊拉克战争中若干作战事件,重现了复杂事件推进的层级结构与内部演化,并采用空间分析方法,分析出事件发生地点与实体的属性特征密切相关,事件发生地点随事件变化的演化趋势,地点的空间分布特征与作战方在作战中的战略部署一致等知识,并发现前序事件的多维度事件特征可成为后续事件发展变化的因果论证依据。上述结果表明,本文提出的模型不仅支持解构—重构复杂事件,结合空间分析方法,还支持对事件之间隐含的时变规律与因果推理的新知识挖掘,以及为后期实现对实体各种行为的后续演变推演与趋势定量预测提供数据模型支撑。

## 2 事件时空数据模型建模

### 2.1 事件的内涵

在认知科学和语言学领域,事件是知识表示的基本单元,也是信息组织的重要手段<sup>[24]</sup>,被定义为是比较重大且对一定人群产生影响的事情,人们通过认识事件与事件之间的联系认识和了解世界。在地理信息科学领域,事件用于表达地理时空演变过程,是面向变化语义描述的时空数据模型的主要建模对象之一<sup>[25]</sup>。依据所研究对象及尺度的不同,不同学者对事件的定义不一而足,如Peuquet等将地理对象的每次状态变化视为一个事件<sup>[7]</sup>;Claramunt等将事件描述为实体的改变过程,以实体的版本变化反映事件的演化过程<sup>[26]</sup>;Yuan结合状态、过程,采用事件描述地理现象一次完整的发生过程<sup>[27]</sup>;Worboys等用事件表示多个地理对象一次变化的组合关系<sup>[28]</sup>;Yuan等将事件定义为一定时间与空间内,造成物体位置随时间发生变化的具有重要意义的事情<sup>[29]</sup>;Yu等定义事件是发生在特定的时间和地点,特定的利益相关者感兴趣的事情<sup>[30]</sup>;杜云艳等把事件归纳为一定时

空域内,地理主体对象的行为或空间结构、属性或组合发生了变化,且这种变化对人类或地理客体对象造成了重要影响<sup>[31]</sup>等,但现有的事件定义无法满足复杂事件的描述需求。

本文以事件的基本特征为出发点,把事件归纳为在自然环境中,一定时空粒度内的一个或若干实体,与外界(自然环境或其他实体)耦合交互的一系列存在特征组织起来的具有特定含义的时空现象的总称。基于此,事件既指离散变化对象的时空状态,也指连续变化对象的时空状态,依据描述内容的详尽程度,事件有不同的层次,它可以是实体位置、属性、存在方式的变化,可以是某个时间发生的具有重要意义的事情,可以是引起后续事件发生的原因,也可以是前序事件的综合结果等,不同层次的事件均涵盖事件的基本特征:语义特征,事件描述的综合语义,如事件表达的主题。时间特征,即事件发生的时间点、时间段。空间特征,如事件发生的位置、范围、事件演化的空间规律。属性特征,如事件包含的实体。存在特征,如实体在事件中状态的变化、形状的演化、实体的行为等。

## 2.2 事件时空数据模型

事件时空数据模型是1995年由Peuquet等<sup>[7]</sup>首次提出,该模型将变化的信息纳入时空语义描述与表达框架下,丰富了实体的时空语义。之后,许多学者对事件时空数据模型进行了不同程度的改进<sup>[32-35]</sup>,并将事件作为描述时空过程的一个媒介。学者们基于事件的研究集中在两个方面:其一,基于事件或单个地理要素的变化,描述时空变化过程,并对触发变化的原因和结果进行表达与分析;其二,将事件作为时空变化过程中的一个元素,由事件驱动结合地理要素的活动、状态、过程反演其时空动态足迹,引导地理空间知识发现超越其数据本身的新知识。如Worboys提出了一种纯粹面向事件的时间和空间参考框架的建模理论,并应用该理论描述了车辆在区域内的运动<sup>[35]</sup>;McIntosh等引入特征的概念,提取特征作为地理事件的足迹<sup>[36]</sup>;Yuan将地理空间扩展到地理动态,探讨了活动、事件、过程从空间结构到动态结构的必要联系,旨在综合活动、事件、过程的信息,重建地理动力学的时空路径与演变<sup>[37]</sup>;薛存金等将地理事件整个生命周期各个时刻的状态作为识别对象,根据地理现象的运动特征提取不同时刻演化状态之间的演化关系<sup>[38]</sup>等。

目前基于事件时空数据模型开展的研究对时空对象的特征变化过程与时序关系的表达讨论广泛且深入,在各自的应用领域均具有重要的意义,也为复杂事件的时空数据模型研究提供了重要参考依据。然而,随着事件研究的深入,逐步发现以往基于事件链或时空变化的建模方法,以时间作为组织基础,以固定流程事件或地理要素的演变进程构建事件序列,一定程度上仍等同于时间序列建模,模型中依据研究问题的需要,锁定研究对象的空间范围和时间跨度,挖掘事件的变化规律、重现周期或事件在空间上的聚类或影响范围等时空分布特征,如以百万年为时间跨度的重大地质事件,以年为时间尺度的地质活动、土地利用变化,以洲际为空间尺度研究板块运动等<sup>[39]</sup>,这类模型将事件的时间、空间特征作为彼此的参照,衡量事件在一定空间的时间分布特征或在一定时间的空间分布特征,具有有限的、可观测的时空尺度,对事件的研究较为单一,但众所周知,多尺度时空特性是地学知识构成的基本要素<sup>[39]</sup>,因此,模型应用到对复杂事件的研究尚显不足,难以达成对复杂事件跨时空维度的知识挖掘以及对地理时空过程的耦合演化、因果分析。具体地,在事件内容描述维度方面,由于不同的研究对事件的关注点不同,多数研究难以拓展到其他领域,导致对事件的认识具有片面性,鲜有事件时空数据模型可以充分融合事件的时间特征与空间特征,既支撑对事件时空模式、规律的挖掘,又支持对事件前因后果的推理论证;在事件的时空粒度方面,复杂事件的发展既有连续渐变的过程也有离散事件驱动的突变,存在一定时空上的不确定性,传统事件时空数据模型由于未实现对事件跨时空维度的描述,很难捕捉事件中同时发生的多个事件及多个地理



对象之间的时变轨迹与时空演化关系,未建立实体连续变化和离散变化时空过程的统一描述框架<sup>[38]</sup>;模型应用领域方面,现有时空表达与建模理论多是基于具体应用驱动的研究,针对特定的科学问题设计,应用领域集中于土地利用与划拨、地籍、房产管理、降雨分析、火势蔓延等,对事件的描述多基于单个对象或同一类要素变化过程,鲜有模型可以依托不同领域事件的动态变化,实现复杂环境下多要素相互作用的复杂事件的时空演化重现;在事件时空、因果关系分析方面,以往研究对事件之间因果关系的分析多是固定流程事件的因果关系,如土地审批事件等,融合不同层次事件语义的动态变化与事件多维度特征之间内在时空逻辑关系,分析由事件变化驱动的因果关系的研究尚不多见。然而,对事件的认识不仅在于描述、挖掘其时空模式,而且应挖掘时空关系背后的原因,模拟甚至预测其时空行为。因此,在实际应用中,对于事件的研究应关注事件推进对于地理对象时空变化的驱动性,而非仅仅是事件的时间序列<sup>[40]</sup>,有效模拟并识别事件之间的语义演变与时空关联是解释事件之间的关联性与后期模拟预测的第一步。综上,当前亟需新的事件时空数据模型,兼顾复杂事件的多尺度时空特征、多层次语义特征,以更丰富的语义、更广泛的事件描述粒度,重建事件历史状态,推理事件之间的时空逻辑关系与因果关联,以支撑复杂事件研究。

### 3 富语义事件时空数据概念模型

#### 3.1 富语义事件特征表达

为研究复杂事件的演化特征与时空模式,从时空数据模型建模的角度,首先需要拓展事件所表达的语义。与已有事件时空数据模型比较,富语义事件时空数据模型中的“富语义事件”,一方面反映不同领域事件的多维度特征及其在不同发展阶段表达的多层次语义,体现事件多维度的语义信息与多尺度的时空信息,另一方面代表不同层次事件之间显现的、隐含的复杂时空逻辑联系与因果关联,该模型旨在反映不同层次事件的“是什么、什么时间、什么地点、谁参与、存在特征”5个方面的信息,以及由不同语义事件引发的实体时空特征、实体属性、实体行为的演变,共同推导不同事件之间的因果关联。与其他事件时空数据模型相比,富语义事件时空数据模型所描述的富语义事件的特点如下:

**语义特征 (What):** 具有层次结构的事件主题,如疾病传播、人物生平、物种的起源等。事件的语义特征可描述历史战役、地名地址的历史沿革、事物的起源分布等。依据不同阶段表达语义的丰富程度,事件有不同的层次结构。

**时间特征 (When):** 采用双时间序列表达时间——有效时间与事务时间。有效时间描述事件实际发生时间,依据事件的语义特征,实现对事件可变时间分辨率的描述。事务时间指事件在数据库中的时间,体现事件推进的生命周期。

**空间特征 (Where):** 反映事件在演变过程中实体的空间分布与变化规律,依据事件表达的语义,是事件包含实体的分布范围、位置变化特征,或对事件有特殊意义的实体位置特写。

**属性特征 (Who):** 表示事件包含的实体,是单个实体或实体集合单元,如接触型疾病传播事件中,首个病例事件的实体为单个实体,病情开始传播事件的实体为部分实体,病情开始扩散事件的实体为某个市、某个省的实体,甚至是国家、世界层面的实体。

**存在特征 (How):** 描述实体在事件中的存在方式。

基于事件的多维度特征、层次结构与事件——事件之间的关联关系,将事件按照由整体到局部、由繁到简的原则组织。

3.2 富语义事件组成框架

复杂事件是多实体、多因素综合作用的结果，其发生发展具有一定的层次结构。依据语义特征与事件构成的复杂程度，将事件划分为复合事件、简单事件、原子事件，事件组成结构见富语义事件模型组成层次结构图（图1）。其中，复合事件描述一定时空粒度内，所有事件序列的综合语义，是若干简单事件按照一定的逻辑关系组织起来的和事件。简单事件指一定时空范围内，若干原子事件耦合作用生成的和事件，具有一定的语义特征。原子事件是事件的最小单元，表达若干实体在该事件中的存在特征。而实体是原子事件的重要组成，表示现实世界中存在、可唯一标识的单个或实体集合单元，是现实世界中物体或现象在信息世界的映射，可以有生命特征也可以无生命特征，如一个人、一个组织、境界线、政区、道路、河流等。依据实体在事件中的存在特征，表现为动态实体和静态实体。动态实体是事件的行为主体，具备一定的行为能力，如位置的变迁、形态的改变等，其存在方式会对事件的发展产生一定的影响，随着事件的推进动态实体的空间特征和属性特征均可能发生变化，并且随着事件的演变有一定的生命周期。静态实体是事件的发生环境或背景の説明，具有稳定的空间特征和属性特征，如境界线、行政区、山川河流等。但动态实体和静态实体的分类不是固定的，依据所描述事件的领域主题决定，如在描述行政区划的变迁中，行政区属于动态实体。按照事件描述的语义与时空尺度，将现实世界的事件参与者抽象为对应类别的实体，在事件层级由复合事件——简单事件——原子事件过渡过程中，实体表现为由整体到个别，由集合单元至单个实体的演化过程，如某个省接触型疾病传播的复合事件中，实体为该省感染病例组成的集合体，而在其简单事件——某个市疾病传播事件中，实体为这个市的感染病例集合体，在其原子事件某个单元、某个家庭的疾病传播事件中，实体为某些人或某个人。

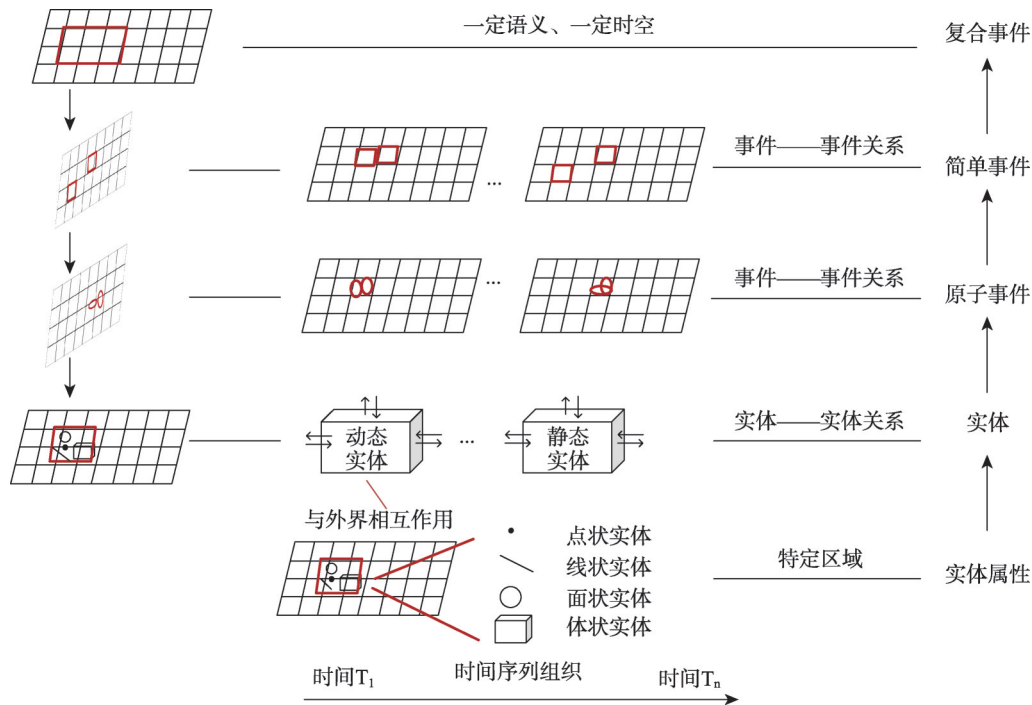


图1 富语义事件时空数据模型层次结构

Fig. 1 Graphical hierarchy structure of the rich semantic event spatiotemporal data model

按照富语义事件时空数据模型中对事件的描述维度与组织原则,该模型中涉及的关系类别主要有:事件与事件、事件与实体、实体与实体。事件与事件的关系描述为层次、时空、因果,因果关系是模型的推理结果,层次与时空关系在模型中描述,两种关系在描述事件时的强弱顺序为层次关系>时空关系。

层次关系依据事件表达的语义丰富程度,是复合事件——简单事件——原子事件的组成结构,反映事件由繁至简的结构。

时空关系表示在事件演进过程中,同级事件之间的时空关联。时空关系可细化为时序关系与空间关系。时序关系依据事件有效时间描述,如在……之前、在……之后、在……期间、相等、相接、相交、包含、同始、同终等,反映事件推进的时序关系。空间关系,包括度量空间关系,如距离、面积;方向空间关系,如东南西北、左右、上下、前后等;拓扑空间关系,表示事件与事件发生的空间范围之间的关系,如相接、相离、重叠、包含等<sup>[41]</sup>。在某些阶段,事件间的空间关系对事件推进的影响非常弱,仅考虑事件间的时序关系。反之,仅考虑事件间的空间关系。在事件其他阶段,事件间的时序与空间关系对事件的推进均具有重要影响,两种关系同时考虑。

因果关系表示事件与引发该事件的事件之间的关系,如某公司团建活动事件中,相关病例的时空接触是导致下一阶段接触型疾病大面积传播事件发生的原因。事件之间的因果关系由事件特征、实体特征,事件的层次关系与时空关系共同推导。

事件与实体的关系为层次关系,实体与实体的关系有属性、时空。属性关系表示实体间的组成关系如拆分、聚合、重组、兼并等,或立场关系如敌对、友好等,依据事件表达内容,属性关系是一个可拓展的关系表示。实体与实体间的时空关系是时序关系、空间关系两者之一,或两者同时存在,依据其对后续事件的影响程度,实体与实体的时空关系在描述过程中侧重点有所不同。空间关系包含度量空间关系、方向空间关系、拓扑空间关系,伴随事件的发生实体与实体的空间关系会不断演变。时序关系指不同实体有效时间之间的时间关系。实体间因果关系描述实体在事件中存在的因果联系,由事件特征、实体特征、事件关系、实体关系推导出。

综上,富语义事件时空数据模型中复杂事件的组成要素为事件、实体,要素之间的关系为层次、时空、属性。其中,事件与事件、实体与实体的时空关系、实体的属性关系是事件语义转变、事件之间关系构建的驱动因素,也是分析事件推进演化前因后果的重要依据。由于事件是时空动态过程的驱动因素,事件的发生会导致实体属性的变化、实体与实体时空关系的变化,以上演变不断更迭衍生出新的实体属性、新的实体与实体关系,触发新的事件发生,实现不同语义事件间前序因果的推理论证与事件后续发展的趋向分析,如一个事件中,实体A的属性为一个值,实体A与B的时空关系为相离,事件发生后实体A的属性演化为另一个值,与实体B的时空关系变为相邻,实体A新的属性、实体A与B新的实体关系又触发新的事件发生,助推事件语义的转变演化,由此进一步产生新的事件、实体之间的时空关联,如此循环往复,不断推动事件的演进。

## 4 富语义事件时空数据逻辑模型

### 4.1 富语义事件数据模型

富语义事件时空数据模型中要素特征和要素间的语义逻辑关系采用面向对象与图论结合的方式描述,主要要素包括事件与实体,从面向对象的角度,将其抽象为复合事件类、简单事件类、原子事件类、动态实体类、静态实体类,每个对象都有与特定事件关联的语义、空间、时间、属性、存在特征。不同抽象层次下,基于图论建立事件与事件、

实体与实体的语义逻辑关系图,对事件的时变规律与实体的时空演化关系进行描述,生成的关联关系包括事件与事件关系、事件与实体关系、实体与实体关系。由于本文研究复杂事件中的关联关系具有方向性,采用有向图表述复杂事件中的语义关联。有向图由节点和边构成,每个节点表达一个事件对象或实体对象,事件对象表达该事件对象的富语义特征,实体对象表达事件中实体的富语义特征;每条边由一对节点组成,表达两个事件对象间的关联关系、事件与实体的层次关系、同一个事件中的两个同类实体之间的关联关系。

富语义事件时空数据模型中不同类的定义如下,复合事件类:

$$\text{CompositeEvent} = \{ \text{Semantic}, \text{Time}, \text{SpatialScope}, [\text{Entityset}], [\text{SimpleEventSeries}] \} \quad (1)$$

式中符号依次表示复合事件的语义特征(事件ID、语义)、时间(有效时间、事务时间)、空间(事件发生的空间范围、空间规律)、实体集(事件包含所有实体或集合单元)、简单事件序列集。

简单事件类:

$$\text{SimpleEvent} = \{ \text{Semantic}, \text{Time}, \text{SpatialAttr}, [\text{Entityset}], [\text{AtomEventSeries}], [\text{EventRelation}] \} \quad (2)$$

式中符号依次表示简单事件的语义特征(事件ID、语义)、时间(有效时间、事务时间)、空间(事件发生的空间范围、开始位置、结束位置)、实体集(事件包含所有实体或其集合单元)、原子事件序列集、简单事件与其前序、后续事件之间的关联关系。

原子事件类:

$$\text{AtomEvent} = \{ \text{Semantic}, \text{Time}, \text{SpatialAttr}, [\text{Entityset}], [\text{EntityBehaviorSeries}], [\text{EventRelation}] \} \quad (3)$$

式中符号依次表示原子事件的语义特征(事件ID、语义)、时间(有效时间、事务时间)、空间(事件发生的空间位置或范围、开始位置、结束位置)、实体集(事件包含的实体)、实体存在特征序列集、原子事件与前序、后续事件之间的关系。原子事件包含的实体类为动态实体类和静态实体类,其中动态实体类:

$$\text{DyEntity} = \{ \text{Semantic}, [\text{Time}], [\text{SpatialAttr}], [\text{Attributes}], [\text{EntityBehavior}], [\text{EnRelationAttr}] \} \quad (4)$$

式中符号依次表示动态实体的语义特征(语义、实体ID、实体类别)、时间(有效时间、事务时间)、空间(开始位置、结束位置)、属性特征集合(数据类型、实体实际类别、等级、规模等)、实体存在特征集合(实体行为方式)、与其他动态实体关系。

静态实体类:

$$\text{SEntity} = \{ \text{Semantic}, [\text{Time}], [\text{SpatialAttr}], [\text{Attributes}], [\text{BehaviorAttr}], [\text{EnRelationAttr}] \} \quad (5)$$

式中符号依次表示静态实体的语义特征(语义、实体ID、实体类别)、时间(有效时间、事务时间)、空间(分布位置)、属性特征集(数据类型、实体实际类别、规模等)、存在特征、与其他静态实体间的关系。

时间类:

$$\text{Time} = \{ \text{TimeID}, \text{ValidStartTime}, \text{ValidEndTime}, \text{TraStartTime}, \text{TraEndTime} \} \quad (6)$$

式中符号依次表示时间ID、有效时间开始、有效时间结束、事务时间开始、事务时间结束。时间的表示是时间点或时间区间,有效时间的粒度为年、月、日、小时、分、秒,依据事件的语义特征与事件推进逻辑,自定义时间粒度。事务时间的粒度为秒、分。

事件与事件关系类:



$$EventRelationType = \{ EvRelationID, EventID, EvRelationType, EvRelationTypeName, EvRelationDescription \} \quad (7)$$

式中符号依次表示事件与事件关系ID、事件ID、关系类型、关系名称、关系详情。

实体与实体关系类:

$$EntityRelationType = \{ EnRelationID, EntityID, EnRelationType, EnRelationTypeName, EnRelationDescription \} \quad (8)$$

式中符号依次表示实体与实体关系ID、实体ID、关系类型、关系名称、关系详情。

依据复杂事件的事件特征,富语义事件时空数据模型的事件组织结构图由2类节点和3类边组成。复杂事件的2类节点包括事件节点、实体节点,3类边包括事件组成关系边、事件与事件、实体与实体时空相互影响边、实体与实体在事件中的关联关系边(图2)。

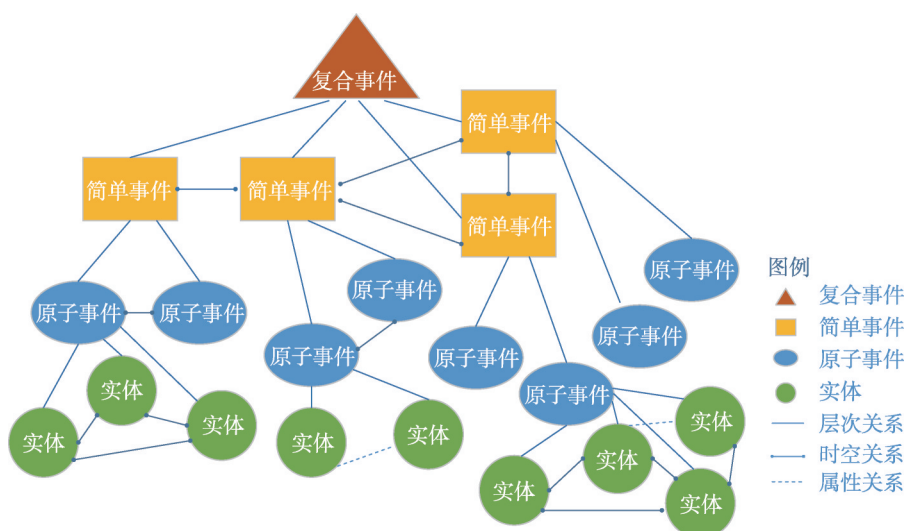


图2 富语义事件时空数据模型组织结构

Fig. 2 Graphical organization of the rich semantic event spatiotemporal data model

复合事件节点是事件节点的父节点,表达复合事件的语义、时间、空间、属性、简单事件序列;简单事件节点是复合事件的子节点,描述简单事件的语义、时间、空间、属性、简单事件与前序、后续事件之间的关联关系、简单事件包括的原子事件序列;原子事件节点是简单事件的子节点,表达原子事件的语义、时间、空间、属性、实体存在特征序列,原子事件与其前序、后续事件之间的关联关系;实体节点是原子事件的子节点,表达某事件中实体的语义、时间、空间、属性、实体存在特征、实体间关系。

事件组成关系边表达不同级事件间、原子事件与实体间的层次关系,表达上一级事件包含了多少个下一级子事件,一个原子事件中包含哪些实体;事件与事件、实体与实体时空相互影响边表达同一级事件间、原子事件包含的实体间的时空关系,如事件在时间上的前序、后续,空间上的方位关系、距离关系等。实体之间的拓扑关系、距离关系等。实体与实体在事件中的关联关系边表达实体在事件中的属性关系,如重组、合并、敌对、友好等。

## 4.2 富语义事件数据结构

依托面向对象的方法、采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)对富语义事件的时空数据模型进行逻辑结构设计,描述其数据结构,表达复合事件类、简单事件类、原子事件类、动态实体类、静态实体类、时间类、事件与事件关系类、实体与



实体关系类及不同类之间的联系，形成具有层次结构的语义逻辑关系树（图3）。事件类和实体类是数据结构的基础，事件类派生出复合事件类、简单事件类、原子事件类，实体类派生出动态实体类、静态实体类，事件类与实体类均具有语义、时间、空间、属性、存在特征5类特征，时间对象类描述事件或实体的时间特征，实体与实体关系类描述不同实体之间的关系，事件与事件关系类表达事件与事件之间的关系。通过面向对象的方法对富语义事件时空数据模型进行逻辑结构设计，使事件类、实体类之间的语义描述能够符合对现实事件的认知规律。

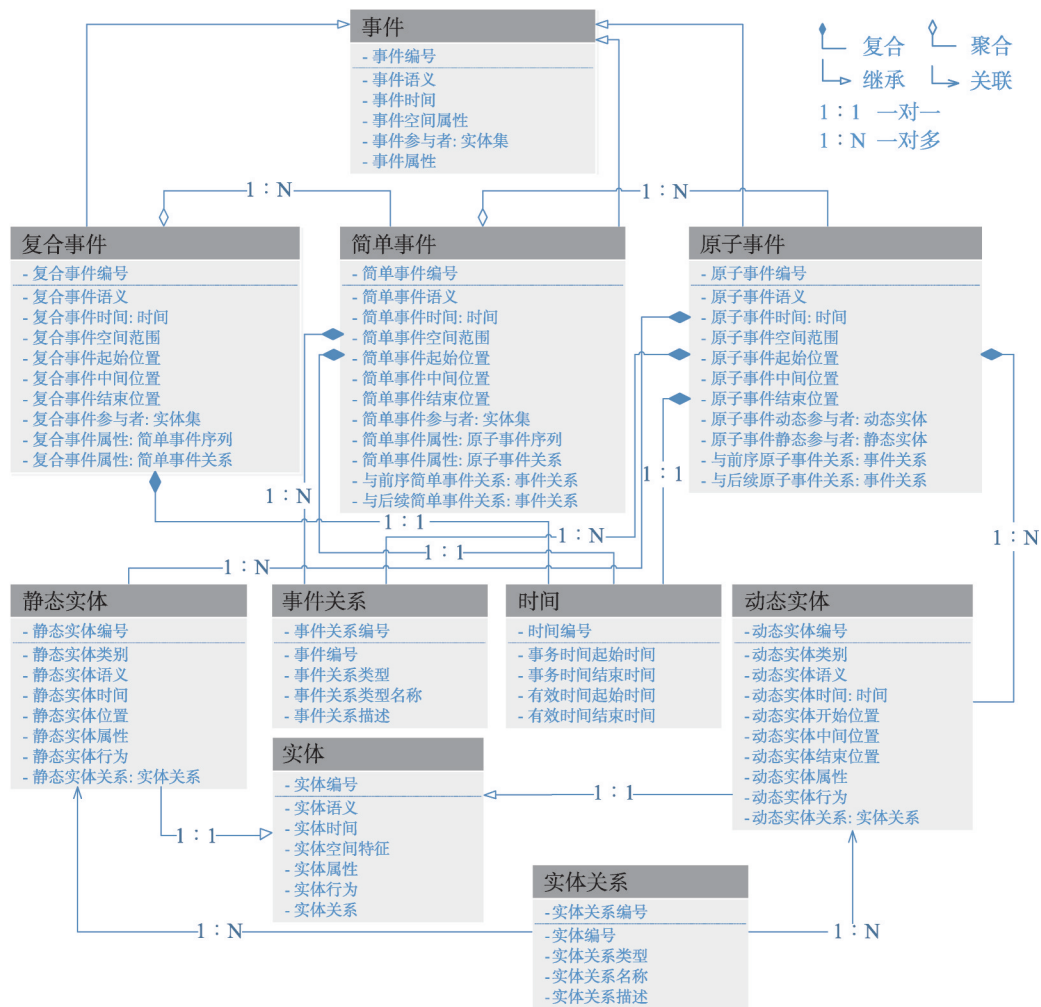


图3 事件逻辑模型数据结构

Fig. 3 Data structure of event logic model

## 5 富语义事件时空数据模型实例建模与分析

战争是人类社会典型的复杂事件之一，其发生过程涉及作战方、人员、武器装备等多样化的实体，发生环境涉及地面、海洋、天空、太空等多维环境<sup>[42]</sup>，演进过程受人类、环境等不可控因素的影响具有高度的不确定性，因此，亟需开展这类事件的建模与分析，充分挖掘其发生发展过程的内在规律与影响关联。本文以伊拉克战争为例，采用富语义

事件时空数据模型实现事件建模, 从事件识别与建模表达、时空与因果关系分析论证两个方面开展实证研究, 并通过与已有模型对比, 验证模型在复杂事件研究中的可行性。

### 5.1 伊拉克战争事件识别与建模表达

在富语义事件时空数据模型的事件层次结构中, 事件的最小单元为原子事件, 因此, 构建复杂事件由复合事件至实体的结构时, 应先识别原子事件、抽取原子事件特征, 由原子事件聚合简单事件, 简单事件聚合复合事件, 再建立事件、实体之间的关系。本文以复杂事件的常见载体——文档为例, 详述基于模型的建模过程。首先, 以文档中每个句子为初级原子事件, 依据人工经验合并表达同一事件的相邻句子。再依托自然语言处理工具识别原子事件的语义、时间、空间、实体、实体存在特征, 在上下文基础上对原子事件的多维度特征做信息补全与对齐等数据预处理, 无值匹配处以空值代替, 并依据模型理论、人工先验知识, 对抽取结果检查修正。其次, 以原子事件的时间特征为基准依序对事件编号, 融合原子事件的多维度特征聚合其为简单事件, 归纳组成简单事件的段落语义为简单事件语义, 并创建简单事件节点, 表达包含语义、时间、空间、实体、简单事件中原子事件的组成序列的简单事件特征, 构建简单事件与前序、后续事件的时空关系, 简单事件与原子事件的层次关系。以原子事件为节点表达其多维事件特征, 构建原子事件之间的时空关系、原子事件与实体的层次关系、不同类型实体与实体间的属性关系、时空关系。最后, 将复杂事件作为复合事件类的一个实例, 构建复合事件节点, 按照模型理论, 抽取文档内容, 表达该节点的富语义事件特征, 建立复合事件与简单事件的层次关系。

本文搜集百度百科 (<https://baike.sogou.com/v142001.html>)、华盛顿日报 (<https://maps.lib.utexas.edu/maps/iraq.html>)、《世界经典战例: 战争卷》<sup>[43]</sup>中2003年3月20日—4月15日期间, 以美英为首的联合部队对伊拉克发动军事行动的一系列事件, 构建以伊拉克战争为复合事件的事件数据集文档。

以数据集前的45个原子事件为例(图4), 将事件中的实体类别按作战单元代表方分为美方、伊方、美英、英方; 实体存在特征归纳为进攻、防守、前进、占领、绕行、宣布与命令; 实体的抵抗行为, 按程度分为轻微抵抗、激烈抵抗、反击3类; 事件类别按事件发生领域分为信息、空中、地面3类。基于此, 融合事件的语义、时间、实体、实体存在特征, 将原子事件聚合为不同阶段: E1-E3美方从信息领域对伊采取行动; E4-E7美方从信息、空中两方面对伊攻击; E8-E9伊方从信息和空中发起反击; E10-E19美英以空中和地面两种方式进攻, 美英向前推进中遇到伊方不同程度的抵抗; E20-E24伊方在美方空中与地面进攻中反击, 美英绕行推进; E25-E29美英在进攻中占领部分区域; E30-E33在伊方的地面作战反击下, 美方绕行; E34-E45地面作战中, 美英不断进攻、推进, 占领

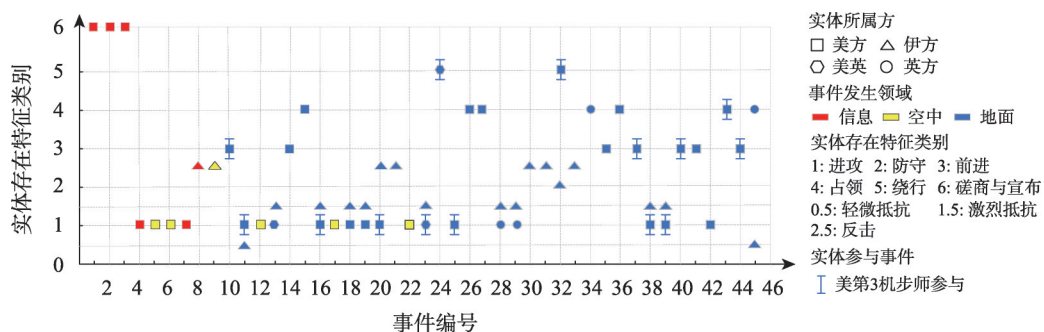


图4 伊拉克战争事件序列与事件特征

Fig. 4 The sequence and characteristics of events in the Iraq War

伊方资源或领地。接着，融入原子事件的空间特征细化简单事件的组成与语义（图5），如E1~E3没有明确的空间特征，这是战争初期美方收到中央情报局提供的情报后所做的磋商、宣布等举措，属战争开始阶段。E4~E7是美方宣布对伊方军事行动后，对巴格达采取空袭行动，可称为斩首行动。在地面作战中，按事件空间分布特点，可分为左中右3路，左路由科威特经纳杰夫、卡尔巴拉至巴格达（E10~E12、E14~E16、E25~E26、E41~E44），中路由科威特经纳西里耶、幼发拉底河、卡尔巴拉至巴格达（E18~E21、E32、E37~E40），右路由科威特经巴士拉地区至巴格达（E13、E17、E22~E24、E27~E31、E33~E35、E45）。诸如此类，融合原子事件的多维度特征聚合由若干原子事件组成的简单事件序列。

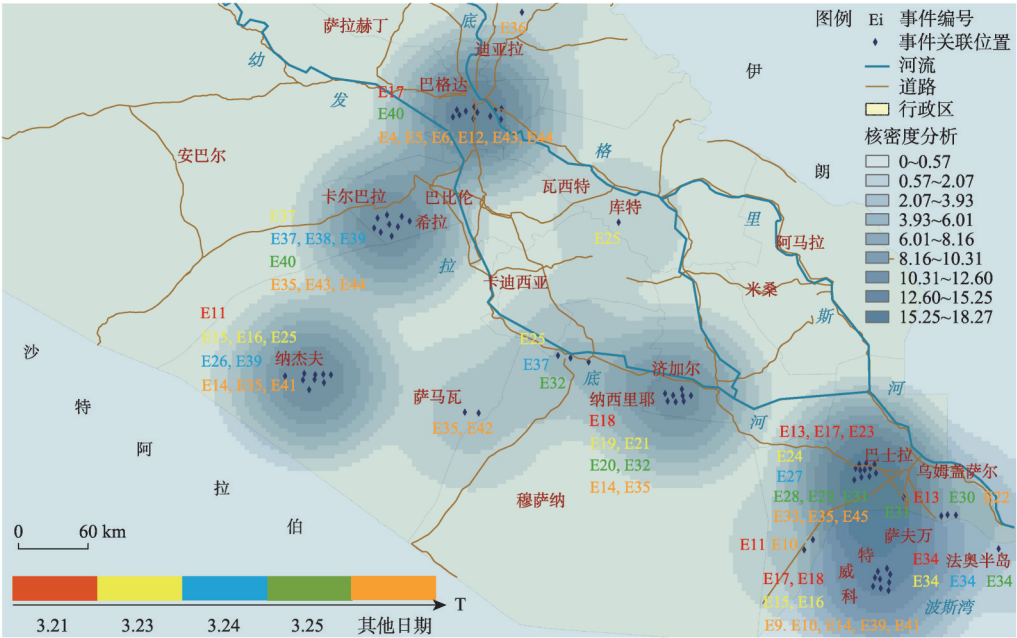


图5 伊拉克战争事件空间分布与核密度估计

Fig. 5 Spatial distribution and kernel density estimation of events in the Iraq War

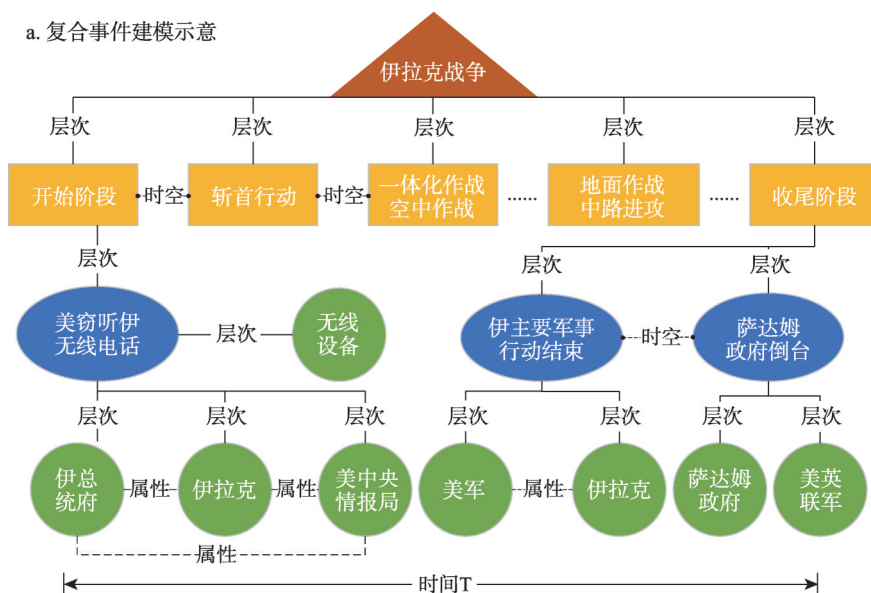
上述过程基于富语义事件时空数据模型的建模理论，实现事件、实体的节点自动化提取与事件、实体关联关系的自动化创建，伊拉克战争事件在图数据库中的实例对象化建模效果如图6所示。

5.2 伊拉克战争时空与因果关系分析论证

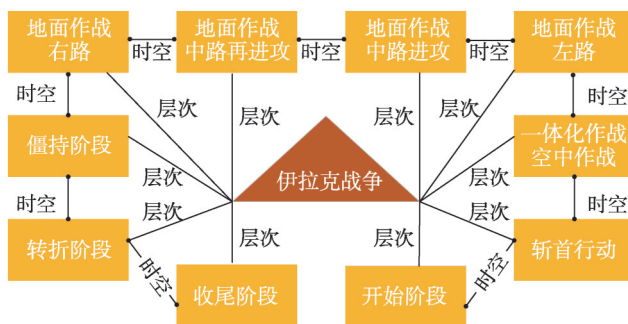
时空关系是数据建模与知识挖掘分析的重要元素，也是富语义事件时空数据模型分析事件演变的重要依据之一。富语义事件模型中的时空关系表现为事件与事件、实体与实体的时空关系。以伊拉克战争事件数据集为基准，搜集伊拉克及周边国家地理信息数据（<https://www.openstreetmap.org/>），包括行政区划、交通、水系数据等。以伊拉克战争事件数据集中的前45个原子事件为分析对象，对事件的空间特征做核密度分析，结果显示，与这一时期事件强关联地点依次为巴士拉、巴格达、科威特、纳西里耶、纳杰夫、卡尔巴拉、幼发拉底河、乌姆盖萨尔等。

结合本次作战的影响因素，从实体行政等级、交通、资源3个方面分析原因（表1），并从事件演化角度解释核密度的空间分布差异。巴士拉是伊拉克南部重要港口城市，境内含丰富石油资源，是石油出口和物资运输的主要通道，对于控制南部地区的交通、物

a. 复合事件建模示意



b. 简单事件序列建模示意



c. 原子事件序列建模示意

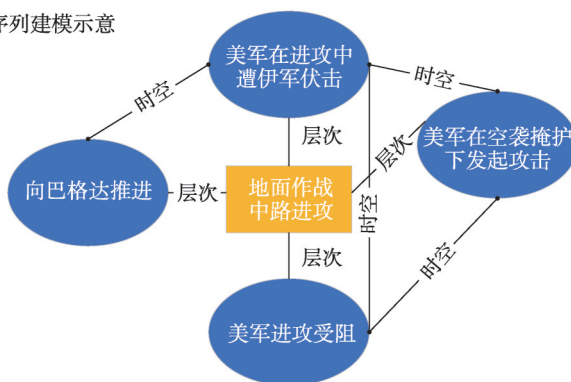


图6 伊拉克战争富语义事件时空数据模型建模

Fig. 6 Rich semantic event spatiotemporal data model modeling for the Iraq War

资运输与海上通道至关重要, 对参战双方均具有重要战略作用, 因此战争中成为伊拉克守军和美英联军的争夺点与战斗持续点, 是所分析事件集的最强关联地点。巴格达属伊拉克首都, 市内拥有许多重要国家机构、军事设施与政府高层官员府邸, 也是时任伊拉克总统所在地, 因此一直是美英联军的空袭目标与进攻目的地。科威特境内的军事基地



表 1 伊拉克战争事件静态实体属性分析

Tab. 1 Analysis of static entities' attributes in the Iraq War events

区域名称	行政等级			交通				资源				
	首都	重要城市	其他区域	机场	公路	港口	桥梁	油田	军事补给	国家机构	高层官员府邸	军事基地
巴格达	√			√	√				√	√	√	√
科威特		√		√	√	√			√			√
科伊边境			√		√							
纳西里耶		√			√							
巴士拉		√		√	√	√	√	√	√			√
乌姆盖萨尔		√			√	√						
法奥半岛		√			√	√		√				
纳杰夫		√			√				√			
卡尔巴拉		√			√							
萨夫万			√		√							
萨马瓦		√			√							
伊拉克北部			√	√	√							

是本次战争起始点，美英联军经科威特领空和领土进入伊拉克。其他与事件具有强关联关系的城市或是港口城市如乌姆盖萨尔，或是通往巴格达的交通要道如纳西里耶、卡尔巴拉。剔除研究中两国在开战初期的宣言与呼吁等没有明确发生地的原子事件，发现战争初期发生的原子事件多在巴格达，之后呈现由科威特经科伊边境、巴士拉、纳西里耶、纳杰夫、卡尔巴拉向巴格达推进的态势，原子事件空间特征随事件演变的这一变化趋势与美方在作战中，先对巴格达进行空袭再由伊南部向巴格达地面进攻的战略部署一致。

事件发生后，依据建模结果可对已发生事件、实体之间的时空关系作时空模式归纳、知识挖掘与潜在因果关系分析。如将同一天发生事件用相同颜色标示（图5），以3月23日为例，由事件的空间分布可看出，事件呈3个聚集区纳杰夫—卡尔巴拉、纳西里耶—幼发拉底河、巴士拉邻近地区，这种空间分布态势与美军3路进攻的战略部署路线一致。以伊拉克战争地面作战事件中，美第3机步师实体参与事件为例，由图4知，该师在地面作战开始阶段已参与作战，并参与多个事件，事件中的实体行为多以进攻、前进、占领、绕行为主，上述实体参与事件、实体的不同行为特征与美第3机步师在作战中承担急先锋与地面作战主力部队的角色一致，因此，在作战中或战后可通过事件多维特征分析出实体在事件中承担的角色，挖掘新的知识以辅助决策。又如事件E24中（图4~图5），该事件的空间特征为巴士拉，美第3机步师实体行为为绕行，而其前序事件中美英联军对巴士拉进攻，伊方顽强抵抗。伊方实体顽强的战斗意志与激烈抵抗的实体行为，使美第3机步师采取绕行策略。事件E32空间特征为纳西里耶，该地区的上一个事件E20中，伊军进行了反击，伏击了该区域的美军。随后，美军为推进其“速战速决”的策略，由纳西里耶渡过幼发拉底河向前推进。综上，前序事件的发生，事件的发生导致的实体的行为与属性演变，会推动后续事件的发展方向，成为分析事件之间因果关系的依据。

事件未发生时，对攻击方而言，通过构建事件模型，可依据有语义、时空关联事件的不同结果采取相异的策略，如上述事件中，美方可根据后期战略目标采用求援或空袭与地面作战结合的方式，再次进攻纳西里耶或巴士拉。对受攻方而言，通过事件模型中，事件之间时空关联可推断对方意图，以采取防范或抵抗措施。如在美英合围巴格达的战略未达成时，伊方可依据模型建模结果，分析出美英左中右3路并行推进的作战模式，推

理美英的作战意图可能是合围巴格达, 基于此, 伊方在美方战略目标未成型时, 可作出相应策略破坏或延缓美方计划。

综上, 相比于其他时空数据模型, 富语义事件时空数据模型的优势体现在: ① 在模型的语义表达方面, 实现了复杂事件不同发展阶段事件的多维特征表达与动态变化, 丰富了事件表达的特征; ② 在事件建模方面, 提出了一种融合事件多维特征的事件层次划分方法, 由原子事件聚合简单事件, 简单事件聚合复合事件, 构建事件之间的层次关系、时空关系, 对事件的理解更全面、深刻; ③ 时空分析方面, 伴随事件语义的转变、事件与事件的关系会导致实体的属性、实体之间关系的演变。以事件语义的转变, 事件、实体之间的时空关系、实体属性的变化为媒介, 分析上述变化引发新的事件发展方向, 这对于分析复杂事件的前序因果关联与后续演变趋向均具有重要的指导意义。

### 5.3 比较与分析

本文列举文献[44]的图结构表示模型(图7), 验证富语义事件时空模型建模的有效性。图结构表示模型以时间、地理实体、属性、地理事件、活动5个要素为基础表达时空过程, 采用具有时间层次的时间立方体结构, 描述单个实体在一段时间的活动, 意在反映地理时空过程中地理知识的演化, 如事件的发展与形成, 地理实体的演化与销毁, 但该模型描述的是单个实体在一段时间的事件或单个实体在较长时间的演化过程, 不能实现对离散事件、连续事件的统一描述, 也不能描述多个实体相互作用的时空过程。而富语义事件时空数据模型表达的是单个实体、多个实体、实体集的事件, 采用多种关联关系, 构建事件之间的逻辑关系, 描述事件推进过程中, 事件包含实体的变化, 以不同语义的事件表达实体的演化过程, 并实现对事件之间的层次结构, 事件、实体之间的关系与事件推进逻辑的表达, 能表达更多级别实体、复杂度更高的事件。在事件描述粒度方面, 富语义事件数据模型实现了对事件跨时空粒度的描述, 既能描述事件演化的离散过程也能描述其连续过程, 克服了多数模型仅支持对存在时间切片特征的事件的描述。以伊拉克战争中的简单事件“地面作战中路进攻”为例, 依据事件的语义切换时间特征, 以天、小时或瞬时时间为粒度, 将有效时间约为3 d(3月21—23日)发生在任意时空分辨率的事件, 刻画为模型中一定时间的时空过程, 表达该事件的富语义特征、包含的原

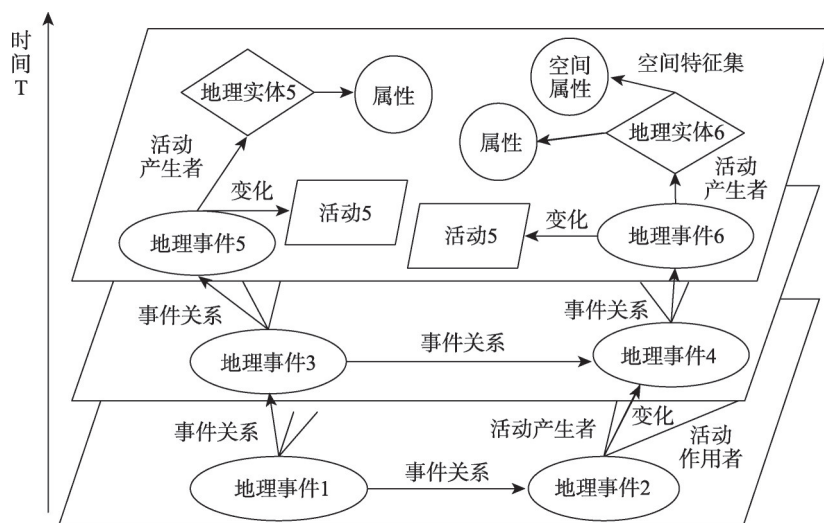


图7 图结构表示模型

Fig. 7 Graph structure of the representation model

子事件序列（即美军进攻受阻—美军在空袭掩护下发起攻击—美军在进攻中遭伊军伏击—向巴格达推进）与邻近事件的关联等。

实验结果表明，以富语义事件时空数据模型构建复杂事件时空演变过程，使事件具有多层次语义、多时空分辨率、多关联关系的特征，模型支持表达事件语义的动态变化，有助于对事件之间潜在因果关系与演化趋向的分析。在语义表达方面，可回答任意事件的“4个W和1个H”的问题，推理事件之间的因果关联（Why），有利于对事件全面解读；在时空分辨率表达方面，富语义事件时空数据模型实现了事件按层次结构转变的时间特征、空间特征的描述，可对事件进行跨时空粒度描述；在事件与事件、实体与实体的关系表达、知识挖掘方面，不仅表达事件发展的逻辑层次、时空关系、属性关系演变，而且有助于挖掘其潜在的事件与事件、实体与实体相互作用的时空模式、因果关联。

## 6 总结与展望

地理事件的建模、分析与知识发现是地理信息机理研究的核心内容<sup>[1]</sup>，目前多数基于事件的时空数据模型集中在构建事件的时间序列与固定流程事件发展的因果关系挖掘，鲜少以事件语义演变反映事件的动态变化规律，融合事件中跨时空要素的时空关系分析其因果关联，这使得目前研究对复杂事件解构、事件动态演变回溯与事件间因果关系挖掘等方面存在不足。本文在总结已有事件数据模型研究基础上，阐述所研究事件表达的语义与维度，构建事件层次结构，提出富语义事件时空数据模型，详细阐述了该模型的概念模型与逻辑模型，并搜集伊拉克战争事件数据集与地理信息数据进行实例验证。主要工作为：①从概念上拓展了事件语义表达的维度与复杂程度，由事件的多维度特征聚合事件层级结构，从事件的语义特征演变出发，融合事件与实体关联关系的变化、实体的变化，挖掘事件之间的时空模式、因果关联；②以面向对象理念和图数据库阐述事件组成的层级结构与逻辑关系，表达事件与事件关系、实体与实体关系，给出了富语义事件时空数据模型的逻辑框架；③采用富语义事件时空数据模型理论框架，实现了对伊拉克战争的事件特征抽取与事件建模，结合空间分析方法，以实例为基础阐述了模型中构建的事件与事件、实体与实体的关联关系如何实现对复杂事件演进过程中的前序因果与后续发展趋向分析，验证了模型对于复杂事件建模与分析的有效性、实用性。

以历史事件为鉴可以更好地指导未来，基于事件时空数据模型可实现对地理时空演变过程历史重塑，发掘其中的规律与时空逻辑关系，但时空演变过程主要是对历史时期的研究<sup>[45]</sup>，然而，构建时空数据模型研究不同时空过程不仅在于解释过去，更重要的是服务现在、尽可能准确地预测其未来的发展，对事件的研究深度也应不限于对客观事件的描述，揭示其形成的原因与演化历程，而应该基于模型构建事件之间的关联关系做知识挖掘、模式匹配和后期模拟推演，以期更好地辅助决策。因此，如何基于富语义事件时空数据模型的逻辑框架，融合图、文、数等多种信息载体的领域知识，结合当前地学知识图谱最新发展、热门深度学习方法，挖掘信息载体背后更深层次的语义关联，定性预测事件未来可能的时空演化趋势将是下一步的研究重点。

**关联数据信息：**本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版,获取地址:<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.06.09.V1>.

## 参考文献(References)

- [1] Li Huan, Ma Boning, Kong Longxing. The spatiotemporal model and driving pattern in military mission rehearsals.

- Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 138-143. [李欢, 马伯宁, 孔龙星. 军事任务推演的时空模型与驱动机制. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 138-143.]
- [2] Hagerstrand T. Diorama, path and project. *Journal of Economic & Social Geography*, 1982, 73(6):323-339.[Hagerstrand T. Diorama, path and project. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 1982, 73(6): 323-339.]
- [3] Armstrong M P. Temporality in spatial database. *GIS/LIS 88 Proceedings: Accessing the World*, 1988: 880-889.
- [4] Langran G E. Time in geographic information systems [D]. Seattle: University of Washington, 1989.
- [5] Langran G, Chrisman N R. A framework for temporal geographic information. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 1988, 25(3): 1-14.
- [6] Wachowicz M. Object-Oriented Design for Temporal GIS. London: CRC Press, 1999.
- [7] Peuquet D J, Duan N. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(1): 7-24.
- [8] Choi J, Seong J C, Kim B, et al. Innovations in individual feature history management: The significance of feature-based temporal model. *Geoinformatica*, 2008, 12(1): 1-20.
- [9] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541-580.
- [10] Claramunt C, Parent C, Theriault M. Design patterns for spatio-temporal processes. *Data Mining and Reverse Engineering: Searching for Semantics*. Leysin, 1998: 455-475.
- [11] Zeng Mengxiong, Hua Yixin, Zhang Jiangshui, et al. Research on dynamic behavior expression model and method of multi-granularity spatio-temporal objects. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(1): 104-112. [曾梦熊, 华一新, 张江水, 等. 多粒度时空对象动态行为表达模型与方法研究. 地球信息科学学报, 2021, 23(1): 104-112.]
- [12] Shamil M S, Farheen F, Ibtehaz N, et al. An agent-based modeling of COVID-19: Validation, analysis, and recommendations. *Cognitive Computation*, 2021: 1-12.
- [13] Zhou Chenghu. Prospects on pan-spatial information system. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 129-131. [周成虎. 全空间地理信息系统展望. 地理科学进展, 2015, 34(2): 129-131.]
- [14] Gong Jianya, Li Xiaolong, Wu Huayi. Spatiotemporal data model for real-time GIS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 226-232, 275. [龚健雅, 李小龙, 吴华意. 实时GIS时空数据模型. 测绘学报, 2014, 43(3): 226-232, 275.]
- [15] Hua Yixin, Zhao Xinke, Zhang Jiangshui. New paradigm of geographic information systems research. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(1): 15-24. [华一新, 赵鑫科, 张江水. 地理信息系统研究新范式. 地球信息科学学报, 2023, 25(1): 15-24.]
- [16] Hua Yixin, Zhang Jiangshui, Cao Yibing. Research on organization and management of spatio-temporal objects in pan-spatial digital world based on spatio-temporal domain. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(1): 76-83. [华一新, 张江水, 曹一冰. 基于时空域的全空间数字世界时空对象组织与管理研究. 地球信息科学学报, 2021, 23(1): 76-83.]
- [17] Xie Yurui, Jiang Nan, Zhao Wenshuang, et al. Object modeling of combat entities based on multi-granularity spatio-temporal objects. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(1): 84-92. [谢雨芮, 江南, 赵文双, 等. 基于多粒度时空对象的作战实体对象化建模研究. 地球信息科学学报, 2021, 23(1): 84-92.]
- [18] Cheng Changxiu, Shi Peijun, Song Changqing, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1397-1406. [程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. 地理学报, 2018, 73(8): 1397-1406.]
- [19] Zhu Jie, Zhang Hongjun. Battlefield geographic environment spatiotemporal process model based on simulation event. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1367-1377, 1437. [朱杰, 张宏军. 面向仿真事件的战场地理环境时空过程建模. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1367-1377, 1437.]
- [20] Zhu Yunqiang, Sun Kai, Hu Xiumian, et al. Research and practice on the framework for the construction, sharing, and application of large-scale geoscience knowledge graphs. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(6): 1215-1227. [诸云强, 孙凯, 胡修棉, 等. 大规模地球科学知识图谱构建与共享应用框架研究与实践. 地球信息科学学报, 2023, 25(6): 1215-1227.]
- [21] Zhu X M, Liu H Y, Xu Q, et al. Advances in an event-based spatiotemporal data modeling. *Scientific Programming*, 2021, 2021(1): 3532845. DOI: 10.1155/2021/3532845.
- [22] Atluri G, Karpatne A, Kumar V. Spatio-temporal data mining: A survey of problems and methods. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(4): 1-41.
- [23] Ma Z M, Bai L Y, Yan L. Modeling Fuzzy Spatiotemporal Data with XML. Cham: Springer International Publishing,



- 2020.
- [24] Zhou Wen, Liu Zongtian, Kong Qingping. A survey of event-based knowledge processing. *Computer Science*, 2008, 35 (2): 160-162, 184. [周文, 刘宗田, 孔庆苹. 基于事件的知识处理研究综述. *计算机科学*, 2008, 35(2): 160-162, 184.]
- [25] He Z J, Deng M, Cai J N, et al. Mining spatiotemporal association patterns from complex geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020, 34(6): 1162-1187.
- [26] Claramunt C, Theriault M. Managing time in GIS an event-oriented approach//Clifford J, Tuzhilin A. *Recent Advances in Temporal Databases: Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases*. Zurich: Springer, 1995: 23-42.
- [27] Yuan M. Representing complex geographic phenomena in GIS. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001, 28(2): 83-96.
- [28] Worboys M, Hornsby K. From objects to events: GEM, the geospatial event model. *International Conference on Geographic Information Science*. Adelphi, 2004: 327-343.
- [29] Yuan M, Hornsby K S. *Computation and Visualization for Understanding Dynamics in Geographic Domains: A Research Agenda*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [30] Yu M Z, Bambacus M, Cervone G, et al. Spatiotemporal event detection: A review. *International Journal of Digital Earth*, 2020, 13(12): 1339-1365.
- [31] Du Yunyan, Yi Jiawei, Xue Cunjin, et al. Modeling and analysis of geographic events supported by multi-source geographic big data. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2853-2866. [杜云艳, 易嘉伟, 薛存金, 等. 多源地理大数据支撑下的地理事件建模与分析. *地理学报*, 2021, 76(11): 2853-2866.]
- [32] Habibi R, Alesheikh A A, Bayat S. An event-based model and a map visualization approach for spatiotemporal association relations discovery of diseases diffusion. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104187. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104187.
- [33] Chen M, Lü G N, Zhou C H, et al. Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era: Some thoughts on their development and construction. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(8): 1207-1223.
- [34] Siabato W, Claramunt C, Ilarri S, et al. A survey of modelling trends in temporal GIS. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(2): 1-41.
- [35] Worboys M. Event-oriented approaches to geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(1): 1-28.
- [36] McIntosh J, Yuan M. Assessing similarity of geographic processes and events. *Transactions in GIS*, 2005, 9(2): 223-245.
- [37] Yuan M. *Toward Knowledge Discovery about Geographic Dynamics in Spatiotemporal Databases*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [38] Xue Cunjin, Su Fenzhen, He Yawen. Process: A new view of geographical spatiotemporal dynamic analysis. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 65-79. [薛存金, 苏奋振, 何亚文. 过程: 一种地理时空动态分析的新视角. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 65-79.]
- [39] Zhou Chenghu, Wang Hua, Wang Chengshan, et al. Geoscience knowledge graph in the big data era. *Science China (Terrae)*, 2021, 51(7): 1070-1079. [周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地学知识图谱研究. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(7): 1070-1079.]
- [40] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [41] Wu Lun, Liu Yu, Zhang Jing, et al. *Geographic Information System: Principles, Methods, and Applications*. Beijing: Science Press, 2001. [郭伦, 刘瑜, 张晶, 等. *地理信息系统: 原理、方法和应用*. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [42] Jiang Bingchuan, Huang Zihang, Ren Yan, et al. Multi-level knowledge modeling method of battlefield environment based on temporal knowledge hypergraph model. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(6): 1148-1163. [蒋秉川, 黄梓航, 任琰, 等. 基于时序超图模型的战场环境多层次知识建模方法. *地球信息科学学报*, 2023, 25(6): 1148-1163.]
- [43] Zhu Dongsheng. *World Classic Battles: War Volume*. Beijing: People's Liberation Army Press, 2010. [朱冬生. *世界经典战例: 战争卷*. 北京: 解放军出版社, 2010.]
- [44] Zheng K, Xie M H, Zhang J B, et al. A knowledge representation model based on the geographic spatiotemporal process. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(4): 674-691.
- [45] Lü G N, Batty M, Strobl J, et al. Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): A geographic perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(2): 346-367.

## Spatio-temporal data modeling of rich semantic for composite events

LIU Feng, ZHONG Zhinong, JIA Qingren, JING Ning, MA Mengyu, YANG Fei  
(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The spatio-temporal feature is a fundamental characteristic of an event. A composite event is the intricate amalgamation of multiple events that have multi-scale spatio-temporal features and multi-level semantic attributes. To effectively model and analyze composite events, it is essential to leverage a spatiotemporal data model that captures the basic features of events and to realize the knowledge mining as well as the simulation and reasoning of the spatio-temporal evolution of events. Existing models often struggle to portray the evolutionary trajectories and causal relationships between entities across different scales of composite events, and lack the ability to capture the dynamically semantic changes of composite events, hindering their ability to meet the requirements for accurate modeling. The primary contributions of this paper are as follows: (1) By analyzing the concept of events within composite events, we propose a rich semantic event spatio-temporal data model that broadens the dimensions of events covered by existing models. We describe the diverse states and behaviors associated with the evolution of multiple entities across various temporal and spatial granularities based on the multidimensional characteristics of events in different domains. (2) We aggregate event hierarchies with their characteristics to establish a multi-level logical framework of events, progressing from complexity to simplicity, from the event itself to its constituent elements. (3) In our model, we depict the associations between events and events, as well as entities and entities within complex events, and analyze the potential causal relationship of the event through the evolution of spatio-temporal relationships and attribute relationships. (4) Finally, we elaborate on the modeling and analysis methods of the rich semantic event spatio-temporal data model by instantiating a historical war in human society. We illustrate the model's application using a GIS platform, demonstrating the knowledge inference process of evolving entity states and changing relationships between entities triggered by events, which lead to the occurrence of new events. Through this process, we validate the feasibility and practicality of our model.

**Keywords:** composite event; rich semantic; event spatio-temporal data model; multiple time and space scales; spatio-temporal evolution causal relationships