arXiv:2512.16487v1 [cs.SI] 18 Dec 2025

时空知识图谱模型综述

Philipp Plamper、Hanna K¨opcke、Anika Groß

摘要——**许多复杂的现实世界系统都具有内在交织的时间和空间特征。因此，时空知识图谱（时空知识图谱）应运而生，成为一种强大的表示范式，因为它们将实体、关系、时间和空间整合到统一的图结构中。它们日益广泛地应用于各类领域，包括环境系统，以及城市、交通运输、社会和人类移动网络。然而，时空知识图谱的建模仍面临挑战：其基础既涉及经典图论，也涉及时序图模型和空间图模型，而这些模型在不同研究群体中独立发展，并遵循异质的建模假设和术语。因此，现有方法往往缺乏概念上的一致性、通用性和可复用性。**

本综述系统梳理了时空知识图谱模型，追溯其在静态、时序和空间图建模中的起源。我们围绕关键建模维度分析现有方法，包括边语义、时序和空间标注策略、时序和空间语义，并将这些选择与各自的应用领域联系起来。我们的分析表明，统一的建模框架基本缺失，当前大多数模型针对特定应用场景量身定制，而非为复用或长期知识保存而设计。基于这些发现，我们提出建模指南，并指出有待解决的挑战，以指导未来研究。

索引词—**知识图谱、时间、空间、时空、建模**

I. 引言

A. 动机

时空知识图谱（STKG）用于建模具有内在空间和时间结构的复杂现实世界现象。例如，它们常用于城市网络领域的人工智能，为在时间和空间尺度上表示知识提供语义丰富的框架 [1]–[3]。图 1 展示了在多个时间点从多个地点收集的数据（左），以及这些数据转换成时空知识图谱表示的结果（右）。时间变化会影响拓扑结构，或节点和边的属性，右侧的图快照展示了这些变化。此外，空间属性还可以确定实体在空间中的位置，例如在笛卡尔坐标系或空间参考系统中，从而影响节点的位置及节点间的距离。图结构在知识表示中发挥着关键作用，并应用于深度学习 [4], [5] 和大语言模型 [6]等技术。时间属性与空间属性相结合，既能带来有价值的见解，也能进一步拓展这些技术的能力，但同时也给知识图谱建模带来了重大挑战。

文献中已有多篇综述，分别探讨了涉及时间属性 [7]–[15] 或空间属性 [16]–[20] 的知识图谱发展与应用。以往关于时间图和空间图的综述往往侧重于其应用与解释，而非对底层图模型给出形式化或标准化定义。鉴于图模型通过从根本上定义节点和边的含义及属性来决定图的基本结构，这一点尤为值得关注。尽管时空知识图谱在众多领域中的应用日益广泛，但由于其起源各异且发展相互独立，现有的时间与空间知识图谱建模方法呈现出异质性。自图论诞生以来，不同研究群体便独立发展出相似的概念，并将其应用于自然科学、物理学、地理学和计算机科学等广泛领域。因此，迄今存在多种尚未得到系统综述或统一的术语和模型。深入考察各类时间图与空间图模型的起源，有助于促进跨学科交流，并推动标准化方法的发展。例如，自动化知识图谱生成方法可以通过复用并整合时空知识图谱模型，从.....中获益

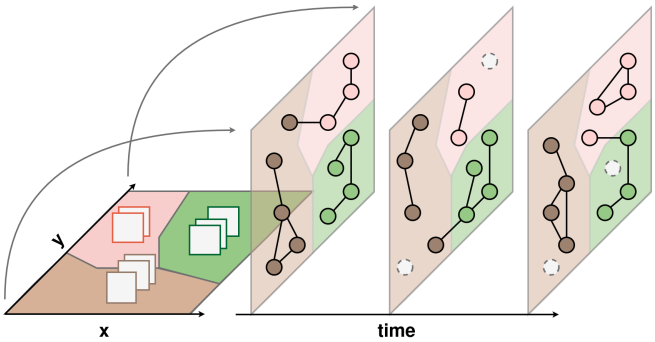


图 1. 从时空数据到时空知识图谱。在示例场景中，数据是在多个地点、多个时间点采集的（左）。时空知识图谱将这些数据点表示为节点，并纳入其空间信息、时间属性及可能存在的关系（右）。

P. Plamper 任职于安哈尔特应用技术大学计算机科学与语言系，地址为德国克滕 Lohmannstraße 23，邮编 06366。电子邮箱：philipp.plamper@hs-anhalt.de。H. K¨opcke 任职于米特韦达应用技术大学应用计算机科学与生物科学学院，地址为德国米特韦达 Technikumplatz 1，邮编 09648。电子邮箱：koepcke@hs-mittweida.de。A. Groß 任职于安哈尔特应用技术大学计算机科学与语言系，地址为德国克滕 Lohmannstraße 23，邮编 06366。电子邮箱：anika.gross@hs-anhalt.de

提示工程，确保对时空动态进行有效建模。基于一致的术语和更强的互操作性，统一的 STKG模型有助于创建长期且彼此兼容的知识图谱。

B. 应用领域

为展示时空图应用的广泛范围，我们重点介绍几个相关领域。在许多领域，数据都与空间参照信息（如地理坐标）相关联，并随时间收集，以监测或预测趋势和发展。当这些数据本身也存在相互关联时，图分析方法便能提供有意义的见解。潜在的应用领域包括：

- **传感器网络**（例如城市、物流或电力网络）：节点表示在空间上分布的传感器及其相关的时间序列测量值，边表示连接这些传感器的街道、交通路线或输电线路。可能的应用场景包括拥堵预测、路线优化和基础设施规划。
- **人类交互网络**（例如社交或流行病学网络）：节点表示个体及其在特定时间的位置，边表示关系或邻近关系。可能的应用场景包括信息传播建模、推荐和模式匹配。
- **计算机网络**（例如网络安全或路由器网络）：节点表示设备及其位置和当前状态，边表示用户或数据包在设备间的移动。可能的应用场景包括网络流量控制和用户移动分析。
- **生态网络**（例如环境或生物网络）：节点表示度量指标，例如与记录日期和区域相关联的已检测生物，而边表示关系或依赖关系，例如物种间的交互。可能的应用场景包括生态系统稳定性与韧性分析、生物多样性维护和养分循环。

近期研究已探讨时空知识图谱的多种应用场景，例如森林火灾预测 [21], 海事通信 [22], 交通预测 [23], [24], 城市出行预测 [25], 移动电话活动 [26], 供水管网中的泄漏风险评估 [27]以及基于骨架的动作识别 [28]。本综述还将考察其他应用，强调它们在各类领域中的重要意义。

C. 范围与贡献

鉴于时空知识图谱的需求及其广泛应用，本综述聚焦于知识图谱中时空属性的建模，尤其关注这些属性如何从时间图模型和空间图模型两方面演化。我们介绍各种图建模方法的基础概念，并整合时空图文献中的多种术语和模型。我们的目标是将这些知识组织起来，使其易于不同研究群体理解。通过这篇综述，我们旨在探讨广泛的计算机科学学术界，无论是将其视为一个独立的研究领域，还是视为支持多个领域众多应用的重要跨学科领域。

本综述旨在整合时空知识图谱模型的基础发展与概念。我们重点关注建模过程中对时间和空间属性的图表示。超出本综述范围的是，从业者在实施过程中还需要决定哪种类型的知识图谱最适合特定用例，例如属性图 [29]或 RDF 图 [30]–[32]结合本体 [33], [34]。

现有综述和方法主要关注时空知识图谱在深度学习任务中的应用 [2], [3]，或试图针对 RDF 图 [35]–[39] 或本体 [40]–[42]，对时空数据管理进行形式化。据我们所知，这是首篇专门探讨时空知识图谱模型的综述。本文追溯时空知识图谱在时态和空间知识图谱中的起源，并回顾当前文献，以统一并指导 STKG 建模。本文的主要贡献如下：

- 系统概述时空知识图谱，以及它们如何从静态、时态和空间图模型发展而来，并涵盖各种应用领域。
- 初步提出一套建模指南，将时态和空间属性整合到节点和边中，为时空知识图谱的发展奠定基础。
- 概述时空知识图谱当前面临及新兴的挑战。

本综述其余部分安排如下：第二节概述静态知识图谱，将其作为后续时态和空间知识图谱模型及相关研究的基础。第三节回顾基础性和当代的时空知识图谱模型，并提出其建模指南。第四节讨论处理时空知识图谱时面临的当前挑战，第五节总结全文。

D. 综述方法

文献综述涵盖了广泛的来源，旨在全面概述近期出版物以及具有历史意义的出版物。在撰写本综述时，我们力求识别文献中提出的不同类型的图模型。因此，我们检索了有关静态图、空间图、时间图和时空图的研究。在许多情况下，出版物重点讨论图分析，却未明确说明其底层建模方法，因此我们需要仔细审阅各篇论文，以确定是否定义了图模型。我们没有设置严格的时间范围，因为有些图模型在该领域研究早期就已提出，而我们希望确保不会遗漏任何重要贡献。

我们纳入了在 Google Scholar、Google、IEEE Xplore 和 Connected Papers 中收录的出版物。我们的初始检索词包括“知识图谱”“时间（知识）图”“时间网络”“空间（知识）图”“空间网络”“时空（知识）图”和“时空网络”。我们仅纳入明确

提出图模型的论文，以确保我们的综述涵盖基础性模型框架，而非纯粹聚焦于应用的研究。我们纳入以英语撰写的出版物。为确保全面覆盖相关文献，我们随后采用了滚雪球法 [43]。确定关键出版物后，我们查阅了其参考文献列表（反向滚雪球），并审阅引用这些出版物的论文（正向滚雪球），以寻找其他相关研究。

II. 知识图谱

“图”通常指由一组实体（例如物体、人物或区域）构成的集合，这些实体通过不同类型的关系相连。“知识图谱”一词尚无普遍接受的定义，因为其范围和边界仍存在多种解释及持续的争论 [44]–[46]。在本综述中，我们广义地使用“知识图谱”一词，指以图为基础表示实体及其关系（例如属性图或 RDF 图），并可能包含额外元数据（如时间和空间）的表示形式。我们也将“图”和“网络”这两个术语互换使用。

图 2 示意性地概述了从简单图模型（上方）到时空图模型（下方）的发展过程。本节首先在第二节-A介绍基本的静态图模型，随后介绍纳入时间信息（第二节-B）和空间信息（第二节-C）的方法。

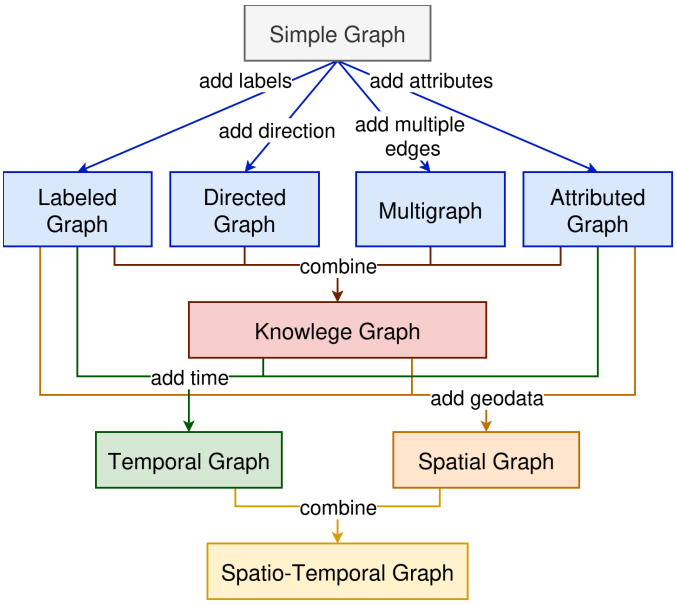


图 2. 时空知识图谱起源概览。简单图模型通过添加额外特征得到扩展，并结合了时间和空间属性。

A. 静态图模型

图的研究大多未涉及语义丰富的节点和边，例如缺少时间信息和空间信息。Albert 汇总了这类静态图模型广泛的应用领域。和 Barab´asi [47]。定义 1 给出了一种常用的简单图定义 [48], [49], ，该定义仍是后续图建模进展的基础。

定义 1（简单图）。简单图 G 描述为 $G = (V, E)$。V 是一个非空的顶点或节点集合$v \in V$。E 是一个可能为空的（$E = \emptyset$）无序无向边或关系集合 $E \subseteq \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v\}$，用于连接顶点。

简单图的一些定义还包含关联函数 $\psi_G : E \to (V \times V)$ [49]，它是一个全函数，将 G中的一对顶点分配给 G中的每条边。图可以表示为关联矩阵或邻接矩阵[49]:

- 关联矩阵 $M(G)$ 为每个顶点分配与其关联的边。它是一个 $V \times E$ 矩阵，定义为$M(G) = [m_{ij}]$，其中 m_{ij} 是$v_i \in V$与 $e_j \in E$ 关联的次数。
- 在邻接矩阵 A（G）中，边并不以显式形式表示，而是由顶点对（$V \times V$）隐式确定。其定义为 A（G），其中 a_{ij} 是连接 $v_i \in V$和 $v_j \in V$的边数。

尽管简单图模型广泛应用于许多应用中，但它无法捕捉节点及其之间边的存在性之外的信息。因此，简单图以多种方式进行了扩展:

- 在有向图中，边是节点的有序对（u, v）。
- 在多重图中，两个节点之间可以由多条边相互连接，并且允许存在连接它们的自环。
- 标记图为节点和边分配标签 [50]。
- 属性图为节点或边添加属性，例如键值对 [51]。
- 加权图涵盖节点之间关系的强度或权重，[48], [52], [53], 超越了单纯的拓扑结构，即边是否存在。

通过纳入这些修改，属性图模型和 RDF 图模型扩展了简单图模型，以定义语义丰富的知识图谱。两者广泛应用于各种应用中 [29], [54]–[57]，并受到多种图数据库的支持 [58]。以下定义 2 和定义 3 给出了属性图模型 [59] 和 RDF 图模型 [60]的通用定义:

定义 2（属性图 [59]）。属性图可定义为 $G = (N, E, \rho, \lambda, \sigma)$，其中 N是节点集合，E是边集合，ρ描述了关联函数，在简单图模型中记作 ψ_G。偏函数 λ 和σ 将节点和边与标签及属性相关联，这些也称为键和值。

定义 3（RDF 图 [60]）。RDF 图可定义为 $G = \langle V, L_V, f_V, E, L_E, f_E \rangle$其中 V 是顶点集合，E 是边集合，L_V 是顶点标签集合，L_E 是边标签集合，而 f_V（f_E）是顶点（边）标记函数，用于为每个顶点（边）分配一个标签。

B. 时序图模型

现实世界系统中收集的数据通常是动态的，而非静态的，其中包含时间信息，例如记录时间或最后更新时间。时间信息有助于将数据置于具体情境中，例如用于分析发展变化和趋势。因此，为时态数据管理而创建的知识图谱应在图模型中体现时间信息。时间变化可能影响图的拓扑结构、节点和边的属性，或节点之间的关系 [9]。许多研究致力于将时态扩展集成到图数据库中 [61], [62], , 涵盖时态图数据库模型 [63], [64]和时态图查询语言 [65], [66]。

为满足时态知识图谱应用的复杂需求，现有图分析方法必须进行调整。例如，中心性度量存在时态扩展 [67]（如时态“PageRank”算法 [68]），最短路径计算也有相应的时态扩展 [69], [70]，此外还可用于检测社群 [15], [71]。

时序知识图谱模型和分析方法的快速发展，导致出现了大量尚未标准化的名称和术语，作者们反复以不同方式定义相似或相关的概念和模型 [10]。为提供概览，我们检索了时态知识图谱相关文献，查找密切相关的术语或同义词，并在表 I 中对其进行总结。

表 I 时态知识图谱的名称

Name	**出版物**
有向无环图	[71]
动态网络	[72]
演化图	[70], [73], [74]
演化网络	[75]
随时间变化的图	[76]
交互网络	[77]–[79]
链接流图	[80], [81]
时序图	[11], [65], [69], [82]–[87]
时间网络	[10], [88], [89]
时序属性图	[66], [90], [91]
时变图	[12]
随时间演化图	[92]
时间有序图	[67]
时变图	[8], [93], [94]
时变网络	[95]

时序知识图谱的领域已显著扩展，如 Holme [9] 的综述所述，如今已广泛应用于许多领域。人们提出了多种静态图模型的改编方法，用于建模时序知识图谱。我们调研了相关文献，并归纳出不同类别，分别涉及 1）边方向、2）时间标注和 3）时间语义。我们将在以下小节中详细阐述这些类别。本节稍后将使用表 II 中的分类，根据这些属性总结时序图模型。

1）边方向：在时序知识图谱中，边可以是无向边、有向边，也可以兼有两者。无向边表示两个节点在某个时间点上的平等（对称）关系（例如，计算机网络中两台计算机之间的连接 [74]）；而有向边则可以表示节点之间的信息流（例如，引文网络中的信息流 [91]）。

2) 时间标注： 任何时态知识图谱模型都必须提供一种表示时间信息的方法。例如，属性图模型的时态扩展（见定义 2）通常称为时序属性图 [66], [90], [96]。总体而言，如图 3 所示，我们在文献中发现了将时间纳入时序知识图谱的四种主要方式：A）节点标注、B）边标注、C）节点-边标注和 D）图标注。

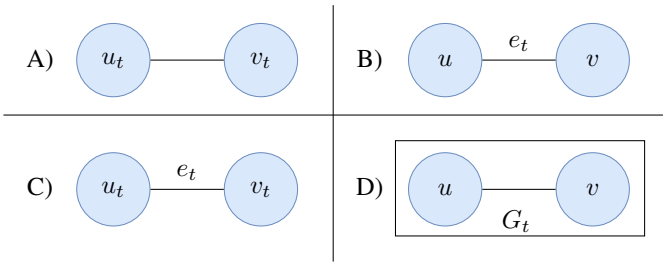


图 3. 时序知识图谱中的时间标注。在节点标注图（A）中，时间存储在节点上，即节点 u 和 v 在时间 t有效。边标注图（B）将时间存储在边上，即 u 和 v 之间的边在时间 t存在，而节点保持静态。在节点-边标注图（C）中，时间可以存储在节点和边上。在图标注方法（D）中，节点和边都不存储时间。图 G_t 表示时间 t的节点和边。

Campos 等人 [65] 提出了一种**节点标注**时序图模型，即只有节点存储时间信息。作者展示了该模型在社交网络中的适用性。他们将时序图定义为 $G(N_o, N_e, N_a, N_v, E)$，其中E 是一组边，而 N_o, N_e, N_a 和 N_v 分别表示对象节点、边节点、属性节点和值节点。每个节点都分配一个元组（$name, interval$），其中包含节点名称以及该节点有效的时间间隔。因此，该模型预先定义了不同类型的节点，用于存储不同的属性。边本身不存储任何信息，而是按照定义的约束连接不同类型的节点。

Rossetti 等人 [79]为社交网络提出了一种纯粹**边标注**的时序图模型。在他们的时序图 $G = (V, E, T)$ 中，时间属性仅添加到边上。 V 是静态顶点的集合， T 是时间戳的集合， E 是带时间戳的边的集合。每条边$e \in E$由一个元组（u, v, t）描述，其中包含其起始顶点（$u \in V$）、终止顶点（$v \in V$）以及边有效时的时间戳 $t \in T$。

为了支持在节点和边上丰富时间信息，Moffitt 和 Stoyanovich [73] 提出了一种**节点-边标注**时序图模型，该模型建立在 Angles [59]提出的属性图模型之上（参见定义 2）。作者将时序图定义为$G = (V, E, L, \rho, \xi^T, \lambda^T)$，其中 V是有限的顶点集，E 是有限的边集， L 描述了有限的属性标签集

表 II 时序知识图谱模型 重点：D - 应用领域，M - 通用图模型，A - 分析/算法

论文	Year	边		时间注释			时间语义			重点	应用领域
		Undirected	Directed	Node	Edge	Graph	Duration	Interval	Timestamp		
Ferreira 等 [74]	2004	x				x			x	M	无线通信网络
Basu等人 [93]	2010	x	x			x			x	A	动态随机图
Kim等人 [67]	2012	x	x		x			x		A	人类接触网络
Huo 等人 [70]	2014	x	x	x	x			x		A	社交网络
Wu 等人 [69]	2014	x	x		x		x		x	A	航班图以及社交和书目网络
Kumar 等人 [78]	2015	x			x				x	A	社交和书目网络
Rossetti 等人 [79]	2015	x			x				x	A	社交和书目网络
Campos 等人 [65]	2016	x		x				x		M	社交网络
Moffitt 和 Stoyanovich [73]	2017		x	x	x				x	M	交互、书目网络
Semertzidis 和 Pitoura [84]	2019		x			x			x	A	书目、生物网络
Rost等人 [91]	2019		x	x	x	x		x		M	书目网络、（合成）社交网络
Gandhi等人 [82]	2020		x	x	x			x		M	社交网络、书目网络
Byun 等人 [90]	2020		x	x	x			x	x	M	书目网络、计算机网络、交互网络
Debrouvier 等人 [66]	2021		x	x	x			x		M	社交网络、航班图
Lou 等人 [83]	2023	x			x				x	A	书目、资金转账网络
Plamper 等人 [97]	2023		x	x					x	M	化学网络

，ρ 是关联函数。此外，全函数 ξ^T 将节点（边）与一个时间段共同映射为布尔值，以表示该节点（边）在该时间段内是否存在。偏函数 λ^T 则将节点（边）与属性标签和时间段共同映射为该时间段内的属性值。作者展示了该模型在交互网络和其他网络中的适用性。

最后，在 Semertzidis 和 Pitoura 提出的**图标注** 时序图模型中，[84],时序图 $G_{[t_i,t_j]}$ 是由一系列图快照 $\{G_{t_i}, G_{t_i+1}, \ldots, G_{t_j}\}$组成的序列。每个图快照 $G_t = (V_t, E_t, L_t)$表示离散时间戳 t处活跃的顶点 V、边 E 和标签 L 集合。例如，这种时序图注释被应用于生物网络[84]。

3）时间语义：时间语义描述了时序知识图谱中的时间应如何解读。图 4 展示了现有时序知识图谱模型采用的不同时间语义：时间可以指 A）持续时间、B）时间间隔或 C）时间戳。

Wu 等人 [69] 提出了一种**以持续时间标注**的时间语义（图 4 A）。作者通过加入有向时序边 $e = (u, v, t, \lambda)$扩展了简单图模型，其中 t 是起始时间，λ 是从 u到 v的遍历时间。例如，这种时间语义可用于表示航班图中的飞行时长，或通话图中的通话时长。

De- brouvier 等人提出了一种**区间标注**时间语义 [66]（图 4 B）。他们基于 Campos 等人 [65]，定义了一种时序知识图谱，其形式为$G(N_o, N_a, N_v, E)$。在该模型中，边 E、对象节点 N_o、属性节点 N_a 和价值节点 N_v 都与表示各自有效时间段的时间区间相关联。定义好的约束决定了哪些类型的节点可以彼此连接。特殊值 now表示某个节点或边当前是否有效 [98]。例如，这种时间语义可应用于自行车租赁图中的时序模式匹配 [99]。

Lou 等人提出了一种**时间戳标记的**时间语义 [83]。作者通过将每条边 $e \in E$ 表示为三元组 $e = (u, v, t)$，扩展了简单图中的边，其中u 和 v 是静态节点，t 是该边处于活动状态时的时间戳。这种时间语义使图能够表示为一系列静态图，通常称为快照图 [70], [74], [78], [79], [83], [84], [93]。静态图序列非常适合某些传统分析方法，因为这些方法通常依赖静态图，因此这种方法成为图建模的热门选择 [92], [100]‚[101]。例如，时间戳标记的时间语义可应用于资金转账网络 [102] 或书目网络

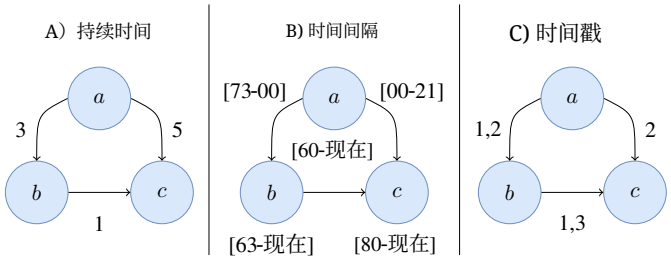


图 4. 时序知识图谱中的时间语义。带持续时间标记的语义（A）定义了从一个节点到另一个节点的遍历时间。带时间间隔标记的语义（B）表示节点或边有效的时间段。带时间戳标记的语义（C）反映了节点或边有效的离散时间戳。

网络 [83]。

4）总结：时态知识图谱建模主要涉及三个关键方面：（1）边方向；（2）时间的标注位置；（3）时间语义。表 II 总结了以往时态知识图谱的建模方式。对于每篇出版物（每一行），该表列出了年份、边是有向还是无向、时间标注的位置、时间语义、重点和应用领域。出版物的重点可能在于解决特定应用领域中的研究问题（D）、提出通用图模型（M），或引入新的通用分析方法或算法（A）。即使具体重点并非总是清晰可辨，而且可能彼此重叠，这种分类仍能反映更普遍的趋势，并粗略概述每篇出版物的范围。对于不聚焦于特定应用场景的通用方法，表 II 右栏中提及的应用领域，指的是该出版物中评估数据集或运行示例所属的领域。根据该表，有向边是时态知识图谱模型中最常用的，其次是无向边，而有些模型同时支持这两种类型。在大多数情况下，作者选择在节点和边上都标注时间信息，或仅在边上标注。仅在节点上或图级别分配时间信息的情况相对少见。时间主要以离散时间戳表示，较少以时间区间表示。持续时间标注的时间语义并不常见，通常仅与时间戳标记的时间语义结合使用。各出版物对通用时序图模型（M）和新分析方法（A）的关注程度相当。相比之下，没有发现面向应用的研究贡献（D）。有些应用领域在文献中频繁出现，例如社交网络和书目网络；另一些则鲜少出现，包括航班图、生物网络和化学网络。

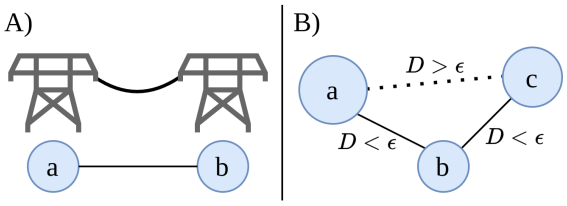


图 5. 获取具有空间信息的节点之间的边。有时，节点之间的边（A）本身就是已知的，例如电线杆之间的输电线路。推理方法（B）则尝试推断实体之间缺失或未知的边，例如通过设定距离阈值。

C. 空间图模型

在现实世界系统中，地理坐标等空间信息发挥着至关重要的作用，因为许多过程、交互和依赖关系都会受到实体在空间中位置的影响。例如，空间信息能够支持在地图上可视化数据，或分析对象之间的距离

表 III 空间知识图谱名称

Name	**出版物**
地理空间网络	[103]
地理社交网络	[104]–[107]
景观图	[18]
基于斑块的图	[19]
电网	[108]
空间网络	[20], [109]
空间图	[110]
街道网络	[111], [112]
交通网络	[113]
交通图	[114]

。知识图谱可以通过对实体之间的空间关系进行建模来支持空间数据管理，从而使实体的位置不再是抽象空间中的任意设定 [115]。

Fall 等人 [110] 将空间图定义为一种几何参考系统，它将节点和边关联到特定的空间位置。这是关于空间图论最早的现代参考文献之一。在其他领域中，“空间图”一词有不同含义，本文不作详细探讨。例如，在数学中，它指嵌入三维空间的图，其中边可以相交[116], [117]。

空间图的起源可追溯至 20 世纪中叶的定量地理学领域 [20], [118]–[121]，当时研究人员探讨了将数学图论融入其研究领域的模型和方法 [122]–[124]。定量地理学涵盖用于研究空间现象、议题和问题的所有方法与技术，例如遥感、数学和地理信息系统（GIS） [119]。地理信息系统是专门用于收集、存储、处理和呈现空间数据的系统 [125]，并作为分析空间数据的基础框架 [126]–[128]。尽管空间图起源于地理学，一些学者将其视为抽象模型，并称之为“地理图”，以强调地点和意义 [129]。

空间图有广泛的应用，包括社交网络 [104]–[107]，、交通运输 [112]–[114],[130], [131]，、体育 [132], [133]，、公共设施 [134]，、生态学 [18], [19], [135], [136]，、能源 [108] 和化学 [137]。它们很少被称为“空间图”，通常会根据具体应用采用相应名称，详见表 III，这使得文献检索和筛选更加困难。我们将知识图谱中融入空间信息的方法分为以下几类：1）边方向与推理；2）空间标注；3）维度。我们先讨论主要方法，再对出版物进行分类，汇总见表 IV。

1) 边方向与推理：空间知识图谱使用有向边、无向边或两种类型的边进行建模。有向边可在非对称权重下表示实体之间的路径，例如考虑地形坡度的最低成本路径 [110]。无向边可表示空间邻近性，例如社交网络中用户之间的距离 [106]。有时，边可以表示以物理实体形式存在的关系，例如电力网中的输电线路

网络（图 5 A） [108]。如果两个节点 v_i和 v_j 由物理实体连接，则可生成此类基于拓扑的图的邻接矩阵 [2] ：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } v_i \text{ connects to } v_j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

某些空间知识图谱的拓扑结构要么模糊不清，要么不存在。即使节点带有空间信息，边也可能缺失或未知，例如在景观建模 [138], [139] 或网络互连[140]中。已有多种方法基于特定假设或规则来推断边。Barth´elemy [20]对这些方法进行了详细综述。例如，基于距离的图方法 [2], [141] 基于 Waxman模型 [142] ，在概念上也基于 Tobler [143], 提出的地理学第一定律，即“万物皆相互关联，但相近的事物比相距遥远的事物关联更紧密”。如果两个节点 v_i 和 v_j 之间的距离 D（例如欧几里得距离）小于阈值 ϵ，则可以生成基于距离的图的邻接矩阵（图 5 B）：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } D(v_i, v_j) < \epsilon, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

*2)*空间标注：与时间图类似，空间信息也可以用不同方式建模：A）节点标注，B）节点-边标注，以及 C）图标注。图 6 展示了空间知识图谱的不同建模选项。

Buhl 等人 [112]提出了一种用于街道网络的**节点标注**空间图模型。该模型扩展了早期未纳入空间信息的方 [111], [144], 法，从而能够分析拓扑和几何模式。作者定义了一个嵌入平面图 $G = (V, E)$，其中 $V = \{(v_i, x_i, y_i), (i = 1, ..., n)\}$ 是一个由位置（x, y）表征的节点集合，而 $E = \{(v_i, v_j)\}$ 是节点之间的边集合。平面图是一种可以

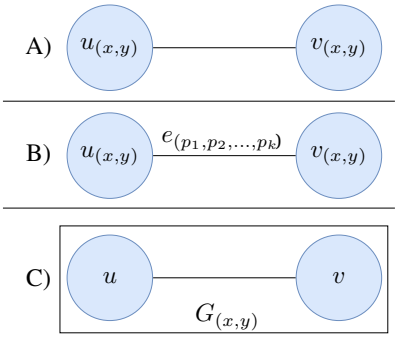


图 6. 空间知识图谱中的空间标注。在节点标注图（A）中，空间信息存储在节点上，例如 $u_{(x,y)}$。在节点-边标注图（B）中，空间信息还存储在边上。(p_1、p_2、.....、p_k) 中的每个点 p 表示一个坐标（x、y），并影响该边的路径。在图标注方法（C）中，一组节点构成非空间图，但该组节点本身带有空间信息标注。

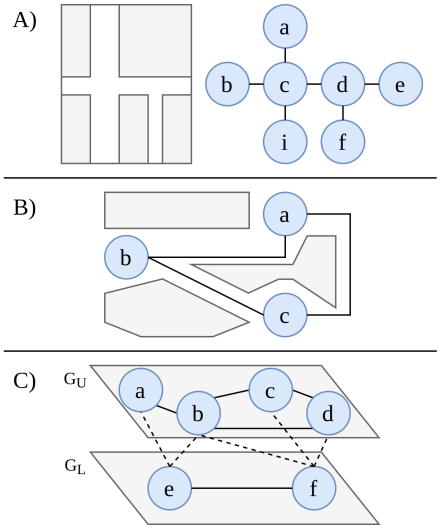


图 7. 空间知识图谱模型示例。街道图（A）可以表示为二值地图（左），其中公共空间为白色，私人空间为灰色。派生图（右）将交叉口和死胡同视为带有坐标的节点，并将街道视为连接这些节点的边。在景观图（B）中，节点可以表示区域，边可以表示最低成本路径。社交网络（C）可分为上层 G_U，用于表示用户及其关系；以及下层 G_L，用于表示位置和上层用户的移动。层与层之间的边表示用户签到的位置。

在平面上绘制且边彼此不相交的图 [145]。图7A展示了一个由街道网络生成的平面图。节点是正方形、街道交叉口和死胡同。边是街道子路段。

Fall 等人提出了一种节点-边标注空间图模型 [110]。作者将空间图定义为$G = (N, L, S, f_{cost})$，其中 N是节点集合， L 是连接边（边）的集合， S 是空间域， f_{cost} 是空间成本函数。节点 n 是矩形网格内由连续相邻的方形单元组成的二维区域（区域），该网格位于笛卡尔平面上，称为空间域 S。连接边$l = ((n, m), (p_n, ..., p_m))$由节点 n和 m以及连接点 p_n 和 p_m的一条线组成。点 p_n 和 p_m 是节点 n 和 m内的无量纲位置。简单线段是连接两点（p_1, p_2）的一维向量。一般线由一系列简单线段构成，以点列表（$p_1, p_2, ..., p_k$）表示，并影响节点之间的路径。例如，在生态学中，这些路径可以表示景观连通性 [146]。空间成本函数 f_{cost} 是一个在每个方形单元上变化的函数。其数值可解释为通行成本，用以反映例如移动所需的运动能量或死亡风险。图7B展示了这样一种节点-边标注图。节点表示地点，边表示它们之间的移动路径。由于存在障碍物，直接路线并非总是可行；这些障碍物可以通过成本函数 f_{cost}建模为较高的成本。

Hristova等人提出了一种**图标注**空间图模型 [106]。作者介绍了一种将社交图投影为空间图，反之亦然的方法。该模型由两个层组成。第一层是社交图 $G_U = (V_U, E_U)$，其中 V_U是一组用户， E_U是一组友谊关系。第二层是空间

表 IV 空间知识图谱模型 重点：D - 应用领域，M - 通用图模型，A - 分析/算法

论文	Year	边				空间注释			Node Dimensionality	重点	应用领域
		Undirected	Directed	Explicit	Inferred	Node	Edge	Graph			
Keitt 等人 [147]	1997	x			x	x			2维	D	景观图
Buhl 等人 [112]	2006	x		x		x			零维	D	街道网络
Crucitti 等人 [148]	2006	x		x		x			零维	D	街道网络
Fall 等人 [110]	2007	x	x		x	x	x		2维	M	景观图
Scellato 等人 [104]	2010	x	x	x		x			零维	D	社交网络
Zhong 等人 [109]	2014		x	x		x			2维	D	城市网络
Wang 等人 [105]	2016		x	x		x			零维	D	社交网络
Hristova等人 [106]	2016	x		x	x	x		x	零维	D	社交网络
Fang 等人 [107]	2017	x		x		x			零维	A	社交网络
Wang 等人 [103]	2020		x	x	x	x			零维	D	城市网络

图 $G_L = (V_L, E_L)$，其中 V_L 是一组位置，E_L 是一组描述用户在这些位置之间转移的边。互联图 $G_M = (G_U, G_L, I)$结合了社交图和空间图，其中 I 是一组记录用户 $u \in V_U$在位置 $l \in V_L$的访问次数$w_{u,l}$ 的边。图7C展示了一个图标注空间图。上层图 G_U 显示了用户及其关系，但不包含空间信息。下层图 G_L表示带有空间信息的位置，以及上层图中用户的移动。层与层之间的边描绘了用户访问的地点。

3) 维度： 空间知识图谱建模能够将节点从零维点（或将边从一维线）扩展为二维多边形，例如表示具有不同宽度的区域或街道等空间区域。然而，本研究未发现任何将一维边转换为二维表示的转换方法。不过，已有多个模型被提出用于表示二维节点。在此背景下，一个关键的建模决策是确定边可以位于二维节点的何处。边既可以连接到节点上的任意位置，例如 Fall 等人 [110]（图 8 A），也可以被限制在二维节点的几何中心，例如 Keitt 等人 [147] （图 8 B）。

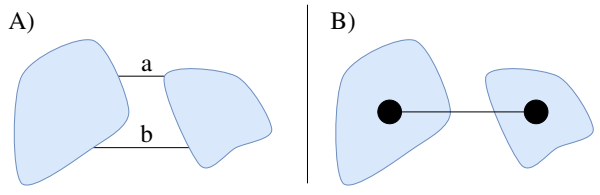


图8. 二维节点上的边定位。（A）边可以放置在节点上的任意位置，从而使同一对节点之间能够存在多个连接。（B）节点在其几何中心处连接。

4) 总结： 空间知识图谱根据（1）边的方向和推理、（2）空间信息的注释以及（3）节点的维度进行建模，如表 IV 所总结。每一行包含一篇出版物，并进一步根据其重点和应用领域进行分类，这与我们在表 II 中针对时态知识图谱模型所采用的方案（第 II-B 节）类似。大多数提出的空间知识图谱模型使用无向边，而有向边或二者的组合出现得较少。在大多数情况下，边由底层数据显式提供，尽管一些作者仅使用推断边，或将两种类型的边结合起来。空间标注几乎总是应用于节点级，有时才会出现边级或图级标注。这些模型主要采用零维节点，只有两种方法支持更高维度的节点表示。与时间图不同，大多数关于空间知识图谱的出版物都通过结合特定用例的图模型与新的分析方法，聚焦于特定应用领域内的研究问题（D）。只有少数例外提出了更通用的模型（M），或引入了与领域无关的分析方法（A）。相关应用领域主要包括景观图、社交网络和城市网络。

III. 时空知识图谱模型

时空知识图谱融合了前文所述时序知识图谱和空间知识图谱的特征，即能够对随时间演变且位于空间中的关联实体进行建模。尽管图式时空数据模型与许多现实世界复杂系统密切相关，但在21世纪初却被搁置一旁 [149]。基于时态 [150]和空间 [151]数据库，众多时空数据库和模型 [152]已充分体现出二者结合的重要性。虽然已有一些分析时空数据的方法，但它们

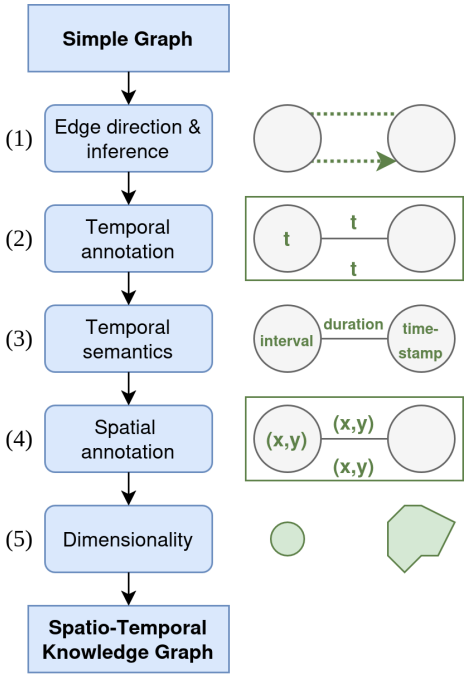


图 9. 建模指南：时空知识图谱可以通过扩展简单图模型，并添加属性和修改，使其能够纳入空间和时间信息。

仍难以应对数据采集和验证方面的挑战[153]，且缺乏上下文信息的集成，例如通过知识图谱实现 [154]。在 2010年代，Del Mondo 等人 [155] 是最早重新将时空图作为重要研究课题提出的学者之一。近年来，时空知识图谱日益广泛地应用于各种场景，包括人类移动预测 [25]、零售销售预测 [154]、交通流量预测 [154]、船舶通信 [22]、交通流预测 [23]、活动地点识别 [26]、火灾检测 [156]、人体动作识别 [28]、医学影像 [157], [158]、行人行为预测 [159]、空气质量预测 [160]、风力涡轮机状态监测[161] 以及常用地点发现 [162]。

接下来，我们将首先提出一项用于建模时空知识图谱的主要指南，然后更详细地讨论基础及近期的时空知识图谱方法。

*1)*时空知识图谱的建模指南：时空知识图谱统一并扩展了时序知识图谱和空间知识图谱的建模原则。我们根据第 II-B 节和第 II-C 节中确定的类别分析 STKG模型，并在表 V 中提供全面的分类，稍后将在本节中加以总结。基于文献调研以及前几节的研究发现，我们提出一套通用建模指南，以支持应用中的时空知识图谱开发。该指南旨在提供概念性工作流程，而非规定性的操作程序：建模决策可以迭代式地重新审视，其顺序并非固定，而是取决于应用领域的具体需求、数据特征和目标。

在建模过程中**边方向和推理**（参见第二节 B 和第二节 C）包括确定边应为有向边还是无向边，以及边是否经过明确定义或通过推理方法推断得出（图 9（1））。如果边的语义取决于方向，则需要使用有向边；否则可以使用无向边。当同一模型中存在不同的边语义时，可以同时纳入有向边和无向边。空间图的主要建模方法提出了各种方法，用于在边事先未知的情况下推断边。模型可以同时包含明确定义的边和推断出的边。

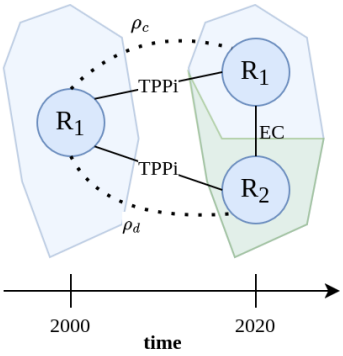
时空知识图谱的**时间方面**（参见第二节 B）包括时间标注及其相关的时间语义（图 9（2、3））。时间标注可以应用于节点、边、节点-边或图层级。节点标注图将时间信息存储在节点上，并将边视为静态或由外部定义；边标注图通常依赖于不断变化的边集和静态节点集。节点-边标注图支持在节点和边上进行时间标注。图标注方法与其他方法的不同之处在于，它们表示的不是单个图，而是一组经过时间标注的图。时间语义可分为时间戳、时间区间和持续时间。时间戳通常表示为离散整数，而时间区间则支持对连续时间进行建模。持续时间通常与其他时间语义之一结合使用。

时空知识图谱模型的**空间方面**（参见第二节 C）由空间标注和维度（图 9（4、5））来表征。空间标注可以应用于节点、节点-边或图层级。节点标注图将空间信息存储在节点上。节点-边标注图还会在边上存储空间信息。图标注方法通常由两个独立的图组成：一个图在节点上存储空间信息，另一个图则存储不含空间信息的节点。这两个图通过边相连，这些边将不含空间信息的节点连接到包含空间信息的节点。空间信息可以几何体的形式存储，从而使节点能够以两个或更多维度建模。

总而言之，时空图模型可以通过以下方式进行建模：（1）确定边的形成方式（显式的还是推断的、有向的还是无向的）；（2）决定将时间信息附加到何处（节点、边或图级别）；（3）决定将空间信息附加到何处（节点、边或图级别）；（4）选择时间语义（时间戳、时间区间或持续时间）；以及（5）确定节点的空间维度（点还是区域）。

2）基础时空图模型：Renolen[163] 于1996年提出了最早的时空图模型之一，称为“历史图模型”。该模型属于概念模型，仅探讨如何在图结构中处理时空数据的基本原则，不包含正式定义或实现。作者指出，时空对象的变更（也称为事件）可发生在多个层面，例如属性、几何或拓扑层面。这些事件（例如一条新街道开通）也可能是较长过程（例如修建一条街道）的结果。作者还进一步阐述了基于状态的建模方法与基于事件的建模方法之间的区别。在基于状态的方法中

对象的历史可视为一系列状态，而在基于事件的方法中，历史则被视为一系列事件。基于状态的方法会丢失状态变化的原因。在基于事件的方法中，可以从初始状态累加变更来推导变更和状态，但其缺点是必须始终重新计算任意给定状态的信息。作者认为这两种模型相辅相成，并将它们结合为“历史图模型”。该模型区分七种不同类型的事件：创建、变更、毁灭、再生、分裂、合并和重新分配。图10展示了一个历史图。圆圈表示事件，其宽度对应事件的持续时间。可能发生的事件基于上述七种类型，例如，在 t_1 处发生创建 e_1，以及在 t_2处发生分裂 e_2 。矩形表示状态，其宽度表示有效时间间隔。多边形则将历史图呈现为一个受事件影响、并因此产生不同状态的区域。



Region

ID	Year	Name	Size	Geom
R_1	2000	Region 1	20 km^2	g1
R_1	2000	Region 1	10 km^2	g2
R_2	2020	Region 2	10 km^2	g3

Filiation

ID_1	$Year_1$	Φ	ID_2	$Year_2$
R_1	2000	ρ_d	R_2	2020

图 11. Del Mondo 等人 [164] 提出的时空知识图谱（左）及其在关系数据库中的实现（右）示例。该图展示了区域随时间的变化，以及它们之间的拓扑关系和谱系关系。表格展示了左侧图在关系数据库中的实现。

Del Mondo 等人 [164] 提出了时空知识图谱最早的形式化定义之一，并通过智利区域和省份的演化展示了该模型的原理。作者将时空知识图谱定义为 $G=(V,E_\Gamma,E_\Phi)$。V是一个顶点集合（e,t），其中 e 是标签，例如某个区域； t 是具有相同粒度的时间实例列表 $T=(t_1,..,t_n)$ 中的一个元素。 E_Γ 是一个元组集合 $((e_i,t_i)\ \gamma,(e_j,t_j))$，其中$t_i \le t_j$ 和 $\gamma \in \Gamma$。拓扑关系 Γ 描述实体在空间中的关系，包括“e_1 是 e_2的一部分”、“e_1 与 e_2重叠”或“e_1 与 e_2 等价”等关系，其中 $e_1,e_2 \in V$；Randell 等人 [165] 和 Cohn 等人 [166]曾对这些关系进行综述。 E_Φ 是一个元组集合 $((e_i,t_i)\ \rho,(e_j,t_j))$，其中 $t_i \le t_j$和 $\rho \in \Phi$。谱系关系 Φ 与实体的身份有关，可分为延续 ρ_c 和派生 ρ_d。如果实体 e 在 t_i 和 t_j之间持续存在，则存在延续关系ρ_c，例如某个区域在两个连续的时间实例中名称相同。如果某个实体派生为其他实体，则存在派生关系 ρ_d ，例如某个区域分裂成两个名称不同的区域。此外，作者还介绍了在关系数据库中实现时空图的方法。实体存储在实体表 $E(ID,Time,U_1,...,U_n,G)$ 中，其中ID 是节点的标识符，$Time$ 是对应的时间实例 $t \in T$，(U_1、.....、U_n) 是一个可能为空的描述属性集合，而 G 是几何属性。派生表定义为 $F(ID_1$、$Time_1$、Φ、ID_2、$Time_2)$，其中 ID_1 和 ID_2 是相连节点的标识符，$Time_1$和 $Time_2$ 是相应节点的时间实例，而 Φ 是派生关系 ρ_d。延续关系 ρ_c 和拓扑关系 Γ 可以从数据中推导出来，因此不会显式存储在表中。

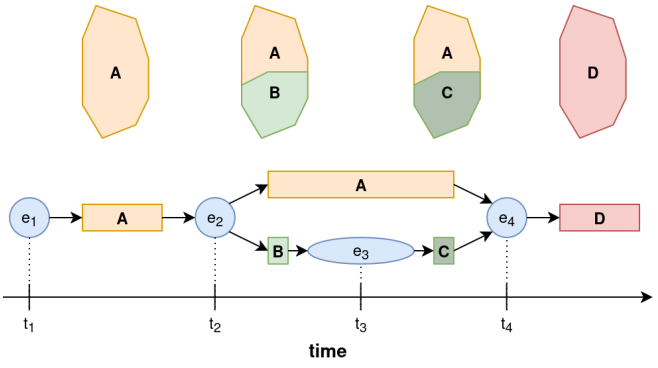


图 10. Renolen [163] 提出的历史图示例。矩形表示持续时间不同的状态，圆形表示瞬时事件，椭圆表示持续时间较长的事件。多边形展示了一个区域及其在历史图中对应的不同状态。

图 11 展示了所提出的时空图模型（左）及其在关系数据库中的实现（右）。区域 R_1 在 2000 年至 2020 年间分裂为两个区域 R_1 和 R_2 ，二者通过边界外部连接（EC）。这两个区域都是 R_1的逆切向真部分（TPPi），即 R_1 完全包围这两个区域，且二者共享同一外边界。R_1 继续存在（边 ρ_c），而 R_2 形成了一个由 $R1$派生的新区域（边 ρ_d）。实体表 $Region$存储这些区域及其对应的时间实例、描述属性和几何信息，例如多边形。派生表存储派生关系 ρ_d ，即从 R_1 到 R_2的派生关系。

*3)*当代方法与应用：继早期基础模型之后，随着时间推移，涌现出各种各样的新模型，这些模型通常针对特定应用或分析方法量身定制。Jin 等人 [2] 在其 2024年 综述中观察到，与时空图神经网络（STGNN）相关的出版物数量呈上升趋势。作者将主要应用领域归纳为交通运输、环境、公共安全和公共卫生。根据他们的观察，时空知识图谱通常可定义为 $G_t=(V,\ E_t,\ A_t)$。 V是一个基本不变的顶点集合， E_t 是时间 t 处可能随时间变化的边集合， A_t 则是时间 t 处的邻接矩阵，并分别随 E_t 变化。边可以是有向或无向、加权或无权的。邻接矩阵可以依据各种规则创建，通常分为基于拓扑、基于距离、基于相似度和基于交互。作者主要关注通过传感器获取的观测，因此将观测定义为 $X=\{X_t \in \mathbb{R}^{N\times F}|t=0,\ldots,T\}$，其中 N是空间顶点， F 是特征。根据

表 V 时空知识图模型 重点：D - 应用领域，M - 通用图模型，A - 分析/算法

论文	Year	边				时间标注			时间语义			空间注释			Node Dimensionality	重点	应用领域
		Undirected	Directed	Explicit	Inferred	Node	Edge	Graph	Duration	Interval	Timestamp	Node	Edge	Graph			
Del Mondo 等人 [164]	2013	x	x	x	x	x					x	x			2维	M	地籍图
Williams 和 Musolesi [167]	2016		x	x				x			x	x			零维	M	城市、社会和生物网络
Landesberger 等人 [168]	2016		x	x			x				x	x			零维	A	用户移动网络
Yan 等人 [28]	2018	x		x		x					x	x			零维	D	骨架图
Yu 等人 [169]	2018	x	x	x				x			x	x			零维	D	城市网络
Guo等人 [23]	2019	x		x		x					x	x			零维	D	街道网络
Ferreira 等 [156]	2020	x	x	x	x	x					x	x			零维	M	火灾检测网络
Mohamed 等人 [159]	2020	x			x			x			x	x			零维	D	人体轨迹网络
Zhang 等人 [170]	2020		x	x				x			x	x			2维	A	城市网络
Gadgil 等人 [157]	2020	x			x	x					x	x			零维	D	脑网络
Lu 等人 [171]	2021	x			x	x					x	x			零维	D	医学网络
Li 等人 [26]	2025		x	x	x	x					x	x			2维	D	手机活动网络

任务和数据，可采用两种时空图，如图 12所示。在静态时空图（图 12 A）中，节点的属性可以变化，但边保持稳定。在动态时空图（图 12 B）中，边和节点的属性都可以变化。

最近，Zeghina 等人 [3] 对面向深度学习方法的时空图进行了系统分析。作者将一种常用的时空知识图谱定义为一个 4 元组 $G = (V, E, T, X)$，其中 V是表示空间实体的顶点集合，E 是边的集合，T 是时间区间或时间戳的集合。$X = \{x_1, \ldots, x_n\} \cup \{y_1, \ldots, y_m\}$ 是与顶点和边相关联的属性集合，其中

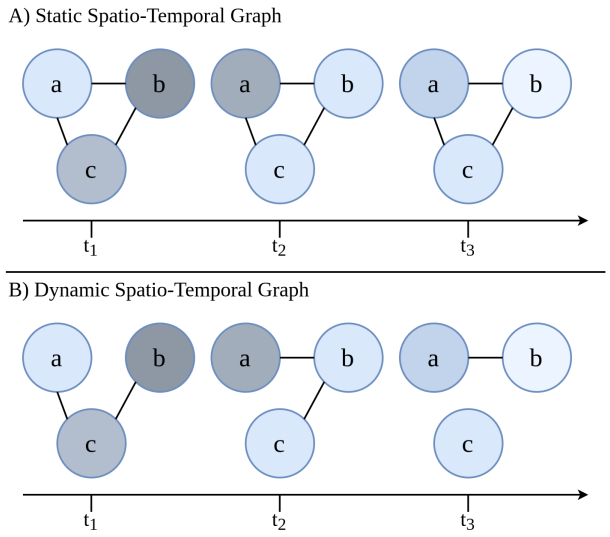


图 12. Jin 等人 [2] 对时空图的分类。静态时空图（A）具有不变结构，但节点的属性可以变化。动态时空图（B）的结构和属性均可变化。

x_i 表示顶点 v_i 的属性，y_i 表示边 e_i的属性。他们发现，时空图的大多数应用场景都避免复杂建模，而倾向于使用简单图模型，例如 Jin 等人提出的模型 [2]。典型时空知识图谱的一个主要缺点是它们依赖于特定应用，无法应用于其初始情境范围之外。

4) 总结： 时空知识图谱将本就复杂的时间图和空间图概念结合起来。基础模型表明，纳入时间和空间会显著增加表示现实世界系统所需的建模复杂度和工作量。相比之下，许多近期方法有意采用省略丰富时间语义或空间语义的简化图结构，以降低这种复杂度。尽管此类简化通常有助于分析或学习任务，但往往会使模型与特定应用场景紧密耦合，难以在该场景之外复用。表 V 根据针对时间图模型（表 II）和空间图模型（表 IV）提出的分类方案，总结了文献中时空知识图谱的建模方式。比较涵盖了若干关键建模维度，包括年份、边方向与推理、时间标注与语义、空间标注、节点维度、研究重点和应用领域。总体而言，使用有向边和无向边的模型数量相当，而且有若干方法支持在单个图中使用混合边类型。大多数模型依赖显式定义的边，而有些模型还纳入推理机制，或结合显式关系与推断关系。时间信息最常附加在节点级，其次是图级标注；所有受调查的模型均采用时间戳作为主要时间语义。同样，所有模型都一致地在节点级对空间信息建模，

无一例外。大多数时空知识图谱采用零维节点，只有少数模型支持更高维的空间表示，例如区域。就研究重点而言，大多数出版物关注领域特定研究问题（D），而强调可重用通用模型（M）或独立分析方法（A）的出版物相对较少。应用领域多种多样，其中研究最频繁的包括城市网络、生物系统和人类移动。总而言之，时空知识图谱通过纳入相应缺失的维度，扩展了时间知识图谱和空间知识图谱，从而能够对复杂的时空现象进行更具表达力的建模和分析。然而，所提出图模型的复杂度很大程度上取决于应用领域和目标。这种异质性凸显了制定更系统的建模指南和统一抽象的必要性，也引出了一系列开放挑战，下一节将对此进行讨论。

IV. 挑战

尽管人们对时空知识图谱的兴趣日益浓厚，相关研究也不断取得进展，但在应用时空知识图谱时，仍存在许多悬而未决的问题、挑战和未来研究方向。以下挑战贯穿此类图的整个生命周期，从建模和构建到维护、分析与复用。这份清单并不全面，因为该领域仍在不断发展，而且许多问题彼此密切相关。尤其是，有些挑战在不同阶段反复出现，必须协同解决，而不能孤立应对。

1) 建模： 如前文所示，用于时序、空间及时空知识图谱的建模方法和术语体系非常多样。当前研究提出的许多时空知识图谱表示都是针对特定应用定制的，而非为跨领域使用而设计，因此模型种类繁多，可迁移性也较弱 [3]。一些作者指出，缺乏简单有效的方法来建模此类图，或以灵活多样的方式利用其中蕴含的知识 [154]。此外，许多出版物重点关注城市网络，导致农业、地质学、体育、流行病学或天气预报等众多研究领域尚未得到充分探索 [3]。开发具有广泛跨领域适用性的通用模型仍是一项尚待解决的挑战，本文对此进行了探讨，未来研究也可进一步深入。时空知识图谱不应仅被视为实用工具，还应被视为用于维护和保存相互关联的时空数据的长期结构。

*2)*构建： 许多领域中的时空数据很少以图的形式存在，更多见于表格格式或非结构化文本。选定合适的时空知识图谱模型后，可以开发相应的方法来创建图 [46] ，并在其整个生命周期内对其进行管理 [172]。例如，可以用半自动或全自动方法取代人工创建流程，使用大语言模型（LLM）直接从非结构化 [6] 或表格 [173] 数据中生成时空知识图谱。A 知识图谱面临的一项关键挑战是，由于节点或边中的信息缺失，它们往往存在不完整性。知识图谱补全方法通常依赖专家知识 [174]、人工智能 [14], [175]–[176] 或其他推理方法 [2]。可靠的（半）自动化创建方法有诸多益处，包括提高速度，以及能够自动推荐实体和关系。

*3)*溯源：用于构建时空知识图谱的时空数据通常源自异构来源，这些来源在质量、粒度和可靠性方面各不相同。因此，为确保可信度和可复现性，明确记录实体、关系及其时间和空间标注的溯源信息至关重要。溯源信息使用户能够评估数据来源、所应用的转换、推理步骤以及底层假设。在时空知识图谱中，溯源与时间方面密切相关，因为数据可能会发生变化、被追溯修正或过时。若没有系统的溯源跟踪，就难以区分历史状态与推断所得或更新后的知识。溯源对于下游分析也至关重要，尤其是在数据受到法律、伦理或组织约束的情况下，例如涉及受保护地点或依时间变化的访问限制。尽管溯源十分重要，它却常被视为辅助元数据，而非不可或缺的建模组件。如何开发能够将溯源与时间和空间信息紧密整合的方法，仍是一项开放挑战；这对于实现时空知识图谱的可靠解释、审计和长期维护至关重要。

4) 集成： 时空知识图谱应长期保留相互关联的时空数据，而不是针对每个用例单独构建。因此，可能需要将新信息（例如来自其他项目的知识图谱）连接到现有的时空知识图谱。合并采用不同时间和空间标注或语义的两个知识图谱，可能会导致重大问题，例如合并不同类型的时间或空间标注时。因此，应提前谨慎规划和管理数据集成过程，以确保时空知识图谱中的知识得以长期保存，同时维持其完整功能。

*5)*增量更新： 时空知识图谱本质上是动态的，因为它们所表示的现实世界系统会随时间演变。时间变化可能影响节点和边的属性、实体和关系的存在状态，或相关的空间信息。为了持续发挥作用，必须将这些变化增量地纳入知识图谱，同时保持内部一致性和历史可追溯性 [46], [177]。增量更新带来了若干挑战。更新必须以能够重建图中过去状态的方式建模，从而支持纵向分析和回溯推理。此外，更新可能来自更新频率、可靠性水平或时间粒度各不相同的异构来源，这使同步和冲突解决更加复杂。增量更新还可能与推断出的知识相互作用

，因此需要在新证据出现时修订或使先前推导出的关系失效。许多现有方法将时空知识图谱视为静态快照或定期重建的结构，这限制了它们在长期运行且不断演变的系统中的适用性。开发高效、一致且具备溯源感知能力的增量更新方法，仍是实现时空知识图谱长期维护、可扩展性和可持续性的关键挑战。

6) 伦理： 时空知识图谱应作为一种知识表示形式，尽可能让更多用户能够重用和访问，同时遵守潜在的法律、组织和伦理约束。尽管并非总能向每位用户开放所有数据，但遵循 FAIR原则（可发现、可访问、可互操作、可重用） [178]有益于公共应用场景（例如开源项目）和私有应用场景（例如企业应用）。从这个意义上说，可以为时空知识图谱添加元数据，以记录前文所述的不同建模方法，从而更容易识别和整合兼容的知识图谱，促进重用。在建模大型时空知识图谱时，由于它们整合了异构且可能敏感的数据，应考虑 CARE原则（集体利益、控制权、责任、伦理） [179] ，以顾及所涉及的多方主体。未来研究可提出框架和指南，确保在建模和开发过程中与所有相关方保持沟通，避免造成影响，例如泄露受保护地点、违反数据主管机构的规定，或忽视可能导致错误预测的偏差。

7) 评估： 时空知识图谱的评估至关重要，应被视为一个持续的过程。评估不仅必须考察初始图构建的质量，还要考察增量更新和各类集成任务的质量。此外，时空知识图谱的质量会直接影响后续分析的结果。目前，知识图谱尚无通用的黄金标准或真实值，质量检查通常需要由专家手动完成[180], [181]。即使是规模较小的知识图谱也面临评估挑战；对于大型、复杂且自动生成的时空知识图谱，评估则会变得愈发复杂。因此，知识图谱质量管理正成为一个重要议题，这与关系数据管理中长期确立的实践类似 [182]。为时空知识图谱创建基准测试颇具挑战，因为这需要考虑多项有时甚至未知的质量标准。此外，时序和空间属性中的不一致，也使整体质量评估更加复杂。因此，许多现有的时空知识图谱方法依赖合成数据或易于访问的数据源 [25], , 但针对真实世界数据集的性能度量指标和适当的评估方法都仍然缺失 [22], [26]。

8) 分析： 图论历史悠久，已发展出多种用于静态、时序和空间图的分析方法，但其中大多数方法无法直接应用于时空知识图谱。由于时空知识图谱具有异质且复杂的特性，因此难以分析，因为许多分析方法仍假设图结构是同质的。时空知识图谱的大多数研究重点在于深度学习任务中的预测，可能忽视了聚类、模体发现、异常检测或推荐等传统图分析任务 [3]。当前的分析方法通常基于图神经网络（GNN），通过将图结构转换为低维向量空间来提升性能 [183] ，或针对具体用例设计模型；然而，这些方法缺乏可解释性，使决策者难以信任其能力[2]。

9) 可视化： 图的一项重要优势是其图示特性使其非常适合可视化。然而，随着图模型日益复杂，可视化也会变得更具挑战性，尤其是在时空知识图谱中可视化时间 [184] 和空间 [185], 等附加属性时。主要挑战包括呈现时间变化、将节点和边映射到地理表示，以及在时间和空间维度上遍历图。虽然时空知识图谱可以仅作为数据结构加以维护，但图本身通常也值得分析。Deng 等人在最近的一篇综述中考察了时空可视化的当前发展与趋势，涵盖了通用方法以及专门应用于图结构的方法。

五、结论

时空知识图谱提供了一种强大的方式，可在统一的图结构中表示时间和空间信息；它已成为建模复杂现实世界系统的重要研究领域，因为这类系统本质上依赖时空数据。对其进行建模需要集成时序知识图谱模型和空间知识图谱模型的原理，而这两类模型此前由不同研究群体各自独立发展。因此，快速发展、多样化的应用领域以及异质化的研究贡献导致术语和建模决策不一致，使文献检索更加困难，并阻碍了标准化。

本综述表明，许多现有的时空知识图谱模型和分析方法都是针对特定应用场景量身定制的，这限制了它们的可复用性、长期知识保存能力和跨领域适用性。本文提出的建模指南旨在支持研究人员和从业者采用更系统、透明的方法进行时空知识图谱设计。更加重视通用性、可复用性和长期持久性，有望推动构建持久化时空知识图谱，使其不仅能保存当前信息，还能保存信息的演化过程及其溯源。从长远来看，连接并整合多个时空知识图谱

或许能够促进更广泛的分析，并带来新的跨领域洞见。

致谢

本项目由德国研究联合会（DFG，德国研究基金会）项目编号 528485254 - FIP 16 资助，并由欧洲区域发展基金（EFRE）项目编号 ZS/2023/12/182018 资助。

参考文献

[1] S. Wang、J. Cao 和 P. S. Yu，《时空数据挖掘的深度学习：综述》，IEEE知识与数据工程汇刊，第34卷，第8期，第3681–3700页，2022年8月。[2] G. Jin、Y. Liang、Y. Fang、Z. Shao、J. Huang、J. Zhang 和 Y. Zheng，《用于城市计算预测学习的时空图神经网络：综述》，IEEE知识与数据工程汇刊，第1–20页，2024年。[3] A. Zeghina、A. Leborgne、F. Le Ber 和 A. Vacavant，《时空图上的深度学习：系统综述、方法论概览与研究机遇》，《神经计算》，第594卷，第127861页，2024年8月。[4] F. Scarselli、M. Gori、A. C. Tsoi、M. Hagenbuchner 和 G. Monfardini，《图神经网络模型》，IEEE神经网络汇刊，第20卷，第1期，第61–80页，2009年1月。[5] T. N. Kipf 和 M. Welling，《利用图卷积网络进行半监督分类》，arXiv预印本 arXiv:1609.02907，2016年。[6] S. Pan、L. Luo、Y. Wang、C. Chen、J. Wang 和 X. Wu，《统一大语言模型与知识图谱：路线图》，IEEE知识与数据工程汇刊，第36卷，第7期，第3580–3599页，2024年7月。[7] B. Blonder、T. W. Wey、A. Dornhaus、R. James 和 A. Sih，《时间动态与网络分析》，《生态学与进化方法》，第3卷，第6期，第958–972页，2012年8月。[8] A. Casteigts、P. Flocchini、W. Quattrociocchi 和 N. Santoro，《时变图与动态网络》，International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems，第27卷，第5期，第387–408页，2012年10月。[9] P. Holme，《现代时间网络理论：专题讨论》，《欧洲物理学杂志B》，第88卷，第9期，2015年9月。[10] P. Holme 和 J. Saram¨aki，《时间网络》，《物理学报告》，第519卷，第3期，第97–125页，2012年10月。[11] O. Michail，《时间图入门：算法视角*》，《互联网数学》，第12卷，第4期，第239–280页，2016年4月。[12] Y. Wang、Y. Yuan、Y. Ma 和 G. Wang，《时变图：定义、应用与算法》，《数据科学与工程》，第4卷，第4期，第352–366页，2019年9月。[13] C. Mo、Y. Wang、Y. Jia 和 Q. Liao，《时态知识图谱综述》，载于2021年IEEE第六届网络空间数据科学国际会议（DSC）。IEEE，2021年10月。[14] B. Cai、Y. Xiang、L. Gao、H. Zhang、Y. Li 和 J. Li，《时间知识图谱补全：综述》，arXiv预印本 arXiv:2201 08236，2022年。。[15] G. Rossetti 和 R. Cazabet，《动态网络中的社区发现：综述》，ACM Computing Surveys，第51卷，第2期，第1–37页，2018年2月。[16] J. D. Phillips、W. Schwanghart 和 T. Heckmann，《地球科学中的图论》，《地球科学评论》，第143卷，第147–160页，2015年4月。[17] T. Heckmann、W. Schwanghart 和 J. D. Phillips，《图论——其在地貌学应用中的最新进展》，《地貌学》，第243卷，第130–146页，2015年8月。[18] M. D. Cantwell 和 R. T. T. Forman，《景观图：利用图论进行生态建模，以检测不同景观中的常见配置》，《景观生态学》，第8卷，第4期，第239–255页，1993年12月。[19] P. Galpern、M. Manseau 和 A. Fall，《基于斑块的景观连通性图：保护领域的构建、分析与应用指南》，《生物保护》，第144卷，第1期，第44–55页，2011年1月。[20] M. Barth´elemy，《空间网络》，《物理学报告》，第499卷，第1–3期，第1–101页，2011年2月。[21] X. Ge、Y. Yang、L. Peng、L. Chen、W. Li、W. Zhang 和 J. Chen，《基于时空知识图谱和多源异构数据的森林火灾预测》，遥感，第14卷，第14期，第3496页，2022年7月。[22] Y. Zhang、R. Xu、W. Lu、W. Mayer、D. Ning、Y. Duan、X. Zeng 和 Z. Feng，《船舶管理多模态时空知识图谱》，应用科学，第13卷，第16期，第9393页，2023年8月。[23] S. Guo、Y. Lin、N. Feng、C. Song 和 H. Wan，《基于注意力的时空图卷积网络用于交通流预测》，AAAI人工智能会议论文集，第33卷，第01期，第922–929页，2019年7月。[24] K.-H. N. Bui、J. Cho 和 H. Yi，《用于交通预测的时空图神经网络：概述与开放研究问题》，应用智能，第52卷，第3期，第2763–2774页，2021年6月。[25] H. Wang、Q. Yu、Y. Liu、D. Jin 和 Y. Li，《时空城市知识图谱赋能的出行预测》，ACM交互式、移动、可穿戴和泛在技术论文集，第5卷，第4期，第1–24页，2021年12月。[26] J. Li、T. Gan、W. Li 和 Y. Liu，《一种基于时空知识图谱的方法：从手机数据识别个人活动地点》，交通地理学杂志，第124卷，第104157页，2025年4月。[27] W. Wu、X. Pan、Y. Kang、Y. Xu 和 L. Han，《感知空间：基于图神经网络的供水管网泄漏风险评估方法》，Water，第16卷，第14期，第2017页，2024年7月。[28] S. Yan、Y. Xiong 和 D. Lin，《用于基于骨架的动作识别的时空图卷积网络》，AAAI人工智能会议论文集，第32卷，第1期，2018年4月。[29] M. A. Rodriguez 和 P. Neubauer，《由点和线构造》，arXiv预印本 arXiv:1006.2361，2010年。[30] F. Manola、E. Miller、B. McBride 等，《RDF入门》，W3C建议书，第10卷，第1–107期，第6页，2004年。[31] P. Hitzler、M. Kr¨otzsch、S. Rudolph 和 Y. Sure-Vetter（编），《语义网》，丛书SpringerLink。柏林、海德堡：Springer Berlin Heidelberg，2008年。[32] P. Hitzler，《语义网领域综述》，ACM通讯，第64卷，第2期，第76–83页，2021年1月。[33] T. R. Gruber，《一种可移植本体规范的转换方法》，知识获取，第5卷，第2期，第199–220页，1993年6月。[34] N. Guarino、D. Oberle 和 S. Staab，《什么是本体？》，Springer Berlin Heidelberg，2009年，第1–17页。[35] M. Koubarakis 和 K. Kyzirakos，《语义传感器网上的元数据建模与查询：模型stRDF与查询语言stSPARQL》，Springer Berlin Heidelberg，2010年，第425–439页。[36] F. Zhang、Q. Lu、Z. Du、X. Chen 和 C. Cao，《用于空间及时空数据管理的RDF全面概述》，知识工程评论，第36卷，2021年。[37] L. Zhu、N. Li、L. Bai、Y. Gong 和 Y. Xing，《stRDFS：时空知识图谱建模》，IEEE Access，第8卷，129 057，2020年 129 043页。[38] M. Nayyeri、S. Vahdati、M. T. Khan、M. M. Alam、L. Wenige、A. Behrend 和 J. Lehmann，《用于时空知识图谱补全的二面体代数嵌入》，施普林格国际出版，2022年，第253–269页。[39] B. Shbita、C. A. Knoblock、W. Duan、Y.-Y. Chiang、J. H. Uhl 和 S. Leyk，《从矢量化历史地形图构建时空知识图谱》，语义网，第14卷，第3期，第527–549页，2023年4月。[40] J. Hoffart、F. M. Suchanek、K. Berberich 和 G. Weikum，《YAGO2：一个经过空间和时间扩展的维基百科知识库》，人工智能，第194卷，第28–61页，2013年1月。[41] X. Meng、L. Zhu、Y. Wang 和 X. Zhang，《基于OWL表示时空数据并确定拓扑关系的一般表征》，地球科学信息学，第15卷，第1期，第413–438页，2022年1月。[42] Y. Zhu、K. Sun、S. Wang、C. Zhou、F. Lu、H. Lv、Q. Qiu、X. Wang 和 Y. Qi，《考虑复杂时空特征与关系的地球科学知识图谱自适应表示模型》，中国科学：地球科学，第66卷，第11期，第2563–2578页，2023年10月。[43] C. Wohlin，《系统性文献研究中的滚雪球抽样指南及其在软件工程中的复现》，载于第18届软件工程评估与评价国际会议论文集，丛书EASE '14。ACM，2014年5月，第1–10页。[44] L. Ehrlinger 和 W. W¨oß，《迈向知识图谱的定义》。SEMANTiCS（海报，*Demos*，*SuCCESS)*，第48卷，第1-4期，p. 2，2016年。

[45] A. Hogan、E. Blomqvist、M. Cochez、C. D'amato、G. D. Melo、C. Gutierrez、S. Kirrane、J. E. L. Gayo、R. Navigli、S. Neumaier、A.- C. N. Ngomo、A. Polleres、S. M. Rashid、A. Rula、L. Schmelzeisen、J. Sequeda、S. Staab 和 A. Zimmermann，《知识图谱》，ACM Computing Surveys，第54卷，第4期，第1–37页，2021年7月。[46] M. Hofer、D. Obraczka、A. Saeedi、H. K¨opcke 和 E. Rahm，《知识图谱的构建：现状与挑战》，Information，第15卷，第8期，第509页，2024年8月。[47] R. Albert 和 A.-L. Barab´asi，《复杂网络统计力学》，Reviews of Modern Physics，第74卷，第1期，第47–97页，2002年1月。[48] J. Clark 和 D. A. Holton，《图论初探》。Hackensack：World Scientific，1991，参考文献，第321–324页。[49] J. A. Bondy，《应用图论》。North Holland，1976。[50] B. Dwyer，《系统分析与综合》。荷兰阿姆斯特丹：Morgan Kaufmann，2016。[51] Z. Wang、Q. Fan、H. Wang、K.-L. Tan、D. Agrawal 和 A. El Abbadi，《Pagrol：面向大规模属性图的并行图联机分析处理》，载于《2014年IEEE第30届数据工程国际会议》。IEEE，2014年3月，第496–507页。[52] A. Barrat、M. Barth´elemy、R. Pastor-Satorras 和 A. Vespignani，《复杂加权网络架构》，Proceedings of the National Academy of Sciences，第101卷，第11期，第3747–3752页，2004年3月。[53] M. E. J. Newman，《加权网络分析》，《物理评论E》，第70卷，第5期，第056131页，2004年11月。[54] O. Hartig，《RDF*与属性图的协调》，2014年。[55] I. Robinson，《图数据库》，J. Webber 和 E. Eifrem 编。北京：O'Reilly，2015。[56] M. Junghanns、A. Petermann、N. Teichmann、K. G´omez 和 E. Rahm，《使用 Apache Flink 分析扩展属性图》，载于《第1届ACM SIGMOD网络数据分析研讨会论文集》，系列：SIGMOD/PODS'16。ACM，2016年7月。[57] N. Francis、A. Green、P. Guagliardo、L. Libkin、T. Lindaaker、V. Marsault、S. Plantikow、M. Rydberg、P. Selmer 和 A. Taylor，《Cypher：一种不断演进的属性图查询语言》，载于《2018年数据管理国际会议论文集》，系列：SIGMOD/PODS '18。ACM，2018年5月，第1433–1445页。[58] M. Besta、R. Gerstenberger、E. Peter、M. Fischer、M. Podstawski、C. Barthels、G. Alonso 和 T. Hoefler，《揭开图数据库的神秘面纱：数据组织、系统设计与图查询的分析和分类》，ACM Computing Surveys，第56卷，第2期，第1–40页，2023年9月。[59] R. Angles，《属性图数据库模型》，载于《CEUR研讨会论文集》，系列：第12届Alberto Mendelzon数据管理基础国际研讨会论文集，哥伦比亚卡利，2018年5月21–25日。 [在线]。地址：https: // ceur-ws.org/Vol-2100/paper26.pdf [60] M. T. ¨Ozsu，《RDF数据管理系统综述》，Frontiers of Computer Science，第10卷，第3期，第418–432页，2016年4月。[61] R. Angles 和 C. Gutierrez，《图数据库模型综述》，ACM Computing Surveys，第40卷，第1期，第1–39页，2008年2月。[62] R. Angles，《当前图数据库模型比较》，载于《2012年IEEE第28届数据工程国际会议研讨会》。IEEE，2012年4月，第171–177页。[63] M. Massri、P. Raipin 和 P. Meye，《GDBAlive：构建于列式数据存储之上的时态图数据库》，Journal of advances in information technology，2020年。[64] J. Hou、Z. Zhao、Z. Wang、W. Lu、G. Jin、D. Wen 和 X. Du，《Aeong：图数据库中高效的内置时态支持》，VLDB基金会会刊，第17卷，第6期，第1515–1527页，2024年2月。[65] A. Campos、J. Mozzino 和 A. Vaisman，《迈向时态图数据库》，arXiv预印本 arXiv:1604.08568，2016年。[66] A. Debrouvier、E. Parodi、M. Perazzo、V. Soliani 和 A. Vaisman，《时态图数据库的模型与查询语言》，VLDB期刊，第30卷，第5期，第825–858页，2021年5月。[67] H. Kim 和 R. Anderson，《复杂网络中的时态节点中心性》，《物理评论E》，第85卷，第2期，第026107页，2012年2月。[68] P. Rozenshtein 和 A. Gionis，《时态PageRank》。施普林格国际出版，2016年，第674–689页。[69] H. Wu、J. Cheng、S. Huang、Y. Ke、Y. Lu 和 Y. Xu，《时间图中的路径问题》，VLDB基金会会刊，第7卷，第9期，第721–732页，2014年5月。[70] W. Huo 和 V. J. Tsotras，《演化社交图上的高效时态最短路径查询》，载于《第26届科学与统计数据库管理国际会议论文集》，系列：SSDBM '14。ACM

，2014年6月。

[71] L. Speidel、T. Takaguchi 和 N. Masuda，"有向无环图中的社区检测"，《欧洲物理学杂志B》，第88卷，第8期，2015年8月。[72] F. Kuhn 和 R. Oshman，"动态网络：模型与算法"，ACM SIGACT News，第42卷，第1期，第82–96页，2011年3月。[73] V. Z. Moffitt 和 J. Stoyanovich，"时态图代数"，载于《第16届国际数据库编程语言研讨会》论文集，丛书 DBPL 2017。ACM，2017年9月。[74] A. Ferreira，"为移动自组网构建参考组合模型"，《IEEE网络》，第18卷，第5期，第24–29页，2004年9月。[75] A. Impedovo、C. Loglisci 和 M. Ceci，"从演化网络中挖掘时态模式"，arXiv预印本 arXiv:1709.06772，2017年。[76] J. Leskovec、J. Kleinberg 和 C. Faloutsos，"随时间变化的图：致密化规律、直径缩小及其可能的解释"，载于第11届ACM SIGKDD知识发现与数据挖掘国际会议论文集，丛书 KDD05。ACM，2005年8月，第177–187页。[77] P. Rozenshtein、N. Tatti 和 A. Gionis，《发现交互网络中的动态社区》。Springer Berlin Heidelberg，2014年，第678–693页。[78] R. Kumar、T. Calders、A. Gionis 和 N. Tatti，《维护交互网络中的滑动窗口邻域概况》。Springer International Publishing，2015年，第719–735页。[79] G. Rossetti、R. Guidotti、D. Pennacchioli、D. Pedreschi 和 F. Giannotti，"利用社区发现进行动态网络中的交互预测"，载于2015年IEEE/ACM社交网络分析与挖掘进展国际会议论文集，丛书 ASONAM '15。ACM，2015年8月，第553–558页。[80] T. Viard、M. Latapy 和 C. Magnien，"计算链接流中的极大团"，《理论计算机科学》，第609卷，第245–252页，2016年1月。[81] M. Latapy、T. Viard 和 C. Magnien，"用于对随时间发生的交互进行建模的流图和链接流"，《社交网络分析与挖掘》，第8卷，第1期，2018年10月。[82] S. Gandhi 和 Y. Simmhan，"用于时间图上分布式计算的以区间为中心的模型"，载于2020年IEEE第36届国际数据工程会议（ICDE）。IEEE，2020年4月。[83] Y. Lou、C. Wang、T. Gu、H. Feng、J. Chen 和 J. X. Yu，"时间图上的时间—拓扑分析"，VLDB期刊，第32卷，第4期，第815–843页，2023年1月。[84] K. Semertzidis 和 E. Pitoura，"时间图上的 Top-k持久图模式查询"，IEEE知识与数据工程汇刊，第31卷，第1期，第181–194页，2019年1月。[85] B. Steer、F. Cuadrado 和 R. Clegg，"Raphtory：分布式时态图的流式分析"，《未来一代计算机系统》，第102卷，第453–464页，2020年1月。[86] V. Kostakos，"时间图"，《物理学A辑：统计力学及其应用》，第388卷，第6期，第1007–1023页，2009年3月。[87] U. Khurana 和 A. Deshpande，"历史图数据的高效快照检索"，载于2013年IEEE第29届国际数据工程会议（ICDE）论文集。IEEE，2013年4月。[88] D. Kempe、J. Kleinberg 和 A. Kumar，"时态网络的连通性与推断问题"，《计算机与系统科学杂志》，第64卷，第4期，第820–842页，2002年6月。[89] N. M. Ahmed 和 L. Chen，"时态不确定社交网络中链接预测的高效算法"，《信息科学》，第331卷，第120–136页，2016年2月。[90] J. Byun、S. Woo 和 D. Kim，"ChronoGraph：支持时态图遍历，以高效分析随时间变化的信息扩散"，IEEE知识与数据工程汇刊，第32卷，第3期，第424–437页，2020年3月。[91] C. Rost、A. Thor 和 E. Rahm，"使用 GRADOOP 分析时间图"，《数据库频谱》，第19卷，第3期，第199–208页，2019年9月。[92] J. Sun、C. Faloutsos、S. Papadimitriou 和 P. S. Yu，"GraphScope：大型时变图的无参数挖掘"，载于第13届 ACM SIGKDD知识发现与数据挖掘国际会议论文集，丛书 KDD07。ACM，2007年8月。[93] P. Basu、A. Bar-Noy、R. Ramanathan 和 M. P. Johnson，"时变图的建模与分析"，arXiv预印本 arXiv:1012 0260，2010。。[94] N. Santoro、W. Quattrociocchi、P. Flocchini、A. Casteigts 和 F. Amblard，"时变图与社交网络分析：时态指标和度量指标"，2011年。[95] N. Perra、B. Gonc,alves、R. Pastor-Satorras 和 A. Vespignani，"时变网络的活动驱动建模"，《科学报告》，第2卷

，第1期，2012年6月。

[96] L. Andriamampianina、F. Ravat、J. Song 和 N. Vall`es-Parlangeau，《查询时序属性图》。施普林格国际出版公司，2022年，第355–370页。[97] P. Plamper、O. Lechtenfeld、W. von T¨umpling 和 A. Groß，“一种用于时态链接预测的基于快照的知识图谱模型”，载于《IJCKG研讨会、海报与演示环节论文集》，2023年，第64–79页。[98] J. Clifford、C. Dyreson、T. Isakowitz、C. S. Jensen 和 R. T. Snodgrass，“论数据库中‘现在’的语义”，《ACM数据库系统汇刊》，第22卷，第2期，第171–214页，1997年6月。[99] C. Rost、K. Gomez、M. T¨aschner、P. Fritzsche、L. Schons、L. Christ、T. Adameit、M. Junghanns 和 E. Rahm，“利用GRADOOP进行分布式时态图分析”，《VLDB期刊》，第31卷，第2期，第375–401页，2021年5月。[100] Z. Dhouioui 和 J. Akaichi，“追踪社交网络中的动态社区演化”，载于2014年IEEE/ACM社交网络分析与挖掘进展国际会议（ASONAM 2014）。IEEE，2014年8月，第764–770页。[101] D. Zhuang、M. J. Chang 和 M. Li，“Dynamo：通过增量最大化模块度进行动态社区检测”，《IEEE知识与数据工程汇刊》，第1–1页，2019年。[102] X. Sun、W. Feng、S. Liu、Y. Xie、S. Bhatia、B. Hooi、W. Wang 和 X. Cheng，“MonLAD：交易流中的洗钱代理检测”，载于第15届ACM网络搜索与数据挖掘国际会议论文集，丛书WSDM ’22。ACM，2022年2月，第976–986页。[103] Y. Wang、Y. Deng、F. Ren、R. Zhu、P. Wang、T. Du 和 Q. Du，“基于地理空间网络分析方法分析城市公交网络的空间配置”，《城市》，第96卷，第102406页，2020年1月。[104] S. Scellato、C. Mascolo、M. Musolesi 和 V. Latora，“距离至关重要：在线社交网络的地理社交度量”，载于第3届在线社交网络研讨会（WOSN 2010），2010年。[105] X. Wang、Y. Zhang、W. Zhang 和 X. Lin，“地理社交网络中的距离感知影响力最大化”，载于2016年IEEE第32届数据工程国际会议（ICDE）。IEEE，2016年5月。[106] D. Hristova、M. J. Williams、M. Musolesi、P. Panzarasa 和 C. Mas-colo，“利用互联地理社交网络测量城市社交多样性”，载于第25届万维网国际会议论文集，丛书WWW ’16。国际万维网会议指导委员会，2016年4月，第21–30页。[107] Y. Fang、R. Cheng、X. Li、S. Luo 和 J. Hu，“大型空间图上的有效社区搜索”，VLDB基金会会刊，第10卷，第6期，第709–720页，2017年2月。[108] G. A. Pagani 和 M. Aiello，“作为复杂网络的电网：综述”，《物理学A辑：统计力学及其应用》，第392卷，第11期，第2688–2700页，2013年6月。[109] C. Zhong、S. M. Arisona、X. Huang、M. Batty 和 G. Schmitt，“通过空间网络分析检测城市结构的动态变化”，《国际地理信息科学杂志》，第28卷，第11期，第2178–2199页，2014年5月。[110] A. Fall、M.-J. Fortin、M. Manseau 和 D. O’Brien，“空间图：栖息地连通性的原理与应用”，《生态系统》，第10卷，第3期，第448–461页，2007年4月。[111] B. Jiang 和 C. Claramunt，“城市街道网络的拓扑分析”，《环境与规划B：规划与设计》，第31卷，第1期，第151–162页，2004年2月。[112] C. Buhl、J. Gautrais、N. Reeves、R. V. Sol´e、S. Valverde、P. Kuntz 和 G. Theraulaz，“自组织城市聚落街道网络中的拓扑模式”，《欧洲物理学杂志B：凝聚态与复杂系统》，第49卷，第4期，第513–522页，2006年2月。[113] R. Ding、N. Ujang、H. B. Hamid、M. S. A. Manan、R. Li、S. S. M. Albadareen、A. Nochian 和 J. Wu，“复杂网络理论在城市交通网络研究中的应用”，《网络与空间经济学》，第19卷，第4期，第1281–1317页，2019年5月。[114] M. Kurant 和 P. Thiran，“分层复杂网络”，《物理评论快报》，第96卷，第13期，第138701页，2006年4月。[115] L. d. F. Costa、F. A. Rodrigues、G. Travieso 和 P. R. Villas Boas，“复杂网络表征：度量指标综述”，《物理学进展》，第56卷，第1期，第167–242页，2007年1月。[116] J. H. Conway 和 C. McA. Gordon，“空间图中的纽结与链环”，《图论杂志》，第7卷，第4期，第445–453页，1983年12月。[117] S. Negami，“关于纽结、链环和空间图的拉姆齐定理”，《美国数学会汇刊》，第324卷，第2期，第527–541页，1991年2月。[118] J. R. Mackay，“区域地理学：一种定量方法”，《魁北克地理学札记》，第3卷，第6期，第57页，1959年。[119] A. T. Murray，“定量地理学”，《区域科学杂志》，第50卷，第1期，第143–163页，2010年2月。[120] M. Barthelemy，《空间网络的形态发生》。Springer International Publishing，2018年。[121] ——，《空间网络：完整导论：从图论和统计物理学到现实应用》。Springer International Publishing，2022年。[122] A. H. Robinson 和 R. A. Bryson，“定量描述地理分布对应关系的方法”，《美国地理学家协会年刊》，第47卷，第4期，第379–391页，1957年12月。[123] P. Haggett 和 R. J. Chorley，《地理学中的网络分析》，丛书《空间结构探索》。伦敦：Arnold，1969年，第1期。[124] R. G. Golledge 和 A. N. Spector，“理解城市环境：理论与实践”，《地理分析》，第10卷，第4期，第403–426页，1978年10月。[125] M. M. Fischer，编，《空间分析与地理计算》，丛书 SpringerLink。柏林、海德堡：施普林格柏林·海德堡，2006年。[126] P. A. Longley，《地理信息科学与系统》，M. F. Goodchild、D. J. Maguire 和 D. W. Rhind 编。霍博肯，新泽西州：约翰·威立父子公司，2015年。[127] N. Bartelme，编，《地理信息学》，第4版，丛书 SpringerLink。柏林、海德堡：Springer Berlin Heidelberg，2005年。[128] K. Yano，“地理信息系统与定量地理学”，《地理学杂志》，第52卷，第3期，第173–180页，2000年。[129] J. Uitermark 和 M. van Meeteren，“地理网络分析”，《经济与社会地理学杂志》，第112卷，第4期，第337–350页，2021年8月。[130] A. De Montis、M. Barth´elemy、A. Chessa 和 A. Vespignani，“城际交通的结构：加权网络分析”，《环境与规划B：规划与设计》，第34卷，第5期，第905–924页，2007年10月。[131] A. Cardillo、S. Scellato、V. Latora 和 S. Porta，“城市街道格局平面图的结构属性”，《物理评论E》，第73卷，第6期，第066107页，2006年6月。[132] J. M. Buld´u、J. Busquets、J. H. Mart´ınez、J. L. Herrera-Diestra、I. Echegoyen、J. Galeano 和 J. Luque，“运用网络科学分析足球传球网络：比赛的动态、空间、时间与多层性质”，《心理学前沿》，第9卷，2018年10月。[133] J. M. Buld´u、J. Busquets、I. Echegoyen 和 F. Seirul Lo，“定义一支历史足球队：运用网络科学分析瓜迪奥拉的巴塞罗那足球俱乐部”，《科学报告》，第9卷，第1期，2019年9月。[134] M. T. Gastner 和 M. E. J. Newman，“空间分布网络的优化设计”，《物理评论E》，第74卷，第1期，第016117页，2006年7月。[135] A. Runions、M. Fuhrer、B. Lane、P. Federl、A.-G. Rolland-Lagan 和 P. Prusinkiewicz，“叶脉格局的建模与可视化”，载于《ACM SIGGRAPH 2005论文集》，丛书 SIGGRAPH05。ACM，2005年7月。[136] B. Shanthala Devi、M. Murthy、B. Debnath 和 C. Jha，“运用图论诊断并确定森林斑块连通性的优先级”，《生态建模》，第251卷，第279–287页，2013年2月。[137] T. Danel、P. Spurek、J. Tabor、M. ´Smieja、Ł. Struski、A. Słowik 和 Ł. Maziarka，《空间图卷积网络》。Springer International Publishing，2020年，第668–675页。[138] D. Urban 和 T. Keitt，“景观连通性：图论视角”，《生态学》，第82卷，第5期，第1205–1218页，2001年5月。[139] J. M. Calabrese 和 W. F. Fagan，“连通性指标选用指南”，《生态学与环境前沿》，第2卷，第10期，第529–536页，2004年12月。[140] E. Zegura、K. Calvert 和 S. Bhattacharjee，“如何对互联网络建模”，载于《IEEE INFOCOM ’96论文集》。计算机通信会议，丛书 INFCOM-96，第2卷。IEEE计算机学会出版社，1996年，第594–602页。[141] D. Chai、L. Wang 和 Q. Yang，“基于多图卷积网络的自行车流量预测”，载于第26届 ACM SIGSPATIAL地理信息系统进展国际会议论文集，丛书 SIGSPATIAL ’18。ACM，2018年11月。[142] B. Waxman，“多点连接的路由”，《IEEE通信选定领域期刊》，第6卷，第9期，第1617–1622页，1988年。[143] W. R. Tobler，“模拟底特律地区城市增长的计算机动画”，《经济地理学》，第46卷，第234页，1970年6月。[144] M. Rosvall、A. Trusina、P. Minnhagen 和 K. Sneppen，“网络与城市：信息视角”，《物理评论快报》，第94卷，第2期，第028701页，2005年1月。

[145] T. Nishizeki，《平面图》，《离散数学年刊》丛书，N. Chiba 编。阿姆斯特丹：North-Holland，1988年，第32卷，含参考文献和索引。[146] P. D. Taylor、L. Fahrig、K. Henein 和 G. Merriam，“连通性是景观结构的重要组成部分”，《Oikos》，第68卷，第3期，第571–573, 1993 [ ] 3544927 页。在线。可访问：http://www.jstor.org/stable/ [147] T. H. Keitt、D. L. Urban 和 B. T. Milne，“检测破碎化景观中的临界尺度”，《保护生态学》，第1卷，第1期，1997年。 [ ] 26271642 在线。可访问：http://www.jstor.org/stable/ [148] P. Crucitti、V. Latora 和 S. Porta，“城市街道空间网络中的中心性度量”，《物理评论E》，第73卷，第3期，第036125页，2006年3月。[149] W. Siabato、C. Claramunt、S. Ilarri 和 M. A. Manso-Callejo，“时态地理信息系统建模趋势综述”，ACM Computing Surveys，第51卷，第2期，第1–41页，2018年4月。[150] R. H. G¨uting，“空间数据库系统简介”，VLDB期刊，第3卷，第4期，第357–399页，1994年10月。[151] A. U. Tansel 编，《时态数据库》，《本杰明/卡明斯数据库系统与应用丛书》。加利福尼亚州雷德伍德城：Benjamin/Cummings，1993年。[152] N. Pelekis、B. Theodoulidis、I. Kopanakis 和 Y. Theodoridis，“时空数据库模型文献综述”，《知识工程评论》，第19卷，第3期，第235–274页，2004年9月。[153] M. Y. Ansari、A. Ahmad、S. S. Khan、G. Bhushan 和 Mainuddin，“时空聚类：综述”，《人工智能评论》，第53卷，第4期，第2381–2423页，2019年7月。[154] R. Yang、F. D. Salim 和 H. Xue，“SSTKG：用于可解释且通用的动态信息嵌入的简单时空知识图谱”，载于《2024年ACM网络会议论文集》，WWW ’24丛书。ACM，2024年5月，第551–559页。[155] G. Del Mondo、J. G. Stell、C. Claramunt 和 R. Thibaud，“时空演化的图模型”，《JUCS——通用计算机科学期刊》，第16卷，第11期，第1452–1477页，2010年。 [在线]。可访问：https://doi.org/ 10 3217 016 11 1452 。/jucs- - - L. N. [156] Ferreira、D. A. Vega-Oliveros、M. Cotacallapa、M. F. Cardoso、M. G. Quiles、L. Zhao 和 E. E. N. Macau，“利用时间序列网络进行时空数据分析”，《自然通讯》，第11卷，第1期，2020年8月。[157] S. Gadgil、Q. Zhao、A. Pfefferbaum、E. V. Sullivan、E. Adeli 和 K. M. Pohl，《用于静息态功能磁共振成像分析的时空图卷积》。Springer International Publishing，2020年，第528–538页。[158] P. Lu、W. Bai、D. Rueckert 和 J. Noble，“用于心脏运动分析的动态时空图卷积网络”，载于《2021年IEEE第18届生物医学成像国际研讨会（ISBI）》。IEEE，2021年4月，第122–125页。[159] A. Mohamed、K. Qian、M. Elhoseiny 和 C. Claudel，“Social-STGCNN：用于人类轨迹预测的社会时空图卷积神经网络”，载于《2020年IEEE/CVF计算机视觉与模式识别会议（CVPR）》。IEEE，2020年6月，第14 412–14 420页。[160] Y. Qi、Q. Li、H. Karimian 和 D. Liu，“基于图卷积神经网络和长短期记忆网络的PM2.5时空预测混合模型”，《全面环境科学》，第664卷，第1–10页，2019年5月。[161] X. Jin、S. Lv、Z. Kong、H. Yang、Y. Zhang、Y. Guo 和 Z. Xu，“用于风力涡轮机状态监测的图时空网络”，《IEEE可持续能源汇刊》，第15卷，第4期，第2276–2286页，2024年10月。[162] X. Xiong、F. Xiong、J. Zhao、S. Qiao、Y. Li 和 Y. Zhao，“在时空社交网络中动态发现偏好位置”，《信息处理与管理》，第57卷，第6期，第102337页，2020年11月。[163] A. Renolen，《时态及时空信息建模的概念与方法》，博士工程师论文丛书。特隆赫姆：NTNU，1999年，第1999,79号。[164] G. Del Mondo、M. Rodr´ıguez、C. Claramunt、L. Bravo 和 R. Thibaud，“时空图建模的一致性”，《数据与知识工程》，第84卷，第59–80页，2013年3月。[165] D. A. Randell、Z. Cui 和 A. G. Cohn，“基于区域和连接的空间逻辑”，载于《第三届知识表示与推理原理国际会议论文集（KR’92）》。美国马萨诸塞州剑桥，1992年10月25—29日，B. Nebel、C. Rich 和 W. R. Swartout 编。Morgan Kaufmann，1992年，第165–176页。[166] A. G. Cohn、B. Bennett、J. Gooday 和 N. M. Gotts，“利用区域连接演算进行定性空间表示与推理”，《Geoinformatica》，第1卷，第3期，第275–316页，1997年。

[167] M. J. Williams 和 M. Musolesi，《时空网络：可达性、中心性与鲁棒性》，《Royal Society Open Science》，第 3 卷，第 6 期，页码 160196，2016年6月。[168] T. von Landesberger、F. Brodkorb、P. Roskosch、N. Andrienko、G. Andrienko 和 A. Kerren，《MobilityGraphs：通过时空图与聚类对大规模移动动态进行可视分析》，《IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics》，第 22 卷，第 1 期，第 11–20 页，2016年1月。[169] B. Yu、H. Yin 和 Z. Zhu，《时空图卷积网络：用于交通预测的深度学习框架》，载于《第二十七届国际人工智能联合会议论文集》，IJCAI-2018 系列，International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization，2018年7月，第 3634–3640 页。[170] J. Zhang、Y. Zheng、J. Sun 和 D. Qi，《基于多任务深度学习的时空网络流量预测》，《IEEE知识与数据工程汇刊》，第 32 卷，第 3 期，第 468–478 页，2020年3月。[171] P. Lu、W. Bai、D. Rueckert 和 J. A. Noble，《利用时空图卷积网络建模心脏运动以提升心脏疾病诊断》。Springer International Publishing，2021年，第 56–65 页。[172] S. Geisler、C. Cappiello、I. Celino、D. Chaves-Fraga、A. Dimou、A. Iglesias-Molina、M. Lenzerini、A. Rula、D. Van Assche、S. Welten 和 M.-E. Vidal，《从起源到成熟：通过生命周期管理知识图谱生态系统》，《Proc. VLDB Endow.》，第 18 卷，第 5 期，页码 1390–1397，2025年1月。 [在线]。网址：https://doi.org/ 10 14778 3718057 3718067 。/. [173] Z. Chen 、 H. Xie 、 J. Zhang 、 X. song 、 J. Tang 、 H. Rangwala 和 G. Karypis，《AutoG：从表格数据自动构建图》，arXiv 预印本 arXiv:2501.15282，2025年。[174] P. Plamper、O. J. Lechtenfeld、P. Herzsprung 和 A. Groß，《用于预测复杂溶解性有机质中化学转化的时序图模型》，《Environmental Science & Technology》，第 57 卷，第 46 期，第 18 116–18 126 页，2023年5月。[175] Y. Lin、Z. Liu、M. Sun、Y. Liu 和 X. Zhu，《学习用于知识图谱补全的实体与关系嵌入》，《AAAI人工智能会议论文集》，第 29 卷，第 1 期，2015年2月。[176] Z. Chen、Y. Wang、B. Zhao、J. Cheng、X. Zhao 和 Z. Duan，《知识图谱补全：综述》，《IEEE Access》，第 8 卷，第 192 435–192 456 页，2020年。[177] A. Groß、C. Pruski 和 E. Rahm，《生物医学本体与映射的演化：近期方法概述》，《Computational and Structural Biotechnology Journal》，第 14 卷，第 333–340 页，2016年。[178] M. D. Wilkinson、M. Dumontier、I. J. Aalbersberg、G. Appleton、M. Axton、A. Baak、N. Blomberg、J.-W. Boiten、L. B. da Silva Santos、P. E. Bourne、J. Bouwman、A. J. Brookes、T. Clark、M. Crosas、I. Dillo、O. Dumon、S. Edmunds、C. T. Evelo、R. Finkers、A. Gonzalez-Beltran、A. J. Gray、P. Groth、C. Goble、J. S. Grethe、J. Heringa、P. A. ’t Hoen、R. Hooft、T. Kuhn、R. Kok、J. Kok、S. J. Lusher、M. E. Martone、A. Mons、A. L. Packer、B. Persson、P. Rocca-Serra、M. Roos、R. van Schaik、S.-A. Sansone、E. Schultes、T. Sengstag、T. Slater、G. Strawn、M. A. Swertz、M. Thompson、J. van der Lei、E. van Mulligen、J. Velterop、A. Waagmeester、P. Wittenburg、K. Wolstencroft、J. Zhao 和 B. Mons，《科学数据管理与管理的 FAIR 指导原则》，《Scientific Data》，第 3 卷，第 1 期，2016年3月。[179] S. R. Carroll、I. Garba、O. L. Figueroa-Rodr´ıguez、J. Holbrook、R. Lovett、S. Materechera、M. Parsons、K. Raseroka、D. Rodriguez-Lonebear、R. Rowe、R. Sara、J. D. Walker、J. Anderson 和 M. Hudson，《原住民数据治理的 CARE 原则》，《Data Science Journal》，第 19 卷，2020年。[180] U. Qudus、M. R¨oder、M. Saleem 和 A.-C. Ngonga Ngomo，《知识图谱事实核查：综述》，《ACM Computing Surveys》，2025年7月。[181] U. Qudus、M. R¨oder、S. Kirrane 和 A.-C. N. Ngomo，《TemporalFC：一种基于知识图谱的时序事实核查方法》。Springer Nature Switzerland，2023年，第 465–483 页。[182] B. Xue 和 L. Zou，《知识图谱质量管理：全面综述》，《IEEE知识与数据工程汇刊》，第 1–1 页，2022年。[183] A. Grover 和 J. Leskovec，《node2vec：面向网络的可扩展特征学习》，载于《第 22 届 ACM SIGKDD知识发现与数据挖掘国际会议论文集》，KDD ’16 系列，ACM，2016年8月，第 855–864 页。[184] F. Beck、M. Burch、S. Diehl 和 D. Weiskopf，《动态图可视化的分类法与综述》，《Computer Graphics Forum》，第 36 卷，第 1 期，第 133–159 页，2016年1月。

[185] S. Hadlak、H. Schumann 和 H.-J. Schulz，《多面向图可视化综述》，欧洲图形学可视化会议 *(EuroVis) - STARs*，2015年。[186] Z. Deng、D. Weng、S. Liu、Y. Tian、M. Xu 和 Y. Wu，《城市可视分析综述：进展与未来方向》，计算视觉媒体，第 9 卷，第 1 期，第 3–39 页，2023年3月。

VI. 作者简介

Philipp Plamper 正在安哈尔特应用技术大学位于科滕（德国）的校区攻读计算机科学博士学位。他的研究兴趣包括知识图谱、数据工程和数据管理。

Hanna K¨opcke 目前是米特韦达应用技术大学（德国）的教授。她的研究兴趣包括数据管理和数据集成，尤其重点关注实体解析、知识图谱和信息检索。

Anika Groß 目前是安哈尔特应用技术大学位于科滕（德国）的校区教授。她的研究重点是数据集成，包括知识源的连接和聚类，尤其是知识图谱和本体，以及它们的演化与分析。