

Методы динамического познания города на основе графов знаний и их применение в микросредах

Авторы: ЯН Фэнъин, ЛУ Цзюньмо

Аннотация. Города как сложные системы, формируемые совместно физическим пространством и человеческой деятельностью, характеризуются непрерывно эволюционирующими процессами функционирования и механизмами обратной связи. Стремительное развитие Интернета и Интернета вещей в настоящее время обеспечивает возможность фиксирования в реальном времени городских активностей; однако извлечение интерпретируемых структур знаний из фрагментированных данных остаётся ключевой проблемой для динамического познания города. В настоящем исследовании предлагается методологическая рамка на основе графов знаний, объединяющая пространственно-временные данные из множества источников и выстраивающая методологию познания человеческой активности в городах вокруг семантической структуры «человек–объект–место–время–событие–эффект», что позволяет осуществлять многомерное сетевое познание и структурированное представление городского пространства и человеческой деятельности. На примере университетского кампуса как репрезентативной микросреды построен граф знаний, содержащий около 54 000 узлов-сущностей и 118 000 реляционных связей, что позволило выполнить извлечение отношений и причинно-следственный ретроспективный анализ. Результаты демонстрируют, что данный подход эффективно обеспечивает атрибуцию активностей и реакцию пространственного управления в сложных средах посредством ретроспективного отслеживания активностей и семантического связывания. Метод отличается высокой масштабируемостью и переносимостью между пространственными уровнями, предлагая перспективный методологический путь для городского планирования и управления, ориентированных на поведение в эпоху новых городских технологий.

Ключевые слова: динамическое познание города; человеческая деятельность; граф знаний; пространственное управление; кампус университета

Города представляют собой сложные системы, характеризующиеся сопряжением множественных элементов и мульти-масштабной эволюцией. Их функционирование — не просто результат статического структурного равновесия, а непрерывный процесс конститутивной реконструкции. Взаимодействие физического пространства и человеческой деятельности делает город состоянием перманентной реорганизации[1] — динамика эта не побочный продукт урбанизации, а сам способ городского существования. Соответственно, городское познание не должно ограничиваться структурной пространственной формой; оно должно сосредоточиться на фиксации и интерпретации непрерывных процессов взаимодействия деятельности и среды, а также на выявлении лежащих в их основе механизмов и логик[2-3].

По мере развития информационных технологий городская динамика может быть зафиксирована и количественно охарактеризована с беспрецедентной точностью. Множественные источники пространственно-временных макроданных — сенсорные сети, мобильная связь, социальные сети[5] — позволяют воспринимать в реальном

времени пространственно-временное распределение и эволюционные характеристики человеческой активности, побуждая городские исследования к переходу от статического описания к динамическому анализу[6]. Однако накопление массивных объёмов данных само по себе не привело к углублённому пониманию функционирования города: существующие исследования остаются преимущественно описательно-статистическими[7], не располагая механизмами, преобразующими результаты многомерного восприятия в интерпретируемые когнитивные рамки. Переход от накопления данных к когнитивному углублению стал таким образом ключевой проблемой современной городской науки.

Хотя современные технологии восприятия и методы анализа позволяют фиксировать характеристики активностей, их недостаточно для системного представления семантических связей и причинно-следственных цепей между множественными субъектами и элементами. Для преодоления этого ограничения графы знаний — как инструменты структурированного семантического представления и рассуждения — были интегрированы в городские исследования. В отличие от методов, основанных на статической информации, графы знаний используют тройки «сущность—отношение—сущность» в качестве базовой единицы, формируя динамические семантические сети, связывающие многомерную информацию и обеспечивая структурированное представление процессов городской активности[8]. Потенциал применения графов знаний для причинного рассуждения и логического выражения городских активностей был подтверждён в различных сценариях управления: познание городских функций, регулирование транспорта и контроль энергопотребления.

Опираясь на вышеизложенное, настоящее исследование предлагает метод динамического познания города, основанный на графах знаний. Данный метод применяет структуру замкнутого цикла «восприятие—понимание—вмешательство» для интеграции сбора многоисточниковых данных, семантического моделирования и причинно-механистического рассуждения. Посредством построения целостной карты знаний «человек—объект—место—время—событие—эффект» достигается когерентная цепь от интеграции данных до познания механизмов. На примере репрезентативной среды кампуса исследование подтверждает работоспособность и масштабируемость модели в задачах идентификации активностей, ретроспективного отслеживания результатов и динамического вмешательства. Данная разработка направлена на создание новой когнитивной рамки для понимания механизмов сопряжения человеческой городской активности и физической пространственной среды, а также на методологическую инновацию и теоретическое обеспечение поведенчески ориентированного городского управления.

1 От пространственного восприятия к комплексному анализу

1.1 Эволюция теории городского познания

Городское познание — это процесс представления и осмысления пространственных структур, функциональных отношений и социальных смыслов при взаимодействии человека с городской средой. Оно выходит за рамки вопроса «как воспринимается город», акцентируя «как город понимается и интерпретируется», выступая существенным посредником между физическим пространством, поведенческими механизмами и планировочными решениями.

Ранние исследования городского познания находились под глубоким влиянием

структурализма и пространственной морфологии, фокусируясь преимущественно на правилах организации и визуальном порядке городской физической формы. В середине XX века Кевин Линч через эмпирические исследования предложил теорию пяти элементов городского образа — тропы, края, районы, узлы и ориентиры[9-10] — систематически раскрыв когнитивную логику, по которой индивидуумы воспринимают городское пространство. Эта теория заложила парадигму исследований городского познания. Джейн Джейкобс[11] с позиции социального взаимодействия подчеркнула сложность и многообразие уличной жизни, расширив поле внимания на городские активности. Позитивистская география через дедуктивное и индуктивное рассуждение укрепила количественную характеристику пространственных процессов. Этот этап сосредоточился на читаемости и ощущении порядка города, через описательные методы выявив влияние пространственной формы на индивидуальное восприятие и заложив теоретическую основу для внимания планирования к пространственной идентифицируемости и ценностям мест.

Однако чрезмерное упрощение пространственных проблем привело к тому, что исследования временно утратили роль «человека» в городе, вызвав волну академической рефлексии[12]. Поведенческая география, возникшая в 1960-х годах, подчеркнула значимость индивидов и микропроцессов[13-14], предложив новые перспективы для понимания сложных пространственно-временных связей между человеческой деятельностью и географической средой. Норберг-Шульц[15] и И-Фу Туан[16] углубили интеллектуальные основы городского познания с феноменологических и гуманистических позиций, акцентировав генерацию перцептивного опыта, эмоций и смыслов в пространстве. Временная география Торстена Хегерстранда через «пространственно-временные пути» раскрыла динамические отношения между активностью, ограничением и возможностью[17], переместив перспективу городского познания от статического пространственного восприятия к системному пониманию пространственно-временных поведенческих процессов. Исследования поведенческих ограничений и механизмов принятия решений дополнительно показали, что индивидуальная активность распределена не произвольно, а демонстрирует анализируемые паттерны под множественными ограничениями времени, ресурсов и социальных сетей, продвинув городское познание от визуального представления к процессуальному анализу и создав новые теоретические основания для понимания причинно-следственной цепи между пространственной конфигурацией и поведенческим выбором.

На этих основах исследователи постепенно осознали, что городская сложность не может быть объяснена ни исключительно с пространственной, ни исключительно с поведенческой позиции. Новая волна теоретической интеграции, представленная теорией социального пространства и теорией взаимодействия пространства и поведения, продвинула городское познание к этапу исследования, сосредоточенному на «сопряжении физического пространства и человеческой активности»[18]. В эпоху информатизации появление городской информатики и внедрение многоисточниковых пространственно-временных данных, искусственного интеллекта и графов знаний позволили городскому познанию перейти от теоретических концепций к системному моделированию; город перестал быть лишь объектом восприятия и представления, превратившись в сложную систему, поддающуюся пониманию, предсказанию и

вмешательству в реальном времени[19].

В совокупности теория городского познания следовала эволюционной траектории от пространственной характеристики к поведенческому анализу, а затем к когнитивной системности, движимой данными. Эта траектория не только обеспечила интеллектуальную основу для методологических инноваций, но и закрепила «взаимодействие пространства и активности» как ключевую проблему понимания сложных механизмов городского функционирования.

1.2 Развитие технологий городского восприятия

По мере постепенной эволюции теоретических рамок от пространственно-поведенческого сопряжения к системному познанию, сопутствующие исследования сосредоточились на достижении динамического восприятия городских механизмов функционирования посредством технологических средств — приобретении, идентификации, сборе и классификации информации о физической среде и человеческой деятельности в городах для создания вычислительной базы городского познания. Развитие технологий городского восприятия прошло путь от эмпирического вывода и ручных обследований к интеллектуальному восприятию. Фундаментальная траектория заключалась в расширении объектов восприятия от физического пространства к человеческой активности, переходе методов восприятия от односторонних к мульти-источниковому слиянию, и трансформации содержания восприятия от статической характеристики к динамическим пространственно-временным процессам.

Первичное городское восприятие опиралось преимущественно на ручные наблюдения и эмпирические исследования, получая характеристики городского пространства через полевые обследования, опросы и статистические данные исследователей, с присущими ограничениями полноты данных и охвата. С распространением спутниковых снимков дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС) городское восприятие вступило в фазу цифрового картографирования, ориентированного на «пространство–изображение–показатели»[20]. Объектами восприятия на этом этапе были главным образом элементы физической пространственности — землепользование, здания, дорожная сеть; структуры данных преимущественно в растровом или векторном формате позволяли точную количественную репрезентацию статической пространственной информации.

С развитием технологий мобильного Интернета и Интернета вещей интегрированные космос–воздух–земля интеллектуальные инфраструктуры постепенно утвердились, введя городское восприятие в фазу интеллектуального мульти-источникового режима[21]. Основанные на мульти-временных и мульти-спектральных спутниковых снимках, изображениях улиц и данных мониторинга окружающей среды, собираемых профессиональными датчиками, в сочетании с социальным восприятием, переносимым людьми (сигналы мобильных телефонов, социальные сети, данные траекторий) и партисипативным восприятием (фотографии, тексты и информация о местоположении, загружаемые пользователями), динамические городские характеристики теперь могут фиксироваться в реальном времени, сдвигая центр тяжести восприятия от «объектов» к «людям»[22]. Исследования этого этапа не ограничиваются физической формой городского пространства, но также интересуются идентификацией и анализом процессуальной информации, такой как индивидуальное

и коллективное поведение, модели перемещений и эволюция энергопотребления[23]. Среди репрезентативных исследований — идентификация интенсивности активности населения и динамических функциональных границ по данным мобильной связи[24-25], распознавание городских эмоций и пространственных предпочтений на основе данных социальных сетей[26-27], а также восприятие городских перемещений в реальном времени через транспортные датчики и видеонаблюдение[28-29]. Слияние этих гетерогенных многоисточниковых данных преобразовало город из наблюдаемого объекта как «статический образ» в наблюдаемый объект как «динамический процесс», заложив основу для мелкозернистого анализа городского функционирования[30].

В настоящее время городское восприятие углубляется в направлениях интеграции, интеллектуализации и когнитивизации. Однако одного лишь технологического восприятия для сбора и интеграции данных недостаточно для выявления внутренних логических связей между городскими элементами. Как систематически анализировать пространственную структуру и человеческую активность для поддержки городского познания и принятия решений стало центральной темой следующего этапа исследований.

1.3 Углубление методов городского анализа

Анализ городской среды — опираясь на восприятие — представляет собой процесс идентификации, интерпретации и прогнозирования интерактивных отношений между физическим пространством и человеческой деятельностью с целью раскрытия внутренних механизмов городского функционирования и поддержки принятия решений. Методы городского анализа прошли эволюцию от пространственной статистики к сетевому моделированию и затем к семантическому рассуждению; их ключевая цель постепенно продвигалась от анализа статических конфигураций к познанию динамических механизмов.

Первичный городской анализ опирался преимущественно на пространственную статистику и региональные модели для выявления макропаттернов городской формы и функциональной конфигурации. Методы, представленные анализом пространственно-временного распределения, раскрывали пространственную автокорреляцию и эволюционные характеристики географических элементов[31]; количественные исследования, типизированные традиционными статистическими моделями (гравитационные модели, регрессионные модели и т.д.), подчёркивали статистическую корреляцию пространственных отношений[32-33]; исследования, сосредоточенные на пространственных моделях и анализе сетей, количественно характеризовали логику организации пространственных структур через такие методы, как пространственный синтаксис и анализ доступности[34-35]. С развитием искусственного интеллекта модели машинного обучения и глубокого обучения были интегрированы в городские исследования, значительно укрепив аналитический потенциал для сложных проблем[36]. Городской анализ на этом этапе перешёл от структурного описания к причинно-механистическому рассуждению, но оставался преимущественно на макроуровне с агрегированными данными, затрудняя фиксацию характеристик самоорганизации и процессов пространственно-временного взаимодействия множественных элементов внутри сложной городской системы.

Вследствие этого теория сложных сетей была внедрена в эту область, абстрагируя город как реляционную сеть людей, мест, оборудования и событий, анализируя

распределение степеней, свойства малого мира и коэффициенты кластеризации для выявления скрытых паттернов городского функционирования[37]. Модели многослойных нейронных сетей, разработанные на этой основе, описали каскадные межуровневые отношения между территорией, промышленностью, населением и транспортом[38]; модели взаимодействия мульти-агентов дополнительно включили поведенческую логику и механизмы принятия решений в аналитическую рамку, раскрыв динамическую обратную связь между поведением толпы и пространственными состояниями. В совокупности три подхода заложили основу анализа сложных городских систем, продвинув городской анализ от «параллельного восприятия» к «интерактивному рассуждению» и добившись значительного прогресса в понимании сопряжения пространства–активности–эффекта.

Тем не менее, эти модели всё ещё имеют ограничения в плане семантического выражения и логического рассуждения, особенно при интеграции данных из разных доменов и объяснении причинно-следственных механизмов перед лицом гетерогенных многоисточниковых данных. Внедрение графов знаний предлагает путь решения этой проблемы, наследуя преимущества анализа структуры сетей и одновременно укрепляя возможности кросс-доменной интеграции данных и причинно-следственного моделирования. Познание городских функций, движимое данными POI, социальными сетями и визуальным восприятием, стало активной темой исследований; графы знаний городских функций на основе многоисточниковых данных применяются для поддержки познания городских функций и анализа пространственно-временной эволюции[39]. Chen et al.[40] построили динамические графы на основе данных о перемещениях в период пандемии для поддержки в реальном времени ориентации людских потоков и корректировки стратегий изоляции. Zhu et al.[41] использовали графы транспортного потока и метеорологические данные для повышения точности краткосрочного прогнозирования трафика. Hu et al.[42] интегрировали графы знаний с графовыми нейронными сетями для моделирования причинно-следственной связи между людскими потоками и энергопотреблением зданий в городских центрах, обеспечив интеллектуальное управление системами зданий. Эти исследования демонстрируют, что графы знаний могут служить не только для семантической интеграции городских элементов, но и как посредник для поведенческого моделирования и управленческого рассуждения, организуя городские элементы в вычислимую и интерпретируемую систему знаний.

В этом контексте настоящее исследование стремится построить методологию городского познания, центрированную на графах знаний, устанавливая парадигму представления знаний для полного взаимодействия городского физического пространства и человеческой активности через структурированные, семантизированные и динамические аналитические рамки. Оно исследует систему динамического познания, интегрирующую «восприятие–понимание–реакцию» для поддержки поведенчески ориентированных, мульти-сценарных и мульти-масштабных применений городского управления.

2 Панорамное картографирование человеческой городской активности на основе графов знаний: логика и методы

Для восприятия и анализа сложных процессов городского функционирования настоящее исследование строит систему динамического городского познания,

направленную на многомерную информацию городского физического пространства и человеческой активности, используя графы знаний как рамку представления. Система поддерживает структурированное выражение и динамическое управление элементами, включающими «человек–объект–место–время–событие–эффект»[43], и может быть формально определена как:

$$K_G = \{E, R, S, A\}(1)$$

где: K_G (knowledge graph) обозначает граф знаний; E (entity) представляет сущности, охватывая конкретные объекты и явления человеческой активности как узлы в графе знаний; R (relationship) представляет отношения между этими сущностями, составляя рёбра в графе знаний, где $R = \{(e_1, r, e_2) | r \in R, e_1, e_2 \in E\}$; S (set) обозначает тройки сущность–отношение–сущность, формируемые связью узлов через рёбра, составляющие фундаментальные семантические единицы графа знаний; A (attribution) представляет атрибуты сущностей, удовлетворяя $\forall e \in E$, с соответствующим атрибутом $a_e \in A$, используемым для описания идентификационных, временных, пространственных и числовых характеристик сущностей.

2.1 Ключ к преобразованию динамических городских процессов в представление через графы знаний: определение сущностей и аннотация атрибутов

Первоочередная задача построения графа знаний для человеческой городской активности — идентификация и определение многомерных сущностей. Человеческая деятельность в городах охватывает обширный набор гетерогенных элементов, которые могут быть разложены на ряд информационных категорий: человек, объект, место, время, событие и эффект. Эти семантические сущности совместно составляют фундаментальные узлы информации городского функционирования и структурную основу построения графа знаний (Рисунок 1). Среди них человек и объект выступают субъектами активности, охватывая различных индивидов и носителей, исполняющих деятельность в городском пространстве; место обозначает пространства, в которых развёртывается деятельность, включая здания, дороги, площади, а также районы и сети, формируемые их сочетаниями; время фиксирует временной контекст активностей, поддерживая моделирование поведенческих ритмов и периодических паттернов; событие соответствует конкретным операциям, выполняемым субъектами активности в определённых временных и пространственных контекстах, охватывая как статическое использование ресурсов (например, потребление электроэнергии, воды, газа), так и динамические поведенческие процессы (например, маршруты перемещения, пространственные потоки, социальные скопления); эффект отражает воздействия, порождаемые городской человеческой активностью через различные времена и пространства, включая, помимо прочего, информацию с различных перцептивных устройств о потреблении энергии зданиями, транспортной нагрузке и пространственной интенсивности, служа критической конечной точкой когнитивной цепи, ориентированной на управленческое вмешательство.

Каждый тип сущности в графе должен располагать полной атрибутивной информацией. Типы атрибутов не фиксированы в размерности, а должны гибко определяться в зависимости от характеристик сущностей в реальном контексте, типично включая идентификационные маркеры (например, имя, идентификатор), пространственно-временные атрибуты (например, широта/долгота, временные метки), поведенческие атрибуты (например, роль, состояние), числовую информацию (например,

энергопотребление, объём потока) и иную информацию, способную характеризовать сущности, для достижения мультиперспективного описания состояний сущностей. Сущности и их атрибуты образуют первое структурное измерение графа знаний, служа основанием для последующего логического построения и причинного выражения.

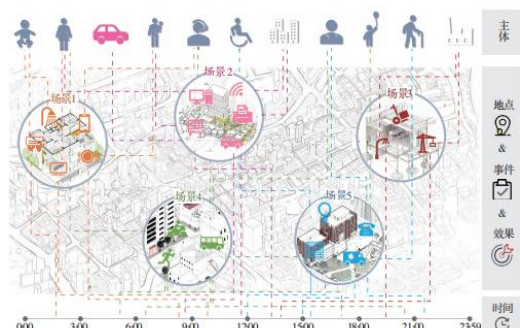


Рисунок 1. Многомерные сущности в графе знаний городской активности

2.2 Ядро преобразования многомерных городских элементов в построение семантических сетей: структурированная обработка и отображение отношений

На основе определения сущностей и атрибутов, огромный объём данных восприятия человеческой активности должен быть преобразован в единообразно обрабатываемую структурированную информацию. Настоящее исследование применяет методы глубокого обучения для обработки многомерной информации из видеоизображений, текстов социальных сетей, траекторий локализации и других источников. В частности, видеоизображения обрабатываются моделями обнаружения объектов для идентификации субъектов толпы и транспорта; тексты социальных сетей обрабатываются языковыми моделями для извлечения поведенческих событий, пространственных позиций и временных меток; данные траекторий анализируются в сочетании с методами моделирования временных рядов для идентификации паттернов маршрутов и характеристик активностей. Все данные проходят конверсию формата и разрешение пространственных координат в среде Python и единообразно сохраняются в графовой базе данных Neo4j, достигая таким образом преобразования гетерогенных сырых данных из множества источников в структурированные семантические единицы. На основе структурированных данных семантические отношения между сущностями должны быть далее идентифицированы для построения структурной сети, способной к логическому выражению. Семантические отношения в городских системах включают, помимо прочего, пространственную смежность и принадлежность, временную последовательность и продолжительность, поведенческое исполнение и реакцию на события. Эти отношения отражают реальные взаимодействия между городскими элементами на семантическом уровне, обеспечивая семантическую поддержку для построения логических цепей «кто—где—почему—как—какой результат».

Вследствие этого строится система правил, сопрягающая пространственные, временные и поведенческие ограничения, для обеспечения полуавтоматического вывода семантических отношений между структурированными данными. Конкретнее: базовые отношения (например, «развёртывается в», «принадлежит к») генерируются автоматически путём сопоставления полей с использованием функций pandas в Python; пространственные отношения вычисляются на основе координат широты/долготы с использованием библиотек geopandas и shapely для вычисления пространственных

расстояний, и когда расстояние ниже определённого порога, система автоматически генерирует отношения «расположен в», «смежен с», «пересекает». Временные отношения (например, «синхронизирован», «последователен») идентифицируются через разницы временных меток; поведенческие отношения (например, «участвует в», «совместно появляется с») автоматически выводятся на основе перекрытия идентификаторов субъектов и записей событий во временных окнах, логика чего реализуется функциями временных рядов pandas. Для сложных семантических отношений (например, «влияет на», «отвечает на», «вызывает») интегрируются экспертные знания для установления логических правил, формируя гибридный механизм генерации «ручная аннотация + вывод по правилам» для баланса между семантической точностью и вычислительной масштабируемостью.

Наконец, структурированные сегменты отображаются в форме троек, центрированных на «человек–событие–место–время–объект–эффект», и интегрируются в граф знаний с помощью платформ типа Neo4j, обеспечивая организацию, запрос и динамическое обновление узлов и отношений, что создаёт операционную поддержку знаний для понимания и управления механизмами городского функционирования. См. Рисунок 2.



Рисунок 2. Траектория отображения городского физического пространства и человеческой активности на основе графа знаний

2.3 Мост от интеграции данных к познанию знаний: запрос путей и анализ рассуждения

После построения графа знаний настоящее исследование дополнительно вводит методы рассуждения и анализа графов, основанные на сопоставлении реляционных путей и вычислении семантического сходства, для достижения когнитивного познания от явных отношений к скрытым причинно-следственным цепям внутри многомерной семантической сети.

Сопоставление реляционных путей раскрывает скрытые поведенческие цепи или пространственные зависимости через многошаговое реляционное рассуждение. Например, когда «Субъект А — участвует в — Событие В — развёртывается в — Здание С» и «Здание С — смежно с — Здание D» сосуществуют, рассуждение по путям может выявить скрытое отношение, что «Субъект А может быть активен вблизи Здания D». Этот метод опирается на функциональные возможности сопоставления паттернов путей языка запросов Cypher в графовой базе данных Neo4j, в сочетании с библиотекой сетевого анализа графов NetworkX в Python, для автоматического извлечения и вывода многошаговых путей.

Вычисление семантического сходства идентифицирует объекты, обладающие схожими атрибутами, близкими функциями или когерентными поведенческими паттернами, среди многоисточниковых сущностей. Используя библиотеки gensim и scikit-learn в

Python для векторизации атрибутивной информации узлов-сущностей, в сочетании с алгоритмом сходства узлов (node similarity) Neo4j, проводится комплексная оценка семантического сходства между пространственными местами и поведенческими событиями, выявляя тем самым явления повторяемости паттернов и функционального сопряжения внутри городских систем.

Система рассуждения на графах реализуется в среде графовой базы данных Neo4j; предварительная обработка данных, извлечение путей и вычисление семантического сходства выполняются на платформе Python; результаты рассуждения реинжектируются в базу данных Neo4j через инструкции Cypher, формируя динамически обновляемую сеть знаний. Этот процесс не только достигает панорамного представления городского физического пространства и человеческой активности, но и обеспечивает выявление поведенческих цепей, пространственных зависимостей и их причинных механизмов.

3 Многомерное познание городских микросред на основе графов знаний: случай университетского кампуса

3.1 Объект исследования и выбор среды

Для проверки работоспособности и потенциала применения предложенного метода был выбран новый кампус Университета А в пригороде Тяньцзиня как экспериментальная платформа на микроскопическом уровне в силу его репрезентативности и доступности данных. Новый кампус Университета А занимает общую площадь более 2,4 млн м², с застроенной площадью 1,55 млн м². Его пространственная организация принимает модель планирования «дисциплинарный пояс + функциональный пояс» с чётко определёнными функциональными границами и разнообразными типами активностей. Кроме того, кампус располагает полноценными системами видеонаблюдения и интеллектуальными измерительными приборами, обеспечивая необходимую поддержку данных для построения графа знаний.

3.2 Получение многоисточниковых данных и структурированная обработка

Сочетая полевое обследование с макроданными Интернета, была получена информация об активностях за осенний семестр 2023 года (1 сентября 2023 — 1 января 2024), построена составная система данных, охватывающая архитектурные инженерные планы, геоинформацию, данные социальных сетей, мониторинг транспорта и тексты измерения энергопотребления. Данные поступают преимущественно из статистических документов, предоставленных департаментом логистического управления университета, и открытых данных публичных онлайн-платформ. Поскольку данные мобильной связи трудно получить из-за ограничений защиты приватности и авторизации данных, перемещения на моторизованных транспортных средствах использовались как замещающая переменная человеческих перемещений для характеристики поведения перемещения в кампус.

На этапе обработки данных были внедрены интеллектуальные методы, включая модель YOLOv8 и алгоритм SDV (Synthetic Data Vault), для стандартизации форматов, выравнивания временных меток и унифицированной кодировки сущностей на мультимодальных данных, интегрировав их в единую карту многомерной информации кампуса (Рисунок 3), обеспечивая высококачественные нормализованные интерфейсы данных для построения графа знаний.



Рисунок 3. Техническая дорожная карта построения графа знаний активностей кампуса Университета А, Тяньцзинь

3.3 Результаты моделирования и характеристики графа знаний активностей кампуса

На основе структурированно обработанных данных был построен граф знаний активностей кампуса с использованием графовой базы данных Neo4j (Рисунок 4), содержащий около 54 000 узлов и 118 000 реляционных связей, охватывающих различные субъекты активностей, поведенческие события, пространственные сущности и записи энергопотребления в кампусе. В графе многоуровневые отношения между сущностями и их временные, пространственные и причинные атрибуты совместно формируют сеть знаний, способную к выполнению задач быстрого реагирования на ключевые проблемы управления — такие как аномальные траектории активностей, места высокого энергопотребления и события плотного скопления — посредством семантического запроса и причинно-следственной ретроспекции.

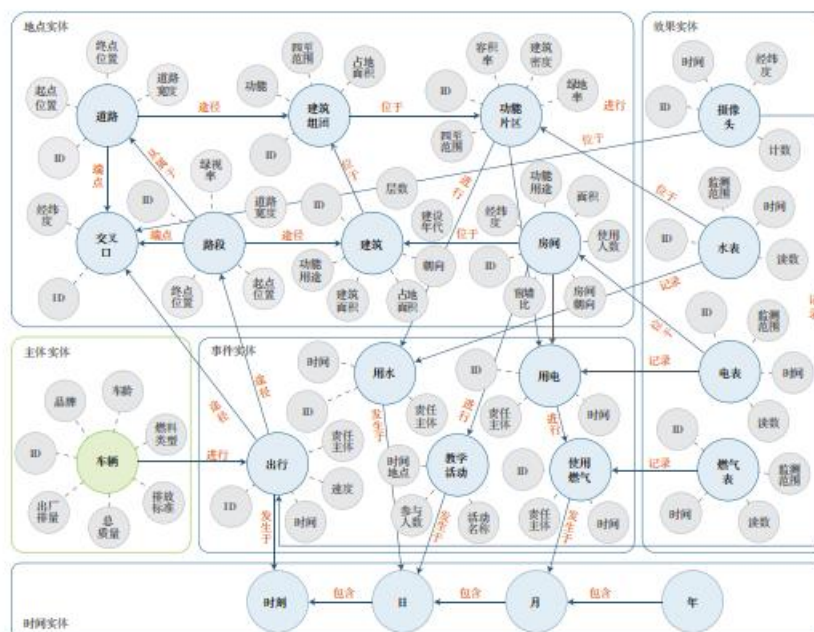


Рисунок 4. Определения сущностей и атрибутов в графе знаний активностей кампуса Университета А, Тяньцзинь

4 Применение и перспективы графов знаний в городском познании

4.1 Приложения управления в сценарии кампуса

Предложенный в данном исследовании метод динамического городского познания, движимый графами знаний, позволяет структурированное представление паттернов активности на уровне всей области и поддерживает агрегацию многомерной информации и причинный анализ от любого узла. Размерность «эффект» характеризует последующую реакцию человеческой активности во времени и пространстве, составляя центральный компонент когнитивного графа и практическую конечную точку городского управления. Таким образом, опираясь на граф знаний активностей кампуса Университета А, был выбран период утреннего пика (7:30–8:30) 18 декабря 2023 года — типичного учебного дня — как окно наблюдения. Транспортное средство, въехавшее в кампус, выбранное случайным образом, послужило отправной точкой для семантического запроса с акцентом на характеристиках атрибутов и семантических коннотациях размерности эффекта для исследования потенциала применения графов знаний в семантической интеграции и идентификации причинно-следственной логики.

4.1.1 Идентификация маршрутов перемещения: индивидуальная активность и пространственная траектория

Опираясь на возможности структурированной организации и семантического запроса графа знаний, система инициировала запрос от транспортного средства с номером Jing H1Z*, зафиксированного камерой видеонаблюдения северных ворот, идентифицировав узел активности перемещения T041, генерированный после въезда транспортного средства в кампус в 8:17 18 декабря 2023 года, и выполнила ретроспективное отслеживание этого поведенческого перемещения [Рисунок 5(a)]. Граф автоматически восстановил атрибуты маршрута и отношения соседних узлов этого события перемещения, завершив семантическую реконструкцию индивидуальной траектории транспортного средства внутри пространственной сети кампуса.

Результаты отслеживания маршрута показали, что после въезда в кампус через северные ворота транспортное средство последовательно прошло через пять перекрёстков — P01, P37, P56, P57 и P58 — для的最终 остановки вблизи Учебного здания 55, сформировав маршрут перемещения «Северная дорога XY — Центральная дорога XY — Северная дорога MD». На основе атрибутов транспортного потока узлов камер в графе этот маршрут перемещения был идентифицирован как основной коридор с наиболее сконцентрированным давлением транспорта в период утреннего пика, со средней плотностью потока, значительно превышающей другие одновременные маршруты, поддерживая значительный объём междусобственных перемещений в кампусе.

Реконструкция траектории транспортного средства демонстрирует способность графа знаний выстраивать полные поведенческие цепи от отдельных узлов, обеспечивая структурную основу для последующей идентификации высокочастотных паттернов перемещения и исследования логики пространственного использования.

4.1.2 Связывание семантической информации: сети пространственных элементов и характеристики агрегации

На основе идентифицированного маршрута перемещения система дополнительно проанализировала многомерные пространственные структуры и функциональные узлы, связанные через атрибутивный механизм ассоциации семантического графа знаний,

выявляя скрытую логику пространственного поведения.

Результаты показывают, что место назначения перемещения, Учебное здание 55, принадлежит кластеру Школы информатики, который является одной из единиц с наибольшим числом преподавателей и студентов и наиболее плотной учебной и исследовательской активностью в кампусе — типичный пункт назначения для высокочастотных перемещений [Рисунок 5(b)]. Вдоль этого маршрута перемещения пересекаются множественные студенческие общежития, библиотека, центры досуга и Учебное здание 45, среди других важных общественных мест, связывающих поведенческую цепь повседневной студенческой группы: «жильё–учёба–социализация». Одновременно этот маршрут также охватывает узлы сервисного оборудования в жилищном кластере, включая супермаркеты, рестораны и почтовые отделения. Наложение эффектов пространственного скопления коммерческого и образовательного оборудования значительно усиливает притягательную способность людских потоков в этой зоне, формируя отношение сопряжения горячих точек пространства и поведения, совместно движимое учебными функциями и услугами близости.

Связанный запрос пространственной информации подтверждает способность системы графа знаний к автоматической ассоциации от индивидуальных поведенческих цепей к многомерной информации на уровне всей области, обеспечивая когнитивную траекторию для понимания интерактивных отношений между сложными пространственными структурами и поведенческими механизмами в кампусе.

4.1.3 Анализ причинно-следственной логики: реагирование на события и энергопотребление

От конечной позиции вышеуказанного поведенческого перемещения система дополнительно вызвала модуль семантической ассоциации графа знаний для выполнения глубокого запроса и структурной ретроспекции пространственных сущностей и содержания активностей, связанных с Учебным зданием 55.

Во-первых, результаты запроса на основе атрибутов узлов здания показали, что учебный кластер информатики, где расположено Здание 55, принадлежит сектору отопления D и сектору водоснабжения восточных ворот, где регистрируются его активности потребления воды и энергии в секторальных измерительных таблицах. Здание содержит 174 помещения, охватывающих различные функции — учебные аудитории, лаборатории, конференц-залы, лекционные аудитории, кафетерии и санитарные узлы. Данные об электроэнергии ежедневно собираются индивидуальными счётчиками в каждом помещении и записываются в реальном времени в атрибуты узлов энергопотребления графа. Последующий запрос атрибутов энергопотребления узлов помещений с ежедневной агрегацией показал, что из 29 помещений, классифицированных в верхние 3% по ежедневному потреблению электроэнергии, 11 находились внутри Учебного здания 55, что составляет 37,9%. Примечательно, что Лекционная аудитория R18 зарегистрировала суточное потребление электроэнергии в 87,3 кВт·ч, эквивалентное 69,4 кг выбросов углерода — самое высокое среди почти 10 000 помещений всего кампуса в этот день, с нагрузкой энергии, значительно превышающей другие обычные учебные пространства.

Во-вторых, система вызвала функциональную возможность семантической ретроспекции графа знаний для связывания многомерной информации, включающей

вышестоящую пространственную структуру Учебного здания 55 (учебный кластер, подотрасль энергии), поведенческие события этого дня и узлы окружающего транспорта [Рисунок 5(с)]. Результаты показали, что 18 декабря Школа информатики организовала масштабный академический форум в этом здании, с несколькими залами, используемыми для различных типов семинаров, презентаций результатов и учебных мероприятий. Среди них Лекционная аудитория R18 служила главной площадкой форума, с наибольшим числом участников и наиболее продолжительной активностью, сформировав тем самым наиболее сконцентрированный спрос на энергию в этот день. Параллельно два участка главных дорог перемещения L90 и L103, прилегающие к Учебному зданию 55, показали временные флуктуации, высоко когерентные с изменениями потребления электроэнергии нескольких залов здания в этот день в кривых интенсивности транспорта, выявляя типичный механизм «поведенческий триггер–пространственное скопление–энергопотребление», движимый масштабными учебными мероприятиями, и отражая динамический процесс взаимодействия мульти-элементов в единицах городской микромасштабной среды.

Посредством ретроспекции путей семантической ассоциации между узлами графа система эффективно интегрировала изначально разрозненную многомерную информацию, реконструируя скрытую причинно-следственную логику активностей кампуса и обеспечивая структурную поддержку для управленческого вмешательства.

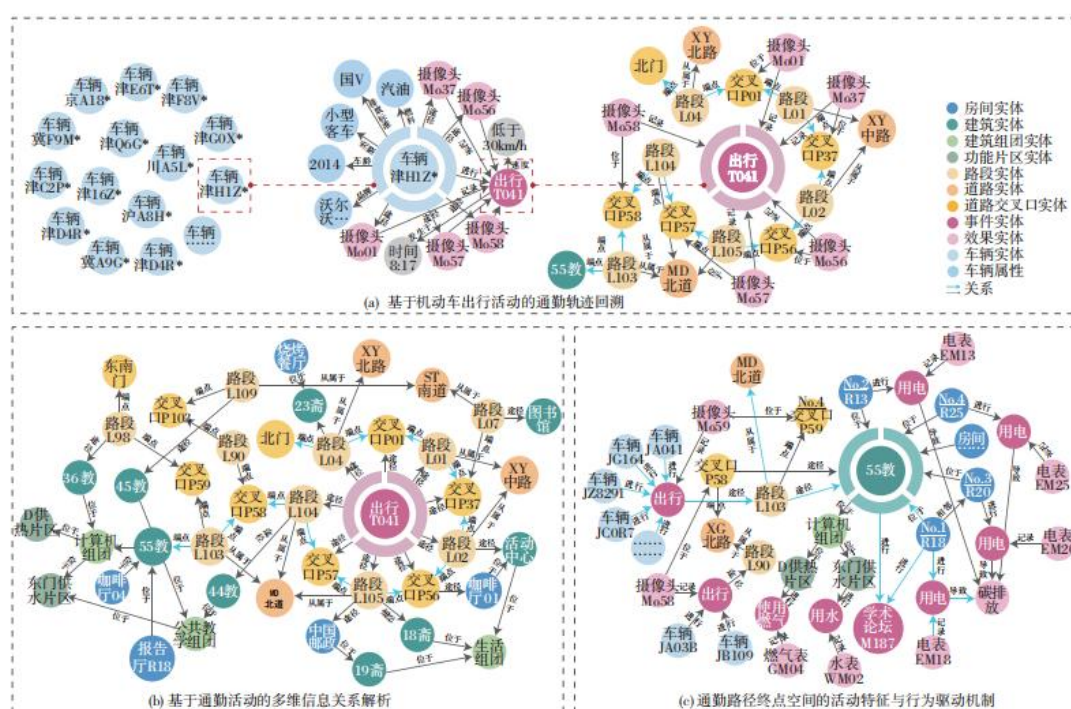


Рисунок 5. Приложения управления графом знаний в сценарии кампуса

Источник: Перерисовано на основе графа знаний активностей кампуса Университета А

4.2 Мульти-сценарное продвижение и методологические перспективы

Эмпирическое исследование на основе графов знаний в сценарии кампуса не только подтверждает способность метода к интеграции информации и семантическому моделированию в пространствах высокой плотности, но и предоставляет обобщаемый аналитический подход для понимания поведенческих процессов на более широких городских масштабах. Посредством идентификации цепей индивидуальной активности,

частоты пространственного использования и отношений поведенческого сосуществования можно выявить поведенческие логики и паттерны пространственной реакции, широко присутствующие в организации городского пространства, обеспечивая микроскопическую справку для динамического познания сложных городских проблем.

Как центральный вектор, интегрирующий полный процесс «идентификация–атрибуция–моделирование–обратная связь», семантическая рамка графа знаний обладает высокой реконфигурируемостью: типы сущностей и отношений могут гибко определяться или корректироваться в зависимости от сценариев применения, а атрибуты могут динамически обновляться, обеспечивая адаптацию к диверсифицированным источникам данных и когнитивным потребностям без изменения общей семантической логики. Эта характеристика позволяет когнитивной модели, построенной в данном исследовании, сохранять семантическую когерентность и интерпретируемую логику через различные пространственные уровни и тематические домены. Соответственно, метод может быть расширен далее на жилые сообщества, промышленные парки, коммерческие зоны и другие типы городских пространств, и даже на весь городской домен, позволяя моделирование многомерного познания и реагирования в различных областях, таких как управление энергией, регулирование окружающей среды, охрана наследия и городская регенерация.

С дисциплинарной перспективы, графы знаний продвигают исследования городского планирования от статического пространственного описания к динамическому когнитивному анализу, выстраивая логическую цепь «информация–знание–познание». Значение заключается не только в достижении структурированной интеграции и панорамного представления многомерных городских элементов, но более существенно — в выявлении механизмов городского функционирования вычислимым и интерпретируемым образом, предоставляя новые пути реализации для построения цифровых городских двойников и интеллектуального управления, способствуя трансформации планировочных решений от ориентации на основе опыта к подходу, движимому данными и знаниями, и осуществляя двунаправленную интеграцию и инновацию между дисциплинарной теорией и управленческой практикой.

5 Выводы и перспективы

Перед лицом современных вызовов недостаточной детализации анализа сопряжения между городским физическим пространством и человеческой активностью, а также разобщённости механизмов реагирования, данное исследование предлагает метод динамического городского познания, основанный на графах знаний. Центрированный на семантической структуре «человек–объект–место–время–событие–эффект», метод обеспечивает полный замкнутый цикл от сбора многоисточниковых данных и поведенческого моделирования до поддержки реагирования.

В эмпирическом исследовании, проведённом в университетском кампусе, построенный граф знаний человеческой активности продемонстрировал устойчивые способности к агрегации информации и семантической ассоциации, эффективно поддерживая задачи многомерного анализа — от отслеживания индивидуальных траекторий и идентификации пространственных отношений до анализа причинно-следственных механизмов. Исследование подтверждает применимость и масштабируемость метода в пространственном управлении на микроскопическом уровне, демонстрируя

потенциал графов знаний для усиления семантической интеграции, структурированного выражения и возможностей рассуждения и вывода методов динамического познания. С позиции планировочного городского управления, метод обеспечивает техническую траекторию для построения системы динамического познания, centered на логике «человек–среда–поведение», с обобщаемыми аналитическими подходами и переносимыми, расширяемыми методологическими моделями, которые могут быть интегрированы в различные сценарии планировочной практики — включая оптимизацию организации транспорта в центральных районах, мониторинг и регулирование окружающей среды промышленных парков, а также охрану и регенерацию историко-культурного наследия — поддерживая трансформацию парадигмы управления от статической ориентации на конфигурацию к динамическому подходу, подвижному поведением.

В перспективе системы динамического городского познания требуют непрерывного углубления в трёх ключевых направлениях: во-первых, продвижение автоматизации интеграции данных на входе для повышения способностей обработки в реальном времени гетерогенных данных; во-вторых, укрепление глубины извлечения информации внутри графа для улучшения идентификации и построения сложных поведенческих паттернов и семантических отношений; в-третьих, расширение механизмов сопряжения графа с концевыми точками принятия решений для улучшения стратегической обратной связи, моделирования сценариев и межведомственной координации. Эти траектории совместно будут способствовать эволюции городских графов знаний от инструментов организации данных к платформам городского управления, обеспечивая поддержку для построения новых систем городского управления.

Список литературы

- [1] BATTY M. The pulse of the city[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(4): 575-577.
- [2] YANG Junyan, ZHANG Xun, YANG Qingxin, et al. Tracing origins and building foundations: a geomorphological analysis of disciplinary development in urban-rural planning[J]. City Planning Review, 2025, 49(5): 4-16.
- [3] WANG De, HU Yang. Urban spatiotemporal behavior planning: concept, framework, and prospects[J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 44-50.
- [4] SHAO Yuntong, WU Xiao. The evolution pattern of city connectivity in the Yangtze River Delta under the "hierarchy-network" dual dimension: an analysis based on population flow big data[J]. Urban Planning Forum, 2023(6): 59-67.
- [5] WANG Weiqiang, MA Xiaojiao. Research on waterfront public space vitality evaluation based on multi-source data: a case study of the Huangpu River waterfront area[J]. Urban Planning Forum, 2020(1): 48-56.
- [6] WU Zhiqiang, HE Rui, CHEN Zeyin, et al. Intelligent scenarios: conceptual discussion and urban planning practice of 246 global cases[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 12-17.
- [7] NIU Xinyi, LIN Shijia. Spatiotemporal big data in urban planning research: technological evolution, research agendas, and frontier trends[J]. Urban Planning Forum, 2022(6): 50-57.
- [8] ZHAO Ke, DUAN Linling, LI Jielian. Knowledge graph technology support: smart urban planning approaches inspired by the DIKW model[J]. Urban Planning International, 2023,

38(1): 1-13.

[9] LI Jiewen, WANG Hongyang. Dialectics and transcendence of urban spatial homogenization: a case study of the Wukang Road project in Shanghai[J]. City Planning Review, 2024, 48(1): 79-89.

[10] XIAO Zuopeng, DONG Ziye, CUI Chong, et al. Exploration of time-oriented urban design theory and practice[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2024(2): 8-14.

[11] JACOBS J. The death and life of great American cities[J]. New York Times Book Review, 2021, 12625.

[12] JOHNSTON R J. Philosophy and human geography: an introduction to contemporary approaches[M]. New York: Wiley, 1986.

[13] TA Na, CHAI Yanwei. The disciplinary positioning and frontier directions of behavioral geography[J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 1-15.

[14] ZHANG Wenjia, LU Daming. Methodology of behavioral geography and the micro human-land relationship research paradigm[J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 27-39.

[15] NORBERG-SCHULZ C. Genius loci: towards a phenomenology of architecture[M]. New York: Rizzoli, 1979.

[16] TUAN Y F. Space and place: the perspective of experience[M]. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1977.

[17] ELLEGÅRD K, SVEDIN U. Torsten Hägerstrand's time-geography as the cradle of the activity approach in transport geography[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 23: 17-25.

[18] CHAI Yanwei, TAN Yiming, SHEN Yue, et al. Basic ideas for constructing the space-behavior interaction theory[J]. Geographical Research, 2017, 36(10): 1959-1970.

[19] LIU Chao, WU Zhiqiang. Research progress of urban informatics in planning science, practice, and education[J]. Urban Planning International, 2024, 39(1): 1-10.

[20] NING Xiaogang, WANG Hao, ZHANG Hanchao, et al. High-precision urban boundary extraction and spatiotemporal expansion analysis of Chinese cities at or above the prefecture level from 2000 to 2016 based on remote sensing[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(12): 1916-1926.

[21] GONG Jianya, ZHANG Xiang, XIANG Longgang, et al. Progress and application of comprehensive sensing and intelligent decision-making for smart cities[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1482-1497.

[22] TU Wei, CAO Jinzhou, GAO Qili, et al. Fusing multi-source spatiotemporal big data for perceiving urban dynamics[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2020, 45(12): 1875-1883.

[23] HAN Shengfa, LI Jijun, CUI Yunze. New discoveries in urban image theory based on image and spatiotemporal data: limitations, extensions, and applications[J]. Urban Planning Forum, 2024(Suppl. 1): 127-133.

[24] TIAN Lin, CHENG Yao, NIU Xinyi. Spatial organization of towns and villages from a network perspective: an analysis based on residents' travel connections in Lin'an District, Hangzhou[J]. Urban Planning Forum, 2023(1): 104-110.

[25] XIAO Hongwei, ZHAO Min, ZHANG Jie, et al. Multi-scale spatial correlation analysis and planning issues of "new towns" in the new era: examples from Beijing, Shanghai, and Guangzhou[J]. Urban Planning Forum, 2022(6): 18-27.

[26] LIU Jian, MENG Bin, CHEN Siyu, et al. Exploration of residents' dining activities and urban spatial relationships in Beijing based on multi-source big data[J]. Human Geography, 2021,

36(2): 63-72.

[27] LI Zherui, ZHEN Feng, HUANG Gang, et al. Urban centrality measurement and planning application based on multi-source data: a case study of Changzhou[J]. Urban Planning Forum, 2019(3): 111-118.

[28] KONG Yu, ZHEN Feng, ZHANG Shanqi. Research progress and prospects on the impact of intelligent technology on urban residents' activities[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 413-425.

[29] LI Xiaojiang, LYU Xiaobei, SHAO Ling, et al. "Community carbon reduction": measurement methods, emission characteristics, and realization pathways[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 40-46.

[30] CHEN Jun, ZHANG Shanqi, ZHANG Bing, et al. Development direction of spatiotemporal information empowering territorial spatial planning[J]. Urban Planning Forum, 2025(2): 20-27.

[31] XU Y, CHEN D, ZHANG X, et al. Unravel the landscape and pulses of cycling activities from a dockless bike-sharing system[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2019, 75: 184-203.

[32] LIN J J, YANG A T. Structural analysis of how urban form impacts travel demand: evidence from Taipei[J]. Urban Studies, 2009, 46(9): 1951-1967.

[33] LU Xigang, SONG Zuxuan, PANG Lei. Measurement and interpretation of spatial interaction in population migration: evidence from inter-provincial migration flows in the sixth and seventh censuses[J]. Urban Planning Forum, 2025(2): 35-42.

[34] LONG Y H, JIANXIN Q, WU Y, et al. Analysis of urban park accessibility based on space syntax: take the urban area of Changsha city as an example[J]. Land, 2023, 12(5): 1061.

[35] PAN Z G, LAN G W, FAN D L, et al. Analysis of accessibility of urban roads based on space syntax and distance measurement[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 42(3/W10): 159-165.

[36] YANG Dongfeng, WANG Xiaomeng, HAN Ruina. Nonlinear impacts and interaction effects of built environment on street vitality: a case study of Shenyang[J]. Urban Planning Forum, 2023(5): 93-102.

[37] ZHANG Jining, ZHUO Jian, ZHAI Duanqiang, et al. Research on the representation, logic, dilemma, and response of job-housing spatial relationships from a network perspective[J]. Urban Planning Forum, 2025(4): 112-121.

[38] ZHANG D S, HE T, ZHANG F, et al. Urban-scale human mobility modeling with multi-source urban network data[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(2): 671-684.

[39] PANDEY S, PATEL A S. Urban scene representation and summarization using knowledge graph[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 275: 126956.

[40] CHEN T, ZHANG Y M, QIAN X W, et al. A knowledge graph-based method for epidemic contact tracing in public transportation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 137: 103587.

[41] ZHU J W, HAN X, DENG H H, et al. KST-GCN: a knowledge-driven spatial-temporal graph convolutional network for traffic forecasting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15055-15065.

[42] HU Y Q, CHENG X Y, WANG S H, et al. Time series forecasting for urban building energy consumption based on graph convolutional network[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118231.

[43] RODRIGUEZ H, CLIMENT S, VOSSSEN P, et al. The top-down strategy for building

EuroWordNet: vocabulary coverage, base concepts and top ontology[J]. Computers and the Humanities, 1998, 32(2-3): 117-152.