

Métodos de cognición dinámica urbana y aplicaciones en microescenarios basados en grafos de conocimiento

YAN Fengying, LU Junmo

Resumen: Las ciudades, como sistemas complejos constituidos conjuntamente por el espacio físico y las actividades humanas, se caracterizan por procesos operativos en evolución continua y mecanismos de retroalimentación. El desarrollo rápido de Internet y del Internet de las cosas ofrece actualmente la posibilidad de capturar en tiempo real las actividades urbanas; sin embargo, la forma de extraer estructuras de conocimiento interpretables a partir de datos fragmentados sigue siendo un desafío central para la cognición dinámica urbana. La presente investigación propone un marco basado en grafos de conocimiento que integra datos espaciotemporales multifuente y construye una metodología de cognición de las actividades humanas urbanas en torno a la estructura semántica «humano–objeto–lugar–tiempo–evento–efecto», permitiendo una cognición multidimensional en red y una representación estructurada del espacio urbano y las actividades humanas. Tomando un campus universitario como microescenario representativo, se construyó un grafo de conocimiento que comprende aproximadamente 54.000 nodos-entidad y 118.000 aristas relacionales para realizar la extracción de relaciones y el análisis de trazabilidad causal. Los resultados demuestran que este enfoque permite respaldar eficazmente la atribución de actividades y la respuesta de gobernanza espacial en entornos complejos mediante el rastreo retrospectivo de actividades y la vinculación semántica. Asimismo, presenta una fuerte escalabilidad y transferibilidad a través de las escalas espaciales, ofreciendo una vía metodológica viable para la planificación y gobernanza urbanas orientadas por los comportamientos en la era de las nuevas tecnologías urbanas.

Palabras clave: cognición dinámica urbana; actividad humana; grafo de conocimiento; gobernanza espacial; campus universitario

Las ciudades son sistemas complejos caracterizados por el acoplamiento de múltiples elementos y la evolución multi-escala. Su funcionamiento no constituye simplemente el resultado de un equilibrio estructural estático, sino un proceso dinámico de reconstitución continua. La interacción entre el espacio físico y las actividades humanas sitúa a la ciudad en un estado de reorganización permanente[1] —una dinámica que no es un subproducto de la urbanización, sino el propio modo de existencia urbana—. En consecuencia, la cognición urbana no debe limitarse a la forma espacial estructural; debe concentrarse en la captura y la interpretación de los procesos en curso de interacción entre actividades y entorno, así como en los mecanismos y lógicas subyacentes que revelan[2-3].

Con los avances en tecnologías de la información, la dinámica urbana puede ahora ser registrada y cuantificada con una fidelidad sin precedentes. Los macrodatos espaciotemporales multifuente —redes de sensores, señalización móvil, redes sociales[5]— permiten la percepción en tiempo real de la distribución espaciotemporal y las características evolutivas de las actividades humanas, impulsando la investigación urbana de la descripción estática hacia el análisis dinámico[6]. Sin embargo, la acumulación de volúmenes masivos de datos no se ha traducido naturalmente en una comprensión más profunda del funcionamiento urbano: los estudios existentes siguen siendo

predominantemente descriptivos y estadísticos[7], carentes de mecanismos que transformen los resultados de percepción multidimensional en marcos de conocimiento interpretables. Pasar de la agregación de datos a la profundización cognitiva se ha convertido así en una problemática central para la ciencia urbana contemporánea.

Si bien las tecnologías de percepción y los métodos de análisis actuales permiten capturar las características de las actividades, resultan insuficientes para representar sistemáticamente las relaciones semánticas y las cadenas causales entre los múltiples actores y elementos. Para subsanar esta limitación, los grafos de conocimiento —como herramientas de representación semántica estructurada y razonamiento— han sido incorporados a la investigación urbana. A diferencia de los métodos basados en información estática, los grafos de conocimiento utilizan las tripletes «entidad–relación–entidad» como unidad fundamental, construyendo redes semánticas dinámicas que interconectan información multidimensional y permitiendo una representación estructurada de los procesos de actividades urbanas[8]. El potencial de aplicación de los grafos de conocimiento para el razonamiento causal y la expresión lógica de las actividades urbanas ha sido validado en diversos escenarios de gobernanza específicos, como la cognición de funciones urbanas, la regulación del tráfico y el control del consumo energético.

Sobre esta base, el presente estudio propone un método de cognición dinámica urbana fundamentado en grafos de conocimiento. Este método emplea una estructura de ciclo cerrado «percepción–comprensión–intervención» para integrar la recolección de datos multifuente, el modelado semántico y el razonamiento mecanístico. Mediante la construcción de una cartografía de conocimiento completa «humano–objeto–lugar–tiempo–evento–efecto», se logra una cadena coherente desde la integración de datos hasta la cognición de mecanismos. Tomando un entorno de campus representativo como marco experimental, el estudio valida la viabilidad y escalabilidad del modelo en la identificación de actividades, la trazabilidad de resultados y la intervención dinámica. Esta exploración tiene como objetivo proporcionar un nuevo marco cognitivo para comprender los mecanismos de acoplamiento entre las actividades humanas urbanas y el entorno espacial físico, así como una innovación metodológica y un respaldo teórico para la gobernanza urbana orientada por los comportamientos.

1 De la percepción espacial al análisis integrado

1.1 Evolución de la teoría de la cognición urbana

La cognición urbana se refiere generalmente al proceso de representación y comprensión de las estructuras espaciales, las relaciones funcionales y los significados sociales durante la interacción humana con el entorno urbano. No se limita a la cuestión de «cómo se percibe la ciudad», sino que enfatiza «cómo se comprende e interpreta la ciudad», sirviendo como intermediario esencial entre el espacio físico, los mecanismos comportamentales y las decisiones de planificación.

Las investigaciones tempranas sobre cognición urbana estuvieron profundamente influenciadas por el estructuralismo y la morfología espacial, centrándose principalmente en las reglas de organización y el orden visual de la forma física urbana. A mediados del siglo XX, Kevin Lynch propuso, a través de investigaciones empíricas, la teoría de los cinco elementos de la imagen urbana —senderos, bordes, distritos, nodos e hitos[9-10]— revelando sistemáticamente la lógica cognitiva por la cual los individuos perciben el espacio urbano. Esta teoría estableció el paradigma fundador de la investigación en cognición urbana. Jane

Jacobs[11], desde la perspectiva de la interacción social, subrayó la complejidad y la diversidad de la vida callejera, ampliando el campo de atención hacia las actividades urbanas. La geografía positivista reforzó la caracterización cuantitativa de los procesos espaciales mediante el razonamiento deductivo e inductivo. Esta fase se centró en la legibilidad y la sensación de orden urbano, revelando a través de métodos descriptivos la influencia de la forma espacial sobre la percepción individual, y sentando las bases teóricas de la atención prestada por la planificación a la identificabilidad espacial y al valor de los lugares.

Sin embargo, una simplificación excesiva de los problemas espaciales condujo a que la investigación descuidara temporalmente el papel de las «personas» en la ciudad, desencadenando una ola de reflexión académica[12]. La geografía del comportamiento, surgida en la década de 1960, enfatizó la importancia de los individuos y los microprocesos[13-14], ofreciendo nuevas perspectivas para comprender las complejas relaciones espaciotemporales entre las actividades humanas y el entorno geográfico. Norberg-Schulz[15] e Yi-Fu Tuan[16] profundizaron los fundamentos intelectuales de la cognición urbana desde perspectivas fenomenológicas y humanistas, poniendo de relieve la generación de la experiencia perceptiva, la emoción y el significado en el espacio. La geografía temporal de Torsten Hägerstrand reveló las relaciones dinámicas entre actividad, restricción y oportunidad a través de los «camino tiempo-espacio»[17], haciendo pasar la perspectiva de la cognición urbana de la percepción espacial estática a la comprensión sistemática de los procesos comportamentales espaciotemporales. Las investigaciones sobre las restricciones comportamentales y los mecanismos de decisión demostraron además que las actividades individuales no se distribuyen aleatoriamente, sino que presentan patrones analizables bajo las múltiples restricciones del tiempo, los recursos y las redes sociales, haciendo avanzar la cognición urbana de la representación visual hacia el análisis de procesos y proporcionando nuevos fundamentos teóricos para comprender la cadena causal entre la configuración espacial y las elecciones comportamentales.

Sobre estas bases, los investigadores reconocieron gradualmente que la complejidad urbana no puede ser explicada desde una única dimensión, ya sea espacial o comportamental. Una nueva ola de integración teórica, representada por la teoría del espacio social y la teoría de la interacción espacio-comportamiento, impulsó la cognición urbana hacia una fase de investigación centrada en el «acoplamiento espacio físico– actividades humanas»[18]. En la era de la informatización, el surgimiento de la informática urbana y la introducción de datos espaciotemporales multifuente, la inteligencia artificial y los grafos de conocimiento permitieron que la cognición urbana pasara del concepto teórico al modelado sistemático; la ciudad dejó de ser únicamente un objeto de percepción y representación para convertirse en un sistema complejo susceptible de ser comprendido, predicho e intervenido en tiempo real[19].

En conjunto, la teoría de la cognición urbana ha seguido una trayectoria evolutiva que va desde la caracterización espacial hasta el análisis comportamental, y luego hacia la cognición sistémica impulsada por datos. Esta trayectoria no solo ha proporcionado un fundamento intelectual para la innovación metodológica, sino que ha establecido la «interacción espacio–actividad» como la problemática central para comprender los mecanismos complejos de funcionamiento urbano.

1.2 Avances en las tecnologías de percepción urbana

A medida que los marcos teóricos evolucionaban gradualmente del acoplamiento espacio-comportamiento hacia la cognición sistémica, las investigaciones afines se centraron en lograr la percepción dinámica de los mecanismos de funcionamiento urbano mediante medios tecnológicos —adquiriendo, identificando, recolectando y clasificando información sobre el entorno físico y las actividades humanas en las ciudades, para proporcionar una base computable para la cognición urbana—. El desarrollo de la tecnología de percepción urbana ha evolucionado de la inferencia empírica y la encuesta manual hacia la percepción inteligente. Su trayectoria fundamental reside en la expansión de los objetos de percepción del espacio físico a las actividades humanas, la transición de los métodos de percepción de fuente única hacia la fusión multifuente, y la transformación del contenido de percepción de la caracterización estática a los procesos espaciotemporales dinámicos.

La percepción urbana primitiva se basaba principalmente en la observación manual y la investigación empírica, obteniendo las características espaciales urbanas mediante los relevamientos de terreno, cuestionarios y datos estadísticos de los investigadores, con limitaciones inherentes en cuanto a la completitud de los datos y la cobertura. Con la difusión de las imágenes de teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), la percepción urbana entró en una fase de cartografía digital centrada en «espacio—imagen—indicadores»[20]. Los objetos de percepción en esta etapa eran principalmente los elementos espaciales físicos —ocupaciones del suelo, edificios, vías—; las estructuras de datos, predominantemente en formato ráster o vectorial, permitían una representación cuantitativa afinada de la información espacial estática.

Con el desarrollo de las tecnologías de Internet móvil e IoT, las infraestructuras inteligentes integradas espacio—aire—suelo se han establecido progresivamente, haciendo entrar a la percepción urbana en una fase inteligente y multifuente[21]. Basadas en imágenes de teledetección multitemporales y multispectrales, imágenes de calles y datos de monitoreo ambiental recolectados por sensores profesionales, combinadas con la percepción social portada por las personas (señalización de telefonía móvil, redes sociales, datos de trayectorias) y la percepción participativa (fotografías, textos e información de localización cargados por los usuarios), las características dinámicas urbanas pueden ahora ser capturadas en tiempo real, desplazándose el centro de gravedad de la percepción de los «objetos» a las «personas»[22]. Las investigaciones de esta fase no se limitan a la forma física del espacio urbano, sino que también se interesan por la identificación y el análisis de informaciones procesuales tales como los comportamientos individuales y colectivos, los patrones de desplazamiento y la evolución del consumo energético[23]. Entre los estudios representativos se encuentran la identificación de la intensidad de las actividades de población y los límites funcionales dinámicos mediante datos de señalización móvil[24-25], el reconocimiento de las emociones urbanas y las preferencias espaciales a partir de datos de redes sociales[26-27], y la percepción en tiempo real de los desplazamientos urbanos mediante sensores de tráfico y videovigilancia[28-29]. La fusión de estos datos heterogéneos multifuente ha transformado la ciudad de un objeto observado como «imagen estática» en un objeto observado como «proceso dinámico», sentando las bases para el análisis de grano fino del funcionamiento urbano[30].

Actualmente, la percepción urbana se profundiza en las direcciones de la integración, la inteligencia y la cognitividad. Sin embargo, el solo recurso a los medios de percepción para adquirir e integrar datos sigue siendo insuficiente para revelar las relaciones lógicas

intrínsecas entre los elementos urbanos. Cómo analizar sistemáticamente la estructura espacial y las actividades humanas para respaldar la cognición y la toma de decisiones urbanas se ha convertido en el tema central de la siguiente fase de investigación.

1.3 Profundización de los métodos de análisis urbano

El análisis urbano —apoyándose en la percepción— es el proceso de identificación, interpretación y predicción de las relaciones interactivas entre el espacio físico y las actividades humanas, con el objetivo de revelar los mecanismos internos del funcionamiento urbano y respaldar la toma de decisiones. Los métodos de análisis urbano han evolucionado de la estadística espacial al modelado en red, y luego al razonamiento semántico; su objetivo central ha progresado gradualmente del análisis de configuraciones estáticas a la cognición de mecanismos dinámicos.

El análisis urbano primitivo se apoyaba principalmente en la estadística espacial y los modelos regionales para revelar los patrones macroscópicos de la forma urbana y la configuración funcional. Los métodos representados por el análisis de distribución espaciotemporal revelaban la autocorrelación espacial y las características evolutivas de los elementos geográficos[31]; los estudios cuantitativos tipificados por los modelos estadísticos tradicionales (modelos de gravedad, modelos de regresión, etc.) enfatizaban la correlación estadística de las relaciones espaciales[32-33]; las investigaciones centradas en los modelos espaciales y el análisis de redes caracterizaban cuantitativamente la lógica de organización de las estructuras espaciales mediante métodos como la sintaxis espacial y el análisis de accesibilidad[34-35]. Con el desarrollo de la inteligencia artificial, los modelos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo fueron incorporados a la investigación urbana, reforzando considerablemente la capacidad de análisis de problemas complejos[36]. El análisis urbano en esta etapa transitó de la descripción estructural al razonamiento mecanístico, pero permaneció predominantemente a escala macroscópica con datos agregados, resultándole difícil capturar las características de autoorganización y los procesos de interacción espaciotemporal de los múltiples elementos dentro del sistema complejo urbano.

En consecuencia, la teoría de redes complejas fue introducida en este ámbito, abstrayendo la ciudad como una red relacional de personas, lugares, equipamientos y eventos, y analizando la distribución de grados, las propiedades de mundo pequeño y los coeficientes de agrupamiento para revelar los patrones potenciales del funcionamiento urbano[37]. Los modelos de redes neuronales multicapa desarrollados sobre esta base describieron las relaciones en cascada inter-niveles entre el territorio, la industria, la población y el transporte[38]; los modelos de interacción multiagente incorporaron además la lógica comportamental y los mecanismos de decisión al marco analítico, revelando la respuesta dinámica entre los comportamientos de las multitudes y los estados espaciales. En conjunto, estos tres enfoques construyeron el fundamento del análisis de sistemas urbanos complejos, impulsando la transformación del análisis urbano de la «percepción paralela» al «razonamiento interactivo» y logrando avances significativos en la comprensión del acoplamiento espacio-actividad-efecto.

No obstante, estos modelos presentan aún limitaciones en cuanto a la expresión semántica y el razonamiento lógico, especialmente para la integración de datos interdominios y la explicación de los mecanismos causales cuando se enfrentan a datos heterogéneos multifuente. La incorporación de los grafos de conocimiento ofrece una vía

para resolver este problema, heredando las ventajas del análisis de estructura en red y fortaleciendo al mismo tiempo la capacidad de integración de datos interdominios y de modelado de relaciones causales. La cognición de las funciones urbanas impulsada por datos POI, redes sociales y percepción visual se ha convertido en un tema de investigación activo; los grafos de conocimiento de las funciones urbanas basados en datos multifuente han sido aplicados para respaldar la cognición de las funciones urbanas y el análisis de la evolución espaciotemporal[39]. Chen et al.[40] construyeron grafos dinámicos a partir de datos de movilidad durante la pandemia para asistir en tiempo real la orientación de los flujos de personas y el ajuste de las estrategias de confinamiento. Zhu et al.[41] utilizaron grafos de flujo de tráfico y datos meteorológicos para mejorar la precisión de la previsión del tráfico a corto plazo. Hu et al.[42] integraron grafos de conocimiento con redes neuronales gráficas para modelar la relación causal entre los flujos de personas y el consumo energético de los edificios en los centros urbanos, habilitando el control inteligente de los sistemas de edificios. Estos estudios demuestran que los grafos de conocimiento pueden servir no solo para la integración semántica de los elementos urbanos, sino también como intermediarios para el modelado comportamental y el razonamiento de gobernanza, organizando los elementos urbanos en un sistema de conocimiento calculable e interpretable.

En este contexto, el presente estudio intenta construir una metodología de cognición urbana centrada en los grafos de conocimiento, estableciendo un paradigma de representación del conocimiento para la interacción completa entre el espacio físico urbano y las actividades humanas a través de marcos de análisis estructurados, semantizados y dinámicos. Explora un sistema de cognición dinámica que integra «percepción–comprensión–respuesta» para respaldar las aplicaciones de gobernanza urbana orientadas por los comportamientos, multi-escenario y multi-escala.

2 Cartografía panorámica de las actividades humanas urbanas basada en grafos de conocimiento: lógica y métodos

Para percibir y analizar los procesos complejos del funcionamiento urbano, el presente estudio construye un sistema de cognición dinámica urbana dirigido a la información multidimensional del espacio físico urbano y las actividades humanas, utilizando los grafos de conocimiento como marco de representación. El sistema admite la expresión estructurada y la gestión dinámica de elementos que incluyen «humano–objeto–lugar–tiempo–evento–efecto»[43], y puede definirse formalmente como:

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

donde: K_G (knowledge graph) denota el grafo de conocimiento; E (entity) representa las entidades, abarcando los objetos y fenómenos concretos de la actividad humana, como nodos en el grafo de conocimiento; R (relationship) representa las relaciones entre estas entidades, constituyendo las aristas en el grafo de conocimiento, donde $R = \{(e_1, r, e_2) | r \in R, e_1, e_2 \in E\}$; S (set) designa las tripletes entidad–relación–entidad formadas por la conexión de los nodos mediante las aristas, constituyendo las unidades semánticas fundamentales del grafo de conocimiento; A (attribution) representa los atributos de las entidades, satisfaciendo $\forall e \in E$, con el atributo correspondiente $a_e \in A$, utilizado para describir las características de identidad, temporales, espaciales y numéricas de las entidades.

2.1 Clave para la transposición de los procesos dinámicos urbanos a la representación mediante grafos de conocimiento: definición de entidades y anotación de atributos

La tarea primordial en la construcción de un grafo de conocimiento para las actividades humanas urbanas es la identificación y definición de entidades multidimensionales. Las actividades humanas en las ciudades implican un vasto conjunto de elementos heterogéneos, que pueden descomponerse en una serie de categorías de información: humano, objeto, lugar, tiempo, evento y efecto (Figura 1). Estas entidades semánticas constituyen colectivamente los nodos de información fundamentales del funcionamiento urbano y la base estructural de la construcción del grafo de conocimiento. Entre ellas, el humano y el objeto sirven como sujetos de la actividad, abarcando los diversos individuos y soportes que ejecutan actividades en el espacio urbano; el lugar designa los espacios donde se desarrollan las actividades, incluyendo edificios, vías, plazas, así como los distritos y redes formados por sus combinaciones; el tiempo capta el contexto temporal de las actividades, respaldando el modelado de los ritmos comportamentales y los patrones periódicos; el evento corresponde a las operaciones específicas realizadas por los sujetos de actividad en contextos temporales y espaciales particulares, abarcando tanto el uso estático de recursos (por ejemplo, el consumo de electricidad, agua y gas) como los procesos comportamentales dinámicos (por ejemplo, las rutas de desplazamiento, los flujos espaciales, las congregaciones sociales); el efecto refleja los impactos generados por las actividades humanas urbanas a través de diferentes tiempos y espacios, incluyendo pero no limitándose a la información procedente de diversos dispositivos de percepción sobre el consumo energético de edificios, la carga de tráfico y la intensidad espacial, sirviendo como punto terminal crítico de la cadena de cognición dinámica orientada hacia la intervención de gobernanza.

Cada tipo de entidad en el grafo debe disponer de información de atributos completa. Los tipos de atributos no están fijados en dimensionalidad, sino que deben definirse de manera flexible en función de las características de las entidades en su contexto real, incluyendo típicamente marcadores de identidad (por ejemplo, nombre, identificador), atributos espaciotemporales (por ejemplo, latitud/longitud, marcas de tiempo), atributos comportamentales (por ejemplo, rol, estado), información numérica (por ejemplo, consumo energético, volumen de flujo) y otra información capaz de caracterizar las entidades, a fin de lograr una descripción multiperspectiva de los estados de las entidades. Las entidades y sus atributos constituyen la primera dimensión estructural del grafo de conocimiento, sirviendo de fundamento para la construcción lógica posterior y la expresión causal.

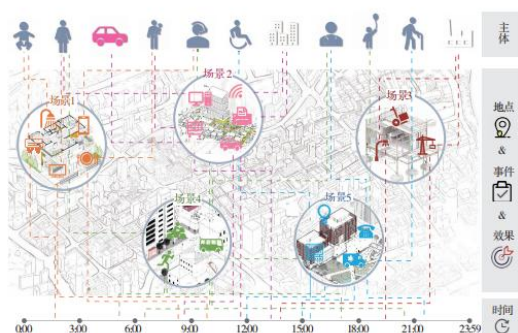


Figura 1. Entidades multidimensionales en el grafo de conocimiento de las actividades urbanas

2.2 Núcleo de la transposición de los elementos urbanos multidimensionales a la construcción de redes semánticas: procesamiento estructurado y mapeo de relaciones

En el marco de la definición de entidades y atributos, el inmenso volumen de datos de percepción de las actividades humanas debe transformarse en información estructurada uniformemente operativa. El presente estudio emplea métodos de aprendizaje profundo para procesar información multidimensional procedente de imágenes de vídeo, textos de redes sociales, trayectorias de localización y otras fuentes. Específicamente, las imágenes de vídeo se procesan mediante modelos de detección de objetos para identificar los sujetos de multitud y tráfico; los textos de redes sociales se procesan mediante modelos de lenguaje para extraer eventos comportamentales, posiciones espaciales y etiquetas temporales; los datos de trayectorias se analizan en combinación con métodos de modelado de secuencias temporales para identificar patrones de rutas y características de actividades. Todos los datos experimentan una conversión de formato y una resolución de coordenadas espaciales en el entorno Python, y se almacenan de manera uniforme en la base de datos de grafos Neo4j, logrando así la transformación de datos brutos heterogéneos multifuente en unidades semánticas estructuradas.

Sobre la base de los datos estructurados, las relaciones semánticas entre las entidades deben identificarse ulteriormente para construir una red estructural capaz de expresión lógica. Las relaciones semánticas en los sistemas urbanos incluyen, pero no se limitan a, la adyacencia espacial y la pertenencia, la secuencia temporal y la duración, la ejecución comportamental y la respuesta a eventos. Estas relaciones reflejan las interacciones reales entre los elementos urbanos en el nivel semántico, proporcionando apoyo semántico para la construcción de cadenas lógicas de «quién—dónde—por qué—cómo—qué resultado».

En consecuencia, se construye un sistema de reglas que acopla las restricciones espaciales, temporales y comportamentales para permitir la inferencia semiautomática de las relaciones semánticas entre los datos estructurados. Más concretamente: las relaciones básicas (por ejemplo, «se desarrolla en», «pertenece a») se generan automáticamente mediante el emparejamiento de campos utilizando las funciones de pandas en Python; las relaciones espaciales se calculan a partir de las coordenadas de latitud/longitud empleando las bibliotecas geopandas y shapely para calcular las distancias espaciales, y cuando la distancia es inferior a un umbral definido, el sistema genera automáticamente relaciones como «ubicado en», «adyacente a» y «atraviesa». Las relaciones temporales (por ejemplo, «sincronizado», «secuencial») se identifican mediante las diferencias de marcas de tiempo; las relaciones comportamentales (por ejemplo, «participa en», «coaparece con») se deducen automáticamente sobre la base del solapamiento de los identificadores de sujetos y los registros de eventos en ventanas temporales, cuya lógica se implementa mediante las funciones de series temporales de pandas. Para las relaciones semánticas complejas (por ejemplo, «influye en», «responde a», «provoca»), se integran los conocimientos de expertos para establecer reglas lógicas, formando un mecanismo de generación híbrida «anotación manual + inferencia por reglas» con el fin de equilibrar la precisión semántica y la escalabilidad computacional.

Finalmente, los segmentos estructurados se mapean en forma de tripletes centrados en «humano—evento—lugar—tiempo—objeto—efecto» y se integran en el grafo de conocimiento utilizando plataformas como Neo4j, permitiendo la organización, la consulta y la actualización dinámica de nodos y relaciones, proporcionando así un soporte de conocimiento operativo para la comprensión y la gobernanza de los mecanismos de funcionamiento urbanos. Véase la Figura 2.



Figura 2. Trayectoria de mapeo del espacio físico urbano y las actividades humanas basada en el grafo de conocimiento

2.3 Puente de la integración de datos a la cognición de conocimiento: consulta de caminos y análisis de razonamiento

Tras la construcción del grafo de conocimiento, el presente estudio introduce además métodos de razonamiento y análisis de grafos fundamentados en el emparejamiento de caminos relacionales y el cálculo de similitud semántica, a fin de lograr la cognición de conocimiento desde las relaciones explícitas hasta las cadenas causales potenciales dentro de la red semántica multidimensional.

El emparejamiento de caminos relacionales revela las cadenas comportamentales potenciales o las dependencias espaciales mediante el razonamiento de caminos relacionales multi-salto. Por ejemplo, cuando «Sujeto A — participa en — Evento B — se desarrolla en — Edificio C» y «Edificio C — adyacente a — Edificio D» coexisten, el razonamiento de caminos puede identificar la relación implícita de que «el Sujeto A podría estar activo en las proximidades del Edificio D». Este método se apoya en las funcionalidades de emparejamiento de patrones de caminos del lenguaje de consulta Cypher en la base de datos de grafos Neo4j, combinadas con la biblioteca de análisis de grafos NetworkX de Python, para lograr la recuperación automática y la inferencia de caminos multi-salto.

El cálculo de similitud semántica identifica los objetos que poseen atributos similares, funciones próximas o patrones comportamentales coherentes entre las entidades multifuente. Empleando las bibliotecas gensim y scikit-learn de Python para vectorizar la información de atributos de los nodos-entidad, combinadas con el algoritmo de similitud de nodos (node similarity) de Neo4j, se realiza una evaluación integral de la similitud semántica entre los lugares espaciales y los eventos comportamentales, revelando así los fenómenos de recurrencia de patrones y acoplamiento funcional en el seno de los sistemas urbanos.

El sistema de razonamiento de grafos se implementa en el entorno de la base de datos de grafos Neo4j; el preprocesamiento de datos, la recuperación de caminos y el cálculo de similitud semántica se realizan en la plataforma Python; los resultados del razonamiento se reinyectan en la base de datos Neo4j mediante instrucciones Cypher, formando una red de conocimiento actualizada dinámicamente. Este proceso no solo logra una representación panorámica del espacio físico urbano y las actividades humanas, sino que facilita también la revelación de las cadenas comportamentales, las dependencias espaciales y sus mecanismos causales.

3 Cognición multidimensional de microescenarios urbanos basada en grafos de conocimiento: el caso de un campus universitario

3.1 Objeto de investigación y selección del escenario

Para validar la viabilidad y el potencial de aplicación del método propuesto, se seleccionó el nuevo campus de la Universidad A en las afueras de Tianjin como plataforma experimental a escala microscópica, en razón de su representatividad y la accesibilidad de los datos. El nuevo campus de la Universidad A abarca una superficie total superior a 2,4 millones de m², con una superficie construida de 1,55 millones de m². Su ordenación espacial adopta un modelo de planificación de «cinturón disciplinar + cinturón funcional», con límites funcionales claramente definidos y tipos de actividades diversos. Asimismo, el campus cuenta con sistemas completos de videovigilancia y dispositivos de medición inteligentes, proporcionando el soporte de datos necesario para la construcción del grafo de conocimiento.

3.2 Adquisición de datos multifuente y procesamiento estructurado

Combinando la investigación de campo con los macrodatos de Internet, se obtuvo la información de actividades del semestre de otoño de 2023 (1 de septiembre de 2023 — 1 de enero de 2024), construyendo un sistema de datos compuesto que abarca planos de ingeniería arquitectónica, información geográfica, información de redes sociales, monitoreo de tráfico y textos de medición energética. Los datos provienen principalmente de documentos estadísticos proporcionados por el departamento de gestión logística de la universidad y de datos abiertos de plataformas públicas en línea. Dado que los datos de señalización de telefonía móvil son difíciles de obtener debido a las restricciones de protección de la privacidad y de autorización de datos, se utilizaron los desplazamientos en vehículos motorizados como variable proxy de los desplazamientos humanos para caracterizar los comportamientos de desplazamiento al campus.

Durante la fase de procesamiento de datos, se introdujeron métodos inteligentes que incluyen el modelo YOLOv8 y el algoritmo SDV (Synthetic Data Vault) para realizar la estandarización de formatos, la alineación de marcas de tiempo y la codificación unificada de entidades sobre los datos multimodales, integrándolos en un mapa unificado de información multidimensional del campus (Figura 3), proporcionando interfaces de datos de alta calidad y normalizados para la construcción del grafo de conocimiento.



Figura 3. Hoja de ruta técnica para la construcción del grafo de conocimiento del campus de la Universidad A, Tianjin

3.3 Resultados de modelado y características del grafo de conocimiento de las actividades del campus

Sobre la base de los datos procesados de manera estructurada, se construyó el grafo de conocimiento de las actividades del campus utilizando la base de datos de grafos Neo4j (Figura 4), que comprende aproximadamente 54.000 nodos y 118.000 aristas relacionales, cubriendo los diversos sujetos de actividades, eventos comportamentales, entidades espaciales y registros de consumo energético dentro del campus. En el grafo, las relaciones multinivel entre las entidades y sus atributos temporales, espaciales y causales forman colectivamente una red de conocimiento capaz de realizar análisis de respuesta rápida a los problemas clave de gobernanza —como las trayectorias de actividades anómalas, los lugares de alto consumo energético y los eventos de concentración densa— mediante consulta semántica y trazabilidad causal.

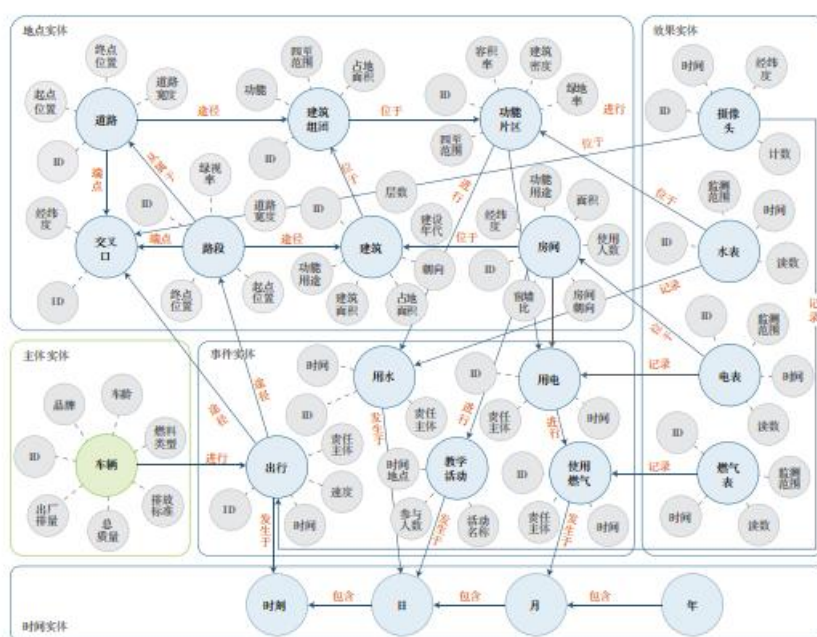


Figura 4. Definiciones de entidades y atributos en el grafo de conocimiento de las actividades del campus de la Universidad A, Tianjin

4 Aplicaciones y perspectivas de los grafos de conocimiento en la cognición urbana

4.1 Aplicaciones de gobernanza en el escenario del campus

El método de cognición dinámica urbana impulsado por grafos de conocimiento propuesto en este estudio permite una representación estructurada de los patrones de actividad a escala del dominio completo y admite la agregación de información multidimensional y el análisis causal desde cualquier nodo. La dimensión «efecto» caracteriza la respuesta consecutiva de las actividades humanas en el tiempo y el espacio, constituyendo el componente central de la cognición por grafo y el punto terminal práctico de la gobernanza urbana. En consecuencia, apoyándose en el grafo de conocimiento de las actividades del campus de la Universidad A, se seleccionó el período de punta matutino (7:30–8:30) del 18 de diciembre de 2023 —día lectivo típico— como ventana de observación. Un vehículo que ingresaba al campus, seleccionado aleatoriamente, sirvió como punto de partida para la consulta semántica, con énfasis en las características de atributos y las connotaciones semánticas de su dimensión de efecto, a fin de explorar el potencial de

aplicación de los grafos de conocimiento en la integración semántica y la identificación de la lógica causal.

4.1.1 Identificación de rutas de desplazamiento: actividad individual y trayectoria espacial

Apoyándose en las capacidades de organización estructurada y consulta semántica del grafo de conocimiento, el sistema inició la consulta desde el vehículo con placa Jing H1Z*, captado por la cámara de vigilancia de la puerta norte, identificando el nodo de actividad de desplazamiento T041 generado tras la entrada del vehículo al campus a las 8:17 del 18 de diciembre de 2023, y realizó la trazabilidad retrospectiva de este comportamiento de desplazamiento [Figura 5(a)]. El grafo recuperó automáticamente los atributos de ruta y las relaciones de nodos adyacentes de este evento de desplazamiento, completando la reconstrucción semántica de la trayectoria individual del vehículo dentro de la red espacial del campus.

Los resultados del seguimiento de ruta mostraron que, tras ingresar al campus por la puerta norte, el vehículo atravesó sucesivamente cinco intersecciones —P01, P37, P56, P57 y P58— para finalmente detenerse en las proximidades del Edificio de Enseñanza 55, formando la ruta de desplazamiento «Vía Norte XY — Vía Central XY — Vía Norte MD». Sobre la base de los atributos de flujo vehicular de los nodos de cámaras en el grafo, esta ruta de desplazamiento fue identificada como el corredor principal con la presión de tráfico más concentrada durante el período de punta matutino, con una densidad de flujo media significativamente superior a las demás rutas simultáneas, soportando un volumen sustancial de desplazamientos interzonas dentro del campus.

La reconstrucción de la trayectoria del vehículo demuestra la capacidad del grafo de conocimiento para construir cadenas comportamentales completas a partir de nodos individuales, proporcionando una base estructural para la identificación posterior de patrones de desplazamiento de alta frecuencia y la exploración de la lógica de uso espacial.

4.1.2 Vinculación de información semántica: redes de elementos espaciales y características de agregación

Sobre la base de la ruta de desplazamiento identificada, el sistema analizó ulteriormente las estructuras espaciales multidimensionales y los nodos funcionales conectados a través de los atributos de entidad y los mecanismos de asociación semántica del grafo de conocimiento, revelando la lógica subyacente del comportamiento espacial.

Los resultados indican que el destino del desplazamiento, el Edificio de Enseñanza 55, pertenece al clúster de la Escuela de Informática, que es una de las unidades con el mayor número de profesores y estudiantes y las actividades de enseñanza e investigación más densas del campus —un destino típico para los desplazamientos de alta frecuencia [Figura 5(b)]. A lo largo de esta ruta de desplazamiento se atraviesan múltiples residencias estudiantiles, la biblioteca, centros de actividades y el Edificio de Enseñanza 45, entre otros lugares públicos importantes, enlazando la cadena comportamental cotidiana de los grupos estudiantiles: «vivir–estudiar–socializar». Simultáneamente, este recorrido cubre también los nodos de equipamientos de servicio en el clúster residencial, incluyendo supermercados, restaurantes y oficinas postales. La superposición de los efectos de aglomeración espacial de los equipamientos comerciales y educativos refuerza significativamente la capacidad de atracción de flujos de personas en esta zona, formando una relación de acoplamiento de puntos calientes espacio-behaviorales impulsada conjuntamente por las funciones de enseñanza y los servicios de proximidad.

La consulta vinculada de la información espacial valida la capacidad del sistema de grafo de conocimiento para asociar automáticamente desde cadenas comportamentales individuales hacia información multidimensional a escala del dominio completo, proporcionando una trayectoria cognitiva para comprender las relaciones interactivas entre las estructuras espaciales complejas y los mecanismos comportamentales en el campus.

4.1.3 Análisis de la lógica causal: respuesta ante eventos y consumo energético

A partir de la posición terminal del comportamiento de desplazamiento antes mencionado, el sistema invocó además el módulo de asociación semántica del grafo de conocimiento para realizar una consulta profunda y una trazabilidad estructural de las entidades espaciales y los contenidos de actividades asociados al Edificio de Enseñanza 55.

En primer lugar, los resultados de consulta basados en los atributos de los nodos de edificio mostraron que el clúster de enseñanza de informática donde se ubica el Edificio 55 pertenece al sector de calefacción D y al sector de abastecimiento de agua de la puerta Este, registrándose sus actividades de consumo de agua y energía en las tablas de medición sectoriales. El edificio contiene 174 salas, que abarcan diversas funciones como aulas, laboratorios, salas de reuniones, anfiteatros, cafeterías y sanitarios. Los datos de electricidad son recolectados diariamente por contadores individuales en cada sala y registrados en tiempo real en los atributos de los nodos de consumo energético del grafo. Una consulta posterior de los atributos de consumo energético de los nodos de sala agregados diariamente reveló que, entre las 29 salas clasificadas en el 3% superior de consumo diario de electricidad, 11 se encontraban en el interior del Edificio de Enseñanza 55, lo que representa un 37,9%. Cabe destacar que el Anfiteatro R18 registró un consumo diario de electricidad de 87,3 kWh, equivalente a 69,4 kg de emisiones de carbono, el más elevado entre las cerca de 10.000 salas de todo el campus ese día, con una carga energética que superaba significativamente a la de los demás espacios de enseñanza convencionales.

En segundo lugar, el sistema invocó la funcionalidad de trazabilidad semántica del grafo de conocimiento para vincular información multidimensional que incluye la estructura espacial de nivel superior del Edificio de Enseñanza 55 (clúster de enseñanza, subsector energético), los eventos comportamentales de ese día y los nodos de tráfico circundantes [Figura 5(c)]. Los resultados mostraron que el 18 de diciembre la Escuela de Informática organizó un foro académico de gran envergadura en este edificio, con varias salas utilizadas para diferentes tipos de seminarios, presentaciones de resultados y actividades docentes. Entre ellas, el Anfiteatro R18 sirvió como sede principal del foro, con el mayor número de participantes y la duración de actividad más prolongada, formando así la demanda energética más concentrada del día. Paralelamente, los dos tramos de vía principal de desplazamiento L90 y L103 adyacentes al Edificio de Enseñanza 55 presentaron fluctuaciones temporales altamente coherentes con las variaciones de consumo de electricidad de varias salas del edificio ese día en las curvas de intensidad de tráfico, revelando el mecanismo típico de «disparador comportamental-aglomeración espacial-consumo energético» impulsado por las actividades docentes de gran envergadura, y reflejando el proceso dinámico de la interacción multi-elemento en las unidades de microescala urbana.

Mediante la trazabilidad de los caminos de asociación semántica entre los nodos del grafo, el sistema integró de manera efectiva informaciones multidimensionales inicialmente dispersas, reconstruyendo la lógica causal subyacente a las actividades del campus y proporcionando un soporte estructural para la intervención de gobernanza.

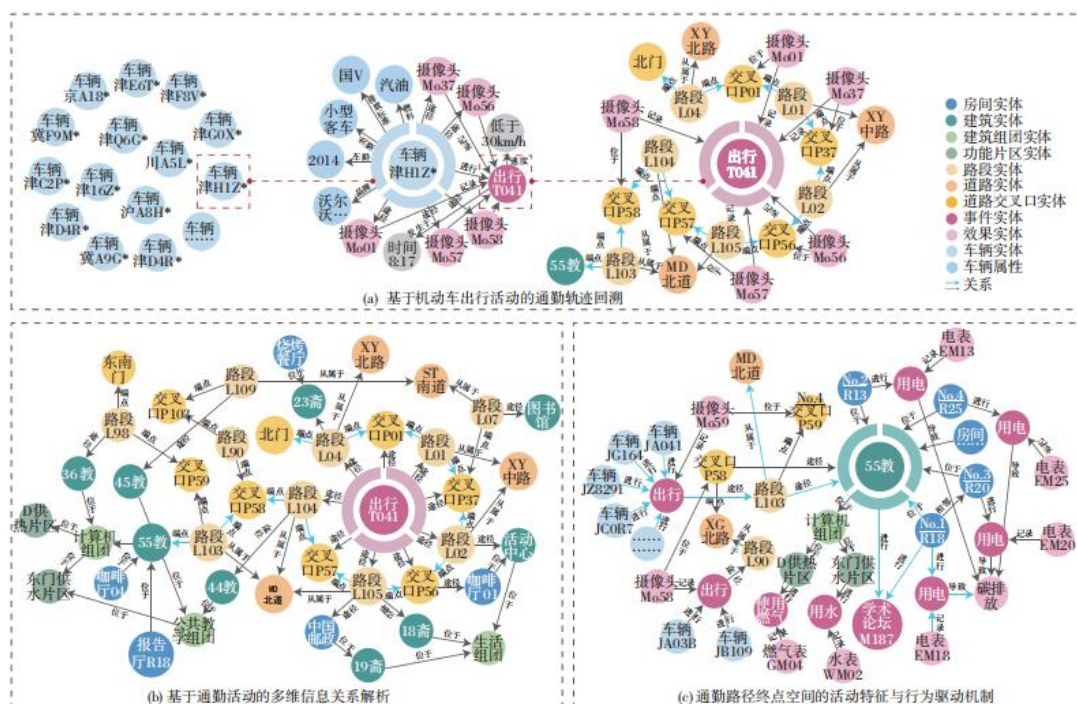


Figura 5. Aplicaciones de gobernanza del grafo de conocimiento en el escenario del campus
Fuente: Redibujado a partir del grafo de conocimiento de las actividades del campus de la Universidad A

4.2 Promoción multi-escenario y perspectivas metodológicas

El estudio empírico basado en grafos de conocimiento en el escenario del campus no solo valida la capacidad del método para la integración de información y el modelado semántico en espacios de alta densidad, sino que proporciona también un enfoque analítico generalizable para comprender los procesos comportamentales a escalas urbanas más amplias. Mediante la identificación de las cadenas de actividades individuales, la frecuencia de uso espacial y las relaciones de co-ocurrencia comportamental, es posible revelar las lógicas comportamentales y los patrones de respuesta espacial ampliamente presentes en la organización espacial urbana, proporcionando una referencia microscópica para la cognición dinámica de los problemas urbanos complejos.

Como vector central que integra el proceso completo «identificación–atribución–simulación–retroalimentación», el marco semántico del grafo de conocimiento posee una alta reconfigurabilidad: los tipos de entidades y relaciones pueden definirse o ajustarse de manera flexible según los escenarios de aplicación, y los atributos pueden actualizarse dinámicamente, permitiendo así la adaptación a fuentes de datos y necesidades cognitivas diversificadas sin alterar la lógica semántica global. Esta característica permite que el modelo cognitivo construido en este estudio mantenga la coherencia semántica y la interpretabilidad lógica a través de diferentes niveles espaciales y dominios temáticos. En consecuencia, el método puede extenderse ulteriormente a comunidades residenciales, parques industriales, zonas comerciales y otros tipos de espacios urbanos, e incluso al

dominio urbano en su conjunto, permitiendo el modelado de la cognición multidimensional y la respuesta en diversos ámbitos como la gestión energética, la regulación ambiental, la conservación del patrimonio y la regeneración urbana.

Desde la perspectiva disciplinar, los grafos de conocimiento hacen avanzar la investigación en planificación urbana de la descripción espacial estática al análisis cognitivo dinámico, construyendo una cadena lógica «información–conocimiento–cognición». La significación reside no solo en lograr la integración estructurada y la representación panorámica de los elementos urbanos multidimensionales, sino más aún en revelar los mecanismos de funcionamiento urbano de manera calculable e interpretable, proporcionando nuevas vías de realización para la construcción de ciudades gemelas digitales y la gobernanza inteligente, promoviendo la transformación de las decisiones de planificación de una orientación basada en la experiencia hacia un enfoque impulsado por los datos y el conocimiento, y realizando la integración bidireccional y la innovación entre la teoría disciplinar y la práctica de gobernanza.

5 Conclusiones y perspectivas

Ante los desafíos actuales de una granularidad insuficiente en el análisis de acoplamiento entre el espacio físico urbano y las actividades humanas, así como la desconexión de los mecanismos de respuesta, este estudio propone un método de cognición dinámica urbana fundamentado en grafos de conocimiento. Centrado en la estructura semántica «humano–objeto–lugar–tiempo–evento–efecto», el método logra un ciclo cerrado completo que abarca desde la recolección de datos multifuente y el modelado comportamental hasta el soporte de la respuesta.

En el estudio empírico realizado en un campus universitario, el grafo de conocimiento de las actividades humanas construido demostró sólidas capacidades de agregación de información y asociación semántica, respaldando eficazmente tareas de análisis multidimensional que van desde el seguimiento de trayectorias individuales y la identificación de relaciones espaciales hasta el análisis de mecanismos causales. El estudio valida la aplicabilidad y escalabilidad del método en la gobernanza espacial a escala microscópica, demostrando el potencial de los grafos de conocimiento para fortalecer la integración semántica, la expresión estructurada y las capacidades de razonamiento y deducción de los métodos de cognición dinámica. Desde la perspectiva de la gobernanza por la planificación urbana, el método proporciona una trayectoria técnica para la construcción de un sistema de cognición dinámica centrado en la lógica «humano–escenario–comportamiento», con enfoques analíticos generalizables y modelos metodológicos portables y extensibles, que pueden integrarse en diversos escenarios de práctica de planificación —incluyendo la optimización de la organización del tráfico en los distritos centrales, la vigilancia y regulación ambiental de parques industriales, y la conservación y regeneración del patrimonio histórico y cultural— respaldando la transformación del paradigma de gobernanza de una orientación estática de configuración hacia un enfoque dinámico impulsado por los comportamientos.

De cara al futuro, los sistemas de cognición dinámica urbana requieren un profundización continua en tres direcciones clave: primero, promover la automatización de la integración de datos en la entrada para mejorar las capacidades de procesamiento en tiempo real de datos heterogéneos; segundo, fortalecer la profundidad de la extracción de información en el interior del grafo para mejorar la identificación y construcción de patrones

comportamentales complejos y relaciones semánticas; tercero, ampliar los mecanismos de acoplamiento entre el grafo y los extremos de toma de decisiones para mejorar la retroalimentación estratégica, la simulación de escenarios y la coordinación interdepartamental. Estas trayectorias contribuirán colectivamente a la evolución de los grafos de conocimiento urbanos de herramientas de organización de datos hacia plataformas de gobernanza urbana, proporcionando soporte para la construcción de nuevos sistemas de gobernanza urbana.

Referencias

- [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, VOSSEN 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.