

# Méthodes de cognition dynamique urbaine et applications en micro-scénarios basées sur les graphes de connaissances

YAN Fengying, LU Junmo

Résumé : Les villes, en tant que systèmes complexes constitués conjointement par l'espace physique et les activités humaines, sont caractérisées par des processus opérationnels en évolution continue et par des mécanismes de rétroaction. Le développement rapide de l'Internet et de l'Internet des objets offre désormais la possibilité de capturer en temps réel les activités urbaines ; toutefois, la manière d'extraire des structures de connaissances interprétables à partir de données fragmentées demeure un défi central pour la cognition dynamique urbaine. La présente étude propose un cadre fondé sur les graphes de connaissances, intégrant des données spatio-temporelles multi-sources, et construit une méthodologie de cognition des activités humaines urbaines autour de la structure sémantique « humain – objet – lieu – temps – événement – effet », permettant une cognition multidimensionnelle en réseau et une représentation structurée de l'espace urbain et des activités humaines. En prenant un campus universitaire comme micro-scénario représentatif, un graphe de connaissances comprenant environ 54 000 nœuds entités et 118 000 arêtes relationnelles a été construit pour effectuer l'extraction de relations et l'analyse de traçabilité causale. Les résultats démontrent que cette approche permet de soutenir efficacement l'attribution des activités et la réponse de gouvernance spatiale dans des environnements complexes grâce au suivi rétrospectif des activités et à la liaison sémantique. Elle présente également une forte extensibilité et transférabilité à travers les échelles spatiales, offrant une voie méthodologique réalisable pour la planification et la gouvernance urbaines orientées par les comportements à l'ère des nouvelles technologies urbaines.

Mots-clés : cognition dynamique urbaine ; activité humaine ; graphe de connaissances ; gouvernance spatiale ; campus universitaire

Les villes sont des systèmes complexes caractérisés par un couplage multi-éléments et une évolution multi-échelle. Leur fonctionnement ne constitue pas simplement le résultat d'un équilibre structurel statique, mais un processus dynamique de reconstitution continue. L'interaction entre l'espace physique et les activités humaines place la ville dans un état de réorganisation permanente[1] — une dynamique qui n'est pas un sous-produit de l'urbanisation, mais le mode même d'existence urbaine. Dès lors, la cognition urbaine ne saurait se limiter à la forme spatiale structurelle ; elle doit se concentrer sur la capture et l'interprétation des processus en cours d'interaction entre activités et environnement, ainsi que sur les mécanismes et logiques sous-jacents qu'ils révèlent[2-3].

Avec les progrès des technologies de l'information, la dynamique urbaine peut désormais être enregistrée et quantifiée avec une fidélité sans précédent. Les mégadonnées spatio-temporelles multi-sources — réseaux de capteurs, signalisation mobile, médias sociaux[5] — permettent la perception en temps réel de la distribution spatio-temporelle et des caractéristiques évolutives des activités humaines, propulsant la recherche urbaine de la description statique vers l'analyse dynamique[6]. Cependant, l'accumulation de volumes massifs de données ne s'est pas traduite naturellement par une compréhension plus approfondie du fonctionnement urbain : les études existantes demeurent principalement

descriptives et statistiques[7], dépourvues de mécanismes permettant de transformer les résultats de perception multidimensionnelle en cadres de connaissances interprétables. Passer de l'agrégation de données à l'approfondissement cognitif est ainsi devenu une problématique centrale pour la science urbaine contemporaine.

Si les technologies de perception et les méthodes d'analyse actuelles permettent de capturer les caractéristiques des activités, elles peinent à représenter systématiquement les relations sémantiques et les chaînes causales entre les multiples acteurs et éléments. Pour remédier à cette limitation, les graphes de connaissances — en tant qu'outils de représentation sémantique structurée et de raisonnement — ont été introduits dans la recherche urbaine. Contrairement aux méthodes fondées sur des informations statiques, les graphes de connaissances utilisent les triplets « entité–relation–entité » comme unité fondamentale, construisant des réseaux sémantiques dynamiques interconnectant des informations multidimensionnelles et permettant une représentation structurée des processus d'activités urbaines[8]. Le potentiel d'application des graphes de connaissances pour le raisonnement causal et l'expression logique des activités urbaines a été validé dans divers scénarios de gouvernance spécifiques, tels que la cognition des fonctions urbaines, la régulation du trafic et le contrôle de la consommation énergétique.

Sur cette base, la présente étude propose une méthode de cognition dynamique urbaine fondée sur les graphes de connaissances. Cette méthode emploie une structure en boucle fermée « perception – compréhension – intervention » pour intégrer la collecte de données multi-sources, la modélisation sémantique et le raisonnement mécanistique. En construisant une cartographie de connaissances complète « humain – objet – lieu – temps – événement – effet », elle réalise un enchaînement cohérent de l'intégration des données à la cognition des mécanismes. En prenant un environnement de campus représentatif comme cadre expérimental, l'étude valide la faisabilité et l'extensibilité du modèle en matière d'identification des activités, de traçabilité des résultats et d'intervention dynamique. Cette exploration vise à fournir un nouveau cadre cognitif pour comprendre les mécanismes de couplage entre les activités humaines urbaines et l'environnement spatial physique, ainsi qu'une innovation méthodologique et un soutien théorique pour la gouvernance urbaine orientée par les comportements.

## 1 De la perception spatiale à l'analyse intégrée

### 1.1 Évolution de la théorie de la cognition urbaine

La cognition urbaine désigne généralement le processus de représentation et de compréhension des structures spatiales, des relations fonctionnelles et des significations sociales au cours de l'interaction humaine avec l'environnement urbain. Elle ne se limite pas à la question de « comment la ville est perçue », mais souligne plutôt « comment la ville est comprise et interprétée », servant d'intermédiaire essentiel entre l'espace physique, les mécanismes comportementaux et les décisions de planification.

Les recherches précoces en cognition urbaine ont été profondément influencées par le structuralisme et la morphologie spatiale, se concentrant principalement sur les règles d'organisation et l'ordre visuel de la forme physique urbaine. Au milieu du XXe siècle, Kevin Lynch a proposé, par le biais d'enquêtes empiriques, la théorie des cinq éléments de l'image urbaine — chemins, limites, quartiers, nœuds et points de repère[9-10] — révélant systématiquement la logique cognitive par laquelle les individus perçoivent l'espace urbain. Cette théorie a établi le paradigme fondateur de la recherche en cognition urbaine. Jane

Jacobs[11], du point de vue de l'interaction sociale, a souligné la complexité et la diversité de la vie de rue, élargissant le champ d'attention aux activités urbaines. La géographie positiviste a renforcé la caractérisation quantitative des processus spatiaux par le raisonnement déductif et inductif. Cette phase s'est concentrée sur la lisibilité et le sentiment d'ordre urbain, révélant par des méthodes descriptives l'influence de la forme spatiale sur la perception individuelle, et posant les fondements théoriques de l'attention portée par la planification à l'identité spatiale et à la valeur des lieux.

Cependant, une simplification excessive des problèmes spatiaux a conduit la recherche à négliger temporairement le rôle des « personnes » dans la ville, déclenchant une vague de réflexion académique[12]. La géographie comportementale, apparue dans les années 1960, a souligné l'importance des individus et des micro-processus[13-14], offrant de nouvelles perspectives pour comprendre les relations spatio-temporelles complexes entre activités humaines et environnement géographique. Norberg-Schulz[15] et Yi-Fu Tuan[16] ont approfondi les fondements intellectuels de la cognition urbaine du point de vue phénoménologique et humaniste, mettant en évidence la génération de l'expérience perceptive, de l'émotion et du sens dans l'espace. La géographie temporelle de Torsten Hägerstrand a révélé les relations dynamiques entre activité, contrainte et opportunité à travers les « chemins temps-espace »[17], faisant passer la perspective de la cognition urbaine de la perception spatiale statique à la compréhension systématique des processus comportementaux spatio-temporels. Les recherches sur les contraintes comportementales et les mécanismes de décision ont en outre démontré que les activités individuelles ne sont pas distribuées aléatoirement, mais présentent des schémas analysables sous les multiples contraintes du temps, des ressources et des réseaux sociaux — faisant progresser la cognition urbaine de la représentation visuelle vers l'analyse des processus et fournissant de nouveaux fondements théoriques pour comprendre la chaîne causale entre configuration spatiale et choix comportementaux.

Sur ces bases, les chercheurs ont progressivement reconnu que la complexité urbaine ne peut être expliquée par une seule dimension, spatiale ou comportementale. Une nouvelle vague d'intégration théorique, représentée par la théorie de l'espace social et la théorie de l'interaction espace-comportement, a propulsé la cognition urbaine dans une phase de recherche centrée sur le « couplage espace physique – activités humaines »[18]. À l'ère de l'informatisation, l'émergence de l'informatique urbaine et l'introduction de données spatio-temporelles multi-sources, de l'intelligence artificielle et des graphes de connaissances ont permis à la cognition urbaine de passer du concept théorique à la modélisation systématique ; la ville n'est plus seulement un objet de perception et de représentation, mais un système complexe susceptible d'être compris, prédit et 干预é en temps réel[19].

Dans l'ensemble, la théorie de la cognition urbaine a suivi une trajectoire évolutive allant de la caractérisation spatiale à l'analyse comportementale, puis à la cognition systémique pilotée par les données. Cette trajectoire a non seulement fourni un fondement intellectuel pour l'innovation méthodologique, mais a également établi l'« interaction espace-activité » comme problématique centrale pour comprendre les mécanismes complexes de fonctionnement urbain.

## 1.2 Progrès des technologies de perception urbaine

Alors que les cadres théoriques évoluaient progressivement du couplage espace-comportement vers la cognition systémique, les recherches connexes se sont concentrées

sur la réalisation d'une perception dynamique des mécanismes de fonctionnement urbain par des moyens technologiques — acquérant, identifiant, collectant et classifiant les informations sur l'environnement physique et les activités humaines dans les villes, afin de fournir une base calculable pour la cognition urbaine. Le développement de la technologie de perception urbaine a évolué de l'inférence empirique et de l'enquête manuelle vers la perception intelligente. Sa trajectoire fondamentale réside dans l'expansion des objets de perception de l'espace physique vers les activités humaines, la transition des méthodes de perception de la source unique vers la fusion multi-sources, et la transformation du contenu de perception de la caractérisation statique vers les processus spatio-temporels dynamiques.

La perception urbaine primitive reposait principalement sur l'observation manuelle et l'enquête empirique, obtenant les caractéristiques spatiales urbaines par les relevés de terrain, les questionnaires et les données statistiques des chercheurs, avec des limites inhérentes en termes de complétude des données et de couverture. Avec la diffusion des images de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), la perception urbaine est entrée dans une phase de cartographie numérique centrée sur « espace–image–indicateurs »[20]. Les objets de perception à ce stade étaient principalement les éléments spatiaux physiques — occupations du sol, bâtiments, routes ; les structures de données, principalement sous forme raster ou vectorielle, permettaient une représentation quantitative affinée de l'information spatiale statique.

Avec le développement des technologies de l'Internet mobile et de l'IoT, les infrastructures intelligentes intégrées espace–air–sol se sont progressivement mises en place, faisant entrer la perception urbaine dans une phase intelligente et multi-sources[21]. Fondées sur des images de télédétection multi-temporelles et multi-spectrales, des images de rue et des données de surveillance environnementale collectées par des capteurs professionnels, combinées à la perception sociale portée par les individus (signalisation de téléphonie mobile, médias sociaux, données de trajectoire) et à la perception participative (photographies, textes et informations de localisation téléchargés par les utilisateurs), les caractéristiques dynamiques urbaines peuvent désormais être capturées en temps réel, le centre de gravité de la perception passant des « objets » aux « personnes »[22]. Les recherches de cette phase ne se limitent pas à la forme physique de l'espace urbain, mais s'intéressent également à l'identification et à l'analyse d'informations processuelles telles que les comportements individuels et collectifs, les schémas de déplacement et l'évolution de la consommation énergétique[23]. Parmi les études représentatives figurent l'identification de l'intensité des activités de population et des limites fonctionnelles dynamiques par les données de signalisation mobile[24-25], la reconnaissance des émotions urbaines et des préférences spatiales à partir des données de médias sociaux[26-27], et la perception en temps réel des déplacements urbains par les capteurs de trafic et la vidéosurveillance[28-29]. La fusion de ces données hétérogènes multi-sources a transformé la ville d'un objet observé comme « image statique » en un objet observé comme « processus dynamique », posant les bases pour l'analyse à grain fin du fonctionnement urbain[30].

Actuellement, la perception urbaine s'approfondit dans les directions de l'intégration, de l'intelligence et de la cognitivisation. Cependant, le seul recours aux moyens de perception pour acquérir et intégrer des données reste insuffisant pour révéler les relations logiques intrinsèques entre les éléments urbains. Comment analyser systématiquement la

structure spatiale et les activités humaines pour soutenir la cognition et la prise de décision urbaines est devenu le thème central de la prochaine phase de recherche.

### 1.3 Approfondissement des méthodes d'analyse urbaine

L'analyse urbaine — s'appuyant sur la perception — est le processus d'identification, d'interprétation et de prédiction des relations interactives entre l'espace physique et les activités humaines, visant à révéler les mécanismes internes du fonctionnement urbain et à soutenir la prise de décision. Les méthodes d'analyse urbaine ont évolué de la statistique spatiale vers la modélisation en réseau, puis vers le raisonnement sémantique ; leur objectif central a progressivement évolué de l'analyse de configurations statiques vers la cognition de mécanismes dynamiques.

L'analyse urbaine primitive s'appuyait principalement sur la statistique spatiale et les modèles régionaux pour révéler les schémas macroscopiques de la forme urbaine et de la configuration fonctionnelle. Les méthodes représentées par l'analyse de distribution spatio-temporelle révélaient l'autocorrélation spatiale et les caractéristiques évolutives des éléments géographiques[31] ; les études quantitatives typées par les modèles statistiques traditionnels (modèles de gravité, modèles de régression, etc.) mettaient l'accent sur la corrélation statistique des relations spatiales[32-33] ; les recherches centrées sur les modèles spatiaux et l'analyse de réseau caractérisaient quantitativement la logique d'organisation des structures spatiales par des méthodes telles que la syntaxe spatiale et l'analyse d'accessibilité[34-35]. Avec le développement de l'intelligence artificielle, les modèles d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond ont été introduits dans la recherche urbaine, renforçant considérablement la capacité d'analyse des problèmes complexes[36]. L'analyse urbaine à ce stade est passée de la description structurelle au raisonnement mécanistique, mais est restée principalement à l'échelle macroscopique avec des données agrégées, peinant à capturer les caractéristiques d'auto-organisation et les processus d'interaction spatio-temporelle des multiples éléments au sein du système complexe urbain.

Par conséquent, la théorie des réseaux complexes a été introduite dans ce domaine, abstraissant la ville en un réseau relationnel de personnes, lieux, équipements et événements, et analysant la distribution des degrés, les propriétés de petit monde et les coefficients de clustering pour révéler les schémas potentiels du fonctionnement urbain[37]. Les modèles de réseaux neuronaux multicouches développés sur cette base ont décrit les relations en cascade inter-niveaux entre le territoire, l'industrie, la population et les transports[38] ; les modèles d'interaction multi-agents ont en outre intégré la logique comportementale et les mécanismes de décision dans le cadre d'analyse, révélant la réponse dynamique entre les comportements de foule et les états spatiaux. Ensemble, ces trois approches ont construit le fondement de l'analyse des systèmes urbains complexes, faisant progresser la transformation de l'analyse urbaine de la « perception parallèle » au « raisonnement interactif » et réalisant des avancées significatives dans la compréhension du couplage espace-activité-effet.

Cependant, ces modèles présentent encore des limites en matière d'expression sémantique et de raisonnement logique, en particulier pour l'intégration de données inter-domaines et l'explication des mécanismes causaux lorsqu'ils sont confrontés à des données hétérogènes multi-sources. L'introduction des graphes de connaissances offre une percée pour résoudre ce problème — héritant des avantages de l'analyse de structure en réseau

tout en renforçant la capacité d'intégration de données inter-domaines et de modélisation des relations causales. La cognition des fonctions urbaines pilotée par les données POI, les médias sociaux et la perception visuelle est devenue un sujet de recherche actif ; les graphes de connaissances des fonctions urbaines basés sur des données multi-sources ont été appliqués pour soutenir la cognition des fonctions urbaines et l'analyse de l'évolution spatio-temporelle[39]. Chen et al.[40] ont construit des graphes dynamiques à partir de données de mobilité pendant la pandémie pour assister en temps réel l'orientation des flux de personnes et l'ajustement des stratégies de confinement. Zhu et al.[41] ont utilisé des graphes de flux de trafic et de données météorologiques pour améliorer la précision de la prévision du trafic à court terme. Hu et al.[42] ont intégré les graphes de connaissances et les réseaux neuronaux graphiques pour modéliser la relation causale entre les flux de personnes et la consommation énergétique des bâtiments dans les centres urbains, permettant le contrôle intelligent des systèmes de bâtiments. Ces études démontrent que les graphes de connaissances peuvent servir non seulement à l'intégration sémantique des éléments urbains, mais aussi d'intermédiaires pour la modélisation comportementale et le raisonnement de gouvernance, organisant les éléments urbains en un système de connaissances calculable et interprétable.

Dans ce contexte, la présente étude tente de construire une méthodologie de cognition urbaine centrée sur les graphes de connaissances, en établissant un paradigme de représentation des connaissances pour l'interaction complète entre l'espace physique urbain et les activités humaines à travers des cadres d'analyse structurés, sémantisés et dynamiques. Elle explore un système de cognition dynamique intégrant « perception – compréhension – réponse » pour soutenir les applications de gouvernance urbaine orientées par les comportements, multi-scénarios et multi-échelles.

## 2 Cartographie panoramique des activités humaines urbaines basée sur les graphes de connaissances : logique et méthodes

Pour percevoir et analyser les processus complexes du fonctionnement urbain, la présente étude construit un système de cognition dynamique urbaine ciblant les informations multidimensionnelles de l'espace physique urbain et des activités humaines, utilisant les graphes de connaissances comme cadre de représentation. Le système prend en charge l'expression structurée et la gestion dynamique des éléments incluant « humain – objet – lieu – temps – événement – effet »[43], et peut être défini formellement comme suit :

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

où :  $K_G$  (knowledge graph) désigne le graphe de connaissances ;  $E$  (entity) représente les entités, englobant les objets et phénomènes concrets de l'activité humaine, en tant que nœuds dans le graphe de connaissances ;  $R$  (relationship) représente les relations entre ces entités, constituant les arêtes dans le graphe de connaissances, où  $R = \{(e_1, r, e_2) | r \in R, e_1, e_2 \in E\}$  ;  $S$  (set) désigne les triplets entité–relation–entité formés par la connexion des nœuds au moyen des arêtes, constituant les unités sémantiques fondamentales du graphe de connaissances ;  $A$  (attribution) représente les attributs des entités, satisfaisant  $\forall e \in E$ , avec l'attribut correspondant  $a_e \in A$ , utilisé pour décrire les caractéristiques d'identité, temporelles, spatiales et numériques des entités.

### 2.1 Clé de la transposition des processus dynamiques urbains en représentation par graphe de connaissances : définition des entités et annotation des attributs

La tâche primordiale dans la construction d'un graphe de connaissances pour les

activités humaines urbaines est l'identification et la définition des entités multidimensionnelles. Les activités humaines dans les villes impliquent un vaste ensemble d'éléments hétérogènes, qui peuvent être décomposés en une série de catégories d'information : humain, objet, lieu, temps, événement et effet (Figure 1). Ces entités sémantiques constituent collectivement les nœuds d'information fondamentaux du fonctionnement urbain et la base structurelle de la construction du graphe de connaissances. Parmi celles-ci, l'humain et l'objet servent de sujets de l'activité, englobant les divers individus et supports qui exécutent des activités dans l'espace urbain ; le lieu désigne les lieux spatiaux où se déroulent les activités, incluant les bâtiments, routes, places ainsi que les quartiers et réseaux formés par leurs combinaisons ; le temps saisit le contexte temporel des activités, soutenant la modélisation des rythmes comportementaux et des schémas périodiques ; l'événement correspond aux opérations spécifiques accomplies par les sujets d'activité dans des contextes temporels et spatiaux particuliers, englobant tant l'utilisation statique des ressources (par exemple, la consommation d'électricité, d'eau, de gaz) que les processus comportementaux dynamiques (par exemple, les trajets de déplacement, les flux spatiaux, les rassemblements sociaux) ; l'effet reflète les impacts générés par les activités humaines urbaines à travers différents temps et espaces, incluant mais ne se limitant pas aux informations provenant de divers dispositifs de perception sur la consommation énergétique des bâtiments, la charge de trafic et l'intensité spatiale — servant de point terminal critique de la chaîne de cognition dynamique orientée vers l'intervention de gouvernance.

Chaque type d'entité dans le graphe doit disposer d'informations d'attributs complètes. Les types d'attributs ne sont pas fixés en dimensionnalité, mais doivent être définis de manière flexible en fonction des caractéristiques des entités dans leur contexte réel, incluant typiquement des marqueurs d'identité (par exemple, nom, identifiant), des attributs spatio-temporels (par exemple, latitude/longitude, horodatages), des attributs comportementaux (par exemple, rôle, état), des informations numériques (par exemple, consommation énergétique, volume de flux) et d'autres informations permettant de caractériser les entités, afin de réaliser une description multi-perspective des états des entités. Les entités et leurs attributs constituent la première dimension structurelle du graphe de connaissances, servant de fondement pour la construction logique ultérieure et l'expression causale.

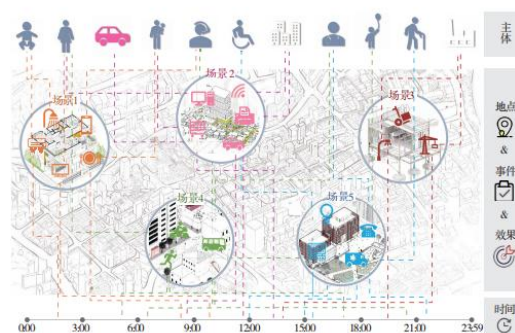


Figure 1. Entités multidimensionnelles dans le graphe de connaissances des activités urbaines

## 2.2 Cœur de la transposition des éléments urbains multidimensionnels en construction de réseau sémantique : traitement structuré et mise en correspondance des relations

Dans le cadre de la définition des entités et des attributs, l'immense volume de données de perception des activités humaines doit être transformé en informations structurées

uniformément exploitables. La présente étude emploie des méthodes d'apprentissage profond pour traiter des informations multidimensionnelles provenant d'images vidéo, de textes de médias sociaux, de trajectoires de localisation et d'autres sources. Plus précisément, les images vidéo sont traitées par des modèles de détection d'objets pour identifier les sujets de foule et de trafic ; les textes de médias sociaux sont traités par des modèles de langage pour extraire les événements comportementaux, les positions spatiales et les étiquettes temporelles ; les données de trajectoire sont analysées en combinaison avec des méthodes de modélisation de séquences temporelles pour identifier les schémas de trajets et les caractéristiques des activités. Toutes les données subissent une conversion de format et une résolution de coordonnées spatiales dans l'environnement Python, puis sont stockées de manière uniforme dans la base de données de graphes Neo4j, réalisant ainsi la transformation de données brutes hétérogènes multi-sources en unités sémantiques structurées.

Sur la base des données structurées, les relations sémantiques entre les entités doivent être ultérieurement identifiées afin de construire un réseau structurel capable d'expression logique. Les relations sémantiques dans les systèmes urbains incluent, mais ne se limitent pas à, l'adjacence spatiale et l'appartenance, la séquence temporelle et la durée, l'exécution comportementale et la réponse aux événements. Ces relations reflètent les interactions réelles entre les éléments urbains au niveau sémantique, fournissant un soutien sémantique pour la construction de chaînes logiques de « qui–où–pourquoi–comment–quel résultat ».

En conséquence, un système de règles couplant les contraintes spatiales, temporelles et comportementales est construit pour permettre l'inférence semi-automatique des relations sémantiques entre les données structurées. Plus précisément : les relations de base (par exemple, « se déroule à », « appartient à ») sont générées automatiquement par mise en correspondance de champs à l'aide des fonctions pandas en Python ; les relations spatiales sont calculées à partir des latitude/longitude en utilisant les bibliothèques geopandas et shapely pour calculer les distances spatiales, et lorsque la distance est inférieure à un seuil défini, le système génère automatiquement des relations telles que « situé à », « adjacent à » et « traverse ». Les relations temporelles (par exemple, « synchronisé », « séquentiel ») sont identifiées par les différences d'horodatage ; les relations comportementales (par exemple, « participe à », « co-apparaît avec ») sont automatiquement déduites sur la base du chevauchement des identifiants de sujets et des enregistrements d'événements dans des fenêtres temporelles, la logique étant implémentée par les fonctions de séries temporelles de pandas. Pour les relations sémantiques complexes (par exemple, « influence », « répond à », « provoque »), les connaissances d'experts sont intégrées pour établir des règles logiques, formant un mécanisme de génération hybride « annotation manuelle + inférence par règles » afin d'équilibrer précision sémantique et extensibilité computationnelle.

En définitive, les segments structurés sont mis en correspondance sous forme de triplets centrés sur « humain–événement–lieu–temps–objet–effet » et intégrés dans le graphe de connaissances à l'aide de plateformes telles que Neo4j, permettant l'organisation, l'interrogation et la mise à jour dynamique des nœuds et des relations, fournissant ainsi un support de connaissances opérationnel pour la compréhension et la gouvernance des mécanismes de fonctionnement urbains. Voir la Figure 2.





Figure 2. Trajectoire de mise en correspondance de l'espace physique urbain et des activités humaines basée sur le graphe de connaissances

### 2.3 Pont de l'intégration de données à la cognition de connaissances : interrogation de chemins et analyse de raisonnement

Après la construction du graphe de connaissances, la présente étude introduit en outre des méthodes de raisonnement et d'analyse de graphes fondées sur la mise en correspondance de chemins relationnels et le calcul de similarité sémantique, afin de réaliser la cognition de connaissances allant des relations explicites aux chaînes causales potentielles au sein du réseau sémantique multidimensionnel.

La mise en correspondance de chemins relationnels révèle les chaînes comportementales potentielles ou les dépendances spatiales par le raisonnement de chemins relationnels multi-sauts. Par exemple, lorsque « Sujet A — participe à — Événement B — se déroule à — Bâtiment C » et « Bâtiment C — adjacent à — Bâtiment D » coexistent, le raisonnement de chemin peut identifier la relation implicite que « le Sujet A est susceptible d'être actif à proximité du Bâtiment D ». Cette méthode s'appuie sur les fonctionnalités de mise en correspondance de motifs de chemin du langage de requête Cypher dans la base de données de graphes Neo4j, combinées à la bibliothèque d'analyse de graphes NetworkX de Python, pour réaliser la récupération automatique et l'inférence de chemins multi-sauts.

Le calcul de similarité sémantique identifie les objets possédant des attributs similaires, des fonctions proches ou des schémas comportementaux cohérents parmi les entités multi-sources. En utilisant les bibliothèques gensim et scikit-learn de Python pour vectoriser les informations d'attributs des nœuds-entités, combinées à l'algorithme de similarité de nœuds (node similarity) de Neo4j, une évaluation globale de la similarité sémantique parmi les lieux spatiaux et les événements comportementaux est réalisée, révélant ainsi les phénomènes de récurrence de schémas et de couplage fonctionnel au sein des systèmes urbains.

Le système de raisonnement de graphes est implémenté dans l'environnement de la base de données de graphes Neo4j ; le prétraitement des données, la récupération de chemins et le calcul de similarité sémantique sont tous réalisés sur la plateforme Python ; les résultats du raisonnement sont réinjectés dans la base de données Neo4j par des instructions Cypher, formant un réseau de connaissances mis à jour dynamiquement. Ce processus réalise non seulement une représentation panoramique de l'espace physique urbain et des activités humaines, mais facilite également la révélation des chaînes comportementales, des dépendances spatiales et de leurs mécanismes causaux.

### 3 Cognition multidimensionnelle de micro-scénarios urbains basée sur les graphes de

connaissances : le cas d'un campus universitaire

### 3.1 Objet de recherche et sélection du scénario

Pour valider la faisabilité et le potentiel d'application de la méthode proposée, le nouveau campus de l'Université A en banlieue de Tianjin a été sélectionné comme plateforme expérimentale à l'échelle microscopique, en raison de sa représentativité et de l'accessibilité des données. Le nouveau campus de l'Université A couvre une superficie totale de plus de 2,4 millions de m<sup>2</sup>, avec une surface de plancher de 1,55 million de m<sup>2</sup>. Son aménagement spatial adopte un modèle de planification en « ceinture disciplinaire + ceinture fonctionnelle », avec des limites fonctionnelles clairement définies et des types d'activités diversifiés. Par ailleurs, le campus est équipé de systèmes complets de vidéosurveillance et d'appareils de mesure intelligents, fournissant le soutien de données nécessaire à la construction du graphe de connaissances.

### 3.2 Acquisition de données multi-sources et traitement structuré

En combinant enquête de terrain et mégadonnées Internet, les informations d'activités du semestre d'automne 2023 (1er septembre 2023 — 1er janvier 2024) ont été obtenues, construisant un système de données composite englobant des plans d'ingénierie architecturale, de l'information géographique, des informations de médias sociaux, de la surveillance du trafic et des textes de comptage énergétique. Les données proviennent principalement de documents statistiques fournis par le département de gestion logistique de l'université et de données ouvertes de plateformes publiques en ligne. Étant donné que les données de signalisation de téléphonie mobile sont difficiles à obtenir en raison des restrictions de protection de la vie privée et d'autorisation de données, les déplacements en véhicules motorisés ont été utilisés comme variable proxy des déplacements humains pour caractériser les comportements de navette sur le campus.

Lors de la phase de traitement des données, des méthodes intelligentes incluant le modèle YOLOv8 et l'algorithme SDV (Synthetic Data Vault) ont été introduites pour effectuer la standardisation des formats, l'alignement des horodatages et l'encodage unifié des entités sur les données multimodales, les intégrant en une carte unifiée d'informations multidimensionnelles du campus (Figure 3), fournissant des interfaces de données de haute qualité et normalisées pour la construction du graphe de connaissances.



La méthode de cognition dynamique urbaine pilotée par les graphes de connaissances proposée dans cette étude permet une représentation structurée des schémas d'activités à l'échelle du domaine entier et prend en charge l'agrégation d'informations multidimensionnelles et l'analyse causale à partir de n'importe quel nœud. La dimension « effet » caractérise la réponse consécutive des activités humaines dans le temps et l'espace, constituant le composant central de la cognition par graphe et le point d'aboutissement pratique de la gouvernance urbaine. En conséquence, en s'appuyant sur le graphe de connaissances des activités du campus de l'Université A, la période de pointe du matin (7h30–8h30) du 18 décembre 2023 — journée typique d'enseignement — a été sélectionnée comme fenêtre d'observation. Un véhicule entrant sur le campus, sélectionné aléatoirement, a servi de point de départ pour l'interrogation sémantique, avec un accent sur les caractéristiques d'attributs et les connotations sémantiques de sa dimension d'effet, afin

d'explorer le potentiel d'application des graphes de connaissances dans l'intégration sémantique et l'identification de la logique causale.

#### 4.1.1 Identification des trajets de navettage : activité individuelle et trajectoire spatiale

En s'appuyant sur les capacités d'organisation structurée et d'interrogation sémantique du graphe de connaissances, le système a initié l'interrogation à partir du véhicule immatriculé Jing H1Z\*, capté par la caméra de surveillance de la porte nord, identifiant le nœud d'activité de déplacement T041 généré après l'entrée du véhicule sur le campus à 8h17 le 18 décembre 2023, et a effectué la traçabilité rétrospective de ce comportement de navettage [Figure 5(a)]. Le graphe a automatiquement récupéré les attributs de chemin et les relations de nœuds adjacents de cet événement de navettage, réalisant la reconstruction sémantique de la trajectoire individuelle du véhicule dans le réseau spatial du campus.

Les résultats du suivi de chemin ont montré qu'après être entré sur le campus par la porte nord, le véhicule a successivement traversé cinq intersections — P01, P37, P56, P57 et P58 — pour finalement s'arrêter à proximité du Bâtiment d'enseignement 55, formant l'itinéraire de navettage « Route Nord XY — Route Centrale XY — Route Nord MD ». Sur la base des attributs de flux de trafic des nœuds de caméras dans le graphe, cet itinéraire de navettage a été identifié comme le corridor principal présentant la pression de circulation la plus concentrée durant la période de pointe du matin, avec une densité de flux moyenne significativement supérieure aux autres itinéraires simultanés, supportant un volume substantiel de déplacements inter-quartiers au sein du campus.

La reconstitution de la trajectoire du véhicule démontre la capacité du graphe de connaissances à construire des chaînes comportementales complètes à partir de nœuds individuels, fournissant une base structurelle pour l'identification ultérieure des schémas de déplacement à haute fréquence et l'exploration de la logique d'utilisation spatiale.

#### 4.1.2 Liaison d'informations sémantiques : réseaux d'éléments spatiaux et caractéristiques d'agrégation

Sur la base de l'itinéraire de navettage identifié, le système a en outre analysé les structures spatiales multidimensionnelles et les nœuds fonctionnels connectés à travers les attributs d'entités et les mécanismes d'association sémantique du graphe de connaissances, révélant la logique sous-jacente du comportement spatial.

Les résultats indiquent que la destination du navettage, le Bâtiment d'enseignement 55, appartient au cluster de l'École d'informatique, qui est l'une des unités comptant le plus grand nombre d'enseignants et d'étudiants et les activités d'enseignement et de recherche les plus denses sur le campus — une destination typique pour les navettages à haute fréquence [Figure 5(b)]. Le long de cet itinéraire de navettage, plusieurs dortoirs d'étudiants, la bibliothèque, les centres d'activités et le Bâtiment d'enseignement 45, entre autres lieux publics importants, sont traversés, reliant la chaîne comportementale quotidienne des groupes d'étudiants : « vivre—étudier—socialiser ». Parallèlement, ce parcours couvre également les nœuds d'équipements de service dans le cluster résidentiel, y compris les supermarchés, les restaurants et les bureaux de poste. La superposition des effets d'agglomération spatiale des équipements commerciaux et éducatifs renforce significativement la capacité d'attraction des flux de personnes dans cette zone, formant une relation de couplage des points chauds spatiaux-behavioraux conjointement tirée par les fonctions d'enseignement et les services de proximité.

L'interrogation liée des informations spatiales valide la capacité du système de graphe

de connaissances à associer automatiquement des chaînes comportementales individuelles à des informations multidimensionnelles à l'échelle du domaine, fournissant une trajectoire cognitive pour comprendre les relations interactives entre les structures spatiales complexes et les mécanismes comportementaux sur le campus.

#### 4.1.3 Analyse de la logique causale : réponse événementielle et consommation énergétique

Sur la base de la position terminale du comportement de navettage susmentionné, le système a en outre invoqué le module d'association sémantique du graphe de connaissances pour mener une interrogation approfondie et une traçabilité structurelle des entités spatiales et des contenus d'activités associés au Bâtiment d'enseignement 55.

Premièrement, les résultats d'interrogation basés sur les attributs des nœuds de bâtiment ont montré que le cluster d'enseignement de l'informatique où se situe le Bâtiment 55 relève du secteur de chauffage D et du secteur d'alimentation en eau de la porte Est, ses activités de consommation d'eau et d'énergie étant enregistrées dans les tableaux de comptage sectoriels. Le bâtiment contient 174 salles, englobant diverses fonctions telles que salles de classe, laboratoires, salles de réunion, amphithéâtres, cafés et sanitaires. Les données d'électricité sont collectées quotidiennement par des compteurs individuels dans chaque salle et enregistrées en temps réel dans les attributs des nœuds de consommation énergétique du graphe. Une consultation ultérieure des attributs de consommation énergétique des nœuds de salles agrégées quotidiennement a révélé que, parmi les 29 salles classées dans le top 3‰ de consommation quotidienne d'électricité, 11 se trouvaient à l'intérieur du Bâtiment d'enseignement 55, soit un taux de 37,9 %. Notamment, l'amphithéâtre R18 a enregistré une consommation quotidienne d'électricité de 87,3 kWh, équivalant à 69,4 kg d'émissions de carbone — le plus élevé parmi les près de 10 000 salles de l'ensemble du campus ce jour-là, avec une charge énergétique dépassant significativement les autres espaces d'enseignement conventionnels.

Deuxièmement, le système a invoqué la fonctionnalité de traçabilité sémantique du graphe de connaissances pour relier des informations multidimensionnelles incluant la structure spatiale de niveau supérieur du Bâtiment d'enseignement 55 (cluster d'enseignement, sous-secteur énergétique), les événements comportementaux de ce jour-là et les nœuds de trafic environnants [Figure 5(c)]. Les résultats ont montré que le 18 décembre, l'École d'informatique a organisé un forum académique de grande envergure dans ce bâtiment, avec plusieurs salles utilisées pour différents types de séminaires, présentations de résultats et activités pédagogiques. Parmi celles-ci, l'amphithéâtre R18 servait de lieu principal du forum, avec le plus grand nombre de participants et la durée d'activité la plus longue, formant ainsi la demande énergétique la plus concentrée de la journée. Parallèlement, les deux sections de route principales de navettage L90 et L103 adjacentes au Bâtiment d'enseignement 55 ont présenté des fluctuations temporelles hautement cohérentes avec les variations de consommation d'électricité de plusieurs salles du bâtiment ce jour-là dans les courbes d'intensité de trafic, révélant le mécanisme typique de « déclenchement comportemental–agglomération spatiale–consommation énergétique » piloté par les activités pédagogiques de grande envergure, et reflétant le processus dynamique de l'interaction multi-éléments dans les unités micro-échelles urbaines.

Par la traçabilité des chemins d'association sémantique entre les nœuds du graphe, le système a intégré de manière effective des informations multidimensionnelles initialement dispersées, reconstituant la logique causale sous-jacente aux activités du campus et



fournissant un soutien structurel pour l'intervention de gouvernance.

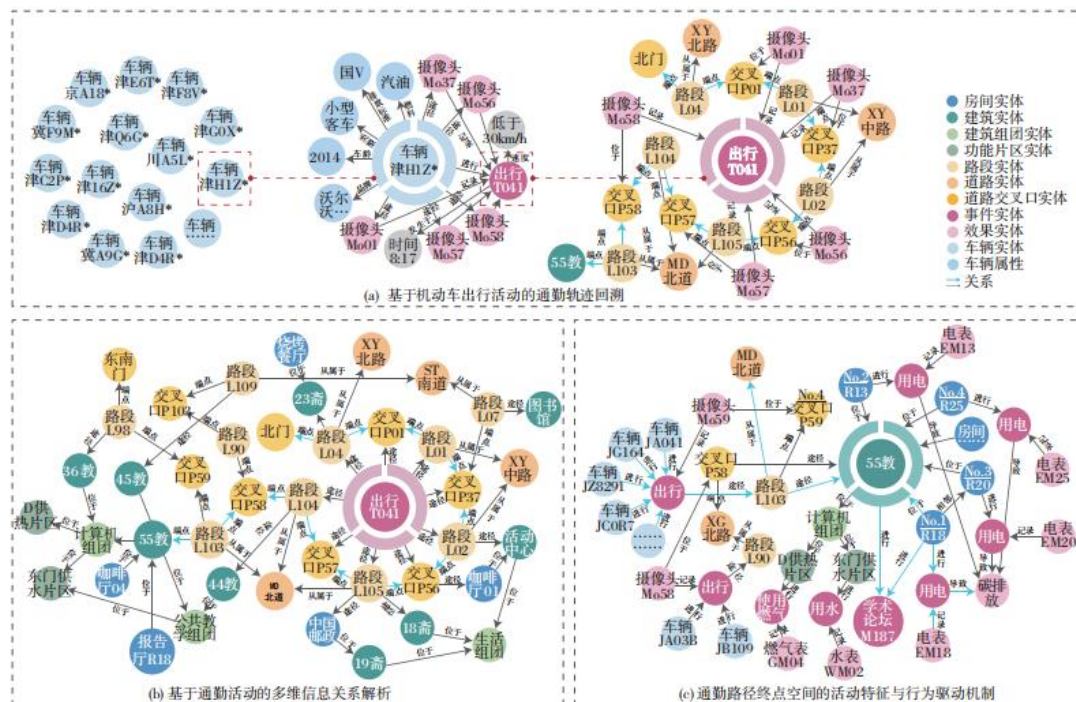


Figure 5. Applications de gouvernance du graphe de connaissances dans le scénario du campus

Source : Redessiné à partir du graphe de connaissances des activités du campus de l'Université A

#### 4.2 Promotion multi-scénarios et perspectives méthodologiques

L'étude empirique par graphe de connaissances dans le scénario du campus valide non seulement la capacité de la méthode pour l'intégration d'informations et la modélisation sémantique dans les espaces à haute densité, mais fournit également une approche analytique généralisable pour comprendre les processus comportementaux à des échelles urbaines plus larges. Par l'identification des chaînes d'activités individuelles, de la fréquence d'utilisation spatiale et des relations de co-occurrence comportementale, il est possible de révéler les logiques comportementales et les schémas de réponse spatiale largement présents dans l'organisation spatiale urbaine, fournissant une référence microscopique pour la cognition dynamique des problèmes urbains complexes.

En tant que vecteur central intégrant le processus complet « identification – attribution – simulation – rétroaction », le cadre sémantique du graphe de connaissances possède une haute reconfigurabilité : les types d'entités et de relations peuvent être définis ou ajustés de manière flexible selon les scénarios d'application, et les attributs peuvent être mis à jour dynamiquement, permettant ainsi l'adaptation à des sources de données et des besoins cognitifs diversifiés sans altérer la logique sémantique globale. Cette caractéristique permet au modèle cognitif construit dans cette étude de maintenir la cohérence sémantique et l'interprétabilité logique à travers différents niveaux spatiaux et domaines thématiques. En conséquence, la méthode peut être ultérieurement étendue aux quartiers résidentiels, parcs industriels, zones commerciales et autres types d'espaces urbains, voire au domaine urbain dans son ensemble, permettant la modélisation de la cognition multidimensionnelle et de la

réponse dans divers domaines tels que la gestion énergétique, la régulation environnementale, la conservation du patrimoine et la régénération urbaine.

Du point de vue disciplinaire, les graphes de connaissances font progresser la recherche en planification urbaine de la description spatiale statique vers l'analyse cognitive dynamique, construisant une chaîne logique « information – connaissance – cognition ». La signification réside non seulement dans la réalisation de l'intégration structurée et de la représentation panoramique des éléments urbains multidimensionnels, mais plus encore dans la révélation des mécanismes de fonctionnement urbain de manière calculable et interprétable, fournissant de nouvelles voies de réalisation pour la construction de villes jumelles numériques et la gouvernance intelligente, favorisant la transformation des décisions de planification d'une orientation fondée sur l'expérience vers une approche pilotée par les données et les connaissances, et réalisant l'intégration bidirectionnelle et l'innovation entre la théorie disciplinaire et la pratique de gouvernance.

## 5 Conclusions et perspectives

Face aux défis actuels d'une granularité insuffisante dans l'analyse de couplage entre l'espace physique urbain et les activités humaines, ainsi qu'à la déconnexion des mécanismes de réponse, cette étude propose une méthode de cognition dynamique urbaine fondée sur les graphes de connaissances. Centrée sur la structure sémantique « humain – objet – lieu – temps – événement – effet », la méthode réalise une boucle fermée complète allant de la collecte de données multi-sources et la modélisation comportementale au soutien de la réponse.

Dans l'étude empirique menée sur un campus universitaire, le graphe de connaissances des activités humaines construit a démontré de solides capacités d'agrégation d'informations et d'association sémantique, soutenant efficacement des tâches d'analyse multidimensionnelles allant du suivi de trajectoires individuelles et de l'identification des relations spatiales à l'analyse des mécanismes causaux. L'étude valide l'applicabilité et l'extensibilité de la méthode dans la gouvernance spatiale à l'échelle microscopique, démontrant le potentiel des graphes de connaissances pour renforcer l'intégration sémantique, l'expression structurée et les capacités de raisonnement et de déduction des méthodes de cognition dynamique. Du point de vue de la gouvernance par la planification urbaine, la méthode fournit une trajectoire technique pour la construction d'un système de cognition dynamique centré sur la logique « humain – scénario – comportement », avec des approches analytiques généralisables et des modèles méthodologiques portables et extensibles, pouvant être intégrés dans divers scénarios de pratique de planification — incluant l'optimisation de l'organisation du trafic dans les quartiers centraux, la surveillance et la régulation environnementale des parcs industriels, et la conservation et la régénération du patrimoine historique et culturel — soutenant la transformation du paradigme de gouvernance d'une orientation statique de configuration vers une approche dynamique pilotée par les comportements.

À l'avenir, les systèmes de cognition dynamique urbaine nécessitent un approfondissement continu dans trois directions clés : premièrement, promouvoir l'automatisation de l'intégration des données en entrée pour améliorer les capacités de traitement en temps réel des données hétérogènes ; deuxièmement, renforcer la profondeur de l'extraction d'informations au sein du graphe pour améliorer l'identification et la construction de schémas comportementaux complexes et de relations sémantiques ;

troisièmement, élargir les mécanismes de couplage entre le graphe et les extrémités décisionnelles pour améliorer la rétroaction stratégique, la simulation de scénarios et la coordination inter-départementale. Ces trajectoires contribueront collectivement à faire évoluer les graphes de connaissances urbains d'outils d'organisation de données vers des plateformes de gouvernance urbaine, fournissant un soutien à la construction de nouveaux systèmes de gouvernance urbaine.

## Références

- [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 Jieli. 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.