

Patrones Espaciales, Estructura de Conectividad y Estrategias de Planificación de la Red Logística del Área Metropolitana de Wuhan: Un Estudio Basado en Datos de Navegación de Camiones

SHAN Zhuoran, ZHU Junqing, YUAN Man, HUANG Yaping, FU Lingfeng

Resumen: Basado en macrodatos de navegación de camiones Gaode, este estudio investiga las características espaciales y metodologías de planificación de la red logística en el área metropolitana de Wuhan. Los hallazgos revelan que el patrón espacial general de las actividades logísticas está dominado por hubs, con aglomeración geográfica impulsada por la distribución de recursos. Específicamente, las actividades de camiones pesados presentan un patrón de concentración en áreas centrales y dispersión hacia parques industriales periféricos y zonas portuarias. En contraste, las actividades de camiones medianos, pequeños y microcamiones muestran una distribución jerárquica — anclada en áreas urbanas centrales, mostrando aglomeración agrupada en zonas urbanizadas de ciudades centrales, y dispersión fragmentada en regiones periféricas. Mediante análisis de agrupamiento, se identificaron 122 unidades espaciales logísticas diferenciadas funcionalmente, algunas de las cuales muestran desalineación con las políticas de planificación actuales. El análisis de red revela además un «efecto Mateo» en la conectividad logística, identifica corredores de transporte regional potenciales en múltiples direcciones, y mide disparidades significativas en la fuerza de vinculación interna y el flujo interregional entre comunidades secundarias asociadas. Para abordar desequilibrios espaciales en la asignación de recursos, conectividad rezagada y coordinación insuficiente entre clusters dentro de la red logística de carga, este artículo propone un marco de planificación estratégico centrado en fortalecimiento de hubs, desarrollo de corredores y reorganización de comunidades. El marco delimita una estructura espacial logística que comprende cinco tipos de instalaciones, siete corredores y cinco comunidades, y ofrece tres vías de optimización y medidas accionables. El estudio proporciona una base teórica para el desarrollo logístico moderno y la planificación del diseño espacial en áreas metropolitanas chinas.

Palabras clave: datos de navegación de camiones; red logística; diseño espacial logístico; estrategia de planificación; área metropolitana

La planificación coordinada y el diseño integrado de espacios logísticos modernos revisten gran importancia para fortalecer la eficiencia económica regional, optimizar estructuras de transporte, promover vínculos industriales interurbanos y estabilizar cadenas de suministro en áreas metropolitanas [1-3]. En noviembre de 2024, la Oficina General del Comité Central del PCCh y la Oficina General del Consejo de Estado emitieron el Plan de Acción para Reducir Eficazmente los Costos Logísticos de Toda la Sociedad, proponiendo mejoras adicionales al sistema de servicios logísticos «hub y spoke», el cultivo de economías de hubs y corredores, y la construcción de un sistema de operación logística moderno que integre «corredores + hubs + redes». El área metropolitana de Wuhan, como zona económica central del curso medio del río Yangtsé y gran hub nacional de transporte intermodal, ha visto expandirse la escala logística y aumentar el número de empresas logísticas en años recientes. Sus

actividades logísticas juegan un papel cada vez más importante como motor del crecimiento económico regional, dando lugar a configuraciones espaciales impulsadas por políticas. El «XIV Plan Quinquenal» (2022) para el desarrollo de la industria logística moderna de Wuhan propuso establecer ejes de desarrollo logístico sinérgico a lo largo de los corredores de desarrollo urbano Wu-E-Huang-Huang, Han-Xiao, Wu-Xian y Wu-Xian-Tian-Qian (Wu-Xian), y profundizar vínculos regionales y desarrollo en cascada entre nodos logísticos a lo largo de estos ejes. Sin embargo, la implementación de planes y proyectos de construcción ha expuesto deficiencias tales como mala conectividad entre nodos de hubs logísticos, redes de transporte interurbanos incompletas, infraestructura logística inadecuada y planificación desequilibrada de recursos logísticos — reflejando inmadurez en la comprensión de patrones de desarrollo del espacio logístico a escala metropolitana.

La asignación regional de recursos y el diseño de factores basados en características de actividades logísticas se han convertido cada vez más en un tema de alta atención en la investigación de planificación. En términos de datos, estudios anteriores se basaban principalmente en encuestas Origen-Destino (OD) y recolección de cuestionarios (preferencia revelada, RP), así como censos de población y encuestas de viaje, para identificar nodos de carga clave [4-6]. Investigaciones posteriores han dependido en gran medida de datos GPS de camiones [7], datos de peajes [8], datos de flujo de tráfico [9] y datos de encuesta de campo de visitas a tiendas Taobao [10], haciendo posible mapear la estructura topológica y la distribución de flujo de tráfico de redes logísticas regionales a gran escala [11-12]. Metodológicamente, la mayoría de los estudios han utilizado provincias, ciudades o distritos/condados como unidades estadísticas, con investigación empírica enfocada principalmente en el nivel nacional [13-14], escalas provinciales [8] y aglomeraciones urbanas [15]. Métodos de análisis de redes sociales han sido ampliamente empleados, enfocándose en indicadores clave como densidad de red, fuerza de conexión y coeficiente de variación [16-17]. En términos de contenido, el mapeo de la estructura espacial de redes logísticas regionales sigue siendo el trabajo central; algunos estudios también han explorado la aplicación de la teoría hub-and-spoke en la reducción de costos globales y la aceleración de la coordinación de nodos logísticos regionales [18-19]. Otros han examinado redes logísticas transfronterizas en zonas de transición interurbanas, investigando el «efecto decaimiento de distancia — efecto de frontera» en la evolución de redes [18]. En general, la investigación existente ha acumulado experiencia valiosa en técnicas de análisis cuantitativo; sin embargo, análisis estadísticos basados en escalas de distritos administrativos no pueden capturar con precisión el gran volumen de actividades logísticas que ocurren dentro de parques industriales y parques logísticos, ni reflejar patrones de viaje reales de camiones en espacio físico. Por lo tanto, existe la necesidad de introducir unidades de cuadrícula de mayor precisión para mejorar la fiabilidad de resultados analíticos y la validez de conclusiones [20-21].

Considerando esto, este estudio emplea celdas de cuadrícula de 2 km × 2 km para medir patrones de distribución espacial de actividades logísticas de diferentes tipos de camiones en el área metropolitana de Wuhan, integra técnicas de agrupamiento espacial para identificar unidades espaciales logísticas regionales, y utiliza análisis de redes sociales para caracterizar la estructura de conectividad y relaciones de comunidad de la red logística, guiando así la optimización de la estructura espacial logística regional del área metropolitana de Wuhan.

1. Datos de Investigación y Métodos

1.1 Alcance de la Investigación

El Plan de Desarrollo del Área Metropolitana de Wuhan fue oficialmente aprobado por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma en 2022. Dado que sus límites no han sido publicados oficialmente, las nueve ciudades cubiertas por el Plan de Acción Trienal (2023-2025) del área metropolitana de Wuhan fueron seleccionadas como alcance de investigación: Wuhan, Ezhou, Huangshi, Huanggang, Xiaogan, Xianning, Xiantao, Tianmen y Qianjiang. El patrón de desarrollo no equilibrado de «núcleo fuerte — hinterland débil» en el área metropolitana de Wuhan, junto con la disparidad significativa en densidad económica y niveles de infraestructura entre ciudades miembros, proporciona un laboratorio ideal para medir efectos de «sifón — derrame» de la red logística regional.

1.2 Ventajas de los Datos

Los datos de navegación de camiones utilizados en este estudio son proporcionados por AutoNavi (Gaode) Software Co., Ltd., con tres ventajas principales:

① Reflexión más auténtica y precisa de orígenes y destinos reales de viajes. A diferencia de datos GPS de camiones, que están sujetos a estacionamientos técnicos, interrupciones de señal y brechas de cobertura bajo puentes o en áreas montañosas remotas (conduciendo a interrupciones de cadenas OD y falsos puntos de escala), datos de navegación de camiones son generados por solicitudes de navegación activas de usuarios y no son afectados por tales interferencias. Además, usuarios de navegación Gaode para camiones representan aproximadamente 40% de todos los usuarios de camiones, garantizando fiabilidad de datos. La proporción de pares OD de viajes de camiones con orígenes y destinos relativamente estables dentro de un solo día en el área metropolitana de Wuhan alcanza hasta 75%, lo que facilita la captura completa y continua de patrones de viaje recurrentes de alta frecuencia y ciclo corto de camiones.

② Información de clasificación de tamaños de camiones más detallada. Estudios convencionales suelen usar datos de viaje de camiones que exceden 12 toneladas (como datos de departamentos de transporte para monitoreo de camiones pesados) como proxy, lo cual no puede representar actividades logísticas de camiones medianos, pequeños y microcamiones [21]. Los datos de navegación de camiones recolectados en este estudio incluyen parámetros clave como tipo de camión, longitud, ancho y peso del vehículo, permitiendo una caracterización más completa y equilibrada de condiciones de funcionamiento de diferentes tipos de vehículos de carga.

③ Considerando restricciones de costo, datos fueron recolectados del 10 al 17 de abril de 2023. Primero, viajes que comenzaron dentro del área metropolitana de Wuhan fueron filtrados, obteniendo más de 1,44 millones de registros OD iniciales. Segundo, siguiendo JIAO Hongzan et al. [20], pares OD de viajes de camiones con coordenadas de origen y destino dentro del área metropolitana fueron extraídos para reflejar científicamente la estructura de la red logística regional. Tercero, puntos de coordenadas anormales fueron limpiados (eliminando datos con desplazamientos de coordenadas, distorsiones de velocidad e información de campo incompleta), y viajes anormales fueron limpiados (eliminando viajes con distancia de ruta OD < 500 m). Finalmente, 780.229 registros OD válidos de viajes de camiones fueron extraídos, de los cuales aproximadamente 56% eran registros de viajes de camiones pesados y aproximadamente 44% provenían de camiones medianos, pequeños y microcamiones. Cada registro de viaje incluye 8 campos: identificación de vehículo, fecha

de viaje, coordenadas de origen, coordenadas de destino, tipo de camión, distancia de ruta OD, y otros.

1.3 Métodos de Investigación

(1) Método de agrupamiento K-means

Calculando la similitud de volúmenes de actividad logística integral entre celdas de cuadrícula, todas las cuadrículas son particionadas en K clusters, y unidades espaciales logísticas regionales son identificadas basándose en diferencias inter-cluster en volumen de actividad logística integral. La estadística pseudo-F se utiliza para determinar el número óptimo de clusters para unidades espaciales logísticas del área metropolitana de Wuhan. La fórmula de cálculo es:

$$F = [SSW/(N-K)] / [SSB/(K-1)]$$

donde SSW es la suma de cuadrados intra-cluster, representando similitud de datos dentro del mismo cluster; SSB es la suma de cuadrados inter-cluster, reflejando diferencias de datos entre clusters; N es el número total de muestras; y K es el número de clusters. Una estadística pseudo-F más alta indica una medida más válida del grado de similitud inter-cluster y diferenciación intra-cluster.

(2) Análisis de redes sociales (SNA)

Indicadores incluyendo densidad de red, coeficiente de variación, coeficiente de agrupamiento promedio y fuerza de conexión son seleccionados para caracterizar la estructura de conectividad de la red logística regional del área metropolitana de Wuhan. Los «nodos» en la red social son traducidos como «unidades espaciales logísticas» en este estudio. Los indicadores clave y sus métodos de medición son los siguientes.

① La fuerza de conexión (F) refleja el nivel de interacción entre unidades espaciales logísticas. La fórmula de cálculo es:

$$F = F_{ij} + F_{ji} \quad (1)$$

donde F_{ij} representa el volumen de actividad logística integral de la unidad i hacia la unidad j. Una fuerza de conexión más alta indica interacción logística más intensa entre las dos unidades.

② La densidad de red (D) mide el nivel general de conectividad de la red, calculada como la proporción del número de conexiones existentes al número total de conexiones posibles. La fórmula de cálculo es:

$$D = E / [N \times (N-1) / 2] \quad (2)$$

donde E es el número de aristas (conexiones) en la red y N es el número de nodos (unidades espaciales logísticas).

③ El coeficiente de variación (CV) evalúa el grado de disparidad en la distribución de fuerzas de conexión. La fórmula de cálculo es:

$$CV = \sigma / \mu \quad (3)$$

donde σ es la desviación estándar de fuerzas de conexión y μ es el promedio de fuerzas de conexión. Un CV más alto indica disparidad mayor en la conectividad entre unidades.

④ El coeficiente de agrupamiento promedio (C) mide la tendencia de nodos vecinos de un nodo dado a formar clusters. La fórmula de cálculo es:

$$C = (1/N) \times \sum_i [(2E_i) / (k_i \times (k_i - 1))] \quad (4)$$

donde E_i es el número de aristas conectando los k_i vecinos del nodo i. Un coeficiente de agrupamiento más alto indica una estructura de red más local y más jerárquica.

(3) Algoritmo de Leiden

Este algoritmo se utiliza para detectar comunidades logísticas en la red. A diferencia del algoritmo de Louvain tradicional, el algoritmo de Leiden ofrece mejor resolución y garantiza que todas las comunidades estén bien conectadas, evitando comunidades desconectadas potencialmente generadas por el algoritmo de Louvain [22]. El proceso de detección de comunidades comprende cuatro pasos: movimiento local de nodos, refinamiento de comunidades, agregación de nodos e iteración hasta convergencia.

2. Resultados y Análisis

2.1 Patrones Espaciales de Actividades Logísticas

2.1.1 Patrón espacial de las actividades de camiones pesados

Se calculó el número total de viajes de camiones pesados dentro de cada celda de la red durante el período de recopilación de datos (en unidades de vehículos). Los resultados muestran que el número de redes con valores distintos de cero es de 11.809 (58,4% de todas las células de la red), con un volumen medio de viaje de camiones pesados de 84 y un coeficiente de variación de 3,3, lo que indica que las actividades de camiones pesados tienen una amplia distribución geográfica y diferencias significativas en el nivel de energía.

El análisis espacial revela que las actividades de camiones pesados en el área metropolitana muestran un patrón de "concentración en áreas centrales para operaciones, con dispersión a parques periféricos y zonas portuarias". Las raras 78 células de red de alto valor (definidas como redes con volumen de viaje de camiones > 1.304, lo que representa el 0,7%) se encuentran en 10 regiones importantes, con efectos sifónicos prominentes. Entre ellos, el Clúster Industrial de Circulación Moderna de Cihui-Zoumaling es el núcleo de la organización logística regional para camiones pesados, realizando funciones de recogida, distribución y transbordo de carga de alta intensidad (ver ① en la figura 1). Cerca de la Tercera Ruta Anular de Wuhan y radiando hacia fuera a través de autopistas, se han formado varias zonas de aglomeración de actividad de camiones pesados contiguas (ver ②③④⑥⑧ en la figura 1). El Parque Industrial de Economía Circular de Piedra Central Macheng, el Puerto Yangluo, la Zona de Alta Tecnología del Lago Daye y la Zona de Desarrollo Gedian también sirven como centros principales para las actividades de camiones pesados (ver ⑤⑦⑨⑩ en la figura 1).



Fig.1 Patrón espacial de las actividades de camiones pesados en el área metropolitana de Wuhan

2.1.2 Patrón espacial de actividades medianas, pequeñas y micro-camiones

Utilizando un método similar, se calculó el volumen total de viaje de camiones medianos, pequeños y micro dentro de cada célula de la red. Los resultados muestran que el número de redes con valores distintos de cero es de 12.412 (61,3% de todas las células de la red), con un volumen medio de viaje de 72 y un coeficiente de variación de 4,0, lo que indica que los camiones medianos, pequeños y micro tienen un rango de actividad más amplio dentro del área metropolitana, mayores diferencias regionales, pero menores volúmenes medios de viaje en comparación con los camiones pesados.

El análisis espacial revela que las actividades medianas, pequeñas y micro-camiones en el área metropolitana muestran un patrón de "fuerte atracción del núcleo, aglomeración sectorial de la zona metropolitana, dispersión fragmentada periférica". Hay 68 células de red de alto valor (definidas como redes con volumen de viaje de camiones > 1.304, lo que representa un 0,5%, menos que los camiones pesados), concentradas principalmente en el Clúster Industrial de Circulación Moderna Cihui-Zoumaling, la Zona de Logística Comercial Hankoubei y la Zona de Logística de la Cadena de Frío de Baishazhou. El área de Cihui-Zoumaling, que sirve como núcleo de organización logística para camiones pesados, también ha demostrado ser el centro cuantitativo de actividades de camiones medianos, pequeños y micro con un efecto polarizador aún más significativo. El negocio de "adquisición-distribución" de alta frecuencia de comercio de pequeñas materias primas y venta al por mayor en Hankoubei y empresas de distribución de cadena de frío / alimentos congelados en Baishazhou genera múltiples demandas de transporte de lotes pequeños para camiones medianos, pequeños y micro. Además, la principal zona urbana de Wuhan, con su población residencial concentrada, un próspero mercado de consumo y una densa red de carreteras urbanas, está casi completamente cubierta por actividades de camiones medianos, pequeños y micro (Fig. 2).

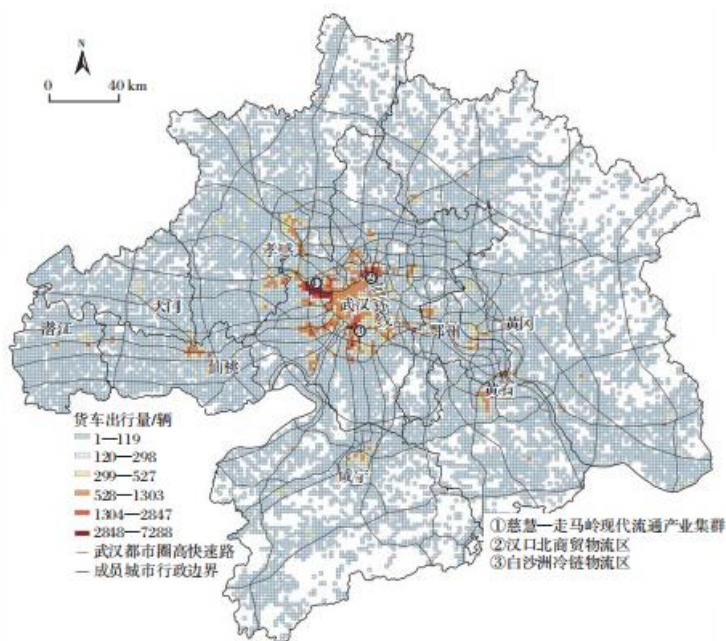


Fig.2 Patrón espacial de las actividades de camiones medianos, pequeños y micro en el área metropolitana de Wuhan

2.1.3 Patrón espacial general de las actividades logísticas del área metropolitana

Las actividades logísticas diarias en el área metropolitana son llevadas conjuntamente por camiones de diferentes capacidades y características operativas. Para reflejar con más precisión la escala real de actividad y la intensidad del viaje, este estudio hace referencia al enfoque de Liu Xinxuan et al. para la relación entre los tipos de camiones y los volúmenes de carga [17-18], integrando conjuntos de datos de camiones pesados y camiones medianos, pequeños y micro, utilizando el peso del vehículo como factor de ponderación [17-18], y sumando el volumen integral de actividad logística para cada célula de la red. Los resultados muestran que el número total de redes con valores distintos de cero es de 13.990 (69,1%), con un volumen medio de actividad logística integral de 1.152, un valor máximo de 119.295 y valores extremadamente altos (kurtosis = 346). Mapeadas en la estructura territorial, las actividades logísticas a escala metropolitana exhiben un patrón espacial general de "aglomeración de carga dominada por centros, impulsada por el desarrollo de recursos". La formación y el crecimiento de centros están impulsados por múltiples factores, incluidos el transporte, la industria y el consumo; Los volúmenes relativamente altos de actividad logística en Macheng (materiales de piedra) y Huangshi (mineral de cobre) reflejan la atracción espacial de las actividades de extracción, procesamiento, almacenamiento y comercio de recursos en el transporte logístico regional.

2.2 Identificación de Unidades Espaciales Logísticas

Utilizando el método de agrupación de medios K, se calculó la similitud de los valores de volumen de actividad logística integral entre las redes a través del área metropolitana para identificar automáticamente regiones con características de flujo consistentes. Los resultados muestran que cuando el número de clústeres es 6, la estadística pseudo-F se maximiza y la diferencia entre clústeres en el volumen de actividad logística integral es mayor (las medias son 248, 1.619, 3.542, 17.212, 35.583, 87.565, respectivamente). En consecuencia, basándose en ArcGIS, las seis categorías de células de red se sometieron a la redivisión y fusión de parches espaciales, haciendo referencia al sistema de transporte y al contenido integral del centro logístico del Plan de Desarrollo del Área Metropolitana de Wuhan, al sistema de área funcional principal del plan espacial del área metropolitana y a los planes maestros espaciales territoriales nacionales y a los estudios de serie de desarrollo de alta calidad de los clústeres urbanos e industriales provinciales de cada ciudad miembro. Finalmente, se identificaron 122 unidades espaciales logísticas de área metropolitana (Fig. 3), con un área unitaria promedio de aproximadamente 20,3 km². Observando la ubicación geográfica de las unidades espaciales logísticas, se resumieron cuatro funciones típicas: funciones de servicio de centros logísticos (6), funciones de servicio de parques industriales (86), funciones de servicio de parques logísticos (17) y funciones de servicio de transbordo y distribución (11). Además, algunas áreas de servicio de autopistas muestran potencial para desarrollarse en unidades espaciales logísticas.

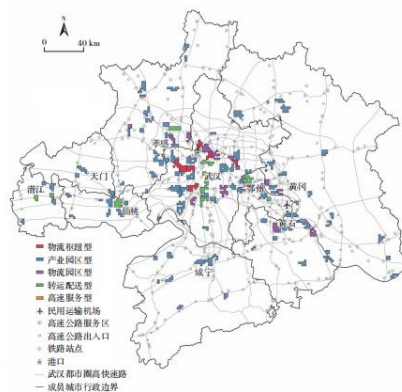


Fig.3 Distribución espacial de 122 unidades logísticas en el área metropolitana de Wuhan

Basándose en el atlas actual y planificado del uso de la tierra del Área Metropolitana de Wuhan compilado por el equipo de investigación, las 122 unidades espaciales logísticas se superponieron y analizaron con tierras industriales, tierras logísticas y de almacenamiento, tierras portuarias y redes de autopistas para examinar la compatibilidad espacial. Se encontró que cinco unidades espaciales logísticas eran altamente compatibles con las intenciones de planificación. Las unidades espaciales logísticas formadas en la Zona de Alta Tecnología de Xiantao y la Zona Industrial de Automotriz y Piezas de Zhuankou se alinean con la orientación de planificación del área metropolitana hacia el desarrollo de la fabricación automotriz inteligente. La Zona Logística Comercial de Hankoubei apoya el posicionamiento regional de "construir un centro logístico comercial modernizado". Las unidades espaciales logísticas que sirven a la Zona de Fabricación de Industria Pesada de Yangluo y la Zona de Alta Tecnología del Lago Daye han ejercido funciones de aglomeración de carga y radiación confiando en el puerto principal de clase cien millones de toneladas y los ferrocarriles troncales de alto volumen. Sin embargo, también se encontró que cuatro unidades espaciales logísticas no eran totalmente compatibles con los planes actuales: por ejemplo, el uso planificado de la tierra en el Parque Industrial Urbano de Dijiao y la Zona Logística de la Cadena de Frío de Baishazhou sigue siendo principalmente tierra de servicios industriales, residenciales y comerciales, careciendo de suministro espacial para funciones de distribución y transbordo de logística de alta frecuencia; Otro ejemplo es que los planes para la Zona de Fabricación de Equipos de Miaoshan y la Zona de Desarrollo Económico de la Estación de Ferrocarril de Huangzhou no tienen suficiente reserva y organización de carreteras de carga dentro de estas unidades, particularmente careciendo de carreteras pesadas y canales dedicados necesarios para el transporte a gran escala.

3 Características de la estructura de conectividad de la red logística regional en el área metropolitana de Wuhan

3.1 Características de la estructura del nodo de red

La red logística regional del Área Metropolitana de Wuhan exhibe un pronunciado "efecto Mateo", con conexiones logísticas de alto volumen fuertemente dominadas por un pequeño número de nodos (es decir, unidades espaciales logísticas). Las estructuras de entrelazamiento de radiación multidireccional y red transurbana también son muy distintas (figura 4).

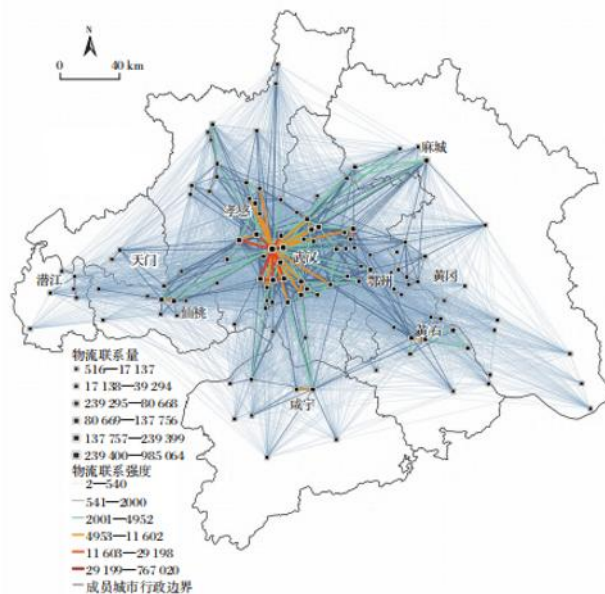


Fig.4 Estructura de la asociación de red logística en el área metropolitana de Wuhan basada en unidades espaciales logísticas

Las mediciones de la densidad de la red y el coeficiente medio de agrupación muestran que la compactez de la estructura de la red logística del área metropolitana alcanza un nivel medio a alto (valor de densidad = 0,691, coeficiente de agrupación = 0,801), lo que indica que cientos de unidades espaciales logísticas tienden a formar relaciones más estrechas.

Sin embargo, las relaciones de red aparentemente estrechas no están espacialmente equilibradas. El análisis estadístico del volumen de conexión logística de cada unidad espacial logística muestra que: el volumen medio de conexión logística de las 122 unidades es de 39.536 con un coeficiente de variación de 2,37; el 5% superior de las unidades espaciales logísticas en términos de volumen de conexión número 7, y aquellos en el rango 5%-10% número 6. Entre ellos, un pequeño número de unidades espaciales logísticas como el Clúster Industrial de Circulación Moderna Cihui-Zoumaling, la Zona Logística de Cadena de Frío de Baishazhou y la Zona de Fabricación de Industria Pesada de Yangluo constituyen centros de red y desempeñan papeles dominantes. El Clúster Industrial de Circulación Moderna Cihui-Zoumaling es el supercentro logístico que domina toda la red, mientras que las unidades periféricas tienen una débil influencia en la estructura de la red.

El cálculo de las fuerzas de conexión entre nodos revela que: se generan 4.971 líneas de conexión entre las 122 unidades, con una fuerza de conexión logística media de 295 pero un coeficiente de variación que alcanza hasta 5,1, lo que refleja una estructura caracterizada por un fuerte desequilibrio y conexiones débiles. Entre las 115 líneas de conexión logística con valores de fuerza de conexión superiores a 2.000, 26 cruzan los límites administrativos municipales, convergiendo en cuatro corredores relacionados con la logística direccional del área metropolitana (dirección Wuhan-Xiaogan, dirección Wuhan-Macheng, dirección Wuhan-Xianning y dirección Wuhan-Xiantao).

3.2 Características de la estructura comunitaria de la red

3.2.1 Distribución espacial de cinco comunidades relacionadas con la logística

El algoritmo de detección de la comunidad de Leiden se utilizó para revelar la estructura comunitaria de la red logística del área metropolitana. El algoritmo iteró 10 veces con una modularidad media de 0,426, identificando en última instancia cinco comunidades relacionadas con la logística: Han-Xiao, E-Huang-Huang, Wu-Ma, Xian-Tian-Qian y Wu-Xian (Fig. 5), con un área territorial media de 11.659 km². Entre ellos, las comunidades Han-Xiao, Wu-Ma y Wu-Xian han cruzado los límites administrativos de Wuhan, y dentro de Wuhan se han diferenciado en tres regiones con esferas de influencia logística relativamente equilibradas, confirmando indirectamente la base científica de la propuesta del Plan para construir ejes de desarrollo de sinergia logística regional Han-Xiao y Wu-Xian.



Fig.5 Distribución espacial de cinco comunidades relacionadas con la logística en el área metropolitana de Wuhan.

3.2.2 Conexiones entre Unidades Espaciales Logísticas dentro de Comunidades

Aunque el número de unidades espaciales logísticas entre las cinco comunidades es relativamente igual, los volúmenes de conexión logística varían significativamente (Tabla 1). Los datos estadísticos y el análisis espacial muestran que la comunidad Han-Xiao presenta un patrón de radiación unipolar en la estructura de la red logística (coeficiente de variación del volumen de conexión logística que alcanza 1.595). El Clúster Industrial de Circulación Moderna Cihui-Zoumaling ejerce un control extremadamente fuerte sobre esta comunidad, formando tres corredores logísticos comunitarios que irradian a la Zona de Desarrollo Económico Hanchuan, el Parque Industrial de Aviación General y Satélite Hannan y la Zona Nacional de Alta Tecnología Xiaogan como nodos auxiliares. La comunidad de Wu-Ma tiene la densidad de red más alta (0,968) y el coeficiente de variación más bajo (0,735), formando una distribución multicéntrica y equilibrada de las actividades logísticas. Dos corredores logísticos comunitarios conectan el Puerto de Yangluo y la Zona de Desarrollo Económico de Hong'an, y el Parque Industrial de Economía Circular de Piedra Central Macheng, respectivamente. El corredor que conecta la Zona de Desarrollo Económico de Luotian y el

Parque Industrial adyacente al Puerto de Tuanfeng ha comenzado a emerger. La estructura de asociación logística interna de la comunidad de Wu-Xian se caracteriza por características de larga distancia, corredor único y doble extremo (Parque Industrial de Salud del Valle de la Óptica Sur Zona de Alta Tecnología de Xianning), que puede estar relacionada con la división de la cadena de trabajo en la industria de la salud con I+D en Wuhan y fabricación en Xianning. La comunidad E-Huang-Huang exhibe baja densidad de red y alto coeficiente de características de variación, con alta dependencia de ciertas unidades espaciales logísticas individuales como la Zona de Desarrollo de Huangshi, dando lugar a un corredor logístico vertical-río y un corredor logístico ribereño con el Nuevo Puerto de Huangshi y la Zona de Desarrollo de Gedian como puntos finales. La comunidad Xian-Tian-Qian presenta una estructura triangular relacionada con la logística "dirigida por la Zona de Alta Tecnología de Xiantao, complementada por la Zona de Alta Tecnología de Tianmen y la Zona de Alta Tecnología de Qianjiang", con características de introversión de red prominentes.

Cuadro 1 Comparación del número total de enlaces logísticos e indicadores de la estructura de la red de cinco comunidades relacionadas con la logística

衡量指标	汉孝社区	武麻社区	鄂黄黄社区	武咸社区	仙天潜社区
单元间物流联系量的平均值	31 731	11 655	6844	8895	4846
单元内物流联系量的极大值	283 810	31 356	30 286	26 547	16 259
单元间物流联系量的极小值	2371	2830	191	1100	956
网络密度	0.934	0.968	0.795	0.926	0.941
网络变异系数	1.595	0.735	0.971	0.877	0.852
网络平均聚类系数	0.946	0.969	0.890	0.938	0.944

3.2.3 Fortaleza de las conexiones logísticas de transporte transcomunitario

Se calculó el volumen de conexiones de carga logística entre dos comunidades y se tabuló la proporción de la logística de carga intercomunitaria al volumen total de conexiones de carga de la comunidad. Los resultados muestran que la proporción de carga entre comunidades de la comunidad de Wu-Ma (35,4%) es significativamente mayor que otras comunidades, lo que demuestra características distintivas de actividad logística orientada hacia el exterior. La proporción de carga intercomunitaria de la comunidad de E-Huang-Huang (29,8%) es ligeramente menor que la de la comunidad de Wu-Ma, en parte porque los puertos y los ferrocarriles desvían la dependencia del transporte de carga por carretera. Las comunidades Han-Xiao y Wu-Xian muestran una fuerte adhesividad de la actividad logística interna, con proporciones de viajes de camiones de salida tan bajas como el 27,4% y el 26,7%, respectivamente. La comunidad de Xian-Tian-Qian tiene la proporción más baja de flujo de carga entre comunidades (menos del 20%), con el mayor grado de cadenas de suministro internas de bucle cerrado.

4 "Mejora de centros, desarrollo de corredores y reorganización comunitaria" Estrategias de optimización para la red logística del área metropolitana de Wuhan

4.1 Problemas y objetivos políticos en el desarrollo y planificación de la red logística

En primer lugar, las unidades espaciales logísticas están dispersas y fragmentadas, con un diseño de función de centro deficiente y desequilibrado, y la construcción sistemática de nodos logísticos de área metropolitana sigue siendo poco sólida. En segundo lugar, la policentricidad y la conectividad multidireccional de la red logística son insuficientes; el efecto de difusión de las ciudades centrales no se ha realizado plenamente, y la participación e influencia de los distritos/condados periféricos y periféricos son muy bajas. El nivel de red

de los corredores de conexión logística necesita mejorarse urgentemente: la dirección Wu-E-Huang-Huang tiene una ruptura de sección media en las conexiones logísticas, la dirección Wu-Xian-Tian-Qian aún no ha formado un corredor regional continuo, y los puntos ciegos del corredor logístico terrestre han sido expuestos en el norte de Han-Xiao, la ribera del río Xianning, el centro-norte de Hong'an, el Área de Base Revolucionaria de la Montaña Dabie y otras regiones. Es necesario complementar los corredores logísticos fluviales y transfluviales hacia el este y coordinar un corredor circular metropolitano que conecte a todas las ciudades miembros. Tercero, la capacidad de agrupación local y sinergia cercana al dominio de la red logística es imperfecta; La brecha de volumen de conexión logística entre las cinco comunidades relacionadas con la logística necesita ser reducida, la asignación de infraestructura equilibrada entre las comunidades y las barreras de conexión logística introvertidas como las islas como las de la comunidad Xian-Tian-Qian. En cuarto lugar, es necesario reforzar la compatibilidad de planificación de algunas unidades espaciales logísticas.

Para abordar los problemas antes mencionados, aprovechando y aprendiendo de las excelentes prácticas de las áreas metropolitanas de la región central en la construcción de sistemas logísticos modernizados, y reconociendo que las jerarquías de centros científicos, los corredores logísticos eficientes y los mecanismos de sinergia profunda son palancas eficaces para mejorar la eficiencia logística regional, este estudio - combinando la orientación estratégica del Plan que guía la construcción de la misma urbanización, junto con las consideraciones de diseño espacial de transporte y logística moderna de las nueve ciudades miembros - propone la estrategia de optimización de la red logística de "mejora de centros, desarrollo de corredores y reorganización comunitaria" (Fig. 6). Basándose en los hallazgos empíricos de este estudio, la estrategia consolida y posee los efectos polarizantes del Clúster Industrial de Circulación Moderna Cihui-Zoumaling, la Zona de Logística Comercial Hankoubei y otros centros de carga integrales, establece 7 centros logísticos a nivel de área metropolitana, incluyendo el Puerto Terrestre de Wujiashan y el Aeropuerto de Huahu, promueve el transporte multimodal que integra carretera, ferrocarril, agua y aire; Construye centros logísticos a nivel comunitario que dependen de la Zona de Desarrollo Económico de Gedian, la Zona de Desarrollo Económico de Macheng y otros, estableciendo 5 bases importantes de recolección y distribución de recursos a nivel comunitario; expande los nodos logísticos de tipo parque industrial dentro de grandes aglomeraciones industriales como la Base de Memoria Nacional y la Zona de Alta Tecnología de Xianning para complementar las instalaciones logísticas de producción y servicios; fortalece los nodos de tipo parque logístico, como la integración de recursos de la empresa logística dentro del parque logístico adyacente al aeropuerto de Huangpi y la ciudad nueva adyacente al aeropuerto de Xiaogan, para planificar razonablemente las zonas de distribución urbana y las zonas de operación logística transfronteriza; incorpora nodos logísticos de transbordo y distribución en la Base Logística de la Cadena de Frío de Baishazhou y la Zona Nacional de Alta Tecnología de Xiaogan, centrándose en la recolección, distribución y asignación de productos terminados y materias primas, desplegando instalaciones de clasificación inteligentes y personalizadas; y valora la capacidad de apoyo de las áreas de servicio de autopistas para estacionamiento regional de vehículos de transporte, descarga y servicios de personal.

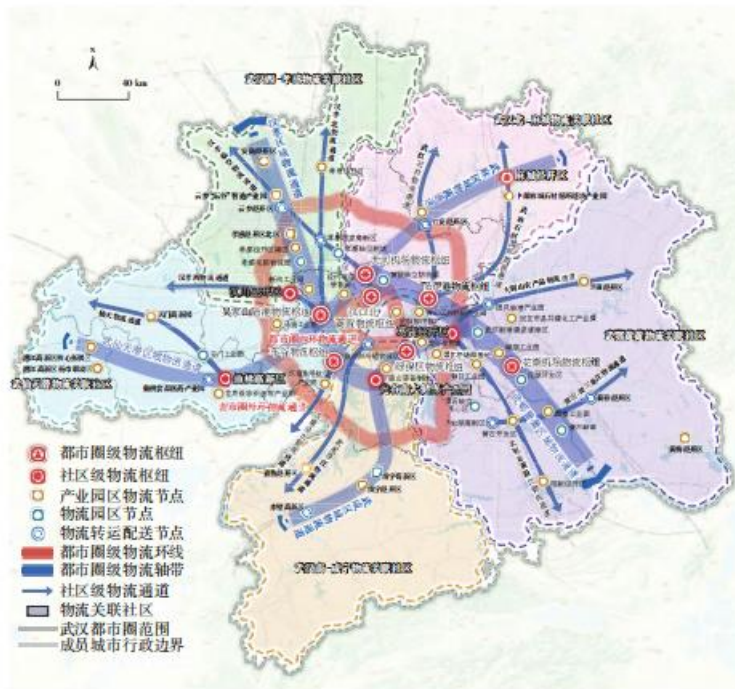


Fig.6 Plan de optimización propuesto para la estructura espacial logística del Área Metropolitana de Wuhan

4.2 Fortalecimiento de centros logísticos regionales de dos niveles y refinamiento de la construcción de nodos funcionales

Consolidando las 6 unidades espaciales logísticas de tipo centro en la figura 3, y respondiendo a los requisitos del plan nacional de optimización del diseño del centro logístico de 2025, estableciendo principios de promoción del equilibrio territorial y de conformidad con los impulsores de la política local, se construye el sistema de instalaciones logísticas de "centros de dos niveles + tres tipos de nodos" de la zona metropolitana: fortalecimiento de 7 centros logísticos a nivel de área metropolitana, incluido el puerto terrestre de Wujiashan y el aeropuerto de Huahu, promoviendo la integración del transporte de mercancías por carretera y el transporte multimodal de "ferrocarril-agua-aire"; Construir cinco bases importantes de recolección y distribución de recursos a nivel comunitario; expandir los nodos logísticos de tipo parque industrial dentro de grandes aglomeraciones industriales como la Base de Memoria Nacional y la Zona de Alta Tecnología de Xianning para complementar las instalaciones logísticas de producción y servicios; fortalecer los nodos de tipo parque logístico, como la integración de recursos de la empresa logística dentro del parque logístico adyacente al aeropuerto de Huangpi y la ciudad nueva adyacente al aeropuerto de Xiaogan, para planificar razonablemente las zonas de distribución urbana y las zonas de operación logística transfronteriza; incorporar nodos logísticos de transbordo y distribución en la Base Logística de la Cadena de Frío de Baishazhou y la Zona Nacional de Alta Tecnología de Xiaogan, centrándose en la recolección, distribución y asignación de productos terminados y materias primas, desplegando instalaciones de clasificación inteligentes y personalizadas; y priorizar la capacidad de apoyo de las áreas de servicio de autopistas para estacionamiento regional de vehículos de transporte, descarga y servicios de personal.

4.3 Actualización de la red de corredores logísticos del área metropolitana y ampliación de los canales de flujo comunitario

Basándose en el análisis y la comprensión de los resultados empíricos, demostrando los efectos de absorción y tracción de la Tercera Ruta Anular de Wuhan y las autopistas radiales, conformándose a las tendencias lineales formadas por varias unidades espaciales logísticas en la figura 3, y solidificando la estructura de la red logística, se mejoran las formas de corredor Han-Xiao, Wu-Ma, Wu-Xian y Wu-Xian identificadas. Siguiendo los principios de interpenetración, entrelazamiento, solidificación de la red, efectos de radiación mejorados, asistencia a la integración periférica en el círculo metropolitano y promoción de la integración intercomunitaria, se establece el sistema de corredores de transporte de mercancías por carretera "doble anillo + eje de red + multi-radial" del área metropolitana.

Construcción de una doble circunvalación logística interna y externa a nivel de área metropolitana: Actualización de la tercera circunvalación de Wuhan, agregando carriles dedicados a la logística inteligente para formar una circunvalación interna de carga por carretera. Acelerar la terminación de la autopista de anillo del área metropolitana, pre-controlar las áreas de servicios logísticos inteligentes y montar una carretera de anillo exterior de carga.

Conexión de corredores de eje logístico en forma de rejilla a nivel de área metropolitana: Agrupación de líneas troncales de transporte nacional que pasan por el área y las autopistas de la columna vertebral metropolitana, cruce y soporte a todos los centros logísticos, conexión de tantos nodos logísticos como sea posible y enfoque en la construcción de cinco corredores transurbanos: Wu-E-Huang-Huang, Han-Xiao, Wu-Ma, Wu-Xian y Wu-Xian-Tian-Qian.

Corredores logísticos radiales equilibrados a nivel comunitario: Utilizando centros y nodos como orígenes, complementando las rutas de área agrícola montañosa y conectadas a puertos por ríos verticales dentro de cada comunidad relacionada con la logística. Los ejemplos incluyen los corredores Wu-Hong y Wu-Ma para el transporte de materiales de piedra, la montaña Dabie y los corredores Han-Xiao del norte para la circulación de productos agrícolas y forestales, el corredor Xian-Tian y el corredor Han-Xiao occidental para la fabricación de prendas de vestir / textiles y equipos, y otros.

4.4 Reconstrucción transfronteriza de comunidades relacionadas con la logística y mejora de la resiliencia estructural del clúster

Utilizando las cinco estructuras comunitarias reveladas en la figura 5 como una base cognitiva, adaptando al alcance de radiación de los nodos hub logísticos planificados y el rango de potencial de servicio bilateral de los corredores logísticos de la columna vertebral, siguiendo el modelo de disposición espacial industrial "núcleo + cinturón de eje" de áreas metropolitanas en crecimiento [23], se construye un patrón de organización comunitaria interregional relacionado con la logística.

Acelerar la integración de la comunidad relacionada con la logística de Wuhan West-Xiaogan: Coordinar las fuentes de radiación de doble centro de "Puerto Terrestre de Wujiashan + Zona de Desarrollo Económico de Hanchuan", expandiéndose para formar una estructura de corredor intermodal "8" en forma de agua-tierra-aire, adyacente al puerto, que conecta la montaña, destacando las funciones de servicio logístico compuesto de tipo parque industrial y distribución de transbordo de la Zona de Desarrollo Económico de Hong'an.

Acelerar la comunidad relacionada con la logística de Wuhan Norte-Macheng: Unir las cuatro

fuentes de radiación del centro de "Puerto Yangluo + Aeropuerto Tianhe + Hankoubei + Zona de Desarrollo Económico Macheng", que se extiende para formar una estructura de corredor intermodal "8" en forma de agua-tierra-aire, adyacente al puerto, que conecta la montaña, destacando las funciones de servicio logístico compuesto de tipo parque industrial y distribución de transbordo de la Zona de Desarrollo Económico de Hong'an.

Mejorar y actualizar la comunidad relacionada con la logística de Wuhan Sur-Xianning: Confiar en las fuentes de radiación de doble centro de "Zona Conjunta Comprehensiva + Parque Industrial de Salud del Valle de la Óptica Sur", estabilizar el marco regional de transporte en forma de H, complementar los recursos de transbordo y distribución a la Zona de Alta Tecnología de Chibi y fortalecer la construcción funcional de tipo parque logístico en la Zona de Alta Tecnología de Xianning y otras áreas.

Expansión y construcción de la comunidad relacionada con la logística de Wu-E-Huang-Huang: Fortalecimiento de las fuentes de radiación de doble centro de "Aeropuerto Huahu + Zona de Desarrollo Económico Gedian", asegurando corredores principales en forma de rejilla "ribera del río + cruz del río" y expandiendo extraordinariamente las funciones logísticas de tipo completo que rodean el aeropuerto de Huahu de una manera circular y en capas.

Cultivar conjuntamente la comunidad relacionada con la logística de Wu-Xian-Tian-Qian: Asistir a las fuentes de radiación de doble centro de "Auto Valley + Xiantao High-Tech Zone", construir una estructura de corredor de transporte "en forma humana" y complementar servicios de parque logístico.

5 Conclusiones

Basado en los grandes datos de la navegación de camiones Gaode, este estudio analiza la red logística del Área Metropolitana de Wuhan, con las siguientes conclusiones clave: ① El patrón espacial regional de las actividades logísticas a menudo exhibe características del modelo como la dominación del centro, las operaciones aglomeradas, la distribución jerárquica y la dispersión periférica, pero las regiones de actividad de los camiones pesados y los camiones medianos, pequeños y micro muestran una diferenciación significativa; ② El Área Metropolitana de Wuhan ha formado 122 unidades espaciales logísticas, cuyas funciones están orientadas principalmente al servicio del parque, complementadas por funciones de transbordo-distribución y tipo de centro, con algunas unidades que muestran desviaciones de compatibilidad de planificación; ③ El "efecto Matthew" en las conexiones logísticas es prominente, con la red general dominada por un pequeño número de nodos de alto volumen como Cihui-Zoumaling, y varias comunidades logísticas secundarias con estructuras de conectividad internas y externas marcadamente diferentes emergiendo; ④ El desarrollo de la red logística del Área Metropolitana de Wuhan expone problemas como nodos fragmentados y desequilibrados, conectividad suelta y atrasada y coordinación insuficiente de los clústeres. La planificación debe seguir el enfoque de "mejora de centros, desarrollo de corredores y reorganización comunitaria", estableciendo una estructura espacial logística de "cinco tipos de instalaciones - siete corredores principales - cinco comunidades", optimizando el sistema de instalaciones logísticas de "centros de dos niveles, tres tipos de nodos" y el sistema de corredores de transporte de mercancías por carretera de "doble anillo, eje de red, multi-radial", y mejorando y fortaleciendo las funciones de servicio y la resiliencia estructural de las comunidades relacionadas.

Este estudio proporciona una nueva cadena metodológica de "minería de datos - medición

de patrones - identificación de unidades - análisis de redes - respuesta de planificación" para la planificación espacial logística moderna en las áreas metropolitanas chinas contemporáneas, con valor teórico y significado de demostración de aplicación para romper las barreras de "economías de distritos administrativos" y promover la integración logística regional. La investigación futura debería ampliar los ciclos de datos e integrar el transporte multimodal de "carretera-ferrocarril-agua-aire" para profundizar el estudio.

Referencias

- [1] WU Zhiqiang, LIU Xiaochang. Evolution of the Knowledge Network of Urban-Rural Planning in China Over 40 Years of Reform and Opening-Up [J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 11-18.
- [2] HUANG Jianzhong, HU Gangyu, SHI Jianing, et al. Strategic Reflections on Cross-Regional Major Infrastructure Planning and Construction in the New Era [J]. Urban Planning, 2025, 49(2): 119-130.
- [3] YE Zhenna. Construction and Application of an Urban Mobility Diagnosis Model [J/OL]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2023, 1(14): 18. [2025-08-19]. <https://doi.org/10.1007/s44243-023-00016-9>.
- [4] YU Z, WANG H, LIU X. Mobility heterogeneity of urban freight areas: geospatial evidence from shared logistics dynamics [J]. Journal of Transport Geography, 2024, 117: 103873.
- [5] NEUTENS T, DELAFONTAINE M, SCOTT D M, et al. A GIS-based method to identify spatiotemporal gaps in public service delivery [J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 253-264.
- [6] GAN Mi, QING Sandong, LIU Xiaobo, et al. Review of the Application of Truck Trajectory Data in Road Freight Transport [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 91-101.
- [7] LI Qiuping, JIA Jingnan, ZHANG Yunfei, et al. Analysis of Inter-City Freight Flow Characteristics Based on Freight Trajectory Data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(5): 84-88.
- [8] CHEN Z, WANG J, LI Y. Intercity connections by expressway in metropolitan areas: passenger vs. cargo flow [J]. Journal of Transport Geography, 2022, 98: 103272.
- [9] ZHU C S, WANG X, WANG D, et al. The spatial linkage of Taobao villages in China and the United States [J]. Journal of Transport Geography, 2021, 91: 102992.
- [10] MAOH H, DIMATULAC T, KHAN S, et al. Studying border crossing choice behavior of trucks moving between Ontario, Canada and Haining city based on the operation process [J/OL]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2023, 1(16): 19. [2025-08-19]. <https://doi.org/10.1007/s44243-023-00017-8>.
- [11] NIU Xinyi, LIN Shijia. Spatiotemporal Big Data in Urban Planning Research: Technological Evolution, Research Topics, and Frontier Trends [J]. Urban Planning Forum, 2022(6): 50-57.
- [12] HU Yang, WANG De, REN Xiyuan, et al. Road Congestion Mechanisms and Strategies from the Perspective of Spatiotemporal Behavior: A Case Study of Shanghai Xiangyin Road Tunnel [J]. Urban Planning, 2024, 48(8): 55-66.
- [13] ZHAO Y, CHENG S, LIU K, et al. Intercity freight connections in China under the view of mass truck trajectories [J]. Cities, 2024, 150: 105034.
- [14] WU Siyu, ZHONG Yexi, LI Jianxin. Evolution and Spatial Correlation Characteristics of China's Inter-Provincial Railway Freight Network from 1990 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(10): 2548-2566.

- [15] WANG Qixuan, CHENG Yao. Measurement of Polycentricity of China's Urban Agglomerations Considering Internal and External Connections [J/OL]. *Frontiers of Urban and Rural Planning*, 2023, 1(19): 22. [2025-08-19]. <https://doi.org/10.1007/s44243-023-00023-w>.
- [16] XIAO Hongwei, ZHAO Min, ZHANG Jie, et al. Multi-Scale Spatial Correlation Analysis and Planning Topics of "New Cities" in the New Era: Taking Beijing, Shanghai, and Guangzhou as Examples [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(2): 32-39.
- [17] ZHANG Shangwu, PAN Xin. Strategic Reflections on Cross-Regional Major Infrastructure Planning and Construction in the New Era [J]. *Urban Planning*, 2021(2): 38-44.
- [18] DABLANC L. Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41(3): 280-285.
- [19] GAN Mi, QING Sandong, LIU Xiaobo, et al. Review of the Application of Truck Trajectory Data in Road Freight Transport [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5): 91-101.
- [20] JIAO Hongzan, YANG Faxing, XU Shasha, et al. Research on Optimization Strategies for Modern Urban Freight Logistics Spatial Layout: A Case Study of Wuhan [J]. *Shanghai Urban Planning*, 2023(2): 93-100.
- [21] ZHOU Huan, HUANG Jin, ZOU Xiao, et al. Urban Internal Logistics Connections and Network Structure from the Perspective of Flow Space: A Case Study of Shenzhen [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(10): 1917-1928.
- [22] CHENG Cheng, CHEN Wendong, MA Hongsheng, et al. A Method for Identifying Shared-Bike Activity Communities Based on the Leiden Algorithm: A Nanjing Case Study [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(2): 103-111.
- [23] YUAN Man, ZHANG Xuan, SHAN Zhuoran, et al. Industrial Spatial Organization Characteristics and Optimization Strategies of the Wuhan Metropolitan Area from the Perspective of Industrial Clusters [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 63-73.