

Tecnología de Planificación Digitalizada: Datos y Conocimiento

Niu Xinyi, Lin Shijia, Sang Tian, Zhang Xiaoke

Resumen: Con los paradigmas tecnológicos basados en datos y conocimiento como hilo conductor, se realiza una revisión sistemática de las categorías y tipos de tecnología de planificación digitalizada, identificando sus tendencias y desafíos en el horizonte. En base a una distinción clara entre las tecnologías digitales y las tecnologías de planificación digitalizada, se analiza la evolución de tres tipos de tecnologías de planificación digitalizada: la tecnología de modelado urbano, la tecnología de planificación basada en grandes datos espaciales y temporales, y la tecnología de planificación basada en inteligencia artificial. A partir de esto, se resumen dos paradigmas tecnológicos: el basado en conocimiento y el basado en datos, y se reconoce el uso y los desafíos de la tecnología de planificación digitalizada actual. Desde la perspectiva de datos y conocimiento, se discute la tendencia en el horizonte de la tecnología de planificación digitalizada. La tecnología de planificación digitalizada es el método de uso de tecnologías digitales en cada etapa del proceso de planificación, y se clasifica en tres usos: análisis, simulación y toma de decisiones. Los paradigmas tecnológicos basados en datos y conocimiento determinan el uso de la tecnología de planificación digitalizada. El paradigma tecnológico basado en datos puede respaldar mejor el análisis y la simulación de la planificación, pero debido a las limitaciones del paradigma tecnológico basado en conocimiento, la tecnología de planificación digitalizada aún tiene dificultades para respaldar mejor el uso de toma de decisiones. La tendencia futura de la tecnología de planificación digitalizada es el impulso conjunto de datos y conocimiento, y la clave es resolver el desafío de "de datos a conocimiento", aprender y extraer "conocimiento en caja blanca" de la disciplina de planificación de los datos, y utilizar "conocimiento en caja blanca" para impulsar el análisis, la simulación y la toma de decisiones de la planificación.

Palabras clave: Tecnología de planificación digitalizada; Tecnología digital; Impulsado por datos; Impulsado por conocimiento; Paradigma tecnológico

En la era digital actual, las tecnologías digitales están transformando profundamente las formas en que las personas viven y trabajan. El desarrollo de tecnologías digitales como la computación en la nube, los grandes datos y la inteligencia artificial está impulsando la transformación digital de toda la sociedad, que abarca desde la vida cotidiana y la economía hasta la gobernanza. El campo de la planificación urbana y rural también ha experimentado una fuerte influencia de la digitalización y las tecnologías digitales. Los últimos 10 años han sido una década de gran impacto de las tecnologías digitales en esta disciplina. Por ejemplo, tecnologías como los gemelos digitales y la realidad virtual han cambiado la forma de percibir y explorar los espacios urbanos[1-2], mientras que los grandes datos espaciales y temporales, junto con la inteligencia artificial, se han integrado rápidamente en la investigación y práctica de la planificación urbana y rural[3-5]. Además, el rápido auge de la tecnología de Generación de Contenidos por Inteligencia Artificial (AIGC, por sus siglas en inglés) está cambiando la forma en que se generan planos y reportes de planificación. Desde las tecnologías que apoyan la investigación en planificación hasta la generación de resultados en la práctica de planificación, las tecnologías digitales han tenido un

impacto enorme y multidimensional en la disciplina de la planificación urbana y rural.

La última década también ha sido la más centrada en las tecnologías digitales en la disciplina de planificación urbana y rural. Las tecnologías de grandes datos espaciales y temporales, junto con la inteligencia artificial, se han convertido en temas candentes dentro de la disciplina, lo que ha provocado dos olas de interés. Desde principios de la década de 2010, la tecnología de grandes datos espaciales y temporales ha atraído una atención significativa, produciendo un impacto positivo y profundo en la investigación sobre los espacios urbanos. Esta tecnología ha sido aplicada ampliamente en varios campos de investigación, como la estructura espacial urbana, la estructura espacial regional, el comportamiento y el entorno construido, y la gobernanza urbana, iniciando la "era de los grandes datos" en la investigación de la planificación[6]. Desde finales de la década de 2010 hasta la fecha, la inteligencia artificial ha atraído una atención considerable dentro de la disciplina de planificación[7]. En particular, las tecnologías de aprendizaje automático han generado un gran interés tanto en el ámbito nacional como internacional, con un rápido aumento en los artículos de investigación a partir de 2018[8]. La ola de inteligencia artificial en la planificación está en pleno auge[9]. Las tecnologías digitales de planificación ya se utilizan ampliamente en la investigación y práctica de la planificación, y los temas de investigación abarcan diversos campos.

En la era digital actual, las tecnologías digitales de planificación se han convertido en la corriente principal de las tecnologías de planificación. Aunque existen una gran variedad de tecnologías digitales en la investigación y práctica de la planificación, aún persisten muchas dudas sin resolver sobre cómo entender estas tecnologías digitales de planificación, cómo reconocer los efectos y cambios que su rápido desarrollo ha traído. Este artículo tiene como objetivo responder a estas cuestiones. Primero, define el concepto y el alcance de las tecnologías digitales de planificación, luego revisa su evolución desde la perspectiva de los datos y el conocimiento, y organiza sistemáticamente sus paradigmas tecnológicos. A continuación, se discuten los avances y los desafíos de las tecnologías digitales de planificación, y se presenta una visión de las tendencias futuras de estas tecnologías en el campo de la planificación urbana y rural.

1. El ámbito y los usos de las tecnologías digitales de planificación

1.1 Diferenciación entre tecnologías digitales y tecnologías digitales de planificación

Para definir con precisión el concepto de tecnologías digitales de planificación, es necesario comprender primero el significado de la palabra "tecnología". Las definiciones de "tecnología" en diferentes diccionarios son esencialmente las mismas, y todas explican la relación entre los conceptos de ciencia y tecnología, describiendo la tecnología como "el uso práctico de métodos específicos derivados de la ciencia"^①. A partir de la relación entre tecnología y ciencia, se puede aclarar que las tecnologías utilizadas en la investigación y práctica de la planificación pueden dividirse en dos categorías.

La primera categoría puede denominarse simplemente "tecnologías digitales". Aunque tecnologías como la realidad virtual, la computación en la nube y el Internet de las Cosas se aplican en la industria de la planificación, la ciencia que las impulsa es la ciencia de la computación. En particular, cuando estas tecnologías se aplican en la planificación, los métodos y las ciencias utilizadas son esencialmente los mismos que los utilizados en otros campos o disciplinas. Un ejemplo típico sería la tecnología de realidad virtual para mostrar los resultados de planificación o la tecnología de bases de datos para la gestión de la información de

planificación.

La segunda categoría puede denominarse "tecnologías digitales de planificación". Las tecnologías digitales de planificación son los métodos que utilizan tecnologías digitales en las diferentes etapas de la investigación y la práctica de la planificación. Estas tecnologías se emplean para analizar el estado actual de la planificación, realizar modelado y predicción, formular propuestas, seleccionar alternativas, implementar planes y evaluar su monitoreo. Aunque estas tecnologías se basan en las tecnologías digitales, lo que las impulsa es el conocimiento propio de la disciplina de la planificación, no el de la ciencia de la computación. En otras palabras, en las diferentes etapas de análisis de la situación actual, modelado y predicción, formulación y selección de propuestas, implementación y evaluación, los métodos y ciencias aplicados son significativamente diferentes de los utilizados en otros campos o disciplinas.

Antes de la aparición de las tecnologías digitales, ya existían diversas tecnologías de planificación. Se puede dar un ejemplo para ilustrar la relación y las diferencias entre "tecnologías digitales" y "tecnologías digitales de planificación". A principios de la década de 1960, McHarg propuso la técnica de superposición para el análisis de idoneidad del uso del suelo. Utilizaba láminas transparentes renderizadas manualmente y realizaba la superposición de capas a mano, lo que dio lugar a la técnica de la "torta de capas". La técnica de superposición "torta de capas" propuesta por McHarg es una tecnología de planificación impulsada por el concepto de planificación "diseño integrado con la naturaleza" de McHarg, que es conocimiento propio de la disciplina de planificación[10]. La técnica de planificación de McHarg inspiró a los primeros investigadores de SIG en la década de 1960, lo que dio lugar a la función de superposición espacial en los SIG, que más tarde se convirtió en una de las funciones básicas de análisis espacial de SIG. La superposición espacial en SIG es una "tecnología digital", y la ciencia que la impulsa es la ciencia de la información geográfica. A partir de la década de 1980, se desarrollaron tecnologías de análisis de idoneidad del uso del suelo basadas completamente en la superposición de SIG[11-12], lo que se convirtió en una "tecnología digital de planificación". Aunque la tecnología de análisis de idoneidad del uso del suelo basada en la superposición de SIG es impulsada por la ciencia de la planificación de McHarg, este ejemplo ilustra claramente cómo las "tecnologías de planificación" pueden inspirar el desarrollo de nuevas "tecnologías digitales", que luego se combinan para formar nuevas "tecnologías digitales de planificación". Esto demuestra la necesidad y la posibilidad de distinguir entre los conceptos de tecnologías digitales y tecnologías digitales de planificación.

1.2 Tipos de usos de las tecnologías digitales de planificación

Una vez diferenciadas las tecnologías digitales y las tecnologías digitales de planificación, se puede discutir los tipos de usos de estas últimas. Las tecnologías digitales de planificación se pueden clasificar en tres tipos de usos: análisis de los efectos de la planificación, simulación de fenómenos de planificación y toma de decisiones sobre los objetos de planificación. El uso de análisis se refiere al análisis de efectos, factores y mecanismos. Un ejemplo típico del uso de análisis es el término "diagnóstico", comúnmente utilizado en los últimos años. Por ejemplo, el análisis de los datos espaciales y temporales sobre la percepción pública de la comunidad puede diagnosticar eficazmente el rendimiento de la gobernanza comunitaria[13]. El uso de simulación incluye simulación y modelado, y el término "deducción" es típico de este uso. Por ejemplo, simular los efectos de la implementación de políticas de ciudades compactas sobre los servicios

públicos y las finanzas urbanas[14]. El uso de toma de decisiones se refiere a la formulación y selección de planes, que es el uso central de la planificación. Por ejemplo, utilizar redes neuronales profundas para generar la mejor propuesta de red vial[15]. Los tres tipos de usos de las tecnologías digitales de planificación dependen de diversas tecnologías digitales como medios básicos, pero lo que impulsa estas tecnologías digitales de planificación es el conocimiento propio de la disciplina de planificación en las etapas de análisis del estado actual, modelado y predicción, formulación de propuestas, selección de alternativas, implementación y evaluación. Tras definir el concepto y los usos de las tecnologías digitales de planificación, este artículo toma como ejemplo tres tecnologías digitales típicas de planificación, a saber, las tecnologías de modelado urbano, las tecnologías de planificación basadas en grandes datos espaciales y temporales, y las tecnologías de inteligencia artificial, para trazar la evolución de cada una y analizar los paradigmas tecnológicos y su relación con los usos.

2. Tecnologías de modelado urbano: Impulsadas por el conocimiento y los datos

2.1 Tecnologías de modelado urbano desde el siglo XXI

Las tecnologías de modelado urbano (urban modeling) tienen una larga historia como técnicas de planificación. Surgidas en la década de 1950, inicialmente no eran tecnologías digitales de planificación, y los modelos requerían cálculos manuales. Estas tecnologías de modelado urbano se popularizaron en la década de 1960, impulsadas por la corriente del planeamiento racional, y el modelo urbano de gran escala (large scale urban model) se volvió muy común. La toma de decisiones fue el principal uso de las tecnologías de modelado urbano, lo que dio lugar a lo que se conoce como la era del planeamiento racional (rational planning). La corriente del planeamiento racional concluyó en la década de 1970, cuando los modelos urbanos de gran escala fueron ampliamente cuestionados y criticados[16]. Sin embargo, la tecnología de modelado urbano no desapareció y siguió presente en el ámbito académico[17]. Desde la década de 1990, con la integración de tecnologías digitales como los SIG[18], las tecnologías de modelado urbano se convirtieron en una tecnología digital de planificación típica.

Desde el siglo XXI, tres tipos de tecnologías de modelado urbano han evolucionado paralelamente. La primera es el modelo urbano de gran escala tradicional, que sigue en desarrollo en el siglo XXI; la segunda es el modelo basado en reglas (rule-based model), que apareció a mediados de la década de 1990, impulsado principalmente por las tecnologías SIG; y la tercera es el modelo de simulación microscópica, como los autómatas celulares (CA). Estos tres tipos de modelos urbanos han evolucionado hasta el día de hoy, y sus paradigmas tecnológicos y usos continúan en constante evolución.

2.2 Modelado urbano impulsado por el conocimiento y los datos

El primer tipo de modelo urbano de gran escala sigue utilizándose en la planificación del uso del suelo y del transporte en áreas metropolitanas. Un ejemplo típico de este tipo es UrbanSim[19-20]. Desde la década de 1990, los modelos urbanos de gran escala han cambiado su uso principal de la toma de decisiones a la simulación, utilizándose para prever los efectos de las políticas urbanas en el futuro. En términos de paradigma tecnológico, los modelos urbanos de gran escala son tecnologías de planificación impulsadas por el conocimiento, ya que sus principios se basan en el conocimiento de la planificación, modelando las interacciones espaciales y de transporte, las decisiones de hogares, empresas y gobiernos. Estos modelos urbanos a menudo se describen

como impulsados por "conocimiento de caja negra" o "caja gris", ya que los principios matemáticos y las fórmulas utilizadas para modelar las interacciones entre el suelo, el transporte y el medio ambiente son complejas, con numerosos parámetros y difíciles de comprender, sin una correspondencia directa y clara con los objetivos y estrategias de la planificación espacial.

El segundo tipo, los modelos basados en reglas, tiene como ejemplos típicos el modelo CUF[21] y What if[22-23]. Los modelos basados en reglas fueron desarrollados específicamente para simular políticas y evaluar los posibles efectos de la planificación, sin estar diseñados para la toma de decisiones. En términos de paradigma tecnológico, los modelos basados en reglas siguen siendo tecnologías de planificación impulsadas por el conocimiento, pero sus principios se expresan mediante reglas claras y sencillas. Por ejemplo, el modelo CUF primero predice la demanda total, y luego distribuye el uso del suelo en función de su idoneidad[24]. Estos modelos ya no se basan en complejas fórmulas matemáticas de interacciones espaciales o elecciones discretas. En cambio, los modelos basados en reglas son impulsados por "conocimiento de caja blanca", ya que las reglas se establecen mediante un conocimiento claro y explícito. La integración de las tecnologías SIG con estos modelos ha sido fundamental para su desarrollo.

Tabla 1: Paradigmas tecnológicos y usos de las tecnologías de modelado urbano

| | Modelos urbanos a gran escala | Modelos basados en reglas | Modelos de simulación microscópica |
|-----------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|
| Paradigma tecnológico | Impulsado por el conocimiento | Impulsado por el conocimiento | Impulsado por los datos |
| Uso | De la toma de decisiones a la simulación | Simulación | Simulación |

La tercera categoría de modelos de simulación microscópica incluye los modelos de autómatas celulares (CA) [25] y los modelos de múltiples agentes (ABM) [26]. Estos modelos surgieron con el propósito de simular y predecir los patrones futuros de uso del suelo, y hasta el día de hoy siguen siendo utilizados con fines de simulación. Estos modelos incorporan conceptos provenientes de la informática, como los autómatas celulares (CA) y los modelos de múltiples agentes (ABM), lo que dio lugar a un nuevo paradigma de modelado impulsado por datos. Los modelos microscópicos dependen de series temporales largas de datos históricos para calibrar las reglas de conversión del modelo. Es necesario utilizar datos históricos de largo plazo para entrenar el modelo y predecir los cambios futuros en el uso del suelo. Por ejemplo, se pueden usar datos históricos de 200 años para calibrar el modelo y simular la evolución del uso del suelo en los próximos 50 años [27]. Los autómatas celulares, provenientes de la ciencia computacional, introdujeron métodos de modelado impulsados por datos, siendo el núcleo de los modelos de autómatas celulares las reglas de conversión, que no incluyen ninguna teoría ni principio de planificación. Las reglas se "entrenan" a partir de los datos. Este tipo de conocimiento, aunque existan, sigue siendo un "conocimiento de caja negra".

A partir de los paradigmas tecnológicos impulsados por datos y por conocimiento, el conocimiento siempre ha sido una palabra clave en la tecnología de modelado urbano. Los modelos urbanos de gran escala tradicionales se basan en el "conocimiento de caja gris"②, los modelos basados en reglas en el "conocimiento de caja blanca", y los modelos de simulación microscópica han traído consigo un paradigma de modelado "impulsado por datos", que también

ha producido "conocimiento de caja negra" (Tabla 1). Hoy en día, la tecnología de modelado urbano se utiliza principalmente como un laboratorio para la simulación de la evolución del espacio urbano, y la simulación es el uso principal, en lugar de la toma de decisiones, que fue la función predominante durante la época del planeamiento racional. Ya sea impulsado por el conocimiento o por los datos, la tecnología de modelado urbano actual se utiliza principalmente para simulaciones y no puede satisfacer de manera efectiva las necesidades de la toma de decisiones.

3 Tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales impulsada por datos

3.1 Evolución de la tecnología de grandes datos espacio-temporales

Han pasado más de 10 años desde que los grandes datos espacio-temporales entraron en el campo de la planificación. Los propios grandes datos espacio-temporales pueden ser considerados como una tecnología digital en la planificación. El primer proyecto Mobile Landscapes utilizó el volumen de llamadas telefónicas para percibir los cambios espaciales y temporales en la intensidad de las actividades urbanas, en el cual los grandes datos espacio-temporales aún pertenecen a la categoría de tecnología digital [28]. En los últimos 10 años, los grandes datos espacio-temporales en la planificación urbana y rural han evolucionado gradualmente de una tecnología digital a una tecnología de planificación digital utilizada para estudiar las relaciones entre el espacio urbano y las actividades urbanas, convirtiéndose en un apoyo efectivo en los temas de planificación, como la estructura espacial urbana, la estructura espacial regional, el comportamiento y el entorno construido, y la gobernanza urbana. La tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales apoya la investigación sobre "actividades urbanas" y "espacio urbano" desde cuatro aspectos: "percibir fenómenos espacio-temporales de actividades en el espacio, comprender las leyes espacio-temporales de las actividades, descubrir los factores espaciales que influyen en las actividades y explorar el mecanismo de interacción entre el espacio y las actividades" [6]. También es necesario abordar estos cuatro aspectos de la tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales desde los paradigmas tecnológicos impulsados por datos y conocimientos.

3.2 Investigación de actividades y espacio impulsada por datos

"Percibir fenómenos espacio-temporales de actividades en el espacio" implica utilizar grandes datos espacio-temporales para describir cuantitativamente los fenómenos espacio-temporales de las actividades en el espacio urbano, sin involucrar los factores e interacciones detrás de esos fenómenos. En este tipo de tecnología, los grandes datos espacio-temporales actúan como una tecnología para percibir las características espacio-temporales de las actividades urbanas. Por ejemplo, el proyecto Mobile Landscapes mide los cambios espacio-temporales en la intensidad de las actividades urbanas a partir de los datos de llamadas telefónicas [28]. "Comprender las leyes espacio-temporales de las actividades en el espacio" consiste en utilizar grandes datos espacio-temporales para identificar patrones y leyes de actividades espacio-temporales. Por ejemplo, se utilizan grandes datos espacio-temporales para obtener patrones de desplazamiento de diferentes grupos de personas [29]. Este tipo de investigación puede abordar los patrones y leyes desde la perspectiva temporal o espacial, pero no se basa en el mecanismo de interacción entre el espacio y las actividades. Ambos tipos de investigación de grandes datos espacio-temporales son impulsados por datos.

"Descubrir los factores espaciales que afectan a las actividades" implica el uso de grandes datos espacio-temporales para identificar los factores espaciales que influyen en las actividades urbanas. Por ejemplo, se utilizan grandes datos espacio-temporales de múltiples fuentes para inferir las funciones urbanas a partir de las características espacio-temporales de las actividades urbanas [30]. Esta es una tecnología que interpreta la información sobre las funciones urbanas a partir de los datos. "Explorar el mecanismo de interacción entre el espacio y las actividades" utiliza grandes datos espacio-temporales para investigar las características de interacción entre el espacio urbano y las actividades urbanas, comprendiendo su mecanismo. Por ejemplo, se emplean grandes datos espacio-temporales para medir el alcance espacial de los centros comerciales urbanos de diferentes funciones y validar la teoría de la localización central en la planificación de centros comerciales [31]. Esta tecnología interpreta la información sobre las actividades urbanas y el espacio urbano para validar el conocimiento existente en disciplinas previas. Estos dos tipos de tecnología de grandes datos espacio-temporales también son impulsados por datos.

Por lo tanto, la tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales siempre ha sido un paradigma tecnológico impulsado por datos, extrayendo información de los datos y descubriendo nuevos fenómenos o verificando el conocimiento existente a partir de esta información. Desde su inicio, la tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales ha estado orientada al análisis, siendo capaz de resolver eficazmente el análisis del espacio y las actividades, pero aún no se utiliza para simulación ni para toma de decisiones (Tabla 2). Los grandes datos espacio-temporales están pasando de "diagnosticar" el espacio urbano a "predecir" el espacio urbano, apoyando así la toma de decisiones en planificación, lo que constituye uno de los avances más importantes en la tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales.

Tabla 2 Paradigma tecnológico y usos de la tecnología de planificación de grandes datos espacio-temporales

| | Fenómenos espacio-temporales en el espacio percibido | Regularidad de los espacio-temporales en el espacio cognitivo | Factores espaciales que influyen en la actividad | Mecanismos de interacción entre el espacio y la actividad |
|-------------------|--|---|--|---|
| Paradigma técnico | Basado en datos | Basado en datos | Basado en datos | Basado en datos |
| Uso | Análisis (analizar fenómenos) | Análisis (descubrir conocimientos) | Análisis (interpretar fenómenos) | Análisis (interpretar fenómenos) |

4 Tecnología de planificación de inteligencia artificial: impulsada por conocimiento y por datos

4.1 Tecnología de sistemas expertos impulsada por conocimiento

La inteligencia artificial es una tecnología digital de larga data. La primera ola de inteligencia artificial fue el sistema experto (SE), también conocido como sistema basado en conocimiento

(KBS, por sus siglas en inglés). A finales de la década de 1980, diversos campos comenzaron a explorar la aplicación de sistemas expertos, y el campo de la planificación urbana no fue la excepción. La primera tecnología de planificación basada en inteligencia artificial apareció en la década de 1980, con artículos [32], libros [33], y varios sistemas, como sistemas expertos para zonificación [34] y para selección de ubicaciones [35]. Ya a finales de la década de 1980, la comunidad académica de planificación urbana en China exploraba los sistemas expertos para la planificación urbana. El artículo de Chen Bingzhao y otros [36], publicado en 1989 sobre el sistema experto para la gestión de planificación y construcción, fue el primer artículo sobre inteligencia artificial en el campo de la planificación urbana en China. Esto ocurrió casi al mismo tiempo que las investigaciones internacionales.

El sistema experto es una tecnología utilizada para apoyar la toma de decisiones en la planificación. Su característica principal es extraer el conocimiento de expertos y construir una base de conocimiento, expresando ese conocimiento en reglas claras que la máquina puede usar para tomar decisiones. El sistema experto pertenece a un paradigma tecnológico típicamente impulsado por conocimiento, cuyo núcleo radica en expresar el conocimiento de la disciplina de planificación como reglas claras de tipo "si-entonces", las cuales componen el "conocimiento de caja blanca" dentro de la base de conocimiento. El sistema toma decisiones basadas en estas reglas "si-entonces".

La tecnología de planificación basada en sistemas expertos encontró muchas dificultades [37]. A principios de la década de 1990, la academia coincidió en que había dos problemas difíciles de resolver [33, 38]. El primer problema era la extracción de conocimiento, es decir, cómo resumir el conocimiento de planificación en un lenguaje común. La dificultad para expresar y extraer el conocimiento de planificación es el mayor obstáculo para desarrollar sistemas expertos para la planificación urbana, lo que está determinado por las características propias del conocimiento de planificación. El segundo problema era la expresión del conocimiento, es decir, cómo representar el conocimiento de planificación mediante "reglas" estandarizadas. Precisamente, no todo el conocimiento en planificación puede expresarse en términos de "si-entonces"; muchas de las decisiones son vagas e imprecisas. La dificultad de extraer y expresar el conocimiento de planificación en reglas claras es la razón por la cual la exploración de la inteligencia artificial en la disciplina de planificación comenzó a avanzar lentamente y se estancó después de la década de 1990.

4.2 Tecnología de aprendizaje automático impulsada por datos

Desde la década de 2010, el desarrollo del aprendizaje automático ha generado un nuevo auge en la inteligencia artificial. A finales de la década de 2010, el aprendizaje automático también entró en la planificación urbana, y hasta la fecha, se ha convertido en la tecnología dominante de planificación basada en inteligencia artificial [8]. El aprendizaje automático ya no requiere extracción de conocimiento, sino que aprende a partir de grandes cantidades de "datos" experimentales, permitiendo que la máquina acumule conocimiento por sí misma y luego utilice ese conocimiento adquirido para hacer juicios y resolver problemas. El enfoque del aprendizaje automático evita precisamente las características vagas e imprecisas del conocimiento de planificación y la dificultad para extraerlo y expresarlo. Por otro lado, lo más importante en el aprendizaje automático es el dato, ya que es a partir de estos datos que se "entrena" a la máquina. Los grandes datos resuelven precisamente la fuente de datos para el aprendizaje

automático, lo que explica el auge de la inteligencia artificial con el advenimiento de la era de los grandes datos. La tecnología de planificación de aprendizaje automático pertenece a un paradigma tecnológico impulsado por datos.

El uso del aprendizaje automático para evaluar la calidad del entorno urbano a partir de imágenes de calles ya es un uso común [39]. La evaluación de la calidad del entorno construido es una tecnología de planificación completamente impulsada por datos, que permite una evaluación inteligente mediante el entrenamiento con grandes datos de imágenes. El uso de técnicas como el aprendizaje automático en la generación de planes de planificación también está en fase de exploración [40-41]. Por ejemplo, mediante el aprendizaje de la estructura de las redes viales urbanas, ya es posible generar automáticamente una red vial de planificación integrada con la estructura histórica de los barrios, lo que constituye una toma de decisiones en el diseño [15]. Cabe señalar que el primer tipo de uso es para análisis, mientras que el segundo se usa para la toma de decisiones.

En 2023, la generación de contenido con inteligencia artificial (AIGC) surgió como una nueva tendencia. AIGC involucra tecnologías como el aprendizaje profundo y el procesamiento del lenguaje natural, y puede considerarse una forma de aplicación práctica del aprendizaje automático. Sobre la base de modelos generales de gran tamaño, se puede seguir entrenando modelos especializados en planificación urbana, para luego generar informes de planificación, planos y otros contenidos relacionados. Esto permitirá que los modelos especializados comprendan las necesidades específicas de las tareas de planificación, lo que facilitará la generación de textos y gráficos de planificación de manera diversificada. Esta es una tecnología de inteligencia artificial en planificación que se espera con entusiasmo.

4.3 Entender la tecnología de planificación de inteligencia artificial desde la dimensión de "datos y conocimiento"

Para analizar la tecnología de planificación de inteligencia artificial desde la dimensión de "datos y conocimiento", es importante recordar que el conocimiento siempre ha sido una palabra clave en la planificación de inteligencia artificial. Los sistemas expertos antiguos eran "impulsados por conocimiento" y se basaban en "conocimiento de caja blanca", pero la adquisición de conocimiento de planificación fue su mayor dificultad. Hoy en día, la tecnología de planificación de aprendizaje automático permite que la máquina obtenga un modelo de conocimiento entrenado a partir de los datos, lo que da lugar a un "conocimiento de caja negra". Esto significa que incluso quienes escriben el algoritmo no saben por qué la máquina toma ciertos resultados, ya que estos surgen de los datos "entrenados". Incluso la tecnología de planificación de inteligencia artificial impulsada por datos sigue operando en torno al conocimiento, aunque sea "conocimiento de caja negra".

De la evolución de la tecnología de planificación de inteligencia artificial, se puede concluir que comenzó con un paradigma impulsado por el conocimiento y que el desarrollo del aprendizaje automático trajo consigo un paradigma impulsado por los datos. Ya sea impulsada por conocimiento o por datos, la tecnología actual de planificación de inteligencia artificial se utiliza principalmente para análisis, y aún no es capaz de satisfacer las necesidades de toma de decisiones (Tabla 3). Las características propias de la disciplina de planificación hacen que la tecnología de planificación de inteligencia artificial no pueda depender únicamente del conocimiento ni exclusivamente de los datos, ya que el conocimiento obtenido a través del

aprendizaje automático es "conocimiento de caja negra", lo que impide que se base en este para tomar decisiones de planificación.

Tabla 3 Paradigma tecnológico y usos de la tecnología de planificación de inteligencia artificial

| X | Sistemas Expertos (ES/KBS) | Aprendizaje Automático (ML) |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Paradigma tecnológico | Impulsado por el conocimiento | Impulsado por los datos |
| Uso | Toma de decisiones | Análisis, toma de decisiones |

Peng et al. [42] propusieron una perspectiva de 4 fases sobre la relación entre los planificadores y la inteligencia artificial (IA), que incluye la fase 1: IA asistida (AI-assisted), fase 2: IA aumentada (AI-augmented), fase 3: IA automatizada (AI-automated), y fase 4: IA autónoma (AI-automatized). El caso mencionado anteriormente sobre la generación automática de redes viales urbanas pertenece a la fase 3, donde el objetivo de planificación es determinado por humanos y la IA proporciona la solución. El punto central de las 4 fases de la IA en la planificación urbana es que, en cualquiera de las fases, no se puede excluir a los humanos de la planificación, ya que la planificación sigue siendo una actividad de toma de decisiones centrada en el ser humano. Al comprender la tecnología de planificación de inteligencia artificial desde la dimensión de "datos y conocimiento", se puede entender mejor este punto central, ya que la actividad de toma de decisiones centrada en el ser humano necesita el respaldo del "conocimiento de caja blanca", y no del "conocimiento de caja negra" obtenido por el aprendizaje automático.

5 "De los datos al conocimiento": Perspectivas y desafíos de la tecnología de planificación digital

5.1 Impulsado por conocimiento vs. impulsado por datos

El paradigma tecnológico impulsado por conocimiento se basa en el conocimiento de la disciplina de planificación para completar el análisis, la simulación y la toma de decisiones, utilizando conocimientos previos establecidos como base. Por ejemplo, en modelos urbanos a gran escala, el conocimiento de la planificación se presenta mediante fórmulas matemáticas dentro del modelo; en los sistemas expertos, el conocimiento de planificación se expresa en forma de reglas. En el paradigma impulsado por conocimiento, los datos siguen siendo indispensables, pero se utilizan conforme al conocimiento de la disciplina para completar el análisis, la simulación y la toma de decisiones.

El paradigma tecnológico impulsado por datos se basa completamente en los datos para completar el análisis, la simulación y la toma de decisiones, sin necesidad de conocimientos previos establecidos en la disciplina de planificación. Este paradigma de datos puede ser utilizado de manera directa para extraer características, factores e interacciones de los efectos de la planificación a partir de los datos, como ocurre con la tecnología de planificación basada en grandes datos espacio-temporales; o puede emplear datos para entrenar modelos, y luego usar esos modelos para análisis, simulación y toma de decisiones, como sucede con la tecnología de aprendizaje automático en planificación.

El impulso del conocimiento proviene del sistema de conocimientos de la disciplina de planificación, siendo este un paradigma inherente a la disciplina. Por otro lado, el impulso por datos es una tecnología desarrollada con los avances digitales, y el paradigma tecnológico de

planificación impulsado por datos solo surgió después de la integración de la tecnología digital con la planificación. La integración de la tecnología digital ha impulsado significativamente el desarrollo de la planificación, resolviendo muchos de los problemas que históricamente han aquejado a la planificación. Al repasar la evolución de tres tipos clásicos de tecnologías de planificación desde la década de 1990, se puede observar que el paradigma impulsado por datos se ha convertido en la corriente principal de la tecnología de planificación digital actual.

5.2 Conocimiento: caja blanca, caja gris, caja negra

“La tecnología es la aplicación práctica de los métodos científicos”, esta definición ya expone la relación entre el conocimiento y la tecnología. Al repasar la evolución de tres tipos clásicos de tecnología de planificación digital, se puede hilvanar la evolución de estas tecnologías con el conocimiento, agrupándolas en “conocimiento de caja blanca”, “conocimiento de caja gris” y “conocimiento de caja negra”. En los modelos basados en reglas y en los sistemas expertos, el conocimiento es de caja blanca; en los modelos urbanos a gran escala, el conocimiento es de caja gris; en la tecnología de planificación basada en autómatas celulares y en el aprendizaje automático, el conocimiento es de caja negra. Ver Figura 1.

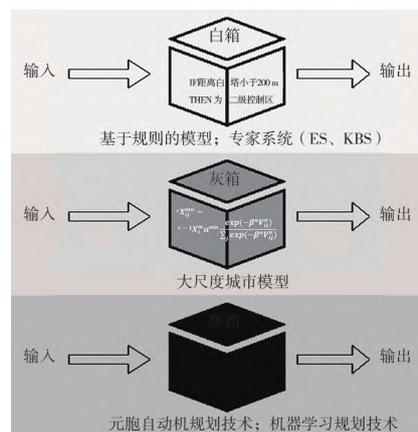


Figura 1 Conocimiento de caja blanca, caja gris y caja negra en las tecnologías de planificación digital

El “conocimiento de caja blanca” es el más confiable, y la tecnología de planificación ideal sería aquella impulsada por “conocimiento de caja blanca”. El principal problema del “conocimiento de caja blanca” en la disciplina de planificación es la extracción y expresión del conocimiento, es decir, cómo transformar el conocimiento de planificación difuso, implícito o incierto en reglas claras y sistemáticas. La experiencia con los sistemas expertos ya nos ha mostrado que esta dificultad está determinada por las características propias de la disciplina de planificación. Este es el cuello de botella del paradigma impulsado por conocimiento.

Las tecnologías de planificación impulsadas por datos evitan el problema de la extracción y expresión del conocimiento, pero a cambio introducen el “conocimiento de caja negra”. El aprendizaje automático en inteligencia artificial es un ejemplo típico. Aunque la tecnología de inteligencia artificial basada en aprendizaje automático puede producir resultados impresionantes, el “conocimiento de caja negra” generado por el aprendizaje automático es igualmente criticado, al igual que el “conocimiento de caja gris” en los modelos urbanos a gran escala. La toma de decisiones en planificación no puede basarse simplemente en el

“conocimiento de caja negra”, especialmente en decisiones de planificación de gran escala. Este es el motivo por el cual el paradigma impulsado por datos puede respaldar eficazmente los usos de análisis y simulación, pero tiene dificultades para respaldar la toma de decisiones.

5.3 La tecnología de planificación digital necesita resolver la clave del “de los datos al conocimiento”

Es precisamente porque la disciplina de planificación es una actividad de toma de decisiones centrada en el ser humano que se determina el cambio en los usos de análisis, simulación y toma de decisiones que asume la tecnología de planificación digital, así como la evolución de los paradigmas impulsados por datos y conocimiento. Las críticas al modelo de planificación racional ya nos han indicado que la toma de decisiones basada en el conocimiento de las tecnologías de planificación tradicionales presenta problemas evidentes. El paradigma impulsado por datos ha enriquecido y mejorado la tecnología de planificación, pero al mismo tiempo ha traído consigo el problema del “conocimiento de caja negra”. Esto ha hecho que la tecnología de planificación impulsada por datos sea adecuada para usos de análisis y simulación, pero tenga dificultades para asumir funciones de toma de decisiones, ya que el uso del “conocimiento de caja negra” en la toma de decisiones de planificación presenta problemas más serios.

La tecnología de planificación con fines decisionales siempre ha sido el objetivo de la disciplina. Para lograr un apoyo efectivo en la toma de decisiones de planificación, el futuro de la tecnología de planificación digital radica en un paradigma impulsado por “datos y conocimiento conjuntamente”. Las tecnologías actuales ya pueden extraer “conocimiento de caja negra”. Si se puede resolver cómo aprender más a partir de los datos para obtener “conocimiento de caja blanca”, o descubrir y entender “conocimiento de caja blanca” a partir de los resultados del aprendizaje automático, entonces el uso de “conocimiento de caja blanca” para realizar análisis, simulaciones y toma de decisiones en planificación debería ser un enfoque confiable y digno de confianza. Basándose en el impulso conjunto de “datos y conocimiento”, es fundamental resolver el problema del “de los datos al conocimiento”, o más específicamente, “de los datos al ‘conocimiento de caja blanca’”. Se debe aprender “conocimiento de caja blanca” a partir de los datos y utilizarlo para impulsar los usos de análisis, simulación y toma de decisiones en planificación.

La tendencia de la tecnología de planificación digital es el paradigma impulsado por “datos y conocimiento conjuntamente”. Para resolver el desafío del “de los datos al conocimiento”, es decir, aprender patrones a partir de los datos para respaldar los usos de análisis, simulación y toma de decisiones. Actualmente, la generación de contenido por inteligencia artificial (AIGC) y los modelos grandes ya han demostrado su valor y perspectivas de aplicación. Usar modelos grandes generales para superar las dificultades de la expresión del conocimiento en la disciplina de planificación, y sobre esa base construir modelos grandes especializados en planificación que incluyan el conocimiento ya establecido en la disciplina, podría servir para respaldar la toma de decisiones. Este camino tecnológico podría ser una ruta viable para resolver el “de los datos al conocimiento”, y merece ser explorado.

6 Conclusiones y perspectivas

Este artículo ha definido el concepto y los usos de la tecnología de planificación digital, abordando desde la dimensión de datos y conocimiento, se han delineado dos paradigmas

tecnológicos de la tecnología de planificación digital, y se han expuesto las fronteras de investigación y los desafíos de esta tecnología, llegando a las siguientes cuatro conclusiones:

Primero, se ha definido el concepto de tecnología de planificación digital y se ha diferenciado claramente entre tecnología de planificación digital y tecnología digital. La tecnología de planificación digital se refiere a los métodos que utilizan tecnología digital en las diversas etapas del análisis de la situación de planificación, modelado y previsión, formulación de planes, selección de planes, implementación de planificación y evaluación y monitoreo de planificación, asumiendo funciones de análisis, simulación y toma de decisiones.

Segundo, la tecnología de planificación digital puede clasificarse en dos paradigmas tecnológicos: impulsada por datos y por conocimiento. El paradigma impulsado por conocimiento es inherente a la tecnología de planificación, mientras que el paradigma impulsado por datos es resultado de la integración de la tecnología digital. Los paradigmas impulsados por datos y conocimiento determinan los tipos de uso de la tecnología de planificación digital.

Tercero, las tecnologías de planificación digital actualmente utilizadas para la toma de decisiones aún necesitan realizar avances significativos. El paradigma impulsado por datos puede respaldar adecuadamente los usos de análisis y simulación, pero las limitaciones del “conocimiento de caja negra” dificultan su aplicación en la toma de decisiones. Las características propias de la disciplina de planificación hacen que el paradigma impulsado por conocimiento enfrente cuellos de botella en la extracción y expresión del conocimiento. Estos dos puntos dificultan que la tecnología de planificación digital satisfaga adecuadamente los usos de toma de decisiones.

Cuarto, la tendencia futura de la tecnología de planificación digital es avanzar hacia un enfoque “impulsado conjuntamente por datos y conocimiento”, donde la clave reside en resolver el “de los datos al conocimiento”, utilizando tecnología digital para aprender y extraer “conocimiento de caja blanca” de los datos, y aplicar “conocimiento de caja blanca” para realizar análisis, simulaciones y toma de decisiones.

Es importante reconocer que nuestra actual atención a la tecnología de planificación digital y la exploración de teorías de planificación inteligente no significan un retroceso hacia la “planificación racional” de hace 60 años. Incluso si en el futuro se superan los obstáculos del “de los datos al conocimiento”, la tecnología de planificación digital seguirá siendo un apoyo para una planificación centrada en el ser humano. La tecnología de planificación ha sido y seguirá siendo utilizada por los humanos, no para reemplazar la toma de decisiones humana, lo cual está determinado por las características intrínsecas de la disciplina de planificación.

Notas

① Esta traducción proviene de la definición de la palabra "tecnología" en el Cambridge Academic Content Dictionary [publicado por Cambridge University Press en 2017]: “La tecnología es un método particular mediante el cual la ciencia se utiliza con fines prácticos.”

② En la crítica a la planificación racional de la década de 1970, se criticó directamente a los modelos urbanos a gran escala como “cajas negras” de conocimiento. Si se compara el modelo urbano a gran escala con los modelos posteriores, como los autómatas celulares y el aprendizaje automático, el modelo urbano a gran escala es más adecuado para ser denominado como “caja gris” de conocimiento.

References

- [1] WHITE G, ZINK A, CODECÁ L, et al. A digital twin smart city for citizen feedback[J]. *Cities*, 2021, 110: 103064.
- [2] SILVENNOINEN H, KULIGA S, HERTHOGS P. et al. Effects of Gehl's urban design guidelines on walkability: a virtual reality experiment in Singaporean public housing estates[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2022, 49(9): 2409-2428.
- [3] 王焱, 钮心毅, 宋小冬. 基于城际出行的长三角城市群空间组织特征[J]. *城市规划*, 2021, 45(11): 43-53.
- [4] 杨俊宴, 邵典, 王桥, 等. 一种人工智能精细识别城市用地的方法探索: 基于建筑形态与业态大数据[J]. *城市规划*, 2021, 45(3): 46-56.
- [5] 王建国, 杨俊宴. 应对城市核心价值的数字化城市设计方法研究: 以广州总体城市设计为例[J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 10-17.
- [6] 钮心毅, 林诗佳. 城市规划研究中的时空大数据: 技术演进、研究议题与前沿趋势 [J]. *城市规划学刊*, 2022(6): 50-57.
- [7] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. *时代建筑*, 2018(1): 6-11.
- [8] KOUTRA S, IOAKIMIDIS C S. Unveiling the potential of machine learning applications in urban planning challenges[J]. *Land*, 2022, 12(1): 83.
- [9] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI 城市: 理论与模型架构[J]. *城市规划学刊*, 2022(5): 17-23.
- [10] 麦克哈格. 设计结合自然[M]. 芮经纬, 译. 天津: 天津大学出版社, 2020.
- [11] CARVER S J. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems[J]. *International Journal of Geo-graphical Information System*, 1991, 5(3):321-339.
- [12] MALCZEWSKI J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview[J]. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [13] KONTOKOSTA C E, FREEMAN L, LAI Y. Up-and-coming or down-and- out? social media popularity as an indicator of neighborhood change[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2021: 0739456X21998445.
- [14] KIKUCHI H, EMBERGER G, ISHIDAH. et al. Dynamic simulations of compact city development to counter future population decline[J]. *Cities*, 2022, 127: 103753.
- [15] FANG Z, JIN Y, YANG T. Incorporating planning intelligence into deep learning: a planning support tool for street network design[J]. *Journal of Urban Technology*, 2022, 29(2): 99-114.
- [16] LEE D B. Retrospective on large-scale urban models[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 35-40.
- [17] WEGENER M. Operational urban models state of the art[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 17-29.
- [18] KLOSTERMAN R E. Large-scale urban models retrospect and prospect[J]. *Journal of the*

- American Planning Association, 1994, 60(1): 3-6.
- [19] WADDELL P A. Behavioral simulation model for metropolitan policy analysis and planning: residential location and housing market components of urbansim[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(2): 247-263.
- [20] KAKARAPARTHI S K, KOCKELMANK M. Application of urbansim to the Austin, Texas, region: integrated-model forecasts for the year 2030[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2011, 137(3):238-247.
- [21] LANDIS J D. The California urban futures model: a new generation of metropolitan simulation models[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1994, 21(4): 399-420.
- [22] KLOSTERMAN R E. The what if? collaborative planning support system[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1999, 26(3): 393-408.
- [23] PETTIT C, BIERMANN S, PELIZAROC. et al. A data-driven approach to exploring future land use and transport scenarios: the online what if? tool[J]. *Journal of Urban Technology*,2020, 27(2): 21-44.
- [24] LANDIS J D. Imagining land use futures: applying the California urban futures model [J], *Journal of the American Planning Association*, 1995, 61(4), 438-457.
- [25] COUCLELIS H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1997, 24(2): 165-174.
- [26] BENENSON I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1998, 22(1): 25-42.
- [27] CLARKE K C, GAYDOS L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore[J]. *International Journal of Geographical Information Science*,1998, 12(7): 699-714.
- [28] RATTI C, FRENCHMAN D, PULSELLI R M, et al. Mobile landscapes: using location data from cell phones for urban analysis[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 727-748.
- [29] BWAMBALE A, CHOUDHURY C F, HESS S. Modelling trip generation using mobile phone data: a latent demographics approach[J]. *Journal of Transport Geography*,2019, 76: 276-286.
- [30] ZHANG Y T, LI Q Q, TU W, et al. Functional urban land use recognition integrating multi-source geospatial data and crosscorrelations[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101374.
- [31] VAN MEETEREN M, POORTHUIS A. Christaller and “big data”: recalibrating central place theory via the geoweb[J]. *Urban Geography*, 2018,39(1):122-148.
- [32] ORTOLANO L, PERMAN C D. A planner's introduction to expert systems[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1987, 53(1): 98-103.
- [33] KIM T J, WIGGINS L L, Wright J R. Expert systems: applications to urban planning [M]. New York, NY: Springer New York, 1990.
- [34] DAVIS J R, GRANT I W. ADAPT: A knowledge-based decision support system for producing zoning schemes[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1987, 14(1):53-66.
- [35] FINDIKAKI I. SISES: an expert system for site selection[M]//Expert systems: applications to urban planning. New York, NY: Springer New York, 1990.
- [36] [36] 陈秉钊, 潘志伟, 宋小冬, 等. 城镇建设项目规划管理智能辅助决策系统[J]. *计算结构*

力学及其应用, 1989, 6(2): 1-10.

[37] HAN S Y, KIM T J. Can expert systems help with planning? [J]. Journal of the American Planning Association, 1989, 55(3): 296-308.

[38] RUBENSTEIN-MONTANO B. A survey of knowledge-based information systems for urban planning: moving towards knowledge management[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(3): 155-172.

[39] 叶宇, 张昭希, 张啸虎, 等. 人本尺度的街道空间品质测度: 结合街景数据和新分析技术的大规模、高精度评价框架[J]. 国际城市规划, 2019, 34(1): 18-27.

[40] 杨俊宴, 朱晓. 人工智能城市设计在街区尺度的逐级交互式设计模式探索[J]. 国际城市规划, 2021, 36(2): 7-15.

[41] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. AIGC 辅助城市设计的理论模型建构[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 12-18.

[42] PENG Z R, LU K F, LIU Y. et al. The pathway of urban planning AI: from planning support to plan-making[J]. Journal of Planning Education and Research, 2023: 0739456X231180568.

****Referencias****

[1] WHITE G, ZINK A, CODECÁ L, et al. Una ciudad inteligente gemela digital para la retroalimentación de los ciudadanos[J]. **Cities**, 2021, 110: 103064.

[2] SILVENNOINEN H, KULIGA S, HERTHOGS P. et al. Efectos de las directrices de diseño urbano de Gehl en la caminabilidad: un experimento de realidad virtual en conjuntos de viviendas públicas de Singapur[J]. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, 2022, 49(9): 2409-2428.

[3] 王焱, 钮心毅, 宋小冬. Características de la organización espacial de la aglomeración urbana del Delta del Yangtsé basadas en los desplazamientos interurbanos[J]. **城市规划 (Urban Planning)**, 2021, 45(11): 43-53.

[4] 杨俊宴, 邵典, 王桥, 等. Exploración de un método de reconocimiento preciso del uso del suelo urbano mediante inteligencia artificial: basado en la forma de los edificios y grandes datos sobre actividades comerciales[J]. **城市规划 (Urban Planning)**, 2021, 45(3): 46-56.

[5] 王建国, 杨俊宴. Investigación sobre métodos de diseño urbano digital para abordar los valores centrales de la ciudad: el caso del diseño urbano general de Guangzhou[J]. **城市规划学刊 (Journal of Urban Planning)**, 2021(4): 10-17.

- [6] 钮心毅, 林诗佳. Grandes datos espacio-temporales en la investigación de la planificación urbana: evolución tecnológica, temas de investigación y tendencias de vanguardia[J]. *城市规划学刊 (Journal of Urban Planning)*, 2022(6): 50-57.
- [7] 吴志强. Planificación urbana asistida por inteligencia artificial[J]. *时代建筑 (Architectural Times)*, 2018(1): 6-11.
- [8] KOUTRA S, IOAKIMIDIS C S. Revelando el potencial de las aplicaciones de aprendizaje automático en los desafíos de la planificación urbana[J]. *Land*, 2022, 12(1): 83.
- [9] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. Ciudades inteligentes basadas en IA: teoría y marco de modelo[J]. *城市规划学刊 (Journal of Urban Planning)*, 2022(5): 17-23.
- [10] 麦克哈格. Diseño con la naturaleza[M]. 芮经纬, 译. 天津: 天津大学出版社, 2020.
- [11] CARVER S J. Integración de la evaluación multicriterio con los sistemas de información geográfica[J]. *International Journal of Geographical Information System*, 1991, 5(3): 321-339.
- [12] MALCZEWSKI J. Análisis de idoneidad del uso del suelo basado en SIG: una visión crítica[J]. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [13] KONTOKOSTA C E, FREEMAN L, LAI Y. ¿Ascendente o en declive? Popularidad en redes sociales como indicador del cambio en los vecindarios[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2021: 0739456X21998445.
- [14] KIKUCHI H, EMBERGER G, ISHIDAH. et al. Simulaciones dinámicas del desarrollo de ciudades compactas para contrarrestar el declive poblacional futuro[J]. *Cities*, 2022, 127: 103753.
- [15] FANG Z, JIN Y, YANG T. Incorporación de inteligencia en planificación al aprendizaje profundo: una herramienta de apoyo para el diseño de redes viales[J]. *Journal of Urban Technology*, 2022, 29(2): 99-114.
- [16] LEE D B. Retrospectiva sobre modelos urbanos a gran escala[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 35-40.
- [17] WEGENER M. Modelos urbanos operativos: estado del arte[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 17-29.
- [18] KLOSTERMAN R E. Modelos urbanos a gran escala: retrospectiva y prospectiva[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 3-6.
- [19] WADDELL P A. Modelo de simulación conductual para el análisis de políticas metropolitanas y planificación: componentes de localización residencial y mercado de vivienda de Urbansim[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(2): 247-263.
- [20] KAKARAPARTHI S K, KOCKELMANK M. Aplicación de Urbansim a la región de Austin, Texas: pronósticos integrados para el año 2030[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2011, 137(3): 238-247.
- [21] LANDIS J D. El modelo de futuros urbanos de California: una nueva generación de modelos de simulación metropolitana[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994,

21(4): 399-420.

[22] KLOSTERMAN R E. ¿Y si? Sistema de apoyo a la planificación colaborativa[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1999, 26(3): 393-408.

[23] PETTIT C, BIERMANN S, PELIZAROC. et al. Un enfoque basado en datos para explorar futuros escenarios de uso del suelo y transporte: la herramienta en línea "¿Y si?"[J]. *Journal of Urban Technology*, 2020, 27(2): 21-44.

[24] LANDIS J D. Imaginando futuros del uso del suelo: aplicando el modelo de futuros urbanos de California[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1995, 61(4): 438-457.

[25] COUCLELIS H. De autómatas celulares a modelos urbanos: nuevos principios para el desarrollo e implementación de modelos[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 165-174.

[26] BENENSON I. Simulaciones multiagente de dinámicas residenciales en la ciudad[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1998, 22(1): 25-42.

[27] CLARKE K C, GAYDOS L J. Integración flexible de un modelo de autómatas celulares y SIG: predicción a largo plazo del crecimiento urbano para San Francisco y Washington/Baltimore[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699-714.

[28] RATTI C, FRENCHMAN D, PULSELLI R M, et al. Paisajes móviles: uso de datos de ubicación de teléfonos celulares para análisis urbanos[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 727-748.

[29] BWAMBALE A, CHOUDHURY C F, HESS S. Modelado de generación de viajes utilizando datos de teléfonos móviles: un enfoque de demografía latente[J]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 76: 276-286.

[30] ZHANG Y T, LI Q Q, TU W, et al. Reconocimiento funcional del uso del suelo urbano integrando datos geoespaciales de múltiples fuentes y correlaciones cruzadas[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101374.

[31] VAN MEETEREN M, POORTHUIS A. Christaller y "big data": recalibrando la teoría de lugares centrales a través de la geoweb[J]. *Urban Geography*, 2018, 39(1): 122-148.

[32] ORTOLANO L, PERMAN C D. Una introducción a los sistemas expertos para planificadores[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1987, 53(1): 98-103.

[33] KIM T J, WIGGINS L L, Wright J R. Sistemas expertos: aplicaciones para la planificación urbana [M]. Nueva York, NY: Springer New York, 1990.

[34] DAVIS J R, GRANT I W. ADAPT: un sistema de soporte de decisiones basado en conocimiento para generar esquemas de zonificación[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1987, 14(1): 53-66.

[35] FINDIKAKI I. SISES: un sistema experto para selección de sitios [M] // Expert systems: applications to urban planning. Nueva York, NY: Springer New York, 1990.

[36] 陈秉钊, 潘志伟, 宋小冬, 等. Sistema inteligente de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de proyectos de construcción urbana[J]. *计算结构力学及其应用 (Computational Structural Mechanics and its Applications)*, 1989, 6(2): 1-10.

[37] HAN S Y, KIM T J. ¿Pueden los sistemas expertos ayudar en la planificación? [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1989, 55(3): 296-308.

[38] RUBENSTEIN-MONTANO B. Una encuesta de sistemas de información basados en

conocimiento para la planificación urbana: avanzando hacia la gestión del conocimiento[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(3): 155-172.

[39] 叶宇, 张昭希, 张啸虎, 等. Medición de la calidad del espacio urbano en la escala humana de la calle: un marco de evaluación de alta precisión y a gran escala combinando datos de paisajes urbanos y nuevas técnicas de análisis[J]. *国际城市规划 (International Journal of Urban Planning)*, 2019, 34(1): 18-27.

[40] 杨俊宴, 朱骁. Exploración de un modelo de diseño interactivo jerárquico en la escala del barrio para el diseño urbano basado en inteligencia artificial[J]. *国际城市规划 (International Journal of Urban Planning)*, 2021, 36(2): 7-15.

[41] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. Construcción de un modelo teórico de diseño urbano asistido por AIGC[J]. *城市规划学刊 (Journal of Urban Planning)*, 2023(2): 12-18.

[42] PENG Z R, LU K F, LIU Y. et al. El camino de la IA en la planificación urbana: del apoyo a la planificación a la elaboración de planes[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2023: 0739456X231180568.