من الاقتران الساكن إلى التفاعل الديناميكي: منهج ذكي للتصميم الحضري على المقياس المتوسط

هوانغ يويه-يويه، يانغ جون-يان، سون هاو-تشنغ، يانغ تشينغ-شين، تسوي آو

الملخص. يمثل التصميم الحضري على المقياس المتوسط حلقة الوصل الأساسية بين المقياس الحضري الكلي والمقياس الجزئي للكتلة العمرانية، ويتولى في آن واحد تنسيق النظام الوظيفي ثنائي الأبعاد والنظام المورفولوجي ثلاثي الأبعاد. غير أن تسارع تغير الاحتياجات الحضرية يكشف محدودية الأساليب التقليدية التي تعتمد اقترانًا ساكنًا وأحادي الاتجاه بين «الوظيفة والمورفولوجيا»، إلى جانب ضعف قدرتها على التعديل. وبالاستناد إلى خوارزمية التعلم بالتعزيز، يقترح البحث مسارًا ذكيًا للتصميم الحضري على المقياس المتوسط يتكون من ثلاث وحدات: التحكم الشبكي، والتوليد التكراري للبدائل، والمقارنة والتحسين. وانطلاقًا من الخصائص المكانية لعناصر الاقتران بين الوظيفة والمورفولوجيا، يميز البحث عدة أنماط للتفاعل، منها الاقتران المرتفع، والتركيز حول النواة، والدفع المحوري، والهيمنة الوظيفية، والهيمنة المورفولوجية. ثم تُختبر هذه الأنماط في تطبيق تصميمي على منطقة نموذجية. وتبين النتائج أن المنهج المقترح يزيد بوضوح تنوع الحلول وكفاءة عملية التصميم، ويعزز قدرة المشروعات على التكيف، ويفتح مسارًا عمليًا نحو التفاعل الديناميكي في التصميم الحضري المستقبلي.

الكلمات المفتاحية: التصميم الحضري الذكي؛ المقياس المتوسط؛ التفاعل الديناميكي؛ التنظيم الوظيفي؛ المورفولوجيا المكانية.
تصنيف المكتبات الصينية: TU984. رمز الوثيقة: A. DOI: 10.16361/j.upf.202503004. رقم المقال: 1000-3363 (2025) 03-0025-09.

* مشروع رئيس من المؤسسة الوطنية للعلوم الطبيعية في الصين «بناء نماذج أولية لتقنيات المباني المحايدة كربونيًا في البيئات الحضرية عالية الكثافة» (رقم 52394224)؛ البرنامج الوطني الرئيس للبحث والتطوير «التقنيات الأساسية للتصميم الحضري الذكي من أجل التحسين المكاني للبيئة المبنية» (رقم 2024YFC3807900).

تنص «لائحة إدارة التصميم الحضري» على أن التصميم الحضري وسيلة فعالة لتنفيذ التخطيط، وتوجيه التصميم المعماري، وصياغة الخصائص المميزة للمدينة [1]. وأمام تعقد المطالب الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، يسعى التصميم الحضري، بوسائل متعددة، إلى «إنشاء أشكال مكانية ثلاثية الأبعاد في البيئة الحضرية» [2] وتحقيق تحسين شامل للبيئة الحضرية [3]. وفي المرحلة الوسطى والمتأخرة من التحضر الجديد في الصين، تزداد أهميته في رفع جودة الفضاء الحضري وتحقيق التنمية المستدامة.

تفرض الطبيعة متعددة المقاييس للنظام الحضري المعقد اختلافًا في مضامين التصميم وأولوياته. ويركز التصميم الحضري على المقياس المتوسط أساسًا على مناطق تتمتع باستقلال وظيفي نسبي وتكامل بيئي [4]، ويغطي مستويات تمتد من المنطقة الحضرية والمجتمع المحلي إلى الشارع والمبنى [5]. وبوقوعه بين التصميم العام على المقياس الكلي والتصميم التفصيلي للكتلة العمرانية على المقياس الجزئي، فإنه يضطلع بمسؤوليتين مترابطتين [6]: ترجمة البنية العامة التي تحددها المستويات العليا إلى تنظيم وظيفي عقلاني، وتنسيق شدة التطوير والارتفاعات وغيرها من المعايير المورفولوجية لتوجيه تصميم الكتل. ومن ثم يصبح التحكم المشترك في الوظيفة والشكل حلقة حاسمة في تجسيد مقاصد التصميم الحضري.

لكن تغير الاحتياجات الاجتماعية بصورة مستمرة يتطلب تصميمًا أكثر مرونة يضمن التفاعل الديناميكي بين الوظيفة والشكل. ومع ذلك، ما تزال الأساليب السائدة محدودة من حيث التنوع والكفاءة. فمن ناحية، يعتمد التصميم التقليدي غالبًا على الخبرة الذاتية وعلى نمط واحد من الاقتران الساكن [7]، بما يحد من قدرته على الاستجابة لتعدد العلاقات بين الوظيفة والمورفولوجيا. كما أن الأساليب الذكية القائمة فقط على نقل الأنماط من حالات سابقة تظل ضعيفة التكيف مع البيئات المعقدة [8]. ومن ناحية أخرى، يتطلب كل موقع جديد في كثير من الأحيان إعادة بناء المنطق التصميمي الأساسي [9]، وهو مسار طويل وكثيف العمل يفتقر إلى تغذية راجعة فورية فعالة [10]، ما يعرقل التعديل السريع ويحد من التطبيق الواسع.

ينطلق هذا البحث من خصائص اقتران الوظيفة والمورفولوجيا على المقياس المتوسط، ويستخدم الذكاء الاصطناعي القائم على التعلم الذاتي لمعالجة مشكلتي التنوع والكفاءة. والهدف هو تجاوز الاعتماد على الخبرة الذاتية أو المكتبات الضخمة للحالات، ومحاكاة التفاعل الديناميكي بين النظامين. كما تُطبَّق استراتيجيات تكرار وتحسين مختلفة وفق أنماط الاقتران المكانية المتعددة، بما يعزز قابلية الحلول للتكيف ودقتها. وتبين التجربة أن المنهج قادر على تمثيل عملية التأثير المتبادل والتعاون والتنافس بين الوظيفة والمورفولوجيا، وعلى إنتاج بدائل متعددة بسرعة، بما يوفر مرجعًا مفيدًا للتصميم الحضري المستقبلي.

1 تأملات في التصميم الحضري على المقياس المتوسط

1.1 المحور الرئيس: التنظيم الوظيفي ثنائي الأبعاد والتصميم المورفولوجي ثلاثي الأبعاد

بوصفهما «التجلي المرئي للبنية العميقة وقوانين تطور الفضاء الحضري» [11]، ظلت الوظيفة والمورفولوجيا في صميم التصميم الحضري. فمن جهة، يحدد التنظيم الوظيفي ثنائي الأبعاد اتجاه التنمية المستقبلية وكفاءة استخدام الأرض وجودة الحياة. وعلى المقياس المتوسط، يترجم التموضع الوظيفي المحدد على المستوى الكلي ويؤسس لتنظيم وظائف المباني على المستوى الجزئي. ولذلك يجب أن يتجاوز فئات الأرض العامة إلى توزيع أكثر دقة، يجمع العناصر وفق منطق وظيفي عقلاني وكفاءة في الاستخدام.

ومن جهة أخرى، تمثل المورفولوجيا ثلاثية الأبعاد التعبير الخارجي للتصميم الحضري وتعكس الهوية الثقافية والقيم الجمالية للمدينة. ويواصل التصميم المورفولوجي على المقياس المتوسط الإطار العام الذي يحدده المستوى الكلي، لكنه ينظم أشكال الكتل العمرانية بمزيد من التفصيل وينقلها إلى المستوى الأدنى في صورة متطلبات ثلاثية الأبعاد، ولا سيما الارتفاع والكثافة وشدة التطوير. وبذلك يعالج عمومية الضبط المورفولوجي الكلي وتجزؤ التدخل على المستوى الجزئي.

وخلاصة القول إن المهمة الأساسية تتمثل في تنسيق التنظيم الوظيفي ثنائي الأبعاد والشكل ثلاثي الأبعاد للمنطقة، استنادًا إلى أهداف التخطيط الأعلى، ثم توجيه تصميم الكتل اللاحق وتحقيق توازن متبادل بين الوظيفة والمورفولوجيا.

1.2 المشكلة: اختلال التوافق بين الوظيفة والمورفولوجيا يفضي إلى فوضى مكانية

تمثل الوظيفة والمورفولوجيا المكونين المركزيين للنظام المكاني على المقياس المتوسط، وهما يتداخلان ويتأثر كل منهما بالآخر. ويُفترض أن الاقتران الديناميكي الفعال بينهما يتيح، في ظل محدودية موارد الأرض، تعظيم إمكانات كل نظام وتكوين علاقة تعزيز متبادل، وهو مسار مهم لرفع كفاءة التشغيل الحضري وضمان الاستدامة [12].

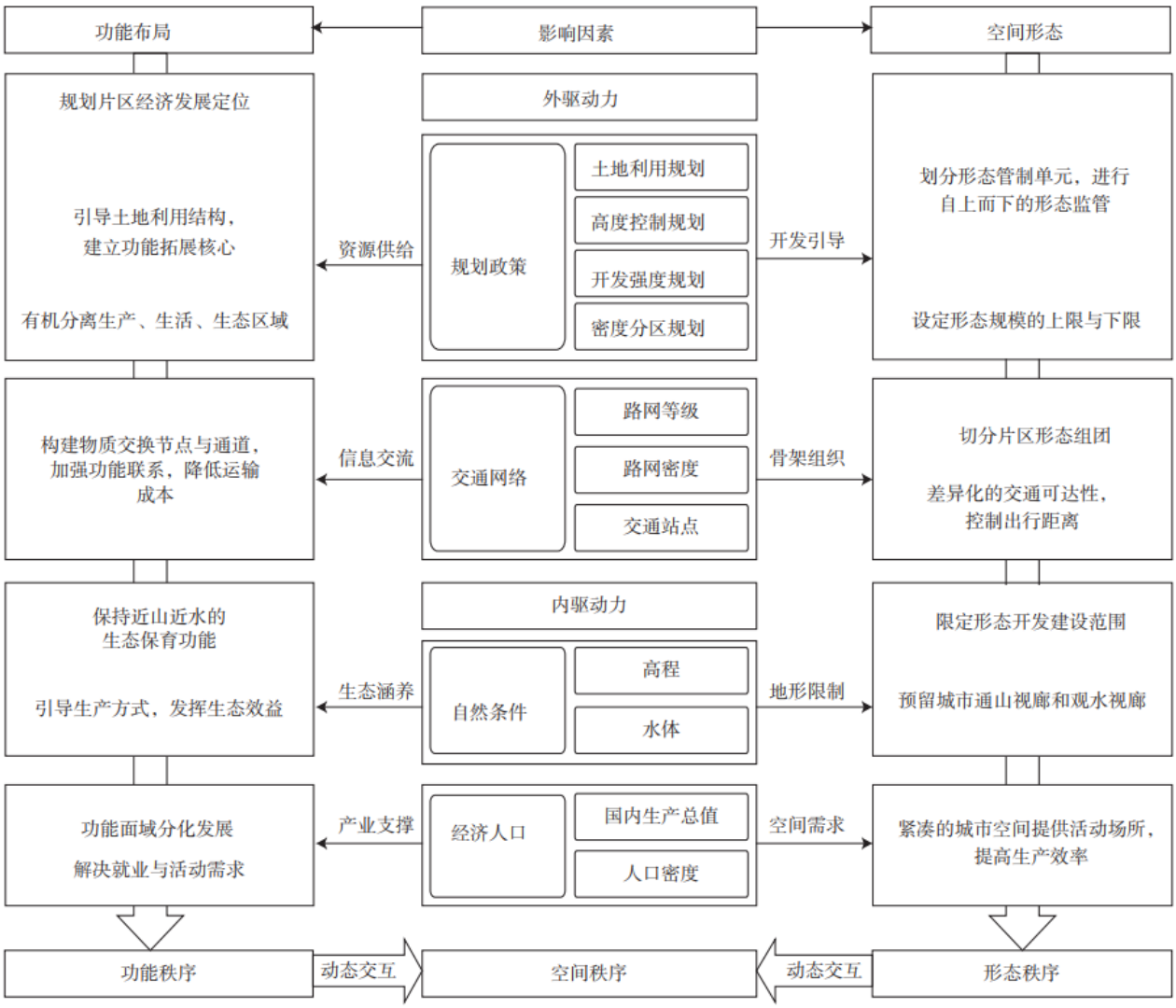
غير أن تسارع التنمية الحضرية يزيد تعقيد الظروف القائمة وتنوع الأطراف المعنية. ويصبح التناقض بين الأنشطة الوظيفية المتغيرة والأشكال المبنية الثابتة أكثر وضوحًا، ولا سيما عندما تقترن وظائف منخفضة الكثافة والحيوية بأشكال عالية الشدة. وبالنسبة إلى السكان، يؤدي سوء توزيع فضاءات الإنتاج والحياة إلى زيادة الازدحام والجزر الحرارية وتلوث الهواء وانخفاض جودة الحياة. أما من منظور الإدارة، فيؤدي عدم التوافق إلى اختلال العرض والطلب المكانيين، ويحد من إطلاق الحيوية الحضرية ويهدر الموارد، لينتهي إلى فوضى مكانية واختلال العلاقة بين الإنسان والأرض.

1.3 الصعوبة: تحقيق التفاعل الديناميكي بين الوظيفة والمورفولوجيا

يواجه المصمم عدة تحديات في تحقيق التفاعل الديناميكي على المقياس المتوسط. أولها صعوبة تفكيك آلية التفاعل. فالمدينة نظام متطور باستمرار؛ تتغير فيه احتياجات السكان والبنية الاجتماعية، وتتقلب العلاقة بين الوظيفة والفضاء بفعل عوامل خارجية، مثل سياسات التخطيط وشبكات النقل، وعوامل داخلية، مثل الطبيعة والاقتصاد والسكان (الشكل 1). وقد يؤدي تعديل منطقة وظيفية إلى تغيير المورفولوجيا العامة، كما يمكن لتغير الشكل أن يعيد توجيه الوظائف. وهذه «اللاانفصالية» و«عدم القدرة الكاملة على التنبؤ» [13] تعقدان التحليل والاستشراف.

والتحدي الثاني هو تأخر التغذية الراجعة الديناميكية. فالقرارات والتنفيذ يتأثران بمصالح متعددة وبالبيئة المبنية المعقدة، ويحتاج المصمم إلى تعديل البدائل والتحقق منها مرارًا في كل مرحلة. ومع غياب الأدوات الفعالة، تصبح عملية التغذية الراجعة بطيئة وتنخفض صلاحية الحلول.

ومن ثم يتطلب تجاوز هذه الصعوبة تخطي حدود الأساليب التقليدية، وفهم آليات التفاعل بين الوظيفة والمورفولوجيا، وتطوير منهج ذكي سريع وواسع التطبيق ومنخفض عتبة الاستخدام [14] يدعم تطورهما المقترن.



الشكل 1. آلية تأثير عوامل متعددة في التفاعل الديناميكي بين الوظيفة والمورفولوجيا

2 بناء مسار ذكي للتصميم الحضري على المقياس المتوسط

2.1 الأساس المنهجي

2.1.1 عناصر الاقتران بين الوظيفة والمورفولوجيا

لا يعني التنسيق بين الأنظمة المكانية التطابق الكامل أو الاستقلال التام، بل تحقيق انسجام بنيوي بين عناصرها. ووفق نظريات الموقع الكلاسيكية، تمثل «العقد والشبكات والأسطح» العناصر الأساسية للتطور المكاني [15]. وعلى نحو مماثل، يمكن تجريد عناصر الاقتران بين الوظيفة والمورفولوجيا في صورة نقاط وخطوط ومساحات [16].

في النظام الوظيفي، تمثل النقاط مراكز الوظائف العامة الرئيسة وفضاءات النشاط الإنتاجي واليومي. وتشير الخطوط إلى الممرات الرابطة بين المراكز، وغالبًا ما تتكون من وظائف عامة مصطفة على الطرق أو المجاري المائية أو المساحات الخضراء، فتشكل ممرات اقتصادية. أما المساحات فتمثل المناطق الوظيفية، مثل تجمعات الأعمال والسكن والإدارة. ويؤلف اجتماع النوى الوظيفية والممرات الاقتصادية والمساحات الخلفية بنية توجه تنمية المنطقة.

أما في النظام المورفولوجي، فتظهر النقاط عادة في صورة مجمعات عامة كبيرة أو مجموعات من الأبراج المكتبية العالية تعمل معالم ومراكز توجيه [17]. وتتكون الخطوط من سلاسل مستمرة من المباني المرتفعة أو منخفضة الكثافة، فتشكل ممرات بصرية. وتمثل المساحات النسيج الأساسي للشكل الحضري، حيث تُملأ الكتل بالمباني. ومن تفاعل مجموعات المعالم والممرات البصرية والنسيج المبني يتكون هيكل مورفولوجي يمكن تمييزه على المقياس المتوسط.

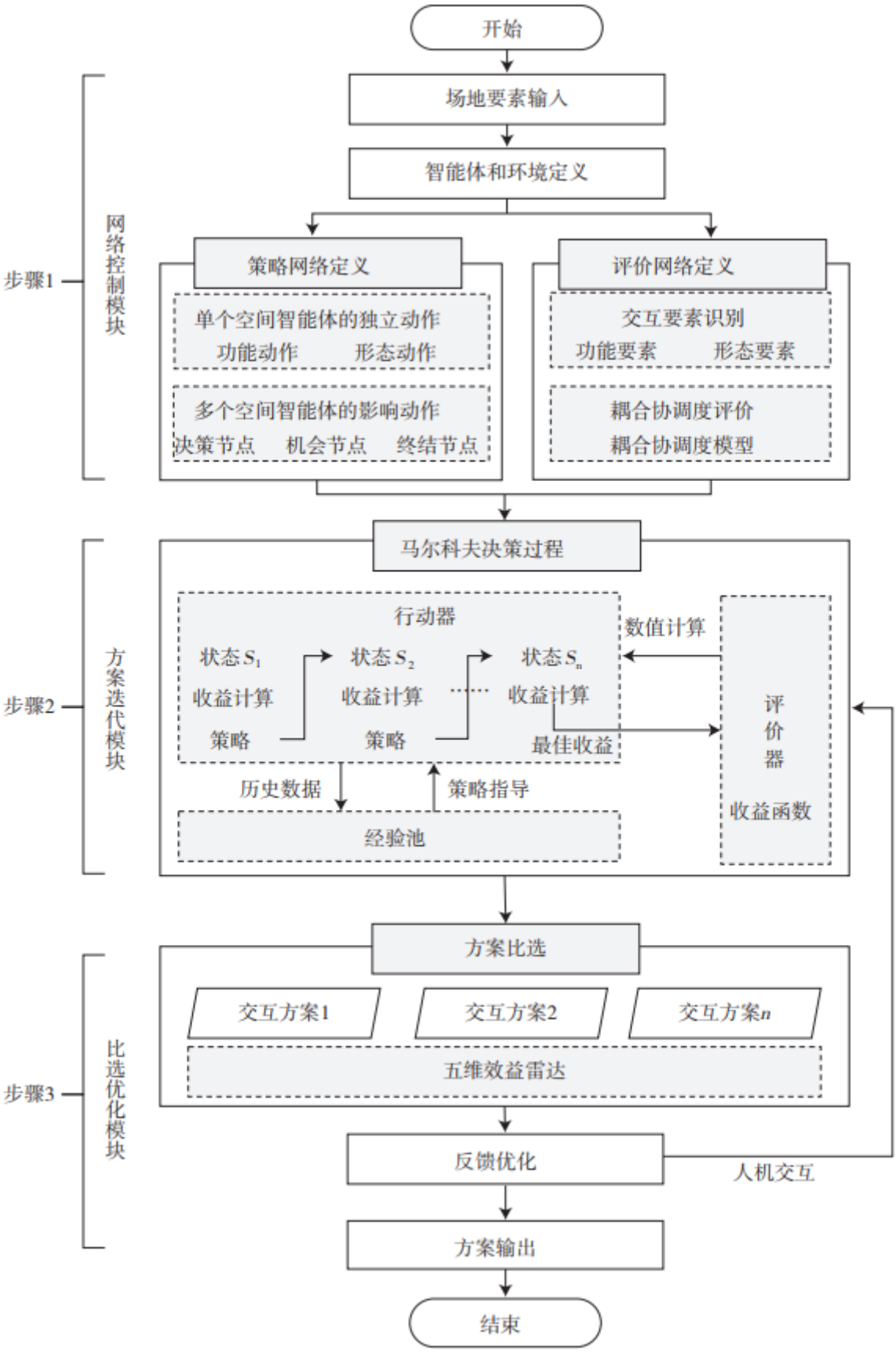
تشكل العناصر الوظيفية والمورفولوجية البنية المكانية الكلية من خلال دورة تغذية راجعة قائمة على الاقتران والتكافل. فالوظائف توجه تكوين الشكل؛ إذ تُحدد النوى الوظيفية واتجاهات الممرات الاقتصادية أولًا وفق أهداف التنمية وموارد الموقع، ثم تُبنى المورفولوجيا. وتعتمد جودة الأخيرة بدرجة كبيرة على عقلانية التنظيم الوظيفي [18] الذي يوفر إطارها الداخلي. وفي المقابل، تؤثر المورفولوجيا في الوظائف؛ فالفضاء المادي يوفر البيئة اللازمة لاحتضان الأنشطة ويساعد على تحسين توزيعها. وتستقطب الأشكال المدمجة والمتنوعة

مزيدًا من المستخدمين وتعزز حيوية المنطقة. ومن خلال الأنشطة البشرية وتنظيم السوق والحكومة والجهات الأخرى، يتكيف النظامان باستمرار وفق استخدام الفضاء [19] ويصلان إلى بنية مستقرة نسبيًا.

2.1.2 إطار تقني قائم على التعلم بالتعزيز

التعلم بالتعزيز① نموذج للتعلم الذاتي تقوده استجابة البيئة. وعلى خلاف التعلم الخاضع للإشراف، لا يحتاج إلى تدريب مسبق على مجموعات ضخمة من العينات؛ إذ يختار الوكيل أفعاله المتتابعة استنادًا إلى إشارات المكافأة والخبرة المتراكمة. وتمكّنه هذه الآلية من التكيف مع حالات بيئية متعددة واتخاذ قرارات ملائمة، ما يجعله مناسبًا للتصميم في فضاء حضري ديناميكي [20].

يعامل البحث كل كتلة عمرانية بوصفها وكيلًا مكانيًا، ويحول توليد المشروع إلى عملية تعاون وتفاعل وتنافس بين وكلاء متعددين. وتحدد شبكة السياسة الأفعال الوظيفية والمورفولوجية الممكنة، بينما تستخدم شبكة التقييم درجة التنسيق بين النظامين بوصفها دالة منفعة. ويقود مسار قرار ماركوف عملية تكرار البدائل، ثم تُستكمل بالمقارنة والتحسين بين الإنسان والآلة. ويتكون المسار العام من ثلاث وحدات: التحكم الشبكي، وتكرار الحلول، والمقارنة والتحسين (الشكل 2).



الشكل 2. المسار التقني للتصميم الذكي لتفاعل الوظيفة والمورفولوجيا على المقياس المتوسط

2.2 وحدة التحكم الشبكي

2.2.1 بناء شبكة السياسة من خلال الأفعال الوظيفية والمورفولوجية

تحدد شبكة السياسة الأفعال الوظيفية والمورفولوجية لكل وكيل مكاني، إضافة إلى علاقات التأثير بين الوكلاء المتعددين.

(1) شبكة سياسة الوكيل المكاني المنفرد

تُعرَّف فضاءات الفعل المستقلة للكتلة على النحو الآتي: $A = [a_1, a_2, \ldots, a_n]^T$ و$B = [b_1, b_2, \ldots, b_n]^T$. وبفعل التغذية الراجعة من شبكة التقييم، ينفذ الوكيل في كل خطوة فعلًا وظيفيًا a_t وفعلًا مورفولوجيًا b_t.

تشمل فئات الأرض المستخدمة عادة في التصميم على المقياس المتوسط B وA وG وR. وبسبب الاختلاف المورفولوجي الواضح بين B1 وB2، تُعاملان كفعلين منفصلين، يمثلان على التوالي خدمات الحياة اليومية والخدمات الإنتاجية، إلى جانب خدمات المصلحة العامة، والمساحات الخضراء، والسكن.

أما الأفعال المورفولوجية فتُقاس بتسعة مؤشرات في ثلاثة أبعاد: المقياس، والصفة المعلمية، والتنوع (الجدول 1). وتُحدد نطاقات توليدها وفق متطلبات التخطيط الأعلى.

الجدول 1. مؤشرات المورفولوجيا في التصميم الحضري على المقياس المتوسط

空间形态属性	指标名称	计算方式	指标释义
规模性	总体积/m³	$V_{sum} = \sum_{i=1}^{n} V_i$	V_i为街坊内第i个建筑单体体积
	总基底面积/㎡	$S_{sum} = \sum_{i=1}^{n} S_i$	S_i为街坊内第i个建筑单体的基底面积
	建筑密度	$B = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{S}$	S为街坊面积
	容积率	$P = \frac{V_{sum}}{S}$	/
	平均高度/m	$H_{avg} = \frac{V_{sum}}{S_{sum}}$	/
标志性	最高高度/m	H_{max}	/
	最大基底面积/m²	S_{max}	/
多样性	高度错落度	$D_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(H_i - H_{avg}\right)^2 / n}}{n}$	H_i为街坊内第i个建筑单体高度
	基底面积错落度	$D_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i - S_{avg}\right)^2 / n}}{n}$	S_{avg}为街坊内的平均基底面积

(2) شبكة السياسة متعددة الوكلاء

لا تمثل الكتل وحدات مستقلة تمامًا تفصلها الطرق، بل شبكة مكانية معقدة تشكلها تأثيرات التكتل وآليات التوازن [21]. وفي نطاق معين قد يؤدي تغير الخصائص الوظيفية أو المورفولوجية لكتلة واحدة إلى تعديل الكتل المحيطة. لذلك يجب تعريف فضاء للفعل وفضاء للحالة يصوغان علاقات التأثير بين الوكلاء.

يمثل فضاء الفعل النطاق الذي تنتقل ضمنه آثار التغيير من كتلة إلى أخرى. ويستخدم البحث خوارزمية أقرب K جيران، ويختار الكتل التسع الأقرب إلى الوكيل المستهدف. أما فضاء الحالة فيشمل كامل المنطقة، لأن أي فعل قد يغير الحالة الكلية.

إذا غيرت كتلة طرفية فعلها تحت تأثير كتلة مستهدفة، فقد تتحول بدورها إلى وكيل يؤثر في الجيران. ولتجنب عدد غير محدود من الحالات، يُضبط عمق التكرار من خلال ثلاثة أنواع من العقد مستلهمة من أشجار القرار: عقدة القرار التي تبدأ التغيير، وعقدة الفرصة التي تتأثر للمرة الأولى، والعقدة النهائية التي تتغير للمرة الثانية. وتبقى الكتل الواقعة خارج العقدة النهائية على حالها.

بعد ذلك تُحدد قواعد التأثير الوظيفي والمورفولوجي في فضاء الفعل. وتستخدم خوارزمية CART تقسيمًا ثنائيًا متتابعًا للبيانات المستمرة أو المنفصلة، وتختار المجموعة ذات أدنى مؤشر جيني:

$$Gini(A) = 1 - \Sigma_{i=1}^{c} p_i^2$$

حيث تمثل A العقدة، وp_i احتمال الانتماء إلى الفئة i، وC عدد الفئات.

2.2.2 بناء شبكة التقييم على أساس درجة اقتران «الوظيفة والمورفولوجيا»

لأن الهدف هو توليد حلول تتسم بتنسيق وظيفي ومورفولوجي، تمثل درجة الاقتران المعيار المركزي للتقييم. وتُستخدم نماذج التنسيق التقليدية، القائمة على معامل الاقتران ومؤشر التنسيق، على نطاق واسع لتقييم العلاقة بين نظامين [22-23]، وخصوصًا عندما يمكن التعبير عنهما رقميًا.

لكن النظامين الوظيفي والمورفولوجي يمتلكان خصائص مكانية واضحة؛ فلا يكفي مؤشر عددي واحد لتمثيل فروق الاقتران في الفضاء، كما أن التقييم اليدوي ذاتي ومكلف. لذلك تُكيِّف شبكة التقييم نموذج التنسيق مع خصائص العناصر المكانية، وتضم أربع مراحل: تحويل الحلول إلى درجات رمادية، والتعرف إلى عناصر الاقتران، وتقييم الكتل، وحساب درجة التنسيق.

① التحويل إلى درجات رمادية. تُحوَّل الحلول الوظيفية والمورفولوجية إلى صور رمادية. وفي النظام الوظيفي تُرتب الفئات وفق أهميتها البنيوية (B2 > A > B1 > G > R)، بينما تُقسم قيم المؤشرات المورفولوجية إلى خمسة مستويات بطريقة الفواصل الطبيعية.

② التعرف إلى عناصر الاقتران. تُستخدم قواعد التعرف إلى النقاط والخطوط والمساحات لتحويل النتائج إلى عناصر مكانية. وللنقاط يُحسب المتوسط الرمادي للكتل القريبة من كل تقاطع طريق بوصفه قيمة كامنة، ثم تُختار أعلى N قيم كنقاط وظيفية أو مورفولوجية. وللخطوط تُختار الكتل الواقعة على جانبي الطرق الرئيسة والثانوية والمنتمية إلى أعلى 50% من القيم، ثم تُحدد N محاور تضم أكبر عدد من الوحدات. أما المساحات فتشمل الكتل الواقعة ضمن أعلى 75% من قيم المنطقة.

③ تقييم الكتل. تُمنح كل كتلة درجة وفق دورها في تكوين العناصر. وتملك النقاط، بوصفها نوى وظيفية أو مجموعات معالم، أعلى قدرة على الإشعاع والتعريف؛ وتحتل الخطوط، بوصفها ممرات اقتصادية أو بصرية، مرتبة وسطى؛ فيما تملك المساحات الخلفية أقل قدرة على التعريف. وإذا شاركت الكتلة في أكثر من عنصر، تُجمع الدرجات.

④ حساب التنسيق. يحسب النموذج درجة اقتران كل كتلة في حالة معينة، وتساوي الدرجة الكلية للمنطقة مجموع قيم جميع الكتل.

2.3 وحدة التكرار في الحلول التصميمية

يمثل نمط الاقتران تعبيرًا عن حالة التفاعل [24]، ويكشف اتجاه تطور النظامين بعد تبادلهما الديناميكي. ومن ثم تقابل الأنماط المختلفة مسارات تكرار مختلفة في التصميم الذكي.

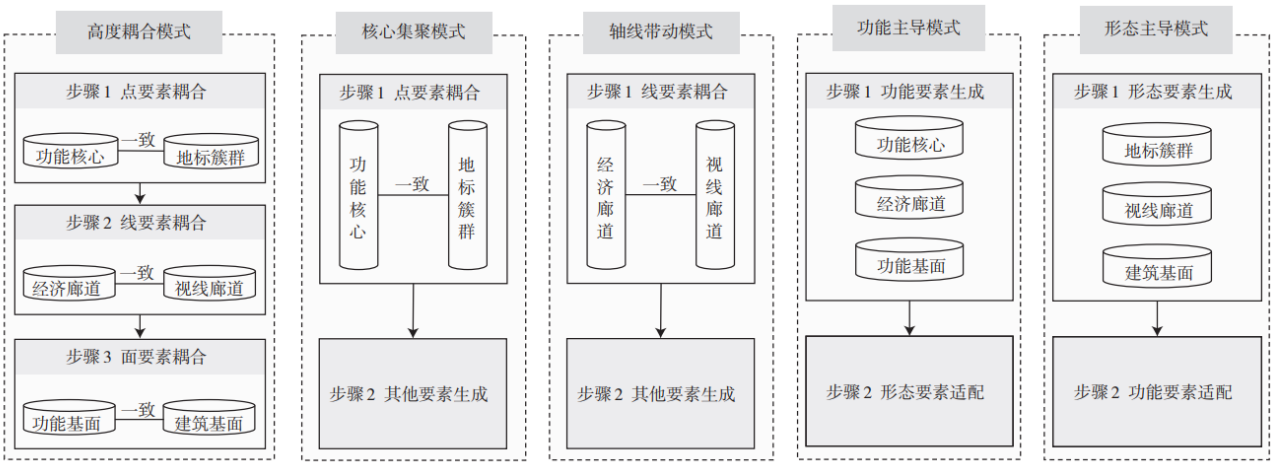
يُظهر فحص العلاقات المكانية بين العناصر الوظيفية والمورفولوجية، مع إعطاء الأولوية للنقاط والخطوط لأن المساحات أقل قدرة على التعريف، عدة حالات. فإذا كان النظامان كاملين، أي أمكن التعرف إلى عناصرهما النقطية والخطية، فقد يحدث تطابق مرتفع، أو تطابق يتركز في النقاط، أو في الخطوط، أو تطابق موضعي، أو غياب شبه كامل للتراكب. وإذا كان أحد النظامين فقط كاملًا، يظهر نمط هيمنة وظيفية أو مورفولوجية. وإذا كان كلاهما غير كامل، يظهر توزيع متناثر.

استنادًا إلى التصنيفات الشائعة لدرجة التنسيق، تُعد القيم بين 80% و100% تنسيقًا جيدًا، فيما تشير القيم الأقل من 20% إلى تنمية غير منسقة [25-26]. لذلك يستخدم البحث حدي 80% و20% للتمييز بين ثمانية أنماط: الاقتران المرتفع، والتركيز حول النواة، والدفع المحوري، والاقتران المتوسط، والتنمية غير المنسقة، والهيمنة الوظيفية، والهيمنة المورفولوجية، والتوزيع المتناثر (الجدول 2).

الجدول 2. ثمانية أنماط لاقتران الوظيفة والمورفولوجيا

نمط الاقتران	اكتمال العناصر الوظيفية	اكتمال العناصر المورفولوجية	اقتران النقاط	اقتران الخطوط
اقتران مرتفع	كامل	كامل	≥ 80%	≥ 80%
تركيز حول النواة	كامل	كامل	≥ 80%	> 80%
دفع محوري	كامل	كامل	> 80%	≥ 80%
اقتران متوسط	كامل	كامل	20-80%	20-80%
تنمية غير منسقة	كامل	كامل	≥ 20% أو > 80%	> 80% أو ≥ 20%
هيمنة وظيفية	كامل	غير كامل	—	—
هيمنة مورفولوجية	غير كامل	كامل	—	—
توزيع متناثر	غير كامل	غير كامل	—	—

تُستبعد الأنماط الثلاثة ذات التنسيق المنخفض، وهي التنمية غير المنسقة والتوزيع المتناثر والاقتران المتوسط. أما الأنماط الخمسة المتبقية — الاقتران المرتفع، والتركيز حول النواة، والدفع المحوري، والهيمنة الوظيفية، والهيمنة المورفولوجية — فتعبر عن تفاعل أكثر عقلانية، وتمثل اتجاهات مكانية مختلفة وتوفر للمصمم مسارات متنوعة للتكرار (الشكل 3).



الشكل 3. مراحل التوليد الموجهة بأنماط اقتران مختلفة

2.4 وحدة المقارنة والتحسين

نظرًا إلى صعوبة تحويل بعض متطلبات التصميم مباشرة إلى معايير تحكم، تُضاف إلى الحلول المولدة آليًا وحدة للمقارنة والتحسين بين الإنسان والآلة، بهدف إنتاج مقترحات قابلة للتطبيق.

أولًا، يُبنى مخطط راداري بخمسة أبعاد لمقارنة القيمة الشاملة للحلول: الاقتصاد، والبيئة، والمجتمع، والمشهد، وسهولة الوصول. وتُمثل الكفاءة الاقتصادية بمساحات أراضي B1 وB2 وحجم البناء؛ والكفاءة البيئية بنسبة أراضي G وE؛ والكفاءة الاجتماعية بنسبة مباني الفئة A؛ والكفاءة المشهدية بمدى رؤية المساحات الخضراء والمسطحات المائية من الكتل باستخدام محاكاة 360 درجة؛ وسهولة الوصول بمتوسط أقصر مسافة بين الوحدات السكنية ومرافق الخدمة العامة المجاورة.

استنادًا إلى هذه المعايير، يحسب الحاسوب مؤشرات عدد كبير من الحلول الأولية ويصنفها تلقائيًا. ثم يستخدم المصمم المخطط الراداري لاختيار الحلول التي تستحق التطوير ويُحسنها بالتفاعل مع النظام مع مراعاة مطالب الأطراف المختلفة. وفي النهاية تُنتج نماذج متجهية ورسومات تصميم حضري على المقياس المتوسط.

3 التحقق التطبيقي: ممارسة التصميم الحضري الذكي في منطقة نموذجية

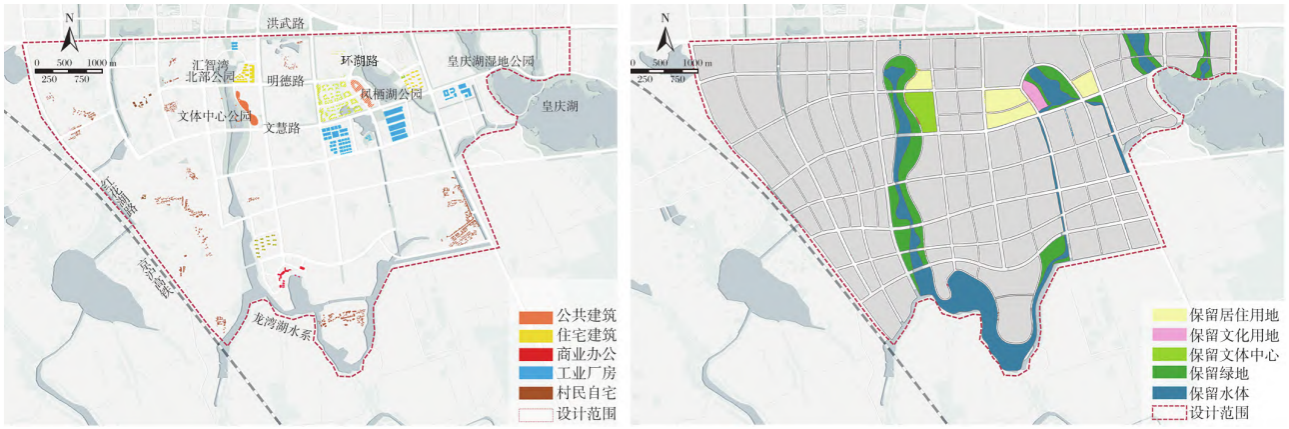
3.1 حالة ممثلة لـ«أرض شبه خالية من القيود»

تختار التجربة منطقة في مدينة Chuzhou تمثل عددًا كبيرًا من الأطراف الحضرية ذات التطوير المحدود، التي أصبحت في ظل السياسات الراهنة مجالات أولوية لاستيعاب الوظائف المنقولة من المدينة القديمة وتوسيع المدينة الجديدة. وتضم هذه المناطق عناصر قليلة يجب الحفاظ عليها، كما أن قيود الملكية المعقدة أو الحماية التاريخية أقل حضورًا، ما يسمح بتجسيد المخطط المكاني على نحو أوسع ويهيئ ظروفًا ملائمة للتجربة الذكية.

تهدف التجربة على «أرض شبه خالية» أولًا إلى بناء العملية الأساسية للتفاعل الذكي بين الوظيفة والمورفولوجيا. وبعد ذلك يمكن تطبيق المنهج في سياقات تضم قيودًا قائمة أكثر تعقيدًا، وصولًا إلى طريقة ناضجة قابلة للاستخدام في المشروعات الواقعية.

يشغل الموقع حاليًا خليط من الأراضي الزراعية والحراجية والقرى. ووفق التخطيط الأعلى، سيُحول إلى أرض بناء حضرية. وقبل التصميم الذكي تُبنى قاعدة رقمية لتقييم الموارد، مع الحفاظ على المجاري المائية والمساحات الخضراء ذات القيمة البيئية العالية، وكذلك الأراضي السكنية والثقافية التي تتمتع مبانيها بجودة مقبولة.

يُستخدم المركز الهندسي لكل كتلة بوصفه إحداثية لإنشاء 155 وكيلًا مكانيًا. وتحصل الوحدات التي يجب الحفاظ على وظائفها أو خصائصها المورفولوجية على ترميز one-hot [27] يمنع تنفيذ أفعال عليها خلال التكرار (الشكل 4).



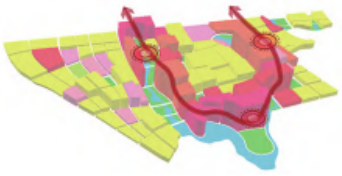
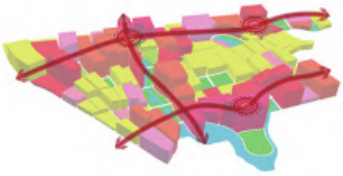
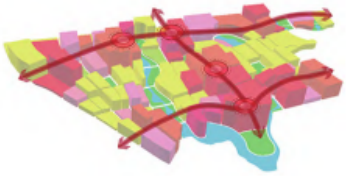
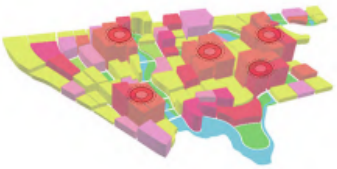
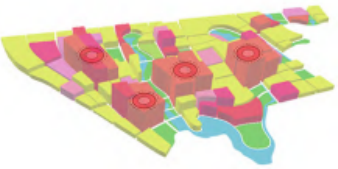
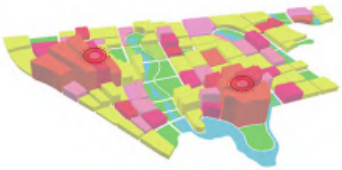
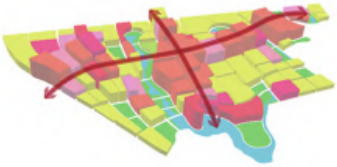
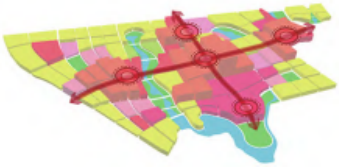
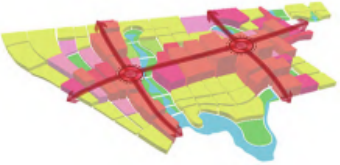
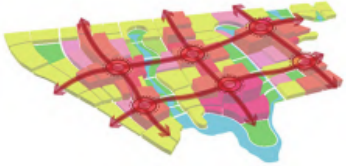
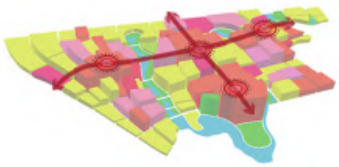
الشكل 4. الظروف القائمة والقاعدة الرقمية للمنطقة النموذجية

3.2 نتائج التصميم الحضري الذكي القائم على التفاعل الديناميكي بين الوظيفة والمورفولوجيا

يولد المسار المقترح تلقائيًا خمسة عشر بديلًا للأنماط الخمسة المختارة (الجدول 3).

الجدول 3. بدائل التصميم الحضري الذكي للمنطقة النموذجية

نمط الاقتران	البديل 1	البديل 2	البديل 3
اقتران مرتفع	A-1	A-2	A-3
تركيز حول النواة	B-1	B-2	B-3
دفع محوري	C-1	C-2	C-3
هيمنة وظيفية	D-1	D-2	D-3
هيمنة مورفولوجية	E-1	E-2	E-3

耦合模式	智能城市设计方案		
高度耦合模式	A-1	A-2	A-3
			
核心集聚模式	B-1	B-2	B-3
			
轴线带动模式	C-1	C-2	C-3
			
功能主导模式	D-1	D-2	D-3
			
形态主导模式	E-1	E-2	E-3
			

3.2.1 توليد الحلول في نمط الاقتران المرتفع

تشمل عملية التكرار عناصر نقطية وخطية. وتُختار تقاطعات الطرق الخمسة ذات أعلى متوسط رمادي للكتل المحيطة بوصفها نقاط اقتران، فيما تُختار الطرق الرئيسة والثانوية الثلاثة الأعلى ترتيبًا بوصفها خطوط اقتران.

تزداد درجة التراكب المكاني مع عدد دورات التكرار. وتصل النقاط إلى أفضل منفعة بعد نحو 1200 دورة، والخطوط بعد أكثر قليلًا من 500 دورة. ثم تُنشأ تركيبات عشوائية ثنائية، وتُختار التركيبات الثلاثة ذات أقل مجموع للمسافات العمودية بين النقاط والخطوط القريبة لتكون الحلول A-1 وA-2 وA-3.

3.2.2 توليد الحلول في نمط التركيز حول النواة

في هذا النمط يؤدي التركز المكاني المرتفع لعوامل الإنتاج إلى تكوين عقد مركزية. وتدفع النوى التي تتطور أولًا الكتل المجاورة عبر انتشار رأس المال والعمل والموارد الأخرى. وتتطابق النوى الوظيفية ومجموعات المعالم بدرجة كبيرة بما يعظم أثر التكتل.

تتشابه عملية تكرار النقاط مع نمط الاقتران المرتفع وتستقر بعد أكثر من 1200 دورة. وتُختار ثلاثة بدائل ذات منفعة مرتفعة وعدد مختلف من العقد: B-1 وB-2 وB-3. ويؤدي اختلاف عدد العقد إلى تكوينات مكانية متباينة، وكلما زاد العدد ضعفت وحدة الهيكل العام.

3.2.3 توليد الحلول في نمط الدفع المحوري

يعتمد النمط المحوري على شبكة النقل لترتيب الكتل ذات الوظائف الأكثر عمومية والأشكال الأكثر معلمية، فينشئ بنية خطية تدفع تنمية المنطقة بأكملها.

بعد أكثر قليلًا من 500 دورة تتقارب العناصر الخطية نحو حلول عالية الاقتران. وتُختار البدائل الثلاثة ذات أعلى قيمة للمنفعة: C-1 وC-2 وC-3. وتظهر النتائج أن الحلول الأفضل غالبًا ما تأخذ شكل صليب أو أحد تحولاته، وأن المحور يحقق أثرًا أكبر عندما يمر عبر وسط المنطقة.

3.2.4 توليد الحلول في نمط الهيمنة الوظيفية

في هذا النمط تُعد المورفولوجيا محتوى متكيفًا مع التنظيم الوظيفي، ولذلك تكون عقلانية الوظائف حاسمة. وللاستفادة من عدم اليقين في التوليد الآلي وتحفيز إبداع المصمم، لا تُفرض في البداية قواعد جامدة للتقسيم الوظيفي، بل تستكشف خوارزمية التعلم بالتعزيز التركيبات الممكنة بحرية.

في المراحل الأولى تكون استخدامات الأرض متناثرة ولا يظهر نظام وظيفي واضح. وبعد نحو 1000 دورة، تتضح النوى التجارية ومراكز الخدمة العامة والممرات الاقتصادية. ثم يقرن النظام بها المؤشرات المورفولوجية المناسبة ويولد الحلول D-1 وD-2 وD-3 ذات أعلى منفعة.

وعمومًا، عندما يزيد عدد العناصر الوظيفية الخطية على ثلاثة، تميل المورفولوجيا إلى التجانس. ورغم استمرار الاقتران الجيد، تضعف الخصوصية المكانية.

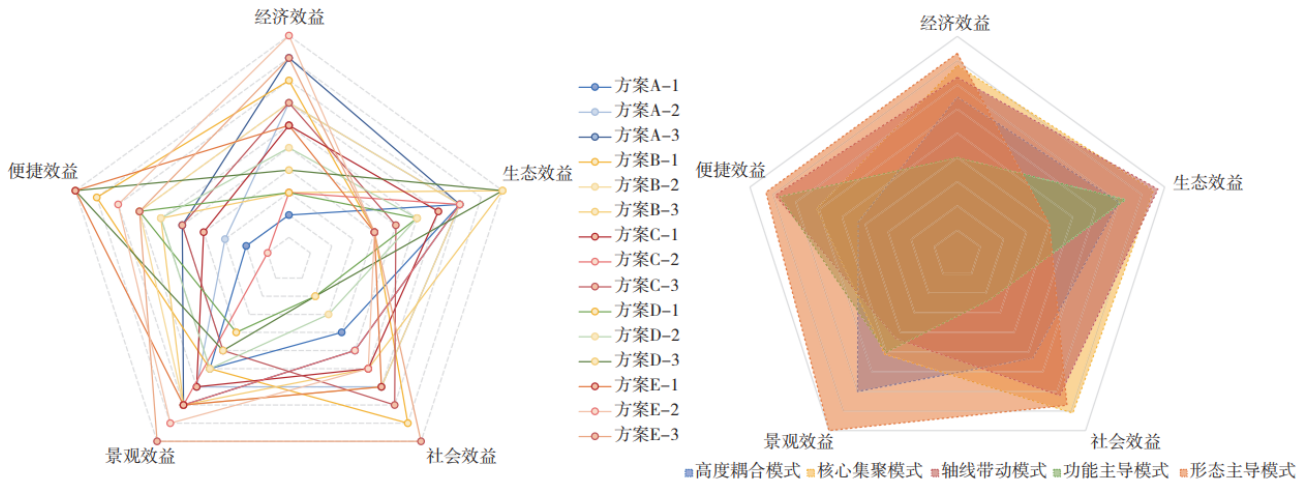
3.2.5 توليد الحلول في نمط الهيمنة المورفولوجية

في هذا النمط تُولد المورفولوجيا أولًا تحت توجيه شبكة السياسة، ثم تُسند الوظائف بذكاء وفق العلاقات المستخلصة من الخبرة. وعلى خلاف الحلول ذات الهيمنة الوظيفية، التي تتسم بكتلة عامة هادئة وارتفاعات موضعية، تنتج الهيمنة المورفولوجية عددًا أكبر من الكتل العالية ذات القيمة المعلمية، ويتراوح الارتفاع بين 0 و250 م فتتكون صورة أكثر تنوعًا.

بعد نحو 900 دورة تصبح تقلبات الشكل قابلة للقراءة، وتظهر مجموعات من المعالم المرتفعة وأشرطة متصلة من المباني العالية. ثم تُسند الوظائف تلقائيًا وتُنتج الحلول E-1 وE-2 وE-3. وتتسم هذه الحلول بمزيج وظيفي مرتفع ولا تظهر فيها مناطق وظيفية شديدة الفصل.

يقارن المخطط الراداري الخماسي أداء البدائل والأنماط المختلفة (الشكل 5). ويُختار البديل E-3، ذي الهيمنة المورفولوجية والأداء الشامل الأفضل، حلًا أوليًا. وبعد جولات من التغذية الراجعة والتحسين المشترك، يُنظم المشروع حول شبكة مائية على هيئة حرف U تشكل هيكلًا مكانيًا، وتُوزع على امتدادها وظائف الخدمة العامة والمباني المعلمية، فيما تتفرع منها عدة اتجاهات للتنمية.

تثبت الحالة قابلية تطبيق المنهج ونقله إلى مناطق أخرى على المقياس المتوسط. فهو قادر على تقديم حلول أكثر تنوعًا وعقلانية في وقت قصير داخل البيئات الحضرية المعقدة. كما أن الحلول لا تمثل حالات ساكنة مستقلة، بل يمكن أن تتحول بينها ديناميكيًا بتعديل المعايير، وهو ما يزيد المرونة والتكيف مع الاحتياجات المتغيرة.



الشكل 5. مخططات رادارية لتقييم البدائل وأنماط الاقتران المختلفة

4 الخاتمة

مع تطور النظام المكاني الحضري المعقد، يزداد التفاعل بين الوظيفة والمورفولوجيا على المقياس المتوسط تعقيدًا. ومن منظور التفاعل الديناميكي، يبني البحث منهجًا ذكيًا ذا قابلية عامة باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي. ومن خلال التفاعل بين المصمم والنظام، ينتقل

الفضاء من الفوضى إلى النظام، ومن حالة ديناميكية إلى حالة مستقرة نسبيًا. وبذلك يحاكي المنهج تطور النظامين الوظيفي والمورفولوجي في التعاون والتنافس والتكيف المتبادل، ويكشف الطبيعة التطورية للفضاء الحضري.

في سياق التحول السريع للتقنيات الناشئة، يشهد التصميم الحضري الرقمي القائم على الذكاء الاصطناعي نموًا متسارعًا. ومع إعادة تشكيل أنماط الإنتاج والحياة للفضاء الحضري المستقبلي، ينبغي إدراك الدور الحاسم للأدوات الذكية بدرجة أكبر. وسيظل الدمج الإبداعي بين المعرفة البشرية والقدرة الحاسوبية لتصميم فضاءات حضرية عالية الجودة عبر مقاييس وأبعاد وسيناريوهات متعددة قضية علمية مهمة لفترة طويلة. وما يزال الطريق نحو تصميم حضري ذكي موجه للمستقبل في بدايته.

ملاحظة

① التعلم بالتعزيز (reinforcement learning, RL) طريقة في التعلم الآلي يحصل فيها الوكيل على «مكافآت» من خلال التجربة والخطأ أثناء التفاعل مع البيئة. وتتمثل مكوناته الرئيسة في شبكة السياسة (policy network)، وشبكة التقييم أو النقد (critic network)، ومسار قرار ماركوف (Markov decision process, MDP). وتولد الأفعال المختلفة إشارات مكافأة متباينة توجه الفعل التالي بهدف تعظيم المنفعة. وقد تطور من التعلم أحادي الوكيل نموذج متعدد الوكلاء، تتعاون فيه عدة كيانات لحل مهام التحسين في فضاءات معقدة وعالية الأبعاد وديناميكية.

المراجع

[1] وزارة الإسكان والتنمية الحضرية والريفية في جمهورية الصين الشعبية. لائحة إدارة التصميم الحضري 2017 .[S]. [بالصينية]

[2] TRANCIK R., GOODEY B., JIN Guangjun. مفهوم التصميم الحضري ومضمونه 77-76 :(4)1990, New Architecture, [J]. [بالصينية]

[3] WANG Jianguo. أربعة أجيال من نماذج تطور التصميم الحضري من منظور التخطيط العقلاني, City Planning Review, [J]. 2018, 42(1): 9-19. [بالصينية]

[4] BIAN Hongqin, CHEN Nan. أربعون عامًا من إرشادات التصميم الحضري على المقياس المتوسط: مراجعة وتأمل وآفاق .[J] Planners, 2020, 36(15): 55-60. [بالصينية]

[5] SUN Yimin. البناء العلمي للمشروعات الحضرية الكبرى على المقياس المتوسط: تأملات في نظام المصمم الرئيس .[J] Contemporary Architecture, 2022(5): 19-23. [بالصينية]

[6] YANG Junyan, LU Xiaobo. المورفولوجيا المتوسطة للتصميم الحضري: استكشاف مشروع «المحاور التسعة في Tongjin» بمدينة Nantong [J]. City Planning Review, 2019, 43(12): 106-116. [بالصينية]

[7] ZHANG Li, DENG Huishu, MEI Xiaohan, et al. هندسة العوامل البشرية الحضرية: علم تصميم جودة التجربة المكانية .[J] Chinese Science Bulletin, 2022, 67(16): 1744-1756. [بالصينية]

[8] WU Zhiqiang, HUANG Xiaochun, LI Dong, et al. مائدة أكاديمية مستديرة حول «تأثير الذكاء الاصطناعي في التخطيط الحضري» 10-1 :(5)2018, Urban Planning Forum, [J]. [بالصينية]

[9] YANG Chao. مبادئ التصميم الحضري للمدن الجديدة في إطار «البنيوية التحتية»: تكامل البنى ذات التنظيم الخارجي والتنظيم الذاتي 53-45 :(5)2023, Urban Planning Forum, [J]. [بالصينية]

[10] YANG Junyan, ZHANG Zhonghu, SHI Yi. منصة رقمية للمشاركة العامة في التصميم الحضري الموجه للتجديد: حالة منطقة Yuejianglou في Nanjing [J]. Urban Planning Forum, 2024(3): 74-81. [بالصينية]

[11] SHAO Dian, YANG Junyan. تحليل تراكب الأنظمة متعددة الهياكل في المورفولوجيا المكانية الحضرية [J]. Chinese Famous Cities, 2023, 37(1): 71-78. [بالصينية]

[12] WANG Lin, TIAN Jian, XU Xiaonan, et al. التمايز المكاني واقتران المستوطنات الريفية على مستوى المقاطعة من منظور علاقة المورفولوجيا بالوظيفة: حالة مقاطعة Shan في جنوب غرب Shandong [J]. Progress in Geography, 2024, 43(9): 1730-1743. [بالصينية]

[13] YANG Tao, TIAN Ying, XU Yanjie. التخطيط والحوكمة التوليديان التفاعليان المدعومان بالتوائم الرقمية [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(5): 4-10. [بالصينية]

[14] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. بناء نموذج نظري للتصميم الحضري المدعوم بتقنيات AIGC [J]. Urban Planning Forum, 2023(2): 12-18. [بالصينية]

[15] ZHENG Degao, ZHU Wenjuan, LIN Chenhui, et al. دراسة المناطق ذات الأولوية والمناطق المحتملة في Shanghai من منظور تحسين البنية الوظيفية 71-65 :(6)2020, Urban Planning Forum, [J]. [بالصينية]

[16] YANG Chao, LI Qiang. المنطق الشكلي المنظم للتصميم الحضري: توسيع نظرية تحليل التصميم [J]. Urban Development Studies, 2024, 31(1): 31-41. [بالصينية]

[17] GUO Y., HU X., TANG J. Structural landmark salience computation in compact urban districts with 3D node-landmark grid analysis model: a case study on two sample districts in Changsha, China [J]. Buildings, 2023, 13(4): 1024.

[18] HU Xinyu. دراسة كمية للفضاء والأنشطة في المراكز الحضرية ذات البنية المحورية والعقدية في المدن الآسيوية الكبرى [D]. جامعة الجنوب الشرقي، 2016. [بالصينية]

[19] HE Yong, CHEN Yufan, ZHAO Jing. التحول الوظيفي والتطور المورفولوجي للمستوطنات الريفية شبه الحضرية في المناطق الصينية المتقدمة اقتصاديًا [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(5): 17-23. [بالصينية]

[20] LI J. W., ZHOU T. Multiagent deep meta reinforcement learning for sea computing-based energy management of interconnected grids considering renewable energy sources in sustainable cities [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104917.

[21] SHAO Dian, YANG Junyan, SHI Beixiang, et al. من مخطط التصميم إلى نظام التحكم: منهج للترجمة الدقيقة للتصميم الحضري على مستوى الكتلة [J]. City Planning Review, 2022, 46(10): 56-71. [بالصينية]

[22] ZHANG Xuchen, ZHAO Min. أصول «دراسات الاقتران» في التخطيط الحضري وتحليل الأخطاء الشائعة [J]. City Planning Review, 2022, 46(6): 37-47. [بالصينية]

[23] ZHANG L., WU M., BAI W., et al. Measuring coupling coordination between urban economic development and air quality based on the fuzzy BWM and improved CCD model [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103283.

[24] ZHANG Yang, HE Yi. من الانفصال إلى التكامل: منطق بناء نظام للتقييم التشخيصي للمناطق التاريخية استنادًا إلى نظرية الاقتران المنظومي [J]. Urban Planning Forum, 2024(3): 82-90. [بالصينية]

[25] XING Zhong, ZHU Jiayi. تقييم عدالة المساحات الخضراء بالاستناد إلى نظرية التنمية المنسقة بالاقتران [J]. City Planning Review, 2017, 41(11): 89-96. [بالصينية]

[26] ZHAO Xuechun, JU Chunyan. علاقة التنسيق بين المساحات الخضراء العامة والفضاء الوظيفي الحضري والعوامل المؤثرة: حالة Urumqi [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(5): 898-908. [بالصينية]

[27] YAO Jiawei, HUANG Chenyu, FU Bin, et al. بحث وتطبيق في تصميم تقوده كفاءة بيئة الرياح ويدعمه التعلم العميق بالتعزيز [J]. Architectural Journal, 2022(S1): 31-38. [بالصينية]

تاريخ استلام النسخة المعدلة: يناير 2025.

ترجمة بمساعدة الذكاء الاصطناعي