

Пространственно-временное агентное моделирование общественных жизненных кругов с интеграцией дискретного выбора и агентного подхода: построение теоретической модели и исследовательская рамка

Авторы

Чэ Гуаньцзюнь; Цю Баосин; Ван И-тянь; Лань Сюй

Аннотация

Эффективность услуг в общественном жизненном круге зависит от того, насколько точно раскрыто взаимодействие разнородных повседневных активностей жителей и пространственного размещения объектов обслуживания. Современные исследования уже смещаются от статического пространственного анализа к динамическим пространственно-временным активностям, микропроектам индивидов и имитации поведенческих решений. Однако количественное описание индивидуальных предпочтений и системное представление измерений выбора остаются недостаточно разработанными; также не вполне прояснены взаимодействие разнородных индивидов с пространством и механизмы восходящего возникновения. Опираясь на систему "проект - активность" в географии времени как теоретический прототип, статья предлагает интегрированную рамку, объединяющую смешанную модель Logit и агентное моделирование. Рамка включает три этапа: настройку агентов жителей и пространственных агентов с динамическими и статическими атрибутами; проектирование и оценку механизма решения, отражающего гетерогенность индивидуальных предпочтений; проведение агентной имитации, соединяющей планирование, исполнение и обратную связь. Тем самым статистическое распределение гетерогенности предпочтений жителей встраивается в агентную модель, формируя контур обратной связи между теоретическим моделированием и практической проверкой. Предложены четыре направления применения: многомерная динамическая оценка качества услуг жизненного круга; атрибутивный анализ механизмов взаимодействия между людьми и жизненными кругами; формирование пространственной многозначности и сценариев на основе имитации активности; прогнозирование сценариев и оценка вмешательств в развитие жизненного круга. Рамка дает вычислимую модель анализа сложности и гетерогенности взаимодействия человека и пространства в общественных жизненных кругах и поддерживает точное, человекоцентричное управление обновлением.

Ключевые слова

пространственно-временная имитация поведения; смешанная модель Logit; агентная модель; общественный жизненный круг; человекоцентричное планирование

1 Развитие теории и методов исследования жизненных кругов

По мере углубления стратегии новой урбанизации в Китае городская пространственная структура и социальная жизнь претерпевают глубокую перестройку, а социальное пространство становится более разнообразным, динамичным и сложным [1-3]. Исследовательская парадигма планирования, сосредоточенная на статическом физическом пространстве, уже не способна эффективно объяснять разнообразные потребности жителей, их динамические модели поведения и сложные взаимодействия с пространственной средой. Поэтому анализ процессов

взаимодействия человека и пространства и механизмов принятия решений при многоуровневых пространственно-временных ограничениях необходим как для понимания сложности и вложенной темпоральности городского социального пространства, так и для реализации человекоцентричной стратегии новой урбанизации [4-5].

В этом контексте общественный жизненный круг является активным полем, которое несет и связывает множественные активности жителей и постоянно опосредует материальный, информационный и эмоциональный обмен. Он выступает не только микронесущей структурой взаимодействия человека и пространства, но и ключевым посредником между индивидом, обществом и пространством. Поэтому он стал важной точкой входа для анализа механизмов человеко-пространственного взаимодействия и реализации идеи "народного города" [6-7]. Такое взаимодействие имеет выраженный процессуальный характер: оно проявляется в непрерывной эволюции траекторий активности и последовательной зависимости пространственно-временных решений. Оно также глубоко сложно, поскольку возникает из индивидуальной гетерогенности, социальных сетей, пространственной среды, институтов и культуры [8-9].

Тем не менее существующие исследования часто опираются на статические данные, "закрепленные" в административных районах или переписных единицах, либо на поперечные данные, которые усредняют индивидов внутри групп. Такие данные дают снимки в отдельные моменты времени, но не позволяют адекватно уловить процессы активности дифференцированных индивидов под пространственно-временными ограничениями и их динамическое взаимодействие с застроенной средой [4]. Это теоретико-методическое ограничение порождает несоответствие между конфигурацией жизненного круга и реальными потребностями жителей, затрудняя человекоцентричное и качественное пространственное управление.

В связи с этим статья фокусируется на двух центральных вопросах. В теоретическом плане - как выйти за пределы статического анализа "снимков" и точно объяснить динамические связи и возникающие паттерны между последовательностями индивидуальных активностей и пространственными решениями? В практическом плане - как построить инструменты, способные имитировать реальное взаимодействие человека и пространства и давать тонкую динамическую поддержку решений для размещения объектов жизненного круга и пространственной оптимизации? Для ответа на эти вопросы статья соединяет понятие "проекта" в географии времени, подчеркивающее двойные ограничения субъективных намерений активности и объективных условий, а также динамическую связь между последовательностями активности и пространственным выбором, с агентным моделированием, поддержанным ИИ. Предлагается пространственно-временная агентная модель общественного жизненного круга, интегрирующая время, пространство и активность [10-12]. Модель центрирована на агентах-жителях с гетерогенными характеристиками, использует модель дискретного выбора для представления процесса "пространственная оценка - выбор - перемещение" и с помощью сценарной имитации раскрывает взаимодействие отдельных жителей с жизненным пространством при множественных ограничениях. Тем самым она формирует восходящую аналитическую парадигму, динамически реагирующую на индивидуальное поведение.

1.1 От статического пространства к динамической пространственно-временной активности

Под влиянием глубокой интеграции городского и сельского планирования, географии времени, поведенческой географии и новых технологий, включая пространственно-временные большие данные, исследования жизненных кругов сместились от физического пространства к активностям населения и от узловых мест к сетям потоков. Ранние работы исходили из пространственной онтологии и продолжали традиционные теории пространственного планирования, такие как теория концентрических зон и единица соседства. Жизненный круг рассматривался как статический, четко ограниченный кольцевой пространственный контейнер [13]. В этой перспективе исследования были сосредоточены на внутренней пространственной организации, выявлении макроструктурных особенностей и сочетаний жилых, коммерческих, зеленых и иных функциональных землепользований [14]. Пространственная эконометрика и GIS также применялись для оценки эффективности и справедливости общественных услуг, создавая доказательную базу для стандартизированного распределения пространственных ресурсов [15-16]. По мере роста мобильности и вложенности человеческих активностей построение жизненных кругов стало требовать теорий и методов, исходящих из систем активности и изучающих отношения человека и пространства. Введение географии времени стало ключевым сдвигом. Понятия пространственно-временного пути и призмы позволили описывать реальные траектории активности и потенциальные наборы возможностей, переводя внимание от статических и узловых пространств активности к процессам активности и сетям потоков [17-19]. Одновременно развитие пространственно-временных больших данных обогатило данные индивидуальных траекторий и городской активности, продвинув исследования к выявлению паттернов активности, уровней и функций жизненного круга и механизмов пространства активности [20]. Исследования охватили делимитацию и типологию жизненных кругов по пространственно-временным траекториям [21-22], согласование спроса, поведения и предложения объектов обслуживания [23-24], оценку эффективности и жизненности пространства по пространственно-временному поведению [25], механизмы влияния застроенной среды на такое поведение [26-29] и социальную дифференциацию поведения в жизненном круге [30-31]. Эти работы создают прочную теоретическую основу для точной функциональной идентификации, анализа взаимодействия людей и пространства и человекоцентричного повышения качества жизни.

1.2 От макроактивности к микропроектам индивидов

География времени и поведенческая география внесли в исследования жизненных кругов человекоцентричную и деятельностную перспективу, однако большинство работ все еще обобщает пространственно-временные паттерны активности на агрегированном уровне. Индивидуальные различия, пространственное восприятие и социально-экономические ограничения учитываются недостаточно, что затрудняет анализ механизмов активности и последовательных связей при двойных ограничениях индивида и среды. В результате исследования часто остаются на уровне последующего наблюдения и слабо поддерживают предварительное прогнозирование [2,8].

В ответ на это смежные исследования выдвинули понятие проекта, подчеркивая, что активности тесно связаны с индивидуальными намерениями и планами, но одновременно ограничены способностью, сопряжением и властью [32-33]. Понятие проекта выходит за рамки классификации по признакам активности и вместо этого классифицирует активности по тому, как индивидуальные

намерения и внешние ситуации совместно организуют деятельность. Оно углубляет понимание совместного действия субъективной агентности и объективных ограничений в контексте активности и дает новую аналитическую рамку для объяснения процессуальных механизмов пространственно-временного поведения и сложности систем активности [1,6].

В этой рамке китайские и зарубежные ученые изучали повседневные системы "проект - активность" в трех направлениях. Первое связано с социальным благополучием и справедливостью: оно выявляет различия в жизненных проектах, пространственно-временных трудностях и социальных эффектах у разных групп, включая компьютеров, женщин, пожилых людей и низкодоходные группы, и анализирует ограничения, обусловленные расстоянием между жильем и работой, семейными обязанностями, физическими и экономическими возможностями [34-41]. Второе направление рассматривает, как технологические изменения перестраивают форму и гибкость проектов. Умная мобильность и сервисы доставки могут ослаблять ограничения способности к перемещению и делать возможными сложные многоцелевые последовательности активностей [23,42-44]. Третье направление связано с мультимодальными обследованиями больших данных и визуализацией. Данные местоположения и траекторий, социальные медиа и вычислительные социальные науки позволяют с высоким разрешением представлять пространственно-временные пути социальных групп и выявлять ограничения, лежащие за конкретными проектными траекториями, переводя измерение проекта от макроописания к микроточности и динамическому анализу [12,45].

1.3 От концептуальных моделей проекта к имитации поведенческого выбора

Выдвижение и применение понятия проекта перенесли исследование повседневной жизни с макроколлективного уровня на микроуровень индивида. Существующие работы предложили алгоритмы построения индивидуальных пространств активности на основе якорей активности [46]. Другие исследования использовали модели дискретного выбора на основе теории случайной полезности, совмещая их с многоагентной имитацией для анализа выбора пунктов назначения и маршрутов при совместных ограничениях намерений агента, застроенной среды и распределения времени [47-49]. Эти работы подтверждают пригодность агентного моделирования для имитации микроповедения, но большинство из них остается на уровне типизированного населения. Количественное выражение индивидуальных предпочтений и различий требует дальнейшего углубления.

Поэтому данная статья принимает систему "проект - активность" в географии времени как теоретический прототип. Принятие решения понимается как оценка полезности и выбор индивидами с гетерогенными предпочтениями в поле возможностей и ограничений, задаваемом застроенной средой. Операционально статья объединяет смешанную модель Logit и агентное моделирование для построения пространственно-временной агентной модели повседневной активности. В модели пространственно-временные агенты представляют индивидов. Под совместным действием внешних условий застроенной среды и внутренних предпочтений агенты принимают решения об активности по принципу максимизации полезности. Параметры предпочтений, отражающие индивидуальную гетерогенность, оцениваются через смешанную модель Logit, формируя механизм оценки полезности и решения под совместным действием "ограничений - предпочтений". Модель способна количественно оценивать вклад и эффективные пороги ненаблюдаемых факторов, например индивидуальных предпочтений, в пространственно-

временные результаты повседневной активности, а также прогнозировать макроизменения через настройку параметров. Тем самым она углубляет понимание взаимодействия индивидов, решений, активностей, времени и пространства и дает основу для обновления и управления жизненными кругами с учетом индивидуальной гетерогенности.

2 Построение пространственно-временной агентной модели общественных жизненных кругов

Модель описывается с использованием распространенной для агентных моделей рамки ODD - "overview - design concepts - details" [50]. Обзор включает цели имитации, агентов модели и выбор переменных; концепции дизайна раскрывают правила решений пространственно-временных агентов; детали модели включают ее запуск и проверку.

2.1 Цель построения модели

Чтобы преодолеть неспособность существующих исследований уловить гетерогенные индивидуальные предпочтения и их динамическое взаимодействие с пространственной средой, статья интегрирует модели дискретного выбора и агентное моделирование, создавая платформу имитации агентов, движимую индивидуальными предпочтениями и замкнутую на обратную связь пространственно-временной среды. В центре три вопроса. Распознавание паттернов: какие пространственно-временные паттерны активности возникают из динамического взаимодействия гетерогенных выборов "активность - поездка" и многослойных пространственных сред? Исследование механизма: как гетерогенные предпочтения через обратную связь взаимодействуют со сложными пространственно-социальными системами, и каковы ключевые факторы и действенные пороги? Оценка политики: какие дифференцированные эффекты альтернативные проектные схемы оказывают на жизненный круг в целом и на отдельных индивидов?

2.2 Агенты и переменные модели: настройка пространственно-временных агентов

2.2.1 Агенты-жители

Агенты-жители обладают активной и адаптивной способностью принимать решения. Исходя из целей, предпочтений, текущих состояний и восприятия среды, они оценивают полезность и выбирают пункты назначения, маршруты и временные схемы. Их атрибуты являются базовыми факторами решений об активности. Они включают статические и динамические атрибуты, параметры которых выводятся из макростатистических данных, микроопросов и результатов калибровки модели [51-52]. Статические атрибуты задают социально-демографические характеристики и устойчивые долгосрочные предпочтения, формируя основу начальных паттернов активности и параметров решения. Динамические атрибуты фиксируют состояния в реальном времени во время имитации и одновременно являются основанием и результатом решений.

Таблица 1. Атрибуты агентов-жителей и источники данных

Группа атрибутов	Переменные	Основное значение	Источники данных
Статические: социально-демографически	Возраст; профессия; структура домохозяйства; доход;	Отражают различия в спросе на активность, мобильности, временных ограничениях,	Перепись; данные общественных

е атрибуты	место проживания; владение транспортными средствами	последовательности активностей, чувствительности к затратам, потребительской способности, пространственной доступности, выборе режима передвижения и потенциальном радиусе активности	сеток; данные недвижимости
Статические: параметры внутренних предпочтений	Чувствительность ко времени; чувствительность к затратам; предпочтение качества объекта; неприятие скученности; коэффициент инерции	Выражают чувствительность к времени и денежным затратам, внимание к среде объекта и качеству услуги, неприятие скученности, склонность к знакомым пространствам и объектам даже при их неоптимальности	Дневники активности; оценка параметров смешанной модели Logit
Динамические: пространственно -временное состояние	Ежедневное расписание активностей; текущее местоположение; текущая активность; состояние перемещения	Фиксируют запланированные и выполненные последовательности активностей, текущие координаты, тип и время начала текущей активности, маршрут и оставшееся время поездки	Дневники активности; данные сервисов на основе местоположени я
Динамические: физиологическо е и психологическое состояние	Усталость; срочность; удовлетворенность или накопленная полезность	Отражают выносливость активности, давление времени перед следующей фиксированной активностью и полезность, накопленную от завершенных активностей	Дневники активности; данные сервисов на основе местоположени я
Динамические: память, ресурсы и ограничения	Память и обучение; дневной бюджет затрат; дневной бюджет времени; список задач	Влияют на последующие выборы и фиксируют дневные лимиты расходов, оставшееся свободное время, а также фиксированные или гибкие задачи	Дневники активности; поведенческие обследования; обновления имитации

2.2.2 Агенты пространственной среды жизненного круга

Пространственная среда жизненного круга является объектом решения, носителем активности и рамкой ограничений для агентов-жителей. Она представляется как двумерная плоскость из точек, линий и полигонов: точки обозначают объекты обслуживания, привлекающие агентов, линии - возможные пути перемещения, полигоны - здания. Агенты пространственной среды имеют статические и динамические атрибуты. Статические атрибуты отражают трехмерные качества и топологические структуры среды, формируя систему показателей, охватывающую сеть улиц, функциональные объекты и качество среды. Эти атрибуты хранятся в двумерном пространстве как описательная информация и служат факторами пространственного восприятия и оценки у агентов-жителей. Динамические атрибуты отражают изменяющиеся во времени свойства, такие как текущая занятость и загруженность; они возвращаются в реальном времени через переменные функции полезности и влияют на последующие решения об активности.

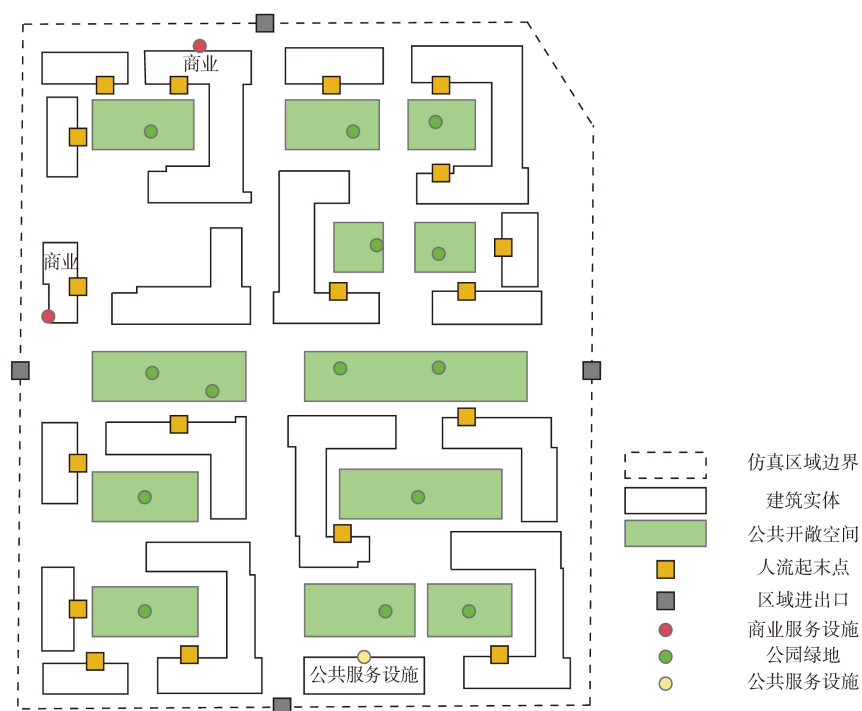


Рисунок 1. Виртуальная пространственная среда.

Таблица 2. Система показателей пространственной среды

Первичный показатель	Вторичный показатель	Значение	Источники данных
Уличная сеть	Длина; ширина; плотность дорожной сети; близость или интеграция; посредничество или выбор	Измеряют длину и ширину дорог, плотность сети в разных радиусах жизненного круга, доступность улиц и их способность привлекать целевые потоки, а также	Планировочные данные; OpenStreetMap и другие большие данные

		вероятность прохождения сквозных потоков	
Функциональные объекты	Масштаб; распределение; плотность; коэффициент площади; смешанность; часы работы	Измеряют масштаб, пространственное распределение, плотность, коэффициент площади, функциональную смешанность и время обслуживания объектов в жизненном круге	Большие данные POI; полевое картирование
Качество среды	Зеленое покрытие; фактор видимости неба; отношение ширины улицы к высоте зданий; доля фасадного фронта	Отражают озеленение парков и улиц, видимость неба в уличных узлах, отношение ширины улицы к высоте зданий и отношение фасадов зданий к длине красной линии дороги	Данные дистанционного зондирования; полевые обследования

2.3 Проектирование модели: механизм решения и оценка параметров

Механизм решений агентов является вычислительным мостом между микроповедением индивидов и макросистемными явлениями. По сравнению с прежними исследованиями ключевое новшество модели состоит во введении смешанной модели Logit. Распределения гетерогенности параметров используются для маркировки индивидуальных различий агенто-жителей, что позволяет агентам с персонализированными параметрами принимать решения и взаимодействовать в виртуальной среде. Это делает возможным более глубокое раскрытие влияния ненаблюдаемых индивидуальных предпочтений на пространственно-временные паттерны и пространственную эффективность жизненного круга. Модель включает два шага: определение множества выбора активности и построение с оценкой функции полезности планов активности.

2.3.1 Определение множества выбора активности

На основе дневников активности и данных пространственной среды жизненного круга модель формирует для каждого агента-жителя допустимое множество паттернов активности C_n при ограничениях способности, сопряжения и власти. Множество состоит из паттернов j_n , например "дом - работа - дом" или "дом - отвезти ребенка в школу - работа - покупки - дом". Каждый паттерн имеет атрибуты, такие как время поездки, денежные затраты и тип активности, которые затем используются при оценке полезности выбора активности.

2.3.2 Построение функции полезности и оценка параметров

После формирования персонализированного допустимого множества C_n каждый агент-житель оценивает и выбирает из возможных ежедневных планов согласно гетерогенным предпочтениям, связывая атрибуты принимающего решение с альтернативами выбора активности. Вводится модель дискретного выбора на основе теории случайной полезности. В частности, смешанная модель Logit применяется для построения и оценки функции полезности и параметров каждого паттерна активности j , тем самым задавая вероятностное поведение выбора.

Для агента-жителя n случайная полезность U_{nj} выбора паттерна активности j состоит из наблюдаемого детерминированного компонента V_{nj} и ненаблюдаемого случайного компонента ϵ_{nj} :

$$U_{nj} = V_{nj} + \epsilon_{nj} \quad (1)$$

Наблюдаемая полезность V_{nj} задается как линейная комбинация атрибутов X_{nj} паттерна активности j :

$$V_{nj} = \beta_n X_{nj} \\ = \beta_{n1} T_{nj} + \beta_{n2} C_{nj} + \sum_{m \in M} \gamma_{nm} D_{jm} \quad (2)$$

Здесь $\beta_n = (\beta_{n1}, \beta_{n2}, \gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \dots)$ - вектор случайных коэффициентов предпочтений агента-жителя n ; он различается между индивидами и отражает гетерогенность предпочтений. T_{nj} - совокупное время поездки для паттерна j ; C_{nj} - совокупные денежные затраты; M - множество типов активности, включая работу, покупки и досуг; m - конкретный тип активности; D_{jm} - бинарная фиктивная переменная. Если паттерн j включает активность типа m , то $D_{jm} = 1$, иначе $D_{jm} = 0$. γ_{nm} - коэффициент предпочтения агента n к типу активности m ; $\gamma_{nm} > 0$ означает предпочтение, а $\gamma_{nm} < 0$ - неприятие.

Ключевая установка состоит в том, что β_n не является фиксированной константой, а представляет собой вектор, случайно меняющийся между индивидами и улавливающий ту гетерогенность предпочтений, которая не объясняется наблюдаемыми переменными. Метод максимального симулированного правдоподобия позволяет оценить распределение этих параметров по данным обследований дневников активности жителей и получить количественное статистическое распределение гетерогенности предпочтений в исследуемой территории. При последующей инициализации ABM каждый агент-житель n независимо извлекает конкретный вектор случайных коэффициентов β_n из оцененного распределения; затем этот вектор фиксируется. В результате каждый агент обладает уникальной и стабильной логикой решения, согласованной с эмпирическими поведенческими закономерностями. Это переводит модель от простого правила-ориентированного вывода к имитации на основе эмпирического поведения и повышает объяснительную силу и прогностическую валидность.

2.4 Запуск и проверка модели

2.4.1 Инициализация модели

Инициализация модели направлена на создание виртуального поля, согласованного с реальной пространственной средой жизненного круга и характеристиками населения. Она может выполняться на платформах NetLogo, AnyLogic и аналогичных системах и включает три последовательных модуля. Во-первых, цифровизацию пространственной среды: на основе высокоточных GIS-данных в платформу импортируются или векторизуются топология дорожной сети, контуры зданий, точки общественных объектов и другая цифровая геоинформация; статические и динамические атрибуты задаются согласно системе показателей пространственных агентов. Во-вторых, генерируются агенты-жители: с помощью итеративного пропорционального подбора и многомерных данных переписи создается список виртуальных жителей, соответствующих реальной демографии жизненного круга. Для каждого агента из ранее оцененного распределения предпочтений смешанной модели Logit извлекается уникальный случайный вектор β_n , представляющий внутренние предпочтения. В-третьих, выполняется пространственное сопоставление и инициализация агентов-жителей: список агентов

распределяется по жилым зданиям в соответствии со статистическими единицами, завершая инициализацию пространственных якорей. Затем по социальным ролям агентов генерируются множества выбора активности, а в начале имитации один план активности выбирается и исполняется вероятностно, формируя начальное расписание и пространственно-временное состояние.

2.4.2 Динамический цикл "планирование - исполнение - обратная связь"

После инициализации модель входит в итерационный цикл, состоящий из низкочастотных решений ежедневного планирования, высокочастотных решений "активность - объект - маршрут" и пространственной обратной связи. Цикл включает четыре шага. Первый - задание и восприятие пространственного состояния. В начале каждого шага t состояние среды задается или обновляется по результатам действий агентов в предыдущем раунде и становится входом для пространственного восприятия текущего раунда. Второй - принятие решения и действие агента-жителя. Устанавливаются условия запуска ежедневного планирования и выполнения активности, затем применяется двухуровневая модель решения: ежедневное планирование и выбор "активность - объект - маршрут". На уровне ежедневного планирования каждый агент рассчитывает случайную полезность U_{nj} каждого паттерна j в своем персональном допустимом множестве C_n на основе собственных коэффициентов β_n и выбирает один паттерн по вероятностям смешанной модели Logit как общий план дня j . *На уровне выбора активности, объекта и маршрута, исходя из j , агент выбирает конкретный объект f из множества пространственно-временно достижимых объектов по функции полезности, завершая выбор пункта назначения. Затем полезность маршрута рассчитывается по ожидаемому времени поездки, и маршрут выбирается вероятностно с помощью модели Logit [52].* Третий шаг - запись данных. Модель фиксирует полные пространственно-временные траектории, дневники активности, накопленную полезность и последовательности решений каждого агента, а также макросостояния использования, включая плотность пешеходов и типы активности в пространственных объектах. Эти данные поддерживают последующую проверку модели и оценку планировочных эффектов. Четвертый шаг - обновление данных и итерация модели. После этого внутренние состояния агентов и пространственные состояния обновляются, и начинается новый раунд восприятия, решения, действия и записи. Через итерации решения жителей непрерывно перестраивают пространственные состояния, например создавая или снимая загруженность, а обновленные пространственные состояния становятся входными параметрами последующих решений. Так динамически возникают многоуровневые паттерны пространственно-временной активности.

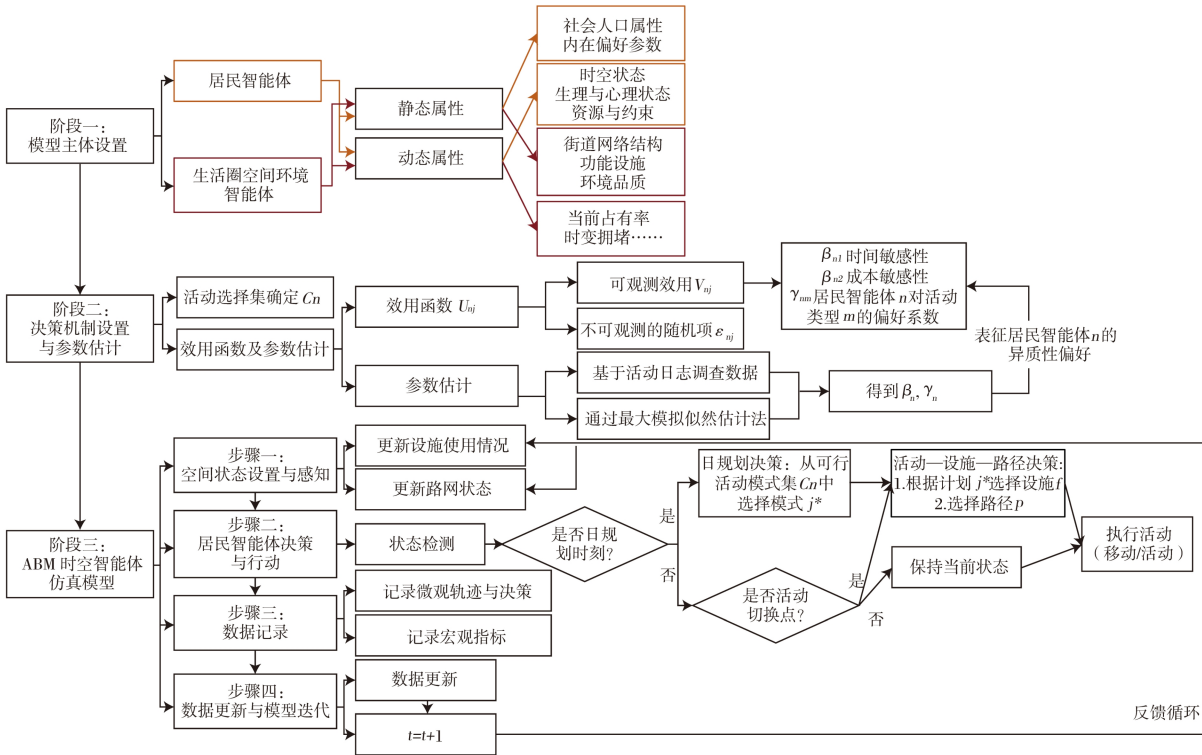


Рисунок 2. Процесс оценки параметров и имитации пространственно-временной агентной модели.

2.4.3 Проверка валидности модели

Для оценки валидности и надежности модели, а также для обеспечения ее пригодности как вычислительной экспериментальной платформы для объяснения механизмов решений жителей и прогнозирования эффектов пространственных вмешательств, формируется двухуровневая рамка проверки, объединяющая сопоставление макропаттернов и тестирование микрологики. Сначала проводится сопоставление макроповеденческих паттернов. Модель запускается до стабильного состояния либо используется среднее по нескольким дням имитации. Пространственная корреляция и временная мера согласия применяются для сравнения смоделированных и наблюдаемых тепловых карт плотности пешеходов и пространственно-временного распределения, а также ежедневных или еженедельных кривых посещений разных объектов. Тесты K-S или сравнения квантилей используются для сопоставления распределений числа ежедневных цепочек активности, расстояний единичных поездок и продолжительности активностей, полученных в имитации и обследованиях, чтобы проверить способность модели воспроизводить стабильные макрозакономерности пространственно-временной активности. Затем проводится анализ чувствительности и внутренняя проверка. Однофакторный анализ чувствительности независимо изменяет входные параметры, такие как емкость объекта и стандартное отклонение распределений предпочтений, и проверяет разумность направления и масштаба изменений ключевых выходов, например посещений объектов. Также имитируются предельные сценарии, такие как резкий рост спроса в праздники или закрытие объекта, чтобы увидеть, порождает ли модель ожидаемое поведение, например заторы или сервисные вакуумы, и тем самым проверить устойчивость логики модели.

3 Применения пространственно-временной агентной модели общественных жизненных кругов

3.1 От статического измерения к динамическому восприятию: многомерная динамическая оценка качества услуг

Традиционный статический анализ доступности, основанный на точках объектов и буферных наложениях, не может полноценно учитывать реальные диапазоны активности индивидов и поведенческие границы при двойных ограничениях пространственно-временной способности и группового взаимодействия. Поэтому он не дает реалистичного представления о динамической эффективности пространств и объектов для гетерогенных индивидов. Встраивая смешанную модель Logit и параметры гетерогенности предпочтений, пространственно-временная агентная модель представляет среду как систему возможностей и ограничений, различающуюся по людям. На этой основе она имитирует решения гетерогенных жителей об активности и поездках при множественных ограничениях и их непрерывную обратную связь с пространством. Модель может оценивать жизненный круг динамически и человекоцентрично по трем измерениям - узлам, сетям и местам, охватывая эффективность объектов, социальные услуги и устойчивость системы.

На уровне узлов модель имитирует выбор объекта при реальных ограничениях. Она может диагностировать разницу между теоретически обслуживаемым и фактически обслуживаемым населением отдельного объекта, оценивать соответствие спроса и предложения и эффективность использования. Показатели оценки тем самым переходят от "наличия покрытия" и "геометрической зоны покрытия" к "доле эффективного покрытия" и "пространственно-временной карте колебаний качества услуги". Модель также выявляет сервисные слепые зоны, вызванные временными конфликтами, ценовыми порогами и другими барьерами, давая более точную поддержку решений по размещению объектов, их типологии и управлению эксплуатацией. На уровне сети модель рассматривает жизненный круг как сложную систему из объектных узлов и потоков жителей. Имитируя сценарии отказа ключевого объекта или добавления новых узлов, она оценивает общую устойчивость и структурную эффективность сети обслуживания, выявляет ключевые хабы и уязвимые связи, анализирует функциональную избыточность и взаимозаменяемость объектов, поддерживая повышение эффективности и справедливости системы услуг.

На уровне места модель фокусируется на пространстве как носителе социального взаимодействия. Отслеживая пространственно-временные траектории активности, она количественно оценивает инклюзивность и пространственно-временную дифференциацию использования общественного пространства, а также диагностирует потенциальные места концентрации или конфликта групп. Через имитацию введения новых видов бизнеса или изменения пространственных правил модель позволяет предварительно оценивать изменения жизненности места при разных проектных вмешательствах, переводя оценку пространства от измерения функциональных контейнеров к оценке потенциала выращивания места.

3.2 От макросвязи к микромеханизму: взаимодействие и атрибуция между людьми и жизненными кругами

Традиционные исследования часто останавливаются на макростатистической связи людей и пространства и не раскрывают микродрайверы наблюдаемых явлений. Пространственно-временная агентная модель строит интерактивный мост между гетерогенностью предпочтений

жителей, решениями об активности и поездках и пространственной средой. Она позволяет моделировать и анализировать два ключевых механизма.

На микроуровне модель описывает механизм сопряжения и адаптации между индивидуальным пространственно-временным поведением и многомерной средой. За счет смешанной Logit-логики решений и динамической пространственной обратной связи она точно имитирует цикл пространственного восприятия, оценки полезности, перемещения активности и обновления атрибутов. На этой основе можно проследить микрокорни любого макроявления. Например, низкое использование объекта можно проследить через цепочки решений всех агентов-жителей и отнести к несоответствию часов работы как ограничению сопряжения, к чрезмерной стоимости как властному ограничению или к низкому качеству как предпочтительному ограничению. Такая способность анализа механизмов углубляет оценку от вопроса "используется ли объект" к вопросам "почему он не используется" и "кто стал бы им пользоваться", напрямую поддерживая точную дифференцированную политику общественных услуг.

На макроуровне модель показывает, как макропорядок возникает из микроиндивидуальных взаимодействий. Адаптивные поведения гетерогенных индивидов накладываются, взаимодействуют и повторяются в общем пространстве, в итоге формируя макросоциально-пространственные паттерны, которые нельзя предсказать простым сложением, то есть локальный порядок [8]. Пространственно-временная агентная модель не только представляет паттерны активности и локальный порядок, но и через настройку входов выявляет сочетания факторов, критические условия и траектории, порождающие тот или иной порядок. Задавая исходные правила и пространственные параметры, планирование может направлять самоорганизацию к более устойчивым, живым и инклюзивным локальным порядкам, переходя от детерминистского чертежного контроля к адаптивным вмешательствам, вырабатывающим позитивные возможности.

3.3 От функциональной конфигурации к созданию места: пространственная многозначность и сценарии на основе имитации активности

Традиционное планирование сосредоточено на материальной функциональной конфигурации пространства и с трудом видит социальные активности и дух места, которые пространство несет. Имитируя выбор активностей и механизмы взаимодействия гетерогенных жителей при реальных ограничениях, пространственно-временная агентная модель позволяет планировщикам оценивать пространство не только по вопросу "чего не хватает", но и по вопросу "почему существующие пространства не поддерживают более богатые проекты". Поэтому она перспективно исследует, как точные пространственные вмешательства стимулируют активные и разнообразные повседневные активности и взаимодействия разных индивидов в одном времени и пространстве. Создание места переходит от формально-эстетического дизайна к дизайну социального процесса на основе поведенческой динамики. В частности, модель поддерживает две взаимодополняющие стратегии создания места, управляемые имитацией активности.

Во-первых, она позволяет точно вводить пространственные катализаторы для активации многозначного потенциала узлов. Многозначность пространства зависит от того, насколько хорошо оно соответствует проектам пользователей [50]. Анализируя факторы решений жителей и траектории активности, модель диагностирует разрывы между существующим пространственным предложением и разнообразным спросом на активность по объектам, типам бизнеса и доступности. Затем она имитирует динамические реакции типов активности, интенсивности и

социальных паттернов после введения катализаторов разных местоположений и типов. Это переводит дизайн от опытного суждения к точному прогнозу на основе поведенческого возникновения и помогает гарантировать, что каждое микрообновление действительно активирует пространство, наделяя его гибким потенциалом социальной гостиной или живого рынка.

Во-вторых, модель помогает системно сплестать пространственно-временные сети встреч, стимулируя жизненность системы. Многозначность одного пространства ограничена, тогда как соединение нескольких взаимодополняющих или сходных узлов может через сетевые эффекты запускать более богатые сценарии, превышающие простую сумму индивидов. Модель способна имитировать процесс, в котором связь создает многозначность. Например, пешеходный маршрут, соединяющий общественный сад, магазин у дома, пункт услуг для пожилых и автобусную остановку, позволяет не только прогнозировать наложение потоков поездок и досуга, но и имитировать новые цепочки активности, такие как покупки по пути и социальное взаимодействие через прогулку. Такое системное сплетение возможностей пространственно-временной встречи перестраивает жизненный круг из набора функциональных участков в текущую сцену, поддерживающую встречи, спонтанные активности и непрерывное исследование.

3.4 От описания настоящего к имитации будущего: прогноз сценариев и оценка вмешательства

Пространственно-временная агентная модель дает планированию и оценке политики высокоуправляемую платформу имитационных экспериментов, переводя оценку от постфактум к предварительному прогнозу. Ее ключевые применения двояки. Во-первых, она поддерживает оптимизационную имитацию распределения ресурсов. Имитируя планировочные схемы при разных целях и ограничениях, модель прогнозирует макроизменения пространственно-временного распределения пешеходов, нагрузок объектов, давления транспортной сети и социальных выгод. Она также входит в микромеханизм, отслеживая изменения индивидуальных цепочек поездок, среднего времени поездки и различий доступности между социальными группами в ответ на пространственные изменения. Этот двойной взгляд на макроявления и микроатрибуцию переводит оценку планирования от статического сравнения схем к динамическому пониманию поведенческой реакции и дает основание решений из имитации сложной системы для выбора оптимальной стратегии распределения ресурсов и баланса эффективности и справедливости.

Во-вторых, модель поддерживает тонкую оценку политических вмешательств, особенно количественную проверку нематериальных "мягких" политик. Изменяя в модели временные правила, например часы работы объектов, ценовые рычаги вроде скидок по времени или разрешительные настройки для группоспецифичных услуг, можно имитировать и прогнозировать трансляцию управленческих стратегий в поведение жителей и системную эффективность. Например, модель может точно рассчитать, как продление вечерних часов работы общественных объектов увеличит использование со стороны работающего населения, или оценить, как ценовые субсидии расширят возможности активности низкодоходных домохозяйств. Способность переводить абстрактную политику в настраиваемые параметры и проводить политические эксперименты позволяет лицам, принимающим решения, предвидеть сложные последствия до внедрения, оптимизировать интенсивность и адреса вмешательств и повышать точность, действенность и инклюзивность общественной политики.

4 Перспективы исследования

В статье построена четырехкомпонентная модель индивидов, активностей, времени и пространства для пространственно-временной агентной имитации общественных жизненных кругов. Она инновационно объединяет способность смешанной модели Logit анализировать индивидуальную гетерогенность со способностью агентной модели имитировать интерактивное возникновение и предлагает три ключевые перспективы анализа взаимодействия. Во-первых, субъектно-объектное взаимодействие индивидов и пространства: смешанная модель Logit маркирует дифференцированные предпочтения агентов-жителей через распределения гетерогенности параметров, а агентное моделирование затем имитирует пространственно-временные регулярности, пространственную дифференциацию и механизмы взаимодействия между различающимися индивидами и пространством. Во-вторых, межмасштабное взаимодействие микроиндивидуальных решений и макрогрупповых паттернов: пространственно-временная агентная имитация показывает, как локальные микроиндивидуальные решения нелинейно взаимодействуют и порождают упорядоченные макропаттерны. Контролируемые эксперименты позволяют выявить ключевые факторы и эффективные пороги формирования паттернов. В-третьих, кратко- и долгосрочное взаимодействие людей и пространства: на коротком масштабе модель анализирует активности населения в разное время суток и использование пространства; на длинном масштабе сбор исторических данных и сценарная имитация позволяют анализировать изменения активности населения и пространственной структуры под влиянием демографических сдвигов, информационных технологий и политических изменений. Через эти три перспективы модель точно описывает индивидуальные различия в жизненных кругах, объясняет механизмы взаимодействия индивидов и пространства и перспективно прогнозирует эффективность планирования и услуг жизненного круга. Тем самым она дает человекоцентричную поддержку решений для эффективного использования пространства, повышения качества услуг и создания общественной жизненности.

Настоящее исследование в основном завершает построение рамки, вывод механизмов и интеграцию методов. Чтобы действительно усилить осуществимую человекоцентричную практику планирования жизненных кругов, необходимы дальнейшие исследования в двух направлениях. Первое - глубокое получение данных индивидуальной пространственно-временной активности и выражение гетерогенности. Сейчас крупномасштабные микроданные активности сталкиваются с трилеммой охвата, точности и глубины. Будущие прорывы связаны с интеграцией многозернистых и мультимодальных пространственно-временных данных, соединяющих высокоточные и семантически богатые GPS-траектории и дневники активности с широкоохватными данными мобильной сигнализации. На этой основе машинное обучение и обратный вывод данных могут реконструировать полные атрибуты и семантику активности для больших масс индивидов, извлекать цифровые метки стабильного индивидуального поведения и встраивать их как латентные переменные в смешанную модель Logit. Это сделает возможным сквозное моделирование данных, поведения и предпочтений, а гетерогенный пространственный выбор - измеримым и объяснимым. Второе направление - динамическая имитация двустороннего взаимодействия человека и пространства и долгосрочной эволюции. Существующие модели ограниченно описывают петлю обратной связи, в которой люди воздействуют на пространство, а пространство заново формирует людей, а также долгосрочные эволюционные механизмы. На

микроуровне могут быть введены рекуррентные нейронные сети (RNN), описывающие накопление индивидуальных активностей и их обратное влияние на пространственное восприятие и оценку, а затем на последующие выборы. На макроуровне возможно сочетание с моделями системной динамики для имитации долгосрочных и нелинейных эффектов демографических изменений, обновления застроенной среды и планировочных политик, что позволит оценивать устойчивые последствия планирования. Эти расширения помогут построить пространственно-временную агентную модель, которая не только объясняет сложные механизмы взаимодействия индивида и пространства, но и имитирует и оценивает долгосрочные выгоды планировочных схем, формируя методическое ядро вычислимого и имитируемого человекоцентричного городского планирования.

Список литературы

- [1] Chai Yanwei, Ta Na. Поведенческая революция в китайской географии и ее теоретические следствия[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2259-2270.
- [2] Wang De, Ren Xiyuan, Hu Yang. Моделирование поведенческих решений для планирования, основанного на времени, и поисковые данные из шанхайского Лудзяцзюа[J]. *Urban Planning International*, 2024, 39(3): 40-50.
- [3] SILVA B N, KHAN M, HAN K. К устойчивым умным городам: обзор тенденций, архитектур, компонентов и открытых вызовов[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 697-713.
- [4] Zhou Suhong, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po, et al. Передовые направления теорий и методов поведенческой географии в Китае[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2235-2258.
- [5] ELLEGARD K. Осмысление географии времени: понятия, методы и приложения[M]. London, UK: Routledge, 2018.
- [6] Wu Zhiqiang, Wang Kai, Chen Wei, et al. Академическая дискуссия об инновационном мышлении для точного управления общественным пространством[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(3): 1-14.
- [7] Sun Yiyuan, Feng Jian. Исследовательская рамка взаимодействия повседневной жизни и пространства под влиянием информационно-коммуникационных технологий[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(8): 2055-2071.
- [8] Zhang Yan, Chai Yanwei. Поворот географии времени к исследованиям системы "проект - активность"[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 53-63.
- [9] CHEN B Y, LUO Y B, et al. Пространственно-временная модель данных и индексная структура для вычислительной географии времени[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2023, 37(3): 550-583.
- [10] Li Chunjiang, Chai Yanwei, Li Yanxi, et al. Поисковое исследование системы классификации "проект - активность"[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2295-2307.
- [11] SADOWSKI J. Киберпространство и городские ландшафты: о возникновении платформенного урбанизма[J]. *Urban Geography*, 2020, 41(3): 448-452.
- [12] SHAW S L. География времени в гибридном физико-виртуальном мире[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2023, 25(3): 339-356.
- [13] Liu Quan, Qian Zhenghan, Huang Dingfang, et al. Эволюционные характеристики и тенденции пространственных паттернов 15-минутного общественного жизненного круга[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 94-101.

- [14] Huang Huiming, Zhou Dailin, Wang Ye. Модели пространственной организации общественных жизненных кругов на основе жилой морфологии: данные из Гуанчжоу[J]. Urban Planning Forum, 2021(2): 94-101.
- [15] Shen Yuhui, Tong Ziyu. Методы оценки удобства общественного жизненного круга на человеческом масштабе[J]. South Architecture, 2022(7): 72-80.
- [16] Cai Xingfei, Wang Hao, Li Li, et al. Оценка общественного жизненного круга: практика применения, вызовы и перспективы[J]. Planners, 2023, 39(5): 47-52.
- [17] KIM H M, KWAN M P. Меры пространственно-временной доступности: геовычислительный алгоритм с акцентом на допустимое множество возможностей и возможную продолжительность активности[J]. Journal of Geographical Systems, 2003, 5(1): 71-91.
- [18] YIN L, SHAW S L. Исследование пространственно-временных путей в пространствах физической и социальной близости: подход пространственно-временной GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(5): 742-761.
- [19] Liao Jingying, Lin Yaoyu, Xiao Zuopeng, et al. Концептуальная модель и измерение доступного в реальном времени пространства на основе пространственно-временной призмы[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(4): 931-948.
- [20] Niu Xinyi, Lin Shijia. Пространственно-временные большие данные в исследованиях городского планирования: технологическая эволюция, исследовательские вопросы и фронтирные тенденции[J]. Urban Planning Forum, 2022(6): 50-57.
- [21] Chai Yanwei, Li Chunjiang, Xia Wanqu, et al. Модель делимитации городских общественных жизненных кругов: данные из района Цинхэ в Пекине[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(9): 1-8.
- [22] Liang Hong, Ju Qiuwen, Chai Yanwei, et al. Измерение и классификация пространственной структуры многоуровневых городских жизненных кругов с позиции пространственно-временного поведения: данные из Пекина[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2025(3): 49-58.
- [23] Zhang Shanqi, Zhen Feng, Kong Yu, et al. Оценка и оптимальная конфигурация объектов обслуживания общественного жизненного круга на основе взаимодействия виртуального и физического пространства: прогресс и перспективы[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(10): 2435-2446.
- [24] Wang De, Hu Yang. Планирование городского пространственно-временного поведения: понятия, рамка и перспективы[J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 44-50.
- [25] Zou Sicong, Zhang Shanqi, Zhen Feng. Измерение пространства повседневной активности сообщества и факторов жизненности на основе пространственно-временного поведения жителей: данные из районов Шачжоу и Наньюань в Нанкине[J]. Progress in Geography, 2021, 40(4): 580-596.
- [26] Zhang Wenjia, Lu Daming. Обзор измерения застроенной среды и эмпирических исследований ее влияния на пространственно-временное поведение[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(12): 9-16.
- [27] TAO T, WANG J, CAO X. Исследование нелинейных связей между пространственными атрибутами и пешей дистанцией до общественного транспорта[J]. Journal of Transport Geography, 2020, 82: 102560.

- [28] Tao Yinhua, Chai Yanwei, Yang Jie. Пространственно-временной поведенческий взгляд на здоровый образ жизни городских жителей[J]. Human Geography, 2021, 36(1): 22-29.
- [29] Luo Xueyao, Zhang Wenjia, Chai Yanwei. Пороговые эффекты застроенной среды в 15-минутных жизненных кругах[J]. Geographical Research, 2022, 41(8): 2155-2170.
- [30] Zhang Xue, Chai Yanwei. Исследовательская рамка социальной дифференциации в смешанных жилых сообществах на основе пространственно-временного поведения[J]. Human Geography, 2022, 37(6): 39-46.
- [31] Zhao Meifeng, Zhang Lanqing, Wang Degen. Дифференциация и факторы размещения городских объектов общественных услуг с позиции жизненного круга: сравнение городов разного размера в регионе Пекин - Тяньцзинь - Хэбэй[J]. Urban Development Studies, 2024, 31(10): 77-86.
- [32] Zhang Yan, Chai Yanwei. "Новая" география времени: инновационные исследования шведской группы Kajsa[J]. Human Geography, 2016, 31(5): 19-24.
- [33] LATHAM A. Диаграммирование социального: изучение наследия диаграмматических ландшафтов Торстена Хегерстранда[J]. Landscape Research, 2020, 45(6): 699-711.
- [34] Ta Na, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po. Поведенческое измерение и взаимодействие пространства и поведения в повседневных стилях жизни пригородных жителей Пекина[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(8): 1271-1280.
- [35] ZHANG S Q, YANG Y, ZHEN F, et al. Понимание поведения поездок и паттернов активности у уязвимых групп с использованием данных смарт-карт: подход на основе пространства активности[J]. Journal of Transport Geography, 2021, 90: 102938.
- [36] Jiao Jian, Wang De, Cheng Ying. Ежедневные паттерны активности и характеристики населения с дефицитом времени в Шанхае[J]. City Planning Review, 2023, 47(4): 31-44.
- [37] He Jiaming, Zhou Suhong, Xie Xuemei. Цели ежедневных поездок и влияющие факторы у женщин - жительниц Гуанчжоу с позиции феминистской географии[J]. Geographical Research, 2017, 36(6): 1053-1064.
- [38] GIURGE L M, WHILLANS A V, WEST C. Почему дефицит времени важен для индивидов, организаций и стран[J]. Nature Human Behaviour, 2020, 4: 993-1003.
- [39] KWAN M P. Пределы эффекта соседства: контекстуальные неопределенности в географических, эколого-медицинских и социальных исследованиях[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2020, 108(6): 1482-1490.
- [40] MUURISEPP K, JARV O, TAMMARU T, et al. Пространства активности и источники больших данных в исследованиях сегрегации: методологический обзор[J]. Frontiers in Sustainable Cities, 2022, 4: 861640.
- [41] Wei Yue, Yang Dongfeng. Влияние застроенной среды района и пункта назначения на возможности ежедневной активности пожилых людей: перспективы восприятия и участия[J]. Progress in Geography, 2023, 42(1): 89-103.
- [42] YUAN Y H, XU Y. Моделирование пространств активности с использованием больших геоданных: прогресс и вызовы[J]. Geography Compass, 2022, 16(11): e12663.
- [43] Niu Qiang, Yi Shuai, Gu Chongtai, et al. Новые понятия и методы обеспечения объектами обслуживания в онлайн-офлайн общественных жизненных кругах: данные из Уханя[J]. Urban Planning Forum, 2019(6): 81-86.

- [44] Wu Lei, Niu Qiang, Ajaibibula Ainiwar, et al. Онлайн-офлайн общественные жизненные круги, интегрирующие виртуальное и физическое пространство: итерационное обновление и планировочный поиск[J]. Urban Planning Forum, 2024(2): 25-33.
- [45] ARRANZ-LOPEZ A, SORIA-LARA J A. Использование ИКТ и пространственная фрагментация участия в активностях в постковидных городских обществах[J]. Land Use Policy, 2022, 120: 1-11.
- [46] Yuan Zehao, Luo Yubo, Zhang Yu, et al. Методы и приложения построения индивидуальных пространств активности на основе якорей активности[J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27(11): 2652-2669.
- [47] OMER I, KAPLAN N. Структурные свойства угловых и метрических центральных уличной сети и их значение для потоков движения[J]. Urban Analytics and City Science, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [48] Che Guanqiong, Qiu Baoxing, Wang Yitian, et al. Планирование общественного жизненного круга на основе имитации пешей активности жителей: исследовательская рамка и вопросы[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(2): 139-143.
- [49] Che Guanqiong, Lan Xu, Wang Yitian. Пространственная оптимизация жилых территорий жизненного круга при имитации пешего движения жителей[J]. South Architecture, 2025(2): 21-29.
- [50] Zhou Zhifei. Несоответствие "население - пространство" в общественных пространствах старых сообществ и проектные ответы[J]. Urban Problems, 2021(6): 25-33.
- [51] YANG S Q, DANE G, ARENTZE T A. Агентная модель для имитации аффективного опыта и активностей пешеходов при оценке дизайна городского общественного пространства[J]. Cities, 2025, 166: 106292.
- [52] WOLPERT L, OMER I. Сравнительный анализ моделей пешеходных объемов: агентные модели, методы машинного обучения и множественная регрессия[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2025, 117: 102238.

Перевод выполнен с помощью искусственного интеллекта