

Оценка ливнево-паводковой устойчивости городских жилых районов на основе нарушений характеристик поездок жителей и ее планировочные выводы: пример Шэньчжэня

Авторы

CHENG Yulin, GAN Xinyue, YANG Xiaochun, GUO Renzhong

Аннотация

Жилые районы являются базовыми единицами анализа городской безопасностной устойчивости и ее пространственной дифференциации. Существующие исследования преимущественно используют статические данные для макромасштабной оценки и потому с трудом отражают динамическую эволюцию городской устойчивости на мелком пространственном уровне. В данной работе пространственно-временные нарушения мобильности жителей во время бедствий рассматриваются как ключевой индикатор устойчивости, а на их основе формируется управляемая данными рамка оценки ливнево-паводковой устойчивости на уровне жилого района. С использованием данных мобильного сигналинга эта рамка применена к 1 087 жилым районам Шэньчжэня в период концентрированных осадков экстремального дождевого события «9.7» 2023 года. Результаты показывают, что районы коммерческого жилья обладают значительно более высокой устойчивостью, чем городские деревни, а районы разных периодов строительства демонстрируют выраженную неоднородность устойчивости как во время бедствия, так и после него. Корреляционный анализ подтверждает, что подтопление дорог является важным фактором нарушения поездок жителей, и доказывает эффективность рамки при выявлении пространственных различий районной устойчивости. Демографическая проверка дополнительно показывает, что применение данных мобильного сигналинга в микромасштабной оценке устойчивости может занижать реальные риски стареющих районов. Предложенная рамка обеспечивает количественную поддержку для динамического мониторинга бедствий и раннего предупреждения, диагностики городского обновления и устойчивого планирования.

Ключевые слова

ливнево-паводковая устойчивость жилых районов; данные мобильного сигналинга; нарушение поездок; пространственная дифференциация; рамка оценки

Введение

На фоне усиления глобальной климатической экстремальности городская климатическая устойчивость стала центральной темой международной науки и управленческой практики. Жилой район как базовая единица городского управления является не только пространственным носителем повседневной жизни, но и передовой линией чрезвычайного управления при бедствиях. Международные метрополии, такие как Лондон и Нью-Йорк, уже включили повышение способности районов противостоять природным бедствиям в ключевые стратегии климатической адаптации [1]. Однако в последние годы китайские сверхкрупные и мегакрупные города часто сталкиваются с экстремальными ливнями. Климатические системы могут поддерживать активную остаточную циркуляцию за счет «эффекта поезда», из-за чего прерывистые осадки продолжают вызывать вторичные воздействия [2]. Такие события серьезно

ограничивают нормальное функционирование городских систем, включая производство и повседневную жизнь жителей, и замедляют последующее восстановление.

Существующие исследования часто оценивают макромасштабную городскую устойчивость через статические индикаторы, что затрудняет динамическое выявление различий устойчивости на уровне жилых районов на протяжении всего цикла бедствия. Поэтому данное исследование вводит пространственно-временные характеристики нарушения поездок жителей и строит управляемую данными рамку оценки ливнево-паводковой устойчивости городских жилых районов. Рамка используется для анализа экстремального ливня «9.7» в Шэньчжэне в 2023 году. Она выявляет пространственно-временную неоднородность устойчивости разных типов районов, проверяет модель на фактических данных о подтопленных дорогах и одновременно раскрывает потенциальные смещения при применении больших данных в микромасштабной оценке устойчивости. Метод направлен на научную поддержку точной чрезвычайной реакции, диагностики обновления районов и климатически адаптивного планирования.

1. Обзор методов оценки городской ливнево-паводковой устойчивости

Исследования городской устойчивости прошли парадигмальный переход от уязвимости к устойчивости [3]. Ранние работы [4-6] в основном наследовали традиционную рамку уязвимости, основанную на комплексных системах индикаторов, и концентрировались на оценке предбедственных внутренних характеристик. Из-за ограниченной доступности данных выбор индикаторов и назначение весов неизбежно включали субъективные смещения. После разработки Cutter и соавт. [7-9] индекса социальной уязвимости и базовых индикаторов устойчивости сообществ исследовательский фокус сместился от статической оценки к динамической реакции системы. Многие ученые стали использовать многоисточниковые пространственно-временные данные для фиксации процессных характеристик городской устойчивости.

Городская ливнево-паводковая устойчивость означает совокупную способность городской системы сопротивляться ударам ливневых и паводковых бедствий, поглощать их, адаптироваться к ним и восстанавливаться после них [10-11]. В соответствии с общим понятием устойчивости ее базовое содержание обычно включает три аспекта: эффективное снижение падения производительности во время бедствия, быстрое восстановление после нарушения и достижение относительно высокого уровня восстановления [12-15]. Пространственный масштаб таких исследований охватывает индивида или здание, сообщество, город и регион [16-18]. Сценарный анализ на основе программ моделирования [19], системная динамика с применением анализа социальных сетей [20], эмпирический анализ на основе больших данных [21-24] и кривые устойчивости [25] стали широко используемыми теоретическими инструментами количественной оценки устойчивости.

Исследования на основе кривых устойчивости позволяют системно описывать временную траекторию производительности системы до и после бедствий. Выделяя ключевые точки, такие как точка воздействия, точка восстановления и точка стабилизации, они количественно оценивают общую площадь нарушения, пиковую долю потерь, скорость восстановления и форму кривой [26-29]. Этот подход стал одной из основных парадигм исследований устойчивости и применяется для описания динамической реакции критически важных городских функций, включая транспортные сети, водоотведение, электроснабжение, медицинские учреждения и экономический выпуск [30].

Большие данные обеспечивают высокоточное основание для анализа пространственно-временного поведения городских групп населения и все чаще используются для моделирования поведения во время бедствий. Ряд работ расширяет рамки кривых устойчивости за счет данных социальных медиа, GPS-траекторий и мобильного сигналинга. Одни используют дневную единицу для выявления долгосрочных макронарушений и двухпиковых моделей восстановления [22]; другие применяют часовую единицу для фиксации краткосрочного воздействия экстремальных ливней и показывают, что восстановление системы может запаздывать относительно окончания события [23], либо выявляют отложенный эффект восстановления потоков мобильности [24]. Эти исследования раскрывают характеристики нарушения поездок, вызванного экстремальной погодой, но их учет многостадийных воздействий климатических бедствий остается недостаточным.

В существующих работах воздействие во время бедствия и послебедственное восстановление часто объединяются в единый показатель нарушения, что затрудняет различение движущих механизмов и накопительных эффектов двух стадий и тем самым размывает понимание механизма бедствия. Особенно на уровне жилого района динамическая оценка устойчивости пока не имеет адекватных методов. Редко встречаются эффективные инструменты, позволяющие количественно измерять воздействие ливневых бедствий на поведение жителей в разные стадии [31]. Для восполнения этого пробела данное исследование строит краткосрочные кривые колебаний поездок жителей до и после бедствия в часовом масштабе [32]. Время отвода воды используется для деления стадий. Традиционные стадии сопротивления и восстановления рассматриваются как стадия бедствия для измерения прямого воздействия, а стадия запаздывающего нарушения добавляется как послебедственная стадия для учета вторичных эффектов. Такой подход соответствует многостадийным климатическим характеристикам экстремальных ливней, позволяет динамически оценивать устойчивость разных типов городских районов и поддерживает перевод тонкой диагностики в чрезвычайное управление и планировочные выводы [33].

2. Эмпирическая территория и методы исследования

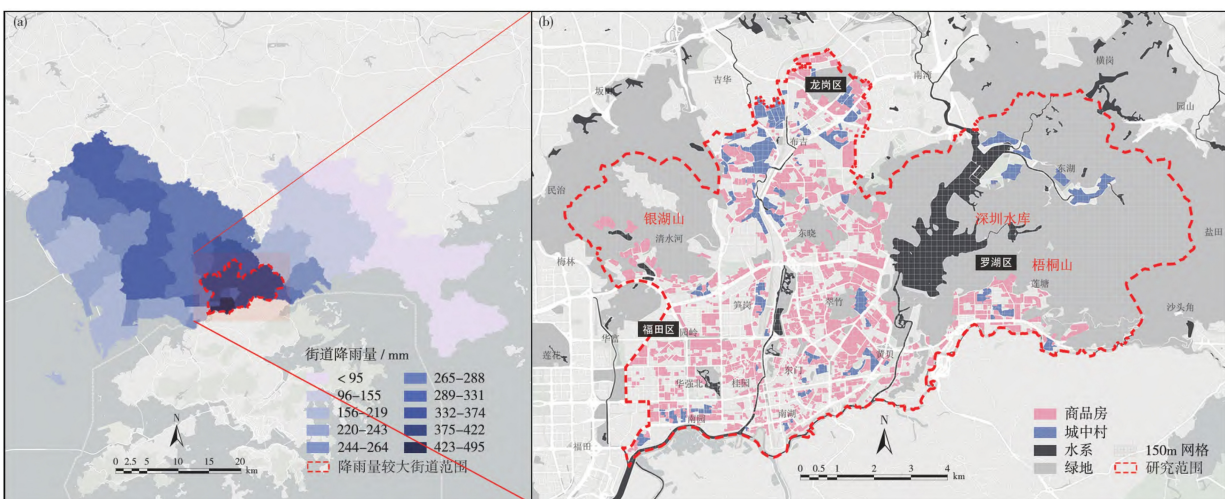
2.1 Территория исследования, источники данных и обработка

По данным Шэньчжэньской метеорологической обсерватории, с 17:00 7 сентября до 6:00 8 сентября 2023 года Шэньчжэнь пережил экстремальный ливень, превысивший исторические записи. Сильная конвективная система демонстрировала выраженный «эффект поезда», вследствие чего прерывистые осадки продолжали влиять на послебедственное восстановление. В качестве территории исследования выбраны 14 субрайонов с концентрированными осадками: вся территория района Лоху, субрайоны Юаньган, Хуацяньбэй и Наньюань в районе Футянь, а также субрайон Буцзи в районе Лунган (рис. 1).

На основе данных AOI жилых районов Baidu Maps, в сочетании с данными OpenStreetMap, векторными данными зданий Шэньчжэня за 2018 год и координатами коммерческого жилья с платформы Anjuke, исследование идентифицирует и отбирает 1 087 единиц жилых районов на территории исследования, включая 103 городские деревни и 984 района коммерческого жилья (рис. 1(b)). Характеристики поездок жителей получены из данных мобильного сигналинга, предоставленных платформой China Unicom Smart Footprint DAAS. Набор данных содержит около

одного миллиона анонимизированных траекторий устройств на территории исследования до и после ливня, за период с 2 по 24 сентября 2023 года.

Кроме того, для проверки надежности метода используются сведения о подтопленных дорогах во время ливня «9.7» 2023 года, опубликованные Шэньчжэньским управлением водных ресурсов и управлением чрезвычайных ситуаций, а также данные о демографической структуре на уровне субрайонов из Седьмой национальной переписи населения 2020 года.



(a) 深圳“9·7”极端暴雨24 h降雨量空间分布示意图

(b) 研究范围内住区空间单元分布图

Рисунок 1. Территория исследования

Рисунок включает карту пространственного распределения осадков за 24 часа во время экстремального ливня «9.7» в Шэньчжэне и карту пространственных единиц жилых районов на территории исследования.

2.2 Методы исследования

Исследование количественно оценивает степень воздействия экстремальных ливней на жилые районы и их способность к восстановлению путем расчета изменений объема поездок жителей во время бедствия по сравнению с небедственными периодами. Затем данные о подтопленных дорогах, пешеходных зонах доступности, внешней дорожной связности и демографической структуре на уровне субрайонов используются для многомерной проверки. Процесс оценки включает три ключевых шага (рис. 2).

2.2.1 Построение базы данных поездок

Исследование использует structured query language (SQL) на платформе DAAS для сбора анонимизированных пространственно-временных записей, обеспечивая законное использование данных и строгую защиту приватности пользователей. Границы жилых районов импортируются на платформу, а SQL используется для расчета суммарного почасового объема поездок жителей каждого района. Так формируется база данных поездок районов, охватывающая предбедственный, бедственный и послебедственный периоды.

В качестве основы кривых колебаний поездок выбраны изменения объема поездок с 6 по 15 сентября 2023 года, то есть непрерывный 10-дневный период. Он охватывает ливень и последующую рабочую неделю, что позволяет зафиксировать сохраняющиеся послебедственные тенденции мобильности. Чтобы избежать влияния праздничных дней, 5 сентября, солнечный день

перед предупреждением о бедствии, и почасовое среднее с 18 по 22 сентября после стабилизации события используются как небедственная рабочая базовая линия. 2 и 3 сентября, а также 23 и 24 сентября используются для расчета небедственных базовых линий субботы и воскресенья. Вместе они формируют три почасовые базовые линии для каждого района: рабочий день, суббота и воскресенье.

Для построения кривых колебаний поездок применяется скользящее среднее. Окно задано равным 7 часам, чтобы сгладить шум и одновременно сохранить тенденции воздействия бедствия. Предварительный анализ показывает, что более 50% районов демонстрируют стадийный паттерн нарушения поездок: «воздействие во время бедствия плюс запаздывающее нарушение».

2.2.2 Оценка и классификация ливнево-паводковой устойчивости районов

Следуя базовой логике кривых устойчивости, исследование измеряет, как система реагирует на бедствие в течение непрерывного периода времени. Оно анализирует изменения почасового объема поездок жителей до и после ливня и обратно представляет ливнево-паводковую устойчивость района через степень нарушения поведения поездок. Метод адаптивно оптимизирован с учетом климатических особенностей ливня «9.7».

Во-первых, введена стадия запаздывающего нарушения для фиксации вторичных воздействий ливневых бедствий на поездки жителей. Воздействие ливней на мобильность часто имеет многостадийный характер: начальный прямой удар осадков сменяется запаздывающими эффектами прерывистых дождей, а поездки могут оставаться нарушенными несколько дней после завершения основного ливня. Поэтому, в отличие от ранних исследований устойчивости, сосредоточенных преимущественно на единичном ударе, данная работа включает запаздывающее нарушение как послебедственную стадию в расчет индикаторов устойчивости, что позволяет полнее описать районную устойчивость на разных стадиях ливня и его вторичных воздействий.

Во-вторых, небедственный диапазон колебаний поездок используется для определения характерных точек бедствия. Поскольку ежедневные поездки жителей естественно варьируются, точки воздействия и стабилизации не являются нулевыми точками, а представляют собой пересечения с нормальным диапазоном колебаний. Разница объема поездок в час t определяется как ΔSt ; затем рассчитывается стандартное отклонение σ последовательности различий, и σ используется как референсная граница небедственного диапазона колебаний.

В-третьих, исследование строит показатель интенсивности нарушения поездок на душу населения, усиливающий накопительный эффект длительности. По различиям в интенсивности и длительности нарушения оно делится на краткосрочный высокоинтенсивный и долгосрочный среднеинтенсивный типы. Чем дольше длительность, тем больше типов поездок затрагивается и тем сильнее накопительное потребление ресурсов и социально-экономические потери. Поэтому интенсивность нарушения A взвешивается по времени. Составной показатель подчеркивает накопительную стоимость нарушения поездок в течение цикла бедствия [35] и нормируется в «интенсивность нарушения поездок на душу населения» для сопоставления районов (табл. 1). По сравнению с традиционными индикаторами этот показатель более чувствителен к различиям устойчивости между малыми пространственными единицами.

Согласно сводке Шэньчжэньского метеорологического бюро [Примечание 1], 48 часов используются как граница между стадиями бедствия и послебедственного периода. Бедственное

нарушение представляет собой сумму всех нарушений поездок до 48-часовой линии, а последующее нарушение рассчитывается аналогично после нее. Если нарушение пересекает 48-часовую линию, оно относится к той стадии, где площадь под кривой больше. Наконец, метод K-means используется для отдельной классификации бедственной и последующей устойчивости, а Elbow Method и коэффициент силуэта определяют оптимальное число кластеров.

Таблица 1. Алгоритмы индикаторов

Индикатор	Формула	Значение
Небедственный диапазон колебаний	$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_t (\Delta S_t - \text{mean}(\Delta S))^2}$, $N = 24 \text{ h}$	Sigma рассчитывается по разнице объема поездок между двумя сопоставимыми нормальными днями в пределах 24 часов и используется как референсная граница небедственного колебания поездок.
Интенсивность нарушения поездок на душу населения	$V1 = A1 / (N_i \cdot T1)$; $A1 = \int_{t0}^{t2} [\max(0, Q_{\max} - Q_t - \sigma)] dt$ ($t2 - t0$)	V1 - интенсивность нарушения поездок на душу населения при первичном колебании в районе i; Ni - общая численность населения района; A1 - интенсивность первичного нарушения, отражающая накопительный эффект снижения поездок от точки воздействия до точки стабилизации; T1 - длительность нарушения; Qmax - базовая линия поездок, Qt - фактический объем поездок жителей.

2.2.3 Проверка метода оценки

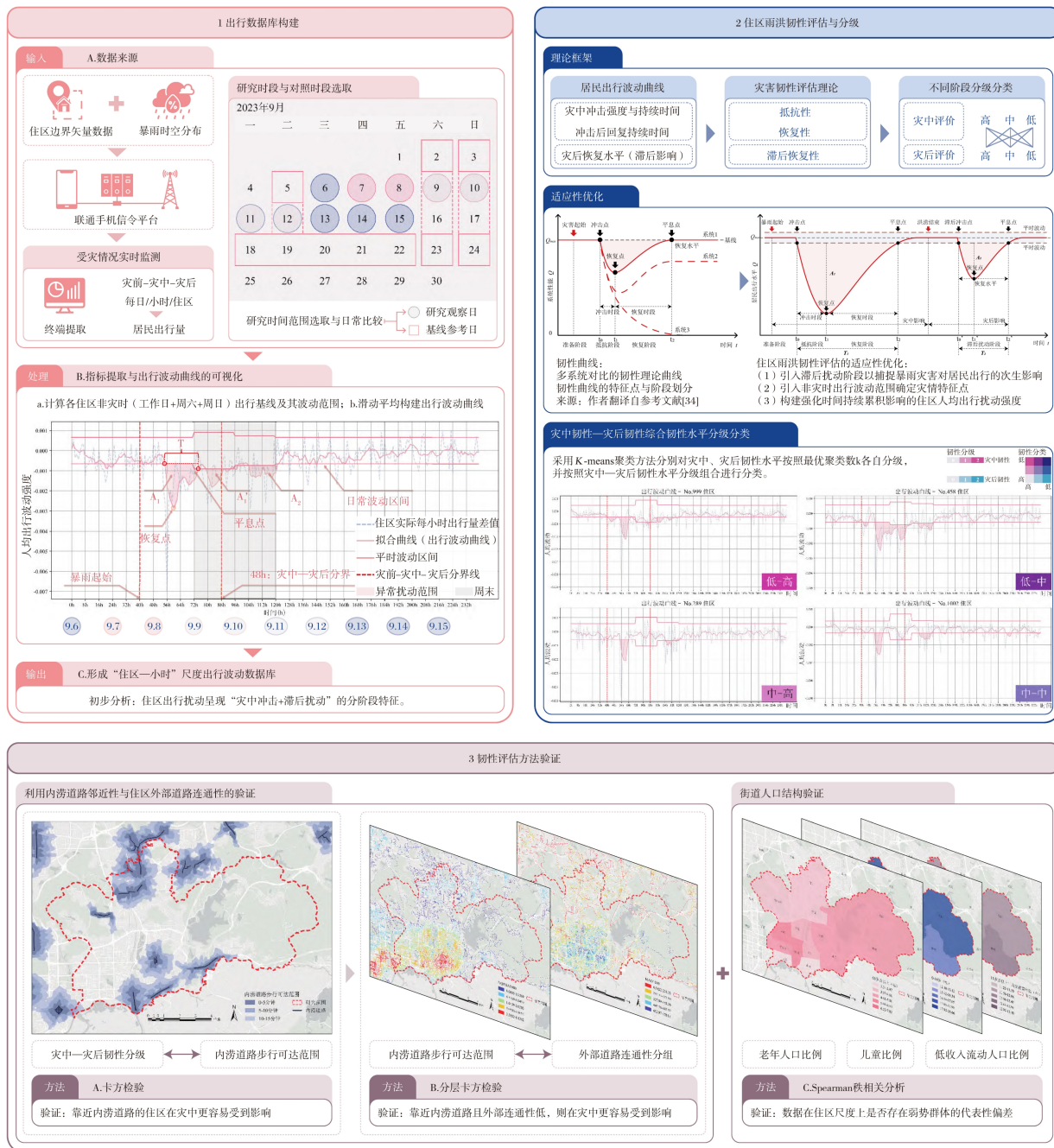
Чтобы проверить применимость и надежность метода в реальных сценариях, исследование вводит многомерные внешние переменные для эмпирического тестирования.

Во-первых, анализируются близость к подтопленным дорогам и внешняя дорожная связность. Поездки жителей часто отменяются, когда маршруты блокируются подтопленными дорогами. Районы, расположенные близко к подтопленным дорогам и имеющие малый выбор маршрутов, операционализированный как слабая внешняя дорожная связность, ожидаемо испытывают более значительные функциональные потери и ограничения поездок при ливневом подтоплении. Для проверки этой гипотезы строятся пешеходные буферные зоны доступности к подтопленным дорогам с порогами более 15 минут, 10-15 минут, 5-10 минут и менее 5 минут. Критерий хи-квадрат используется для проверки значимости связи между классом устойчивости и близостью к подтопленным дорогам. На основе пространственного синтаксиса центральность посредничества, отражающая структурную важность дорожной сети, и угловая средняя глубина, отражающая эффективность организации путей, используются для характеристики внешней дорожной связности. Районы делятся на группы с низкой и высокой связностью, после чего проводятся стратифицированные тесты хи-квадрат для анализа взаимодействия между близостью к подтопленным дорогам и внешней дорожной связностью.

Следует отметить, что высота района не включается в число главных проверочных переменных. Хотя высота является традиционным физическим фактором распределения подтоплений, ее связь

с глубиной воды и ограничением поездок зависит от систем водоотведения, пропускной способности трубопроводных сетей, микрорельефа, проницаемости почв и чрезвычайных организационных мер, поэтому она не является простой линейной зависимостью. Кроме того, высота района главным образом отражает риск затопления самого района, но не является прямым объясняющим фактором того, как паводковые условия влияют на поездки жителей.

Во-вторых, для проверки используется демографическая структура на уровне субрайонов. Чтобы выяснить, содержат ли данные мобильного сигналинга репрезентативное смещение на уровне района по отношению к уязвимым группам, включая пожилых людей, детей и часть низкодоходного плавающего населения, а также оценить социальную объяснительную силу метода, исследование вводит данные демографической структуры субрайонов из Седьмой национальной переписи населения Шэньчжэня. Они включают долю жителей в возрасте 65 лет и старше, долю детей 0-14 лет и среднее число лет обучения жителей 15 лет и старше. Ранговая корреляция Spearman используется для проверки силы и значимости связи между средней устойчивостью на уровне улицы и демографической структурой.



3. Результаты исследования

3.1 Уровни устойчивости районов во время бедствия и после него

Результаты кластеризации интенсивности нарушения поездок на душу населения во время бедствия и после него показывают, что кривые суммы квадратов ошибок имеют излом при $k = 3$, а коэффициенты силуэта также находятся на относительно высоком уровне. Поэтому уровни бедственной и послебедственной устойчивости делятся на три класса, обозначенные 0, 1 и 2 для высокой, средней и низкой устойчивости, а районы дополнительно классифицируются по сочетанию классов во время и после бедствия.

Карты устойчивости (рис. 3) показывают, что районы низкой устойчивости образуют связанные пространственные зоны. Во время бедствия районы низкой устойчивости сосредоточены преимущественно в субрайоне Ляньтан района Лоху и на стыке субрайонов Дунмэнь, Хуанбэй и Наньху. Эти территории относительно низинные, а системы водоотведения, вероятно, не способны выдерживать кратковременные интенсивные осадки, что приводит к сильному подтоплению и прямому воздействию на поездки жителей. Новые послебедственные районы низкой устойчивости сосредоточены главным образом в субрайоне Гуйюань района Лоху и субрайоне Наньюань района Футянь. Эти территории расположены рядом с коммерческими кластерами и могут испытывать влияние транспортных заторов и высокой плотности социально-экономической активности, из-за чего нарушение поездок продолжается после ливня. Районы с низкой устойчивостью как во время бедствия, так и после него сосредоточены в субрайоне Буцзи района Лунган, где расположено много старых кварталов и городских деревень. Стареющая инфраструктура и несовершенные системы водоотведения делают эти территории склонными к подтоплениям и усиливают устойчивое нарушение поездок во время события и после него. Кроме того, такие территории, как Сунган и Циншуйхэ в Лоху, демонстрируют небольшие связанные кластеры, а часть районов низкой устойчивости появляется изолированно. Эти паттерны отражают потенциальное влияние уровня инфраструктуры, эффективности управления и рельефных различий на распределение устойчивости.

Межтерриториальное сравнение дополнительно показывает, что районы низкой устойчивости в пределах исследования концентрируются главным образом в Лоху и Лунгане, тогда как в экономически более сильном Футяне их значительно меньше. Это отражает глубокое влияние городской пространственной формы, инфраструктуры застроенной среды и распределения экономических ресурсов на способность районов сопротивляться бедствиям. Сравнение коммерческого жилья и городских деревень показывает, что районы низкой устойчивости в основном являются городскими деревнями. Некоторые городские деревни имеют заметно более низкую устойчивость, чем соседние районы коммерческого жилья, что указывает на серьезные инфраструктурные дефициты части застроенной среды городских деревень и подчеркивает их устойчивое неблагополучие при одинаковом географическом положении.

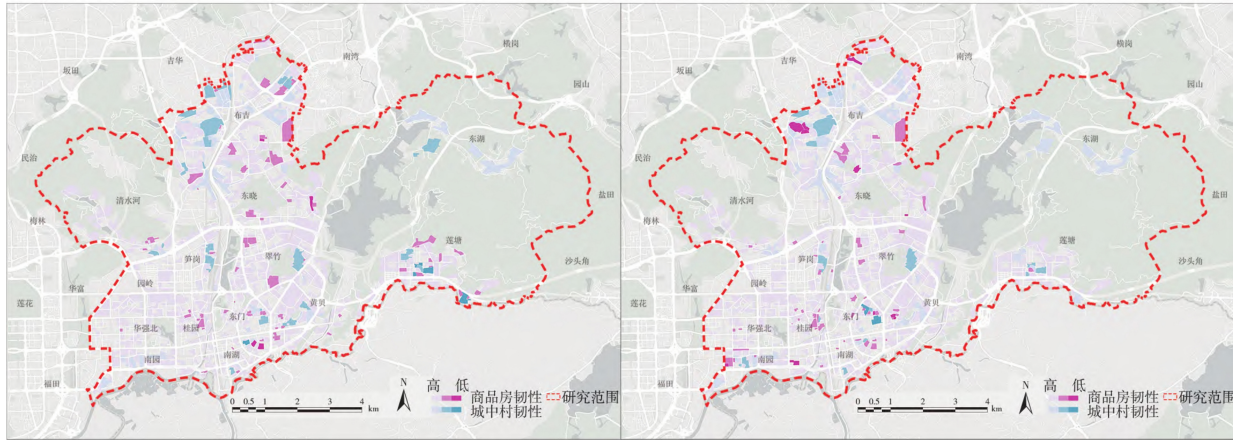


Рисунок 3. Карты устойчивости жилых районов

Рисунок показывает карты устойчивости районов во время бедствия и после него, выявляя связанные зоны низкой устойчивости и различия между Лоху, Футянем и Лунганом.

3.2 Различия устойчивости во время бедствия и после него между типами районов

На основе результатов оценки устойчивости исследование строит boxplot-диаграммы и точечные распределения для анализа изменений устойчивости разных типов районов во время бедствия и после него, раскрывая их дифференцированные характеристики устойчивости (рис. 4).

Городские деревни в целом демонстрируют более низкую бедственную и послебедственную устойчивость. Vохplot показывает, что верхний ус бедственного нарушения значительно вытянут, а несколько чрезвычайно высоких значений расширяют диапазон распределения (рис. 4(а)). Это может быть связано с недостаточной инфраструктурой и ограниченными социальными ресурсами, усиливающими воздействие бедствия. Хотя послебедственное нарушение снижается, оно остается относительно высоким и приближается к уровню бедственного нарушения в районах коммерческого жилья, что указывает на более сильные запаздывающие эффекты восстановления в городских деревнях. Напротив, районы коммерческого жилья имеют более низкую медиану бедственного нарушения, хотя точечное распределение все же показывает некоторые низкоустойчивые примеры. Их послебедственное нарушение снижается значительно, возможно благодаря более совершенной инфраструктуре и достаточной поддержке социальных ресурсов, обеспечивающим более эффективное восстановление.

Boxplot по периодам строительства (рис. 4(b)) показывает, что районы коммерческого жилья, построенные до 2000 года, и районы, построенные в 2000-2010 годах, имеют сходную общую устойчивость. Однако точечное распределение выявляет больше низкоустойчивых примеров среди районов до 2000 года, вероятно из-за старения инфраструктуры и недостаточной социальной поддержки. Районы коммерческого жилья 2000-2010 годов быстрее восстанавливаются после бедствия, что связано с повышением планировочных стандартов и постепенным улучшением застроенной среды. Районы, построенные после 2010 года, показывают наивысшую медиану бедственного нарушения поездок и большой межквартильный размах, но имеют наименьшее число низкоустойчивых точечных примеров и быстрее всего восстанавливаются после бедствия. Этот паттерн соответствует более качественной инфраструктуре и лучшему распределению ресурсов.

Хотя традиционное предположение связывает период строительства, качество района и устойчивость положительной зависимостью, данное исследование показывает, что различия бедственной устойчивости раскрывают нелинейную неоднородность сопротивляемости и механизмов реакции населения под воздействием ливня. В целом оценка районной устойчивости должна выходить за рамки единичных индикаторов застроенной среды и учитывать динамическое изменение сопротивления во время бедствия и восстановления после него. Низкая устойчивость городских деревень подчеркивает значимость социально-экономических свойств и распределения чрезвычайных ресурсов, а различия между поколениями коммерческого жилья раскрывают влияние эволюции инфраструктуры.

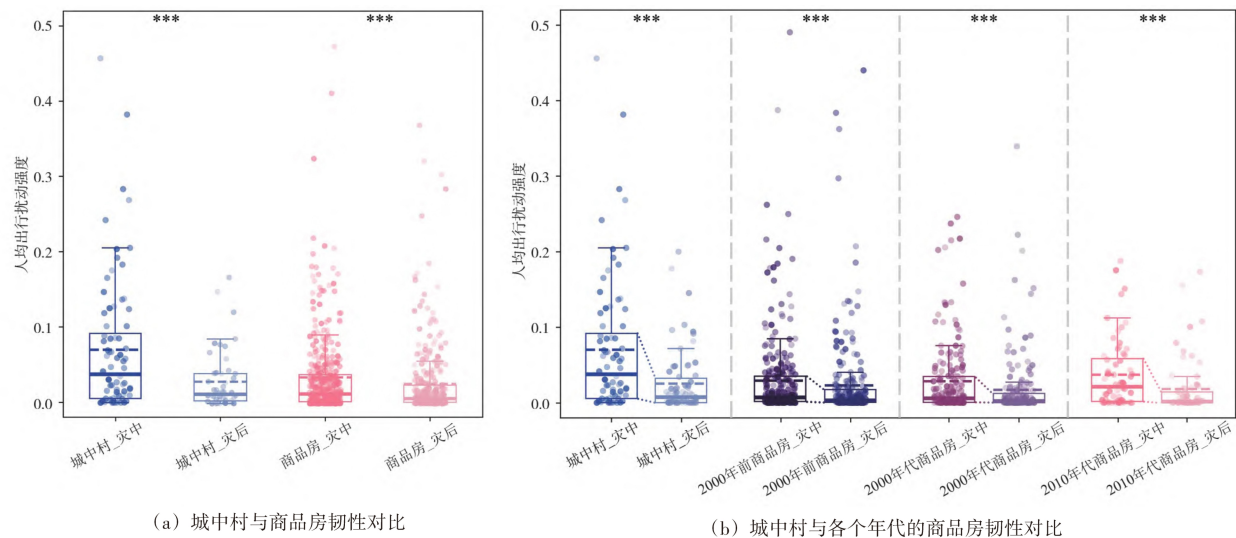


Рисунок 4. Boxplot и точечное распределение уровней устойчивости жилых районов

Рисунок сравнивает устойчивость городских деревень и районов коммерческого жилья, а также сопоставляет городские деревни с районами коммерческого жилья разных периодов строительства.

3.3 Проверка результатов оценки районной устойчивости

Результаты критерия хи-квадрат (рис. 5) показывают, что бедственная устойчивость значимо связана с пешеходным расстоянием до подтопленных дорог ($\chi^2 = 14.5216$, $P = 0.0243 < 0.05$). Чем ближе район к подтопленным дорогам, тем выше вероятность низкой устойчивости во время бедствия. Связь послебедственной устойчивости с пешеходным расстоянием до подтопленных дорог незначима ($\chi^2 = 12.0748$, $P = 0.0603 > 0.05$) и показывает лишь маргинальную тенденцию. Это подтверждает валидность метода оценки: бедственная устойчивость напрямую зависит от подтопления дорог, тогда как послебедственная устойчивость определяется другими факторами.

Стратифицированные тесты хи-квадрат делят районы на группы с низкой и высокой внешней связностью по медиане связности. Результаты показывают, что в группе низкой связности бедственная устойчивость значимо связана с пешеходным расстоянием до подтопленных дорог ($\chi^2 = 15.8262$, $P = 0.01472 < 0.05$). В группе высокой связности эта связь незначима ($\chi^2 = 9.0223$, $P = 0.1723 > 0.05$), что указывает на ослабление влияния подтопления при высокой внешней связности. Для послебедственной устойчивости ни группа низкой связности ($\chi^2 =$

10.8070, $P = 0.0945 > 0.05$), ни группа высокой связности ($\chi^2 = 7.3557$, $P = 0.2892 > 0.05$) не показывают значимой связи с пешеходным расстоянием до подтопленных дорог. Эти результаты выявляют внешнюю дорожную связность как важный модератор влияния подтопленных дорог на бедственную устойчивость. Районы с низкой связностью более склонны к серьезным ограничениям поездок при подтоплении ближайших дорог, тогда как районы с высокой связностью могут смягчать воздействие за счет альтернативных маршрутов и путей отвода воды. В совокупности результаты показывают, что предложенный метод эффективно улавливает дифференцированное влияние подтопленных дорог на бедственную устойчивость окружающих районов.

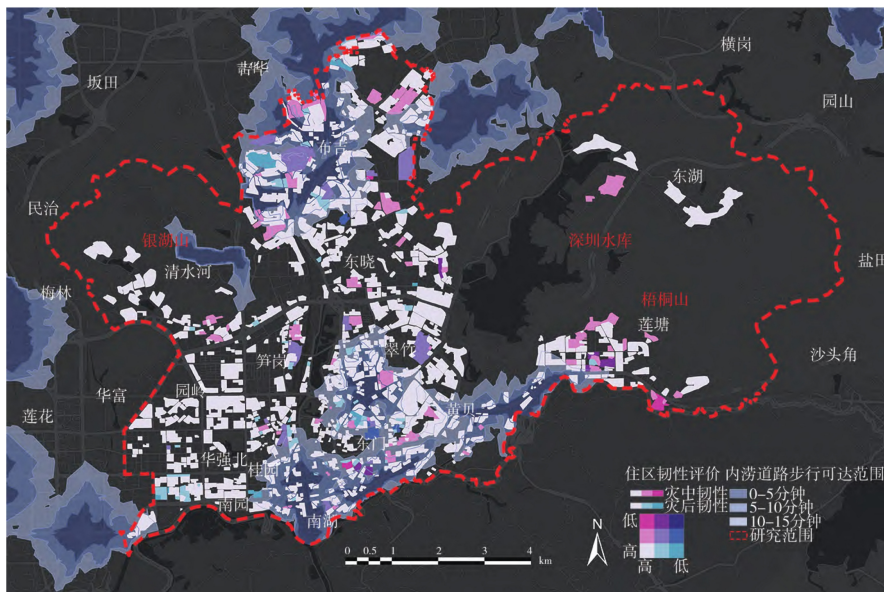


Рисунок 5. Проверка с использованием послойных буферов вокруг подтопленных дорог

Рисунок проверяет связь между устойчивостью района, пешеходным расстоянием до подтопленных дорог и внешней дорожной связностью во время бедствия и после него.

Результаты ранговой корреляции Spearman между средними индикаторами устойчивости на уровне субрайонов и переменными демографической структуры представлены в таблице 2. Бедственный показатель нарушения имеет слабые и незначимые корреляции с долей пожилых людей, долей детей и средним числом лет обучения. На послебедственной стадии интенсивность нарушения имеет значимые отрицательные корреляции с долей пожилых людей и средним числом лет обучения, а также слабую отрицательную корреляцию с долей детей. Это означает, что во время бедствия нарушение поездок менее чувствительно к смещению демографической структуры и главным образом обусловлено внезапными физическими блокировками; невидимость уязвимых групп в данных о поездках еще не усилилась существенно. На послебедственной стадии корреляции становятся сильнее, что показывает более выраженную социально-экономическую чувствительность запаздывающего восстановления и позволяет частично выявить дифференцированное влияние демографической структуры на отложенное нарушение. Например, улицы с более высоким уровнем образования, что означает меньшую долю низкодоходного населения, демонстрируют более высокую послебедственную устойчивость.

Однако значимая отрицательная корреляция с долей пожилых людей указывает на определенное репрезентативное смещение данных мобильного сигналинга на уровне района. Поскольку пожилые люди недопредставлены в выборке, снижение их поездок в некоторых районах, например в субрайонах Юаньлин и Цуйчжу, слабо влияет на совокупное нарушение выборки. Это может создавать статистическую иллюзию, при которой районы с большей долей пожилых людей выглядят более устойчивыми. Иными словами, опора только на данные мобильного сигналинга может занижать реальные риски, с которыми сталкиваются уязвимые группы. Будущие исследования должны интегрировать данные переписей или выборочных опросов на уровне сообщества для калибровки, чтобы сделать оценку устойчивости более инклюзивной.

Таблица 2. Корреляционный анализ между средней устойчивостью на уровне субрайонов и переменными демографической структуры по разным стадиям

Переменная демографической структуры	Интенсивность нарушения поездок на душу населения во время бедствия	Интенсивность нарушения поездок на душу населения после бедствия
Доля населения 65 лет и старше	-0.152	-0.530*
Доля детей 0-14 лет	-0.007	-0.380
Среднее число лет обучения населения 15 лет и старше	-0.099	-0.582*

Примечание: * означает значимость на уровне 0.05 (двусторонний критерий).

4. Обсуждение и выводы

4.1 Основные выводы и практическая ценность

В исследовании построена рамка оценки ливнево-паводковой устойчивости районов на основе пространственно-временного нарушения поездок жителей во время ливневых бедствий и проведена эмпирическая проверка на событии «9.7» в Шэньчжэне. Анализируя данные мобильного сигналинга примерно одного миллиона анонимизированных устройств, исследование строит кривые колебаний поездок до и после бедствия, количественно оценивает уровни устойчивости во время и после бедствия и создает карты районной устойчивости. Валидность метода проверена на фактических данных о подтопленных дорогах и демографической структуре.

Результаты показывают, что районы коммерческого жилья более устойчивы, чем городские деревни, а районы коммерческого жилья разных периодов строительства также демонстрируют значительную неоднородность устойчивости. Анализ связи с подтопленными дорогами подтверждает, что дорожное подтопление является важным фактором нарушения поездок жителей во время бедствий, и доказывает эффективность рамки в выявлении пространственных различий районной устойчивости. Одновременно демографическая проверка на основе структуры населения на уровне улиц показывает, что данные мобильного сигналинга могут содержать внутреннее смещение при применении в микромасштабной оценке устойчивости и тем самым занижать реальные риски стареющих районов.

Большинство существующих оценок устойчивости к бедствиям сосредоточено на макромасштабной статической оценке. Данное исследование обеспечивает более точное суждение на уровне района и подчеркивает преимущества динамического непрерывного временного анализа, основанного на характеристиках поездок жителей. По сравнению с существующими исследованиями больших данных на основе кривых устойчивости предложенная адаптивная оптимизация дает более содержательную перспективу для понимания пространственно-временной неоднородности городской ливнево-паводковой устойчивости и для поддержки чрезвычайного управления. В отличие от сценарного моделирования, зависящего от высоты, исследование не только подтверждает значимую связь между бедственной устойчивостью и близостью к подтопленным дорогам, но и показывает, что районы низкой устойчивости не ограничиваются фиксированным расстоянием от подтопленных дорог (рис. 5). В то же время районы с низкими отметками традиционно считаются высокорисковыми, однако фактическое нарушение поездок жителей не всегда совпадает с этим предположением. Некоторые районы возле склонов, например, имеют относительно высокий рельеф, но низкую устойчивость из-за ограниченного выбора дорог. Динамическая оценка на основе мобильности поэтому способна выявлять более сложные воздействия, которые традиционные оценки могут упускать.

Исследование также отвечает на вопрос социальной справедливости в исследованиях городской устойчивости. Существующие работы [15] показывают, что социально-экономически неблагополучные районы часто имеют более низкую устойчивость. Сравнивая районы разных периодов строительства и разных типов собственности, данное исследование дополнительно подтверждает связь между социально-экономическими факторами и устойчивостью. Оно отражает реальные различия районной устойчивости, вызванные инфраструктурными дефицитами и неравным распределением ресурсов в процессах сопротивления бедствию и восстановления. Карты устойчивости на уровне района также дают более точное представление микромасштабной городской устойчивости.

4.2 Предложения по включению оценки устойчивости в городское обследование на уровне жилых районов

Согласно таким политическим документам, как Технические руководства по городскому обследованию и оценке в территориально-пространственном планировании, городское обследование стало важным институциональным инструментом продвижения качественного городского развития и устранения недостатков среды проживания. Устойчивость является важным измерением действующей системы городского обследования. В ответ на нехватку системных методов тонкой динамической оценки устойчивости на уровне жилого района данное исследование предлагает процедуру обследования и оценки ливнево-паводковой устойчивости районов, управляемую данными мобильного сигналинга. Ее можно пилотировать и продвигать в рамках городского обследования.

Для городского обновления и чрезвычайного управления бедствиями в жилых районах процедура включает сбор данных, построение базовой линии, разделение стадий бедствия, количественную оценку нарушения и внешнюю проверку. Диагностические результаты могут возвращаться в информационные платформы городского обследования и далее встраиваться в подготовку планов городского обновления. Например, районы низкой устойчивости могут включаться в базы

проектов городского обновления и сопоставляться с постепенным микрообновлением, восполнением дефицитов сине-зеленой инфраструктуры и созданием механизмов чрезвычайной координации сообщества. Это формирует замкнутую траекторию управления: «обследование и оценка - диагностическое выявление - приоритетное и адресное исправление - динамический мониторинг», поддерживая регулярный мониторинг, раннее предупреждение и устойчивые планировочные решения на основе данных.

4.3 Ограничения исследования и будущие перспективы

Снижение объема поездок жителей не отражает исключительно повреждение функций районной системы. Использованный в исследовании показатель интенсивности нарушения поездок не различает заблокированные обязательные поездки и добровольное избегание гибких поездок, что может занижать устойчивость районов с высокой управленческой способностью. Будущие исследования могут разработать платформы интеграции многоисточниковых данных, объединяющие точки интереса, землепользование, спутниковое дистанционное зондирование, мобильный сигналинг и социальные медиа. Прогнозирование временных рядов LSTM или графовые нейронные сети могут использоваться для кластеризации траекторий поездок и отдельной количественной оценки обязательных и гибких колебаний мобильности, предоставляя более адресную поддержку решений для управления устойчивостью.

Ключевой индикатор V1 полезен для выявления накопительной несущей способности районов при ливневом нарушении, но один показатель не может полностью сбалансировать острый риск и долгосрочные накопительные потери. В будущем можно строить составные индикаторы, включающие пиковую долю потерь для фиксации максимальной разрушительной интенсивности и острого риска, а также объединять наклон восстановления и кластеризацию формы кривой для повышения точности оценки и различения механизмов сопротивления острому риску и долгосрочного восстановления в разных районах.

Примечания

[1] Большинство точек подтопления было очищено в течение 48 часов, а интенсивность чрезвычайного реагирования заметно снизилась. Водоснабжение, электроснабжение, связь и другая критически важная инфраструктура полностью вернулись к нормальному состоянию в течение 72 часов. Источник: Шэньчжэньское метеорологическое бюро (обсерватория), «Действовать вместе с ветром, бороться с ветром и дождем, укрепляя первую линию городской профилактики и снижения бедствий: хроника реагирования Шэньчжэньского метеорологического бюро на тайфун Саола и экстремальный ливень "9.7"».

Список литературы

- [1] CHEN Yi, CHEN Ruishan, GE Yi. Исследования и размышления о социальной уязвимости и устойчивости к паводковым бедствиям в городских сообществах Китая[J]. *Urbanism and Architecture*, 2018(35): 32-34.
- [2] CHEN Xunlai, XU Ting, WANG Rui, et al. Тонкомасштабные наблюдательные характеристики и причины экстремального ливня «9.7» в дельте Жемчужной реки[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2024, 35(1): 1-16.
- [3] WEI Zongcai, LIN Yudong, WEN Xiaolan, et al. Прогресс исследований городской устойчивости в условиях экстремального климата в Китае и за рубежом: концептуальные рамки, измерение и стратегии оптимизации[J]. *Planners*, 2025, 41(7): 10-17.

- [4] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.
- [5] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN DER MEULEN F. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts[J]. Natural Hazards, 2012, 64: 73-105.
- [6] ZHANG Xiaorui, ZHANG Linya, FANG Chuanglin. Концепт, рамка и измерение: обзор и расширение линии исследований городской уязвимости[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(4): 94-99.
- [7] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. Social Science Quarterly, 2003, 84(2): 242-261.
- [8] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2010, 7(1): 51.
- [9] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. Global Environmental Change, 2014, 29: 65-77.
- [10] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of model's possible climatic applications[R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [11] ZHAI Guofang. Устойчивые ответы на городские ливнево-паводковые бедствия с планировочной перспективы в условиях изменения климата: ключевые понятия, базовые идеи и общая рамка[J]. Urban Planning Forum, 2024(1): 29-37.
- [12] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [13] ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related?[J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [14] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35(1): 557-581.
- [15] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Urban resilience assessment: multiple dimensions, criteria, and indicators[M]//YAMAGATA Y, SHARIFI A. Urban resilience: a transformative approach. Cham: Springer, 2016.
- [16] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.
- [17] SPAANS M, WATERHOUT B. Building up resilience in cities worldwide: Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme[J]. Cities, 2017, 61: 109-116.
- [18] GUO Renzhong, YANG Xiaochun, HONG Wuyang, et al. Базовая логика и рамка планирования и проектирования безопасных и устойчивых городов[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 28-42.
- [19] CHEN Bilin, LI Yinglong. Оценка планирования адаптивной трансформации высокоплотного прибрежного города, ориентированная на паводковую устойчивость: пример района мангров Шэньчжэньского залива[J]. Urban Planning Forum, 2023(4): 77-86.
- [20] LIU C, XU F, GAO C, et al. Deep learning resilience inference for complex networked systems[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9203.
- [21] FAN Yating, LI Yuefan, TU Wei, et al. Оценка уязвимости городских объектов воздействия бедствий на основе данных социальных медиа: пример экстремальной погоды в Шэньчжэне[J]. City Planning Review, 2024, 48(08): 101-113.

- [22] HSU C W, MOSTAFAVI A. Dissecting resilience curve archetypes and properties in human systems facing weather hazards[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11897.
- [23] ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Assessment of urban human mobility perturbation under extreme weather events: a case study in Nanjing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101671.
- [24] TANG J, ZHAO P, GONG Z, et al. Resilience patterns of human mobility in response to extreme urban floods[J]. National Science Review, 2023, 10(8): nwad097.
- [25] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [26] HONG B, BONCZAK B J, GUPTA A, et al. Measuring inequality in community resilience to natural disasters using large-scale mobility data[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1870.
- [27] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36: 23-31.
- [28] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 174-180.
- [29] QIAN J, DU Y, LIANG F, et al. Measuring community resilience inequality to inland flooding using location aware big data[J]. Cities, 2024, 149: 104915.
- [30] YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. Планирование устойчивого Шанхая: ключевые вопросы, общая рамка и планировочные стратегии[J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 19-28.
- [31] YANG Junyan, CAO Jun. Динамическое, статическое, явное и скрытое: четыре режима применения больших данных в городском дизайне[J]. Urban Planning Forum, 2017(4): 39-46.
- [32] PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, et al. Сопряжение множества рисков в городском пространстве и устойчивые планировочные ответы[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.
- [33] PAN Haixiao, DAI Shenzhi, ZHAO Yanjing, et al. Академическая дискуссия «Городская устойчивость и пространственное планирование в ответ на изменение климата»[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 1-10.
- [34] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.
- [35] POULIN C, KANE M B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216: 107926.

Перевод при содействии ИИ