

Формирование системы городских мест экстренного укрытия в условиях сопряженных многоопасных рисков: пример Пекина

Авторы

LI Xiang, XIA Chenhong, WANG Wei

Аннотация

На фоне учащения экстремальных бедствий и усложнения городских пространственных систем городские места экстренного укрытия сталкиваются с комплексными вызовами сопряженных многоопасных рисков: недостаточной структурной адаптивностью, слабой функциональной координацией и запаздыванием механизмов реагирования. Существующие исследования чаще сосредоточены на одиночных опасностях и выборе площадок, тогда как механизмы давления цепочек бедствий, пространственная логика реагирования и системные траектории построения изучены недостаточно. Следуя аналитической последовательности «идентификация риска - структурная диагностика - реконструкция системы», данное исследование формирует интегрированную рамку осмысления систем экстренного укрытия в сценариях многоопасных возмущений и рассматривает Пекин как эмпирический пример. В работе выявляются механизмы сцепления цепочек бедствий и порождаемые ими неоднородные пространственные давления; диагностируются функциональные несоответствия и дисбалансы реагирования действующей системы укрытий с точки зрения типологии, иерархической конфигурации и операционных механизмов; предлагается траектория реконструкции, включающая переосмысление типов укрытий, согласование пространственной структуры и формирование устойчивых механизмов эксплуатации. Эти стратегии соотносятся с пекинскими планировочными стандартами и локальной практикой. Исследование направлено на теоретическую поддержку и разработку стратегий пространственного управления для мегаполисов, сталкивающихся со сложной эволюцией цепочек бедствий, а также на переход систем экстренного укрытия от статической конфигурации объектов к динамичной и устойчивой структуре.

Ключевые слова

сопряженный многоопасный риск; система экстренного укрытия; механизм структурного реагирования; траектория системной реконструкции

Введение

В условиях усиливающегося изменения климата и растущей плотности городского пространства экстремальные бедствия становятся более частыми, более составными по типу и более склонными к цепной передаче. Они меняют традиционные модели городской безопасности. Взаимные триггерные эффекты между различными опасностями усиливаются, что повышает неопределенность ущерба и его пространственную неоднородность. В высокосмешанных и густонаселенных городах первого ранга давление бедствий обычно концентрируется в структурно уязвимых зонах, испытывая пределы устойчивости и регулирующей способности городских систем. Системы экстренного укрытия, связывающие реагирование на бедствия, эвакуацию населения и восстановление порядка, становятся важной опорой городской устойчивости.

В последние годы национальные и местные органы Китая выпустили ряд политических и технических документов, включая «Руководящие мнения по укреплению строительства мест экстренного укрытия», изданные 12 министерствами и комиссиями, национальный стандарт

«Классификация и градация мест экстренного укрытия» (GB/T 44013-2024) и пекинский местный стандарт «Классификация и градация мест экстренного укрытия» (DB11/T 2141-2023). Эти документы задают логику экстренных, краткосрочных и долгосрочных укрытий через продолжительность размещения и пространственную координацию, способствуя переходу от статического обеспечения объектами к многоцелевым системам укрытия. Однако в реальных условиях сцепления цепочек бедствий, высокой пространственной сложности и дифференцированных механизмов управления существующие системы по-прежнему испытывают дефицит координации реагирования, слабую пространственную согласованность и ограниченную способность к структурному сопряжению. Поэтому необходимы системные, перспективные и практико-ориентированные исследования.

Система пространств укрытия постепенно стала ключевой темой исследований устойчивого города. Wei и соавт. [1], Hung и соавт. [2] показывают, что устойчивость проявляется не только в способности системы поглощать удары и восстанавливаться, но и в структурной трансформации и функциональной адаптации; следовательно, пространства экстренного укрытия следует рассматривать как ключевые единицы с динамическими свойствами реагирования. Liu и соавт. [3] предлагают конфигурировать укрытия через динамическое сопряжение распределения населения, путей доступа и эвакуационной пропускной способности, привлекая модели эвакуационного моделирования и сетевой доступности для пространственной оптимизации. Ahmed и Guyton [4], исходя из системного риска, подчеркивают, что состояние давления и функциональное несоответствие структур укрытия должны стать центральными объектами управления. Ran и соавт. [5] строят систему зонирования предотвращения бедствий на основе уровня обслуживания и радиуса размещения; Wang и соавт. [6] предлагают реализовывать вложенную конверсию между повседневными и чрезвычайными функциями объектов; Zhu и соавт. [7] пытаются динамически оценивать вместимость укрытий с помощью сценарного моделирования бедствий и анализа больших данных. Эти исследования формируют прочную теоретическую, методическую и эмпирическую основу, но сохраняются три пробела.

Во-первых, большинство работ сосредоточено на реагировании на одиночную опасность или на статической конфигурации объектов и не дает интегрированного анализа отношений «давление - реагирование - регулирование» в городской системе при сцеплении цепочек бедствий [8]. Во-вторых, внимание остается сконцентрированным на размещении объектов и оценке вместимости укрытий, тогда как внутренний структурный дисбаланс, функциональное несоответствие и фрагментация механизмов моделируются недостаточно. В-третьих, системы укрытия пока не встроены эффективно в рамки управления устойчивостью и потому лишены организационной логики адаптации к сложным возмущениям и эволюции пространственной структуры.

Исходя из этого контекста, исследование фокусируется на Пекине. С момента создания в 2003 году первого в Китае места экстренного укрытия - сейсмического укрытия в парке руин городской стены Юаньдаду - Пекин сформировал более 1 810 мест экстренного укрытия различных уровней и типов. Масштаб системы значителен, но ее проблемы остаются заметными. Как мегаполис на северном крыле Северо-Китайского сейсмического пояса, Пекин длительное время сталкивается с природными рисками, включая землетрясения и метеорологические бедствия. Сложность и уязвимость городского функционирования усиливают потенциальные потери при наложении

бедствий. Поэтому Пекину необходима комплексная планировка и оптимизация системы экстренного укрытия с системной и устойчивой перспектив.

В статье формируется интегрированная рамка, объединяющая идентификацию сцепления бедствий, диагностику пространственной структуры и реконструкцию системы. Ее цель - продвинуть переход систем экстренного укрытия от статического обеспечения объектами к динамическим системам устойчивости, способным справляться со сложными возмущениями. Следуя главной линии «ориентации на сопряженный многоопасный риск», анализ строится через три логики: идентификацию риска, структурную диагностику и реконструкцию системы. Сначала выявляются механизмы связи между такими опасностями, как землетрясения и ливневые паводки, а также неоднородные модели давления, которые они создают в городском пространстве. Затем диагностируются узкие места реагирования в типах укрытий, иерархических связях и операционных механизмах с учетом чувствительности населения и пространственной адаптируемости. Наконец, предлагается траектория реконструкции, охватывающая перестройку типовой системы, координацию пространственного размещения и оптимизацию механизмов эксплуатации, что образует схему реконструкции системы укрытия для сценариев сопряженных многоопасных рисков.

1. Логика идентификации риска в системах укрытия при сопряженных многоопасных сценариях

Под воздействием наложения нескольких опасностей и составных возмущений городские системы экстренного укрытия сталкиваются с многоуровневой структурой давления, создаваемой внешними драйверами риска, внутренними структурными реакциями и системными сбоями. Пекин, как типичный мегаполис, имеет сложную пространственную морфологию, тесно сопряженные функциональные зоны и разнообразные типы опасностей, поэтому его система укрытий обладает высокой репрезентативностью и демонстрационной ценностью на национальном уровне. Исходя из механизмов бедствий, данный раздел сначала анализирует, как различные опасности воздействуют на пространственную систему и создают давление. Затем рассматривается сопряжение пространственной структуры и характеристик населения, раскрывающее логику формирования системной экспозиции. В завершение выявляются формы дисбаланса экспозиции и функционального несоответствия в системе укрытий, что создает проблемную и структурную основу для последующих стратегий.

1.1 Идентификация цепочек многоопасных бедствий и механизмов их действия

С учащением экстремальных климатических событий и усилением сопряженности городских функций связанная эволюция разных опасностей стала важной переменной устойчивости городских систем безопасности. В отличие от традиционных моделей одиночных опасностей, сопряженные многоопасные риски обладают выраженными свойствами цепной передачи: наложением физических опасностей, взаимосвязанным нарушением функциональных систем и эффектами усиления в социальных системах [9]. Пекин имеет сложное геологическое строение и исторически переживал землетрясения, ливни, горные паводки и вторичные бедствия. Его застроенные территории сконцентрированы, а подземное пространство используется интенсивно, что делает цепочки бедствий высоко коррелированными как в вертикальном, так и в горизонтальном пространственном измерении.

На основе матричной модели риска, оценивающей опасности по интенсивности и частоте возникновения, в исследовании упорядочены девять основных типов опасностей: землетрясения,

наводнения, геологические бедствия, пожары, экстремальная погода, опасные химические вещества, аварии в горнодобывающей сфере, инциденты общественной безопасности и эпидемии. Далее строится сеть распространения многоопасных рисков [10], а через обзор литературы и принцип цепочки событий выявляются пути их действия в пространственных измерениях (рис. 1). С позиции взаимодействия опасностей землетрясения могут вызывать обрушение зданий, транспортные сбои и пожарные вторичные бедствия; наводнения - парализовать подземные объекты и повышать риски концентрации людей; эпидемии - усиливать уязвимость общественных мест. В плотной городской структуре Пекина взаимодействия опасностей легче накладываются и усиливаются в центральном городе и субцентре, формируя типичный процесс цепной передачи городского уровня.

Следовательно, различные опасности могут возникать одновременно или накапливаться по фазам, порождая нелинейные возмущения в городских пространственных структурах. Эти составные механизмы распространяются через пространственные каналы передачи риска и формируют «зоны высокого риск-давления», сосредоточенные вокруг плотных городских функций, инфраструктурных узлов и мест концентрации населения [11]. При этом разные опасности, различаясь причинными факторами, ритмами действия и структурами распространения, проецируются в общую пространственную систему отсчета через различия весов факторов, силы сонаступления и моделей цепной связи. Так формируются сопоставимые пространственные реакции, а характеристики опасностей получают эндогенно интегрированное выражение в рамке составного риска.

Идентификация многоопасных связей может быть переведена в процедуру наложения пространственных слоев и цепного анализа, позволяющую абстрагировать общие механизмы действия и извлечь общий паттерн отклика Пекина на связанное распространение опасностей, а также неоднородную карту составного риска. Для ее построения в исследовании используется ArcGIS: сначала отбираются исторические данные о ключевых опасностях, включая землетрясения, наводнения, пожары, экстремальную погоду и аварии с опасными химическими веществами, а также факторы воздействия риска - уклон рельефа, плотность застройки, распределение подземного пространства, плотность населения, плотность инфраструктурных узлов и социально-экономическая экспозиция. На их основе формируются слои интенсивности опасностей. Затем применяются анализ сети сонаступления бедствий на основе многоисточниковых данных и моделирование цепной передачи. Через текстовый майнинг и статистику совместной встречаемости выявляются частоты сонаступления и семантические связи между опасностями, строится количественная матрица взаимодействий, а взвешенные показатели степени и посредничества используются для определения ключевых триггерных опасностей и путей распространения [12]. По порогам вероятности сонаступления связи классифицируются как низкочастотные (<10%), среднечастотные (10%-30%) и высокочастотные (>30%). Метод взвешенного наложения затем используется для построения карты пространственного распределения составного многоопасного риска.

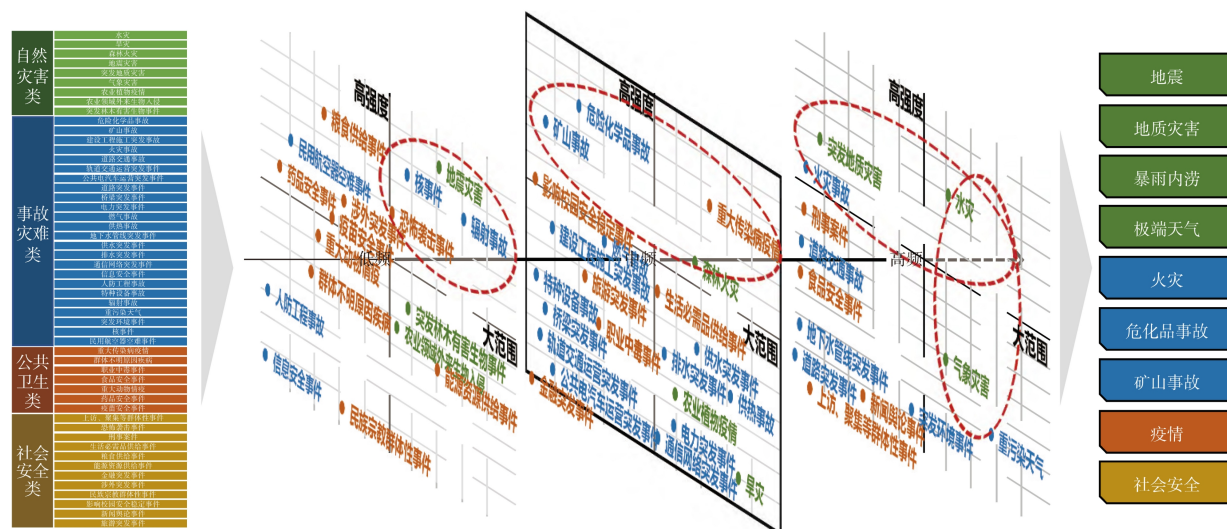


Рисунок 1. Стадии цепной реакции и структура системного воздействия разных типов бедствий

Рисунок классифицирует природные бедствия, аварии, события общественного здравоохранения и инциденты общественной безопасности, связывая их с репрезентативными опасностями: наводнениями, засухами, лесными пожарами, землетрясениями, геологическими бедствиями, экстремальной погодой, опасными химическими веществами, горнодобывающими авариями, сбоями транспорта и инженерных сетей, крупными инфекционными заболеваниями, инцидентами пищевой и лекарственной безопасности, терроризмом, массовыми инцидентами и иными рисками городской безопасности.

1.2 Чувствительность городского населения и анализ спроса на укрытие

Городское население является непосредственным носителем последствий бедствий. Его пространственное распределение и социальные характеристики образуют ядро давления на системы укрытия. В сопряженных многоопасных сценариях спрос на укрытие определяется уже не только численностью или плотностью населения, а является системным результатом взаимодействия причинности риска, чувствительности населения и эффективности спасения [13] (рис. 2). Распределение источников риска задает интенсивность и охват опасности; чувствительность населения определяет степень индивидуальной уязвимости; эффективность спасения влияет на своевременность прибытия ресурсов и точность активации функций.

Для научной и воспроизводимой модели показатели трех измерений взяты из базы исторических событий бедствий Пекина, данных Седьмой всекитайской переписи населения и пространственной информации об инфраструктуре. После нормализации и проверки значимости применяется анализ главных компонент для выделения основных составных факторов и определения весов; затем используется модель координации сопряжения, раскрывающая взаимодействия между экспозицией бедствий, чувствительностью населения и эффективностью спасения. В результате формируется интегрированная количественная модель городского спроса на укрытие.

С учетом существенных различий между опасностями по масштабу потерь, механизмам действия и режимам укрытия тип опасности рассматривается как предварительное ограничение при идентификации спроса. Многоопасные сценарии используются для дифференцированной корректировки составных воздействий разных опасностей, что предотвращает пропуск сценариев,

возникающий при опоре только на данные о населении и инфраструктуре. Землетрясения, наводнения, пожары и аварии с опасными химическими веществами различаются по интенсивности запуска укрытия, режиму эвакуации и пространственным условиям. Поэтому сценарные коэффициенты спроса могут корректировать расчетные результаты и отражать различия масштаба укрытия, продолжительности размещения и пространственной адаптируемости (табл. 1).

В Пекине распределение населения и социальная чувствительность имеют выраженную пространственную дифференциацию. Центральный город содержит множество старых жилых кварталов и пожилых жителей, что обуславливает относительно высокий индекс социальной уязвимости. Новые функциональные районы, такие как Тунчжоу и Ичжуан, характеризуются преобладанием мигрирующего населения и трудоинтенсивных групп, концентрируя давление на систему укрытий. Равнинные новые города и зоны экологической охраны имеют меньшую плотность населения, но более слабую транспортную доступность, что создает значительные ограничения доступа к укрытиям. На основе пространственных данных о фактическом населении Пекина, мигрирующем населении и высокоуязвимых группах - пожилых людях, детях и группах с низким доходом - построена модель оценки чувствительности населения. Результаты показывают, что пожилые жители сосредоточены в старых сообществах и центральных городских районах, а мигрирующее население группируется вдоль рельсовых коридоров и на городских окраинах. Так формируются множественные зоны давления типа «высокая плотность - высокая чувствительность - низкая защищенность». Наложение чувствительности населения и городского функционального пространства задает для Пекина типичную модель высокого давления в ядре и колеблющегося спроса на периферии.

Объединяя эти характеристики населения с особенностями землетрясений, пожаров, наводнений и эпидемий, исследование строит двумерную рамку соответствия «тип опасности x цикл укрытия», чтобы определить пространственную структуру и временную последовательность разных видов спроса. Расчеты показывают, что в экстремальных сценариях максимальное население, нуждающееся в укрытии в Пекине, может составлять около 30% обслуживаемого населения, а пространственное распределение характеризуется «высоким давлением в ядре и колебаниями на периферии». Такая карта спроса дает количественную основу для определения приоритетных зон, уточнения стандартов конфигурации объектов и разработки стратегий распределения ресурсов.

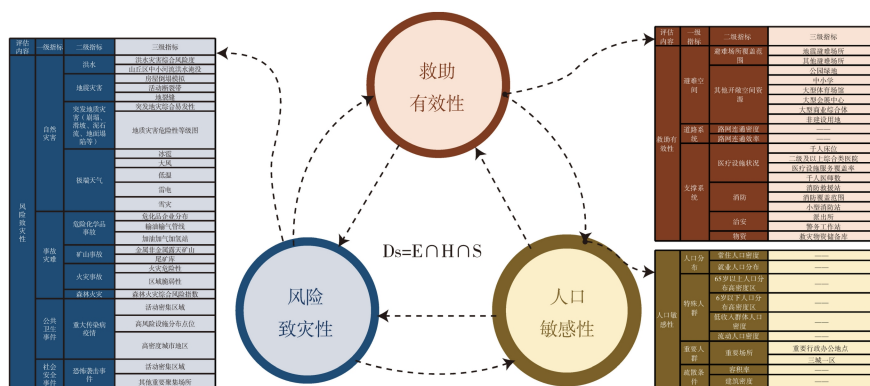


Рисунок 2. Трехмерная сопряженная модель идентификации спроса на городские укрытия

Модель включает три измерения: причинность риска, чувствительность населения и эффективность спасения. Причинность риска охватывает наводнения, землетрясения, геологические бедствия, экстремальную погоду, опасные химические вещества, горнодобывающие аварии, пожары, лесные пожары, события общественного здравоохранения и инциденты общественной безопасности. Чувствительность населения включает постоянное население, занятое население, пожилых людей, детей, группы с низким доходом, мигрирующее население, важные места, коэффициент застройки и плотность застройки. Эффективность спасения включает покрытие укрытиями, ресурсы открытого пространства, связность и эффективность дорожной сети, медицинские учреждения, пожарно-спасательные силы, полицию и резервы материалов для ликвидации бедствий.

Таблица 1. Дифференцированные пороги запуска эвакуации и пространственные требования для распространенных типов бедствий

Тип бедствия	Интенсивность запуска укрытия	Ключевые характеристики пространственного спроса	Направление корректировки
Землетрясение	Высокая	Открытое и безопасное пространство сбора.	Вес спроса.
Наводнение	Средняя	Исключение низинных территорий; обеспечение безопасной отметки и дренажной способности.	Локальная применимость в пострадавших районах.
Пожар	Низкая (локальная)	Противопожарный разрыв и изоляция от дыма.	Локальная корректировка.
Авария с опасными химическими веществами	Средняя (локальная)	Безопасная дистанция изоляции и ограждение с учетом направления ветра.	Локальная корректировка.
Экстремальная погода, например жара или загрязнение воздуха	Низкая	Внутренние убежища и системы вентиляции.	Обычно не формирует крупномасштабный централизованный спрос на укрытие.

1.3 Способность системы укрытий к реагированию и диагностика пространственного баланса спроса и предложения

Способность системы экстренных укрытий к реагированию зависит не только от количества и плотности объектов, но прежде всего от их пространственного соответствия распределению населения, характеристикам опасностей и функциональным узлам. Существующие укрытия Пекина преимущественно создаются на базе общественных объектов - зеленых пространств, парков и школ, образуя трехуровневую сеть реагирования на муниципальном, районном и уличном уровнях. Однако в многоопасных сценариях система по-прежнему сталкивается со структурным несоответствием и дисбалансом спроса и предложения.

Для выявления этих пространственных различий в исследовании построен «индекс соответствия спроса и предложения укрытий» на основе радиуса обслуживания укрытия, плотности населения и вместимости объектов. Результаты показывают существенные различия коэффициента спроса и предложения по Пекину (рис. 3). В функциональном ядре столицы коэффициент составляет 1:0,6, что указывает на достаточное предложение укрытий и даже некоторую ресурсную избыточность. В центральном городе коэффициент равен 1:1,8, отражая высокое давление из-за плотного населения. В городском субцентре коэффициент 1:1,4 свидетельствует об умеренно напряженной ситуации. В нескольких равнинных новых городах коэффициент 1:1,3 указывает на относительное равновесие. В зоне экологической охраны коэффициент 1:1 отражает базовое соответствие спроса и предложения. В целом система укрытий Пекина демонстрирует пространственную модель «избыточность ядра - напряженность субцентра - равновесие равнинных районов - умеренная периферийная емкость». Эта модель отражает структурные различия распределения ресурсов укрытия между функциональными территориями и районами и требует более рациональной планировки и многоуровневых механизмов реагирования для устранения дисбаланса.

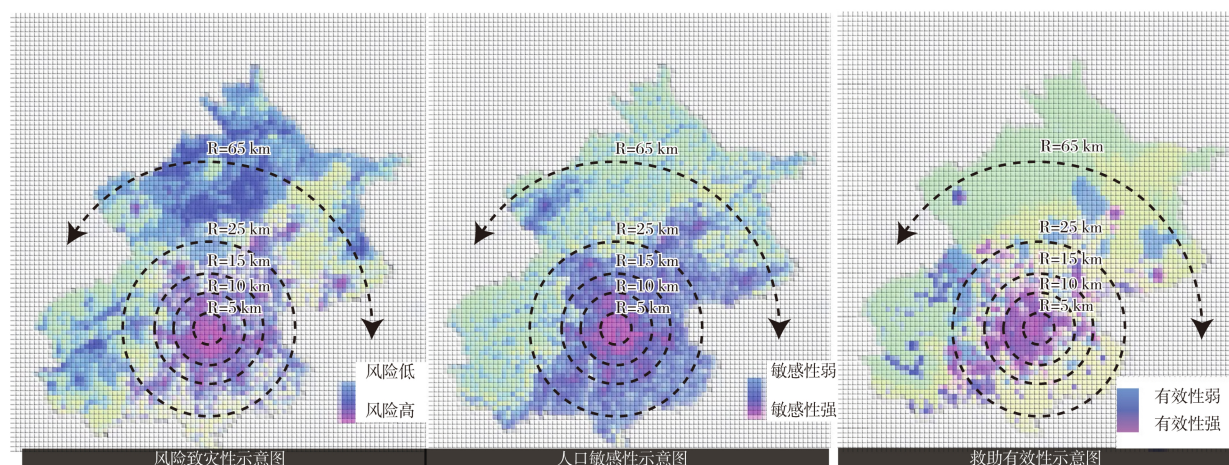


Рисунок 3. Пространственная неоднородность системы экстренного укрытия в Пекине

Рисунок сопоставляет три пространственных слоя: причинность риска, чувствительность населения и эффективность спасения. Он показывает дифференцированное давление на укрытия, создаваемое наложением риска, чувствительного населения и условий спасательных ресурсов в разных частях Пекина.

2. Механизмы структурного реагирования систем укрытия при сопряженных многоопасных сценариях

На фоне наложения разных опасностей и высокой концентрации городского пространства система укрытий Пекина, принадлежащая национальному политическому центру и типичному мегаполису, обнаруживает множественные структурные ограничения в типовой настройке, пространственном размещении и операционных механизмах. Эти ограничения затрудняют быстрое реагирование и безопасный трансфер населения в динамических сценариях. Для выявления ограничений и узких мест анализ должен идти по трем измерениям: соответствуют ли функции требованиям опасностей, охватывает ли планировка ключевые зоны и поддерживают ли механизмы эффективную координацию. Это создает адресную основу для последующей реконструкции системы.

2.1 Функциональное соответствие типовой структуры укрытий

В условиях частых составных рисков и диверсифицированного спроса действующая система укрытий Пекина в основном состоит из трех типов пространств: экстренного убежища, временного размещения и переходного размещения. Вместе они образуют функциональную систему, охватывающую весь процесс бедствия. Однако из-за разнообразия угроз и сложности цепочек бедствий разные типы укрытий сохраняют очевидные недостатки в функциональной стратификации и соответствии конкретным опасностям. Внезапные опасности, такие как землетрясения и пожары, требуют высокой оперативности и доступности; медленно развивающиеся опасности, например наводнения и эпидемии, больше зависят от защитных и устойчиво функционирующих пространств. Эти два набора требований часто трудно согласовать в городском пространстве.

Например, в центральном городе Пекина старые жилые районы испытывают дефицит пространства укрытия, а часть школ и парков из-за раннего строительства и слабой инфраструктуры не отвечает двойным требованиям сейсмической защиты и отвода паводковых вод. В новых функциональных районах, таких как Тунчжоу и Ичжуан, построено много новых общественных зеленых пространств и комплексных укрытий, но конверсия объектов и материальное обеспечение все еще недостаточно приспособлены к составному реагированию на несколько опасностей. Возникает ситуация, когда укрытия видимы как площадки, но отсутствуют как функции при наступлении разных сценариев бедствий. Поэтому типовая структура должна перейти от административной классификации к интегрированной логике реагирования «опасность - цикл - функция», усиливая функциональную адаптацию системы в разных сценариях.

2.2 Пространственная координация структуры размещения укрытий

Размещение укрытий обеспечивает эвакуацию населения и концентрацию ресурсов в различных городских районах во время бедствий. Его структурная рациональность напрямую влияет на способность всей системы выдерживать давление и обеспечивать связанное реагирование. Пространственная структура Пекина имеет отчетливую кольцево-радиальную форму. Предгорная равнина, высокоплотные функциональные зоны и периферийные территории экологической охраны вместе образуют типичную городскую структуру «многих колец и многих ограничений». В такой структуре распределение, баланс и доступность укрытий подчинены множественным природным и социальным ограничениям.

Наложение прогноза населения, нуждающегося в укрытии, на оценку сервисной емкости показывает заметный пространственный дисбаланс системы укрытий Пекина. Центральный город имеет высокую плотность укрытий, но ограниченную вместимость и значительное давление эвакуации населения. Субцентр Тунчжоу и равнинные новые города переживают быстрое накопление населения, нуждающегося в укрытии, тогда как предложение объектов отстает. Периферийные районы, такие как Фаншань и Миюнь, имеют слабую доступность укрытий из-за рельефных барьеров и транспортных условий. Модель «высокое давление в центре - запаздывающее реагирование на периферии» является типичной пространственно-структурной проблемой Пекина. Она отражает неравномерное развитие систем укрытия между городским ядром и окраинными территориями, особенно в пригородно-сельских переходных зонах, ключевых функциональных районах и узлах пересечения транспортных коридоров, где фрагментированная планировка, слабые маршруты доступа и однофункциональность площадок

затрудняют быстрое сосредоточение и реагирование во время бедствий. В целом действующее распределение укрытий в Пекине характеризуется моделью «плотный центр и редкая периферия» при низком соответствии между распределением населения, уровнем риска и условиями доступности.

2.3 Механизм реагирования в эксплуатации укрытий

Операционная структура системы укрытий является практической основой активации пространства, распределения ресурсов и перевода населения. Системность и координированность механизмов реагирования напрямую определяют эффективность связанного действия во время бедствия. Пекин уже сформировал первоначальный трехуровневый механизм эксплуатации на муниципальном, районном и уличном уровнях, однако сохраняются перекрытие функций, фрагментация информационных систем и задержки межведомственной координации. Эти проблемы затрудняют быстрые конверсии, необходимые при эволюции цепочек бедствий.

Как столица, Пекин должен учитывать в эксплуатации укрытий политическую безопасность, общественную безопасность и социальную стабильность, что делает проектирование механизмов сложнее, чем в других городах. Во время крупных событий, экстремальной погоды или чрезвычайных ситуаций в сфере общественного здравоохранения система укрытий должна одновременно эвакуировать людей и обеспечивать бесперебойность транспорта и безопасность ключевых зон, создавая типичную проблему многоцелевой координации. Следовательно, необходима система ответственности, ориентированная на состояние сценария, а также организационный механизм, объединяющий повседневную и чрезвычайную эксплуатацию. Цифровые платформы должны сформировать замкнутый контур «восприятие - диспетчеризация - взаимодействие». Через коэффициенты сервисной поддержки населения для экстренных, краткосрочных и долгосрочных укрытий, а также через динамическое сопряжение метеорологических, гидрологических, транспортных и энергетических данных система может обеспечивать эффективную, безопасную и интеллектуальную поддержку реагирования в сложных условиях бедствий.

3. Траектории реконструкции систем укрытия с учетом рискованных характеристик мегаполиса

В контексте составных бедствий система экстренного укрытия Пекина сталкивается с дефицитом адаптивности и организационными барьерами. Как типичный мегаполис и национальный политический центр, Пекин обладает сложным рельефом, плотным населением и множеством опасностей; поэтому строительство его системы укрытий одновременно репрезентативно и сложно. На основе выявленных проблем и диагностики реагирования данный раздел предлагает интегрированную траекторию реконструкции, охватывающую тип, пространство и механизм. В центре внимания три аспекта: перестройка типовой системы, адаптированной к многоопасным характеристикам; оптимизация пространственной сети с учетом местных условий; и переоформление механизмов на основе сценарной ориентации. Цель состоит в поиске пути устойчивой трансформации, укорененного в пекинской практике и потенциально применимого в национальном масштабе [14-15].

3.1 Адаптивная реконструкция типовой системы укрытий под многоопасные характеристики

Разные опасности существенно различаются по формированию цепочек бедствий, пространственному охвату и путям укрытия населения. Это приводит к структурной дифференциации поведения укрытия и пространственного спроса. Землетрясения, например,

часто вызывают региональные структурные повреждения и создают крупномасштабный централизованный спрос на экстренную эвакуацию. Наводнения зависят от высотных отметок и быстро меняются во времени, часто порождая рассредоточенные временные перемещения, обусловленные топографическими различиями. Пожары и аварии с опасными химическими веществами в основном связаны с локальным распространением и обычно требуют быстрой изоляции и краткосрочного пространственного перевода. Поэтому необходимо строить систему типовой классификации, в которой логическими опорами служат тип риска, цикл реагирования и сервисная функция, а сценарии бедствий выступают важной основой реконструкции типов укрытий.

Во-первых, систему градации и классификации укрытий следует перестроить в соответствии с трехмерным соответствием «тип опасности - продолжительность реагирования - функциональный спрос». Экстренные укрытия главным образом отвечают на внезапные события высокой интенсивности и должны акцентировать близкое, кратковременное и высокореактивное локальное укрытие. Краткосрочные экстренные укрытия соответствуют региональным бедствиям средней интенсивности и выполняют этапные задачи перевода населения, централизованного размещения и концентрации ресурсов. Долгосрочные экстренные укрытия обслуживают послебедственное восстановление и переселение, обеспечивая комплексные возможности жизнеобеспечения, медицинского обслуживания и материального снабжения. С учетом тройственной пространственной структуры Пекина - высокоплотных застроенных районов, широких равнин и предгорных экологических зон - в типовую стратификацию следует включить веса географического зонирования. Центральный город должен отдавать приоритет пространствам быстрого реагирования, тогда как равнинные и горные районы должны усиливать функции переселения и резервной поддержки, формируя многоуровневую систему постепенного реагирования, поэтапного функционального усиления и пространственно-временной связности.

Во-вторых, классификационная рамка должна расшириться до составной структуры типов укрытий «комплексные - специализированные - специальные». Разные территории Пекина сталкиваются с разными опасностями. Комплексные экстренные укрытия должны прежде всего отвечать на землетрясения, одновременно покрывая аварии с опасными химическими веществами, пожары, горнодобывающие аварии, террористические атаки и иные инциденты. Специализированные экстренные укрытия могут классифицироваться по особым потребностям во время бедствий, включая защиту от наводнений, экстремальной погоды, внезапных геологических бедствий, лесных пожаров и крупных инфекционных эпидемий. Специальные экстренные укрытия относятся к пространствам для пожилых людей, младенцев, беременных женщин, людей с инвалидностью, а также раненых и больных. Они должны отвечать требованиям безбарьерного проектирования и выражать социальную инклюзивность столицы и способность к точному обслуживанию.

Наконец, необходимо сформировать динамически сопряженную систему между типовой иерархией и операционными механизмами. Пекин имеет прочную основу в учениях по предотвращению бедствий, моделировании бедствий и материальных резервах. Платформа «городского мозга» должна использоваться для динамического согласования типов укрытий и условий бедствий, формируя операционную логику повседневной готовности, конверсии во время бедствия и повторного использования после бедствия. Предварительное размещение ресурсов и сценарные учения способны повысить способность разных пространств к экстренной конверсии и

эластичность реагирования. Правовые стандарты, технические руководства и механизмы оценки должны поддерживать институционализированную эксплуатацию и нормативность реагирования. В целом адаптивная реконструкция типов укрытий должна исходить из различий городских профилей риска и потребностей населения. На основе функциональной дифференциации и сценарной динамичности система укрытий должна перейти от широких категорий к тонкой классификации и от реагирования на одиночную опасность к многоопасной адаптации, усиливая координацию «человек - пространство» и пространственную устойчивость, необходимые при составных бедствиях.

3.2 Оптимизация пространственного размещения укрытий через согласованную связность

Как ключевая опора управления устойчивостью, действующие ресурсы укрытия Пекина демонстрируют кольцевой дисбаланс: концентрацию в центре и слабость на периферии. Этот пространственный паттерн весьма типичен для мегаполисов. Для формирования пространственной системы с эластичной диспетчеризацией и межрайонной координацией оптимизация размещения должна идти по трем измерениям: кольцевая координация, связь двойного кольца и интеграция города и села. Это позволит перейти от сегментированного администрирования к сетевому взаимодействию.

С точки зрения кольцевой организации необходимо построить многоуровневую систему поддержки укрытия в соответствии с иерархией функциональных зон столицы. Она должна включать центральный город, городской субцентр Пекина, равнинные новые города и трансграничные территории. В функциональном ядре столицы экстренные укрытия должны быть полностью обеспечены согласно функциональному позиционированию, спросу на укрытие и доступным ресурсам. Размещение следует рассчитывать исходя из 1,7-1,8-кратной плановой численности населения, тогда как краткосрочные и долгосрочные потребности, которые не могут быть полностью обеспечены местными пространственными ресурсами, должны координироваться в пределах центрального города. В городском субцентре и равнинных новых городах необходимо уточнить ответственность за среднесрочный перевод и внеситуативное размещение, а также эффективно использовать буферные эффекты транспортных узлов и зеленых поясов. В трансграничных узлах, таких как Тунчжоу, Пингу и Чанпин, можно согласовывать региональные механизмы взаимодействия, формируя трехмерную опорную структуру главных и вспомогательных узлов.

С точки зрения сетевой структуры следует интегрировать крупные зеленые пространства, транспортные коридоры и чрезвычайные узлы, создавая триединую сеть связности укрытий: экологические коридоры, транспортные оси и узлы реагирования. Первый и второй зеленые изоляционные пояса могут выполнять функцию зон перехода давления. Транспортные узлы и зеленые пояса в районах Фэнтай, Чаоян и Чанпин могут совместно развиваться как экологические и чрезвычайные коридоры двойного назначения с межрайонными долгосрочными укрытиями и узлами аварийной логистики. Через железнодорожные и автомобильные оси следует создать трехуровневый коридор реагирования - местное укрытие, ближайшая эвакуация и внеситуативное размещение, - усиливая пространственную доступность и доставку материальных ресурсов.

С точки зрения координации городского и сельского пространства экстренные укрытия должны последовательно распространяться на пригородно-сельские переходные зоны, узлы поселков и деревень, а также горные долины. Рельеф Пекина описывается как «три горные системы и пять

садов, окружающие один город»; горные районы занимают около двух третей территории муниципалитета, а пространственный градиент города выражен ясно. Поэтому составная система укрытий должна охватывать городской центр, равнинную внутреннюю зону и горную периферию. Городской центр должен усиливать локальное укрытие и быструю эвакуацию в высокоплотной застройке, опираясь на общественные зеленые пространства, культурно-спортивные объекты и подземные пространства для формирования эффективной сети сбора. Равнинная внутренняя зона должна использовать транспортные и пространственные преимущества Тунчжоу, Ичжуана и Шуньи, применяя кластерные и сеточно-встроенные схемы, чтобы улучшить среднесрочное размещение и внеситуативный перевод. Горная периферия, включая Яньцин, Фаншань и Миюнь, должна сочетать рельефные условия и дорожную доступность с распределенным размещением, обеспечивая доступность экстренного реагирования в зонах высокого риска.

Радиус обслуживания, достижимое время, защищенная площадь на душу населения и количество коридоров могут быть включены в оценку пространственной оптимизации, нормативное планирование и процедуры оценки риска. Это будет способствовать переходу от статического наложения к динамическому сопряжению и от административного распределения к функциональной координации.

3.3 Системная реконструкция механизмов эксплуатации укрытий на основе сценарной конверсии

В условиях частых многоопасных возмущений и высоконагруженного функционирования мегаполиса механизм эксплуатации экстренных укрытий Пекина должен перейти от модели «статическое назначение - одиночное реагирование» к модели «динамическая конверсия - множественная адаптация». Исследование предлагает иерархический механизм связанного реагирования, основанный на многоопасных сценариях и соответствующий условиям Пекина. Он строит замкнутую операционную логику восприятия, идентификации, реагирования и обратной связи, формируя цифровую и межведомственную устойчивую систему эксплуатации.

Во-первых, следует усовершенствовать двойной механизм нормального и чрезвычайного функционирования, поддерживающий институциональную конверсию и функциональное переключение в разных сценариях (рис. 4). На стадии нормального функционирования пекинская информационная система чрезвычайного командования и городская платформа цифрового двойника должны использоваться для управления резервами укрытий, мониторинга рисков, диспетчеризации ресурсов и тренировочных учений. Необходимо интегрировать многоисточниковые данные о метеорологии, гидрологии, транспорте, населении, энергии и объектах укрытия. Через уточнение стандартов активации, правил управления и границ ответственности можно реализовать динамическое управление мониторингом бедствий и резервами ресурсов укрытия. На стадии чрезвычайного функционирования должны быть улучшены классификация уровней реагирования, процедуры маршрутизации и механизмы информационного оповещения. Во время бедствий четырехуровневый режим реагирования - красный, оранжевый, желтый и синий - может запускаться в зависимости от типа опасности и масштаба воздействия. Интеллектуальные модули вывода способны быстро формировать схемы эвакуации и распределения ресурсов, обеспечивая оперативную активацию, замкнутые задачи и ясные ответственности при внезапных бедствиях.

Во-вторых, следует усилить функциональную интеграцию внутренних и наружных пространств. В центральном городе внутренние безопасные пространства - культурно-спортивные объекты, подземные коммерческие помещения и проходы метро - должны активироваться в первую очередь для усиления защиты от землетрясений, ливней, загрязнения воздуха и других опасностей. В равнинной внутренней зоне и районах экологической охраны открытые и полуоткрытые пространства укрытия должны выполнять функции рассредоточения и буферизации, формируя операционную модель пространственного разнообразия и функциональной взаимодополняемости. Высотные здания и системы гражданской обороны должны повышать трехмерную способность реагирования при экстремальных бедствиях через согласованный механизм вертикального укрытия и подземной буферизации. Региональное сотрудничество может сформировать пространственную систему с разнообразными формами, зональным соответствием и взаимодополняющими функциями, отвечающую потребностям укрытия при землетрясениях, ливнях, волнах жары и других опасностях. Одновременно сенсорные терминалы Интернета вещей должны в реальном времени отслеживать плотность людей, энергоснабжение и проходимость коридоров, поддерживая динамическую активацию и автоматическую диспетчеризацию пространств укрытия.

В-третьих, необходимо создать механизм конверсии общественных ресурсов для повседневного и чрезвычайного использования, чтобы продвигать экстренную конверсию и функциональное расширение существующих общественных ресурсов. Для мест регулярного использования - парков, школьных площадок и общественных площадей - следует разработать трехэлементный перечень условий конверсии, процедур активации и ресурсного обеспечения. Это позволит быстро менять статус и функции при наступлении бедствий, обеспечивая эффективное повторное использование по принципу «повседневный сервис для жителей и чрезвычайное укрытие при бедствиях». Городской субцентр Пекина и равнинные новые города должны далее использовать преимущества пространственной емкости для улучшения межрайонной связности и поочередного реагирования, формируя многоуровневую систему координации центральной эвакуации, приема в субцентре и периферийной поддержки. Это повысит резервность и динамическую диспетчерскую способность ресурсов укрытия.

Наконец, пространства укрытия в высотных зданиях и городские сооружения гражданской обороны следует системно включить в трехмерную сеть чрезвычайной поддержки. В ядрах функций и высокоплотных районах необходимо продвигать этажи-убежища и эвакуационные платформы высотных зданий, связывая их с проходами метро и подземными парковочными системами гражданской обороны. Это позволит сформировать трехмерную сеть укрытий, сочетающую быстрое надземное сосредоточение и безопасную подземную буферизацию, повышая пространственную резервность и операционную устойчивость в экстремальных сценариях мегаполиса.

В целом через многомерную связность нормальной и чрезвычайной конверсии, интеграции внутренних и наружных пространств, двойного повседневно-чрезвычайного использования, высотного укрытия и гражданской обороны Пекин может обеспечить эффективную диспетчеризацию укрытий, точное ресурсное снабжение и замкнутые цепочки реагирования в сопряженных многоопасных сценариях. Это будет способствовать переходу эксплуатации укрытий от пассивного чрезвычайного реагирования к проактивному управлению.

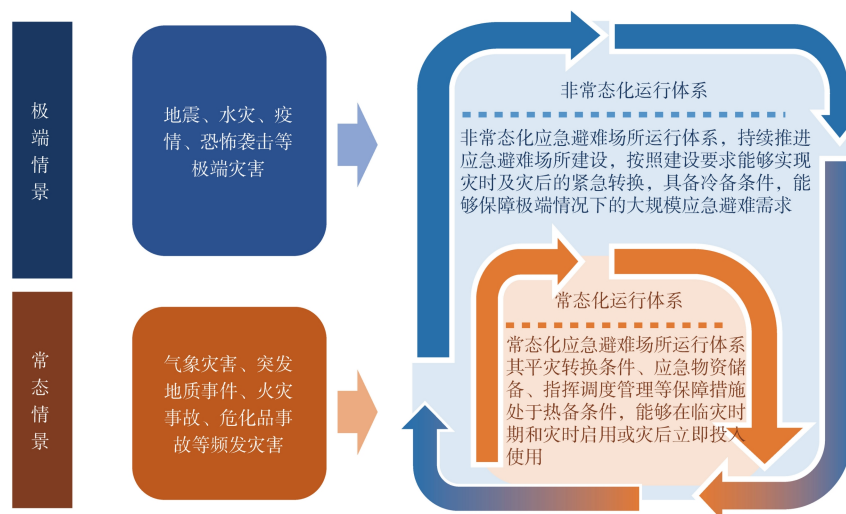


Рисунок 4. Механизм конверсии пространств экстренного укрытия из нормального режима в чрезвычайный

Рисунок различает системы эксплуатации экстренных укрытий в чрезвычайном режиме, которые должны находиться в холодном резерве и поддерживать крупномасштабное укрытие в экстремальных условиях, и системы эксплуатации в нормальном режиме, для которых условия конверсии, материальные резервы и командно-диспетчерские меры должны сохраняться в горячем резерве для немедленного использования до, во время и после бедствий.

4. Выводы и перспективы

4.1 Основные выводы

Используя Пекин как типичный пример, исследование рассматривает устойчивость реагирования городских систем экстренного укрытия при сопряжении множества опасностей. Оно системно анализирует логические потребности и реальные ограничения систем укрытия с точки зрения адаптации к опасностям, перевода населения и соответствия ресурсов, а также предлагает адресные пути оптимизации в рамках многомерной идентификации и реконструкции механизмов. Основные выводы заключаются в следующем.

Во-первых, логика развития систем укрытия срочно требует обновления парадигмы, ориентированной на многоопасную адаптацию. По мере того как городские риски бедствий становятся более составными и экстремальными, системы укрытия, сосредоточенные на одиночных опасностях и статической конфигурации, не могут адаптироваться к среде высокоинтенсивных возмущений. Пекину как мегаполису необходимо расширить систему укрытия от последбедственного экстренного реагирования к полному процессу, охватывающему добедственную готовность, перевод населения во время бедствия и последбедственное восстановление, тем самым перейти от типовой классификации к координации способностей.

Во-вторых, функциональная структура системы укрытий имеет очевидные разрывы соответствия. Текущая конфигурация типов укрытий в Пекине недостаточно покрывает функции, специфичные для отдельных опасностей, и обладает слабым механизмом временной конверсии. Пространственно она демонстрирует неравномерность распределения между районами и заметные слепые зоны на городской окраине. Операционно система сталкивается с

фрагментированными ответственностями и незавершенными контурами реагирования. Эти три ключевых измерения совместно ограничивают общую устойчивость системы укрытий.

В-третьих, оптимизация системы должна следовать интегрированному пути «тип - пространство - механизм». Функционально типы укрытий следует перестраивать в соответствии с многоопасной адаптацией, чтобы покрывать циклы реагирования и точно соответствовать группам обслуживания. Пространственно необходимо создать зонально сопряженную систему на основе координации размещения, усиливая многоуровневую, многоузловую и межрайонную сетевую интеграцию. На уровне механизмов следует продвигать согласованное взаимодействие и устойчивую реконструкцию через совершенствование динамической эксплуатации с ясными ответственностями, обменом данными и замкнутым реагированием.

В-четвертых, «идентификация структуры - диагностика реагирования - перестройка системы» образует ключевую исследовательскую логику. Определяя базовую структуру городской системы укрытий, анализируя ее трудности реагирования при составных возмущениях бедствий и предлагая меры системной перестройки, пространственной оптимизации и реконструкции механизмов, исследование формирует завершенную цепочку от выявления проблемы к перепроектированию системы. В этом состоит его теоретическая значимость и практическая адаптируемость.

4.2 Перспективы исследования

В исследовании разработана аналитическая рамка для городских систем экстренного укрытия в сопряженных многоопасных сценариях и предложены адресные траектории. Однако из-за ограничений доступности данных и практической верификации ряд вопросов требует дальнейшего изучения.

Во-первых, необходимо расширить анализ глубинного сопряжения логики межопасностного реагирования. Передаточные отношения между опасностями, механизмы их наложения и влияние на мобилизацию ресурсов укрытия пока недостаточно детально смоделированы. В будущих исследованиях можно вводить модели эволюции цепочек бедствий и технологии городского динамического моделирования, расширяя анализ от составного возмущения к имитации стратегий.

Во-вторых, механизм динамической диспетчеризации пространственного распределения ресурсов укрытия остается незрелым. Статья в основном обсуждает оптимизацию размещения с точки зрения статических пространственных паттернов. Дальнейшая работа должна объединять данные о распределении населения в реальном времени, транспортной доступности и прогнозах бедствий, чтобы построить платформу соответствия ресурсов укрытия с возможностью оперативной диспетчеризации, обеспечивая эластичное реагирование и динамическую эволюцию пространств укрытия.

В-третьих, механизмы совместного управления с участием множества акторов требуют дальнейшей эмпирической проверки. В реальной эксплуатации системы укрытия включают сотрудничество правительств, уличных офисов, сообществ, предприятий, общественных учреждений и других участников. То, как встроить исполнимые механизмы совместного строительства, совместного управления и совместного обслуживания в институциональный дизайн, является ключевой задачей будущей реализации систем укрытия и важной частью строительства устойчивого города.

Примечания

[1] В исходном тексте принцип цепочки событий в этом месте отмечен символом примечания ①, однако отдельное пояснительное примечание в извлеченном тексте PDF не напечатано.

Список литературы

- [1] WEI Y X, JIN L Z, XU M W, et al. Инструкции по планированию мест экстренного укрытия и открытых пространств в Китае: уроки мирового опыта и экспертных практик[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 51: 101813.
- [2] HUNG C H, HUNG H C, HSU M C. Связь взаимодействия устойчивости, уязвимости и адаптации с долгосрочными изменениями пространств метрополий в управлении рисками климатически обусловленных бедствий[J]. *Climate Risk Management*, 2024, 44: 100618.
- [3] LIU B, LI Y B, ZHANG Y, et al. Метод многокритериального принятия решений для выбора площадок экстренного укрытия с учетом риска наводнений: пример Чжухая, Китай[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2025, 24: 100892.
- [4] AHMED I, GUYTON S T. Траектория восстановления жилья у выживших после тайфуна «Йоланда»: критический синтетический обзор[J]. *Progress in Disaster Science*, 2024, 24: 100378.
- [5] RAN Jing, LIU Xiangyi, HE Lei, et al. Зонирование предотвращения бедствий в центральных городских районах на основе общинного жизненного круга: пример уезда Хуаюань, провинция Хунань[J]. *Planners*, 2024, 40(9): 98-106.
- [6] WANG Yixin, ZHANG Shuo, LIU Delin. Пространственное зонирование городских укрытий двойного повседневного-чрезвычайного назначения: пример основной городской зоны Лояна[J]. *City and Disaster Reduction*, 2025(3): 42-50.
- [7] ZHU Anfeng, FAN Xiufang, DU Wenrui, et al. Комплексная оценка способности мест экстренного укрытия к предотвращению и снижению бедствий с позиции устойчивости: пример района Оухай, Вэньчжоу[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(5): 223-230.
- [8] DAI Shenzhi, LIU Tingting, GAO Xiaoyu, et al. Система разработки и механизм реализации территориального пространственного планирования предотвращения и снижения бедствий[J]. *Urban Planning Forum*, 2023(1): 48-53.
- [9] WANG Wei, XIA Chenhong, MA Donghui, et al. Метод комплексной оценки многоопасных рисков при механизме сопряженного стимулирования[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(3): 161-167.
- [10] WANG Wei, QU Zinuo, GUO Xiaodong, et al. Рамка и метод построения сетей корреляции и цепной связи городских многоопасных рисков[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(11): 5-12.
- [11] WANG Wei, ZHUANG Yuanyuan, ZHANG Luemiao, et al. Оптимизированное размещение городских мест экстренного укрытия в сценариях составных бедствий[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2025, 51(4): 375-385.
- [12] YANG Bing, HE Yong, ZHAO Dan. Комплексная оценка городских многоопасных рисков: пример Пекина[C]//Совместное использование и качество: материалы Ежегодной национальной конференции по планированию 2018 года (01 Городская безопасность и планирование предотвращения бедствий). Urban Planning Society of China; Hangzhou Municipal People's Government, 2018.

- [13] WEI Miling, WANG Wei, RONG Qingwen, et al. Модель оценки риска эвакуации в укрытия при составных бедствиях с учетом неопределенности[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 203-212.
- [14] YANG Xuanmei. Территориальная пространственная устойчивость: концептуальная рамка и пути реализации[J]. Urban Planning Forum, 2021(3): 112-118.
- [15] PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, et al. Сопряжение множества рисков в городском пространстве и ответы устойчивого планирования[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.
- Перевод при содействии ИИ