

Сопряжение множественных рисков в городском пространстве и устойчивые ответы средствами планирования

PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, ZHANG Mengjie

Аннотация. По мере дальнейшей концентрации населения и городской деятельности в условиях высокой плотности города сталкиваются с усиливающимся сопряжением множественных рисков. Городской риск вступил в «стадию 3.0», когда нормализованные долгосрочные давления сосуществуют и взаимодействуют с внезапными возмущениями, а сопряжение рисков становится одним из центральных направлений исследований городской устойчивости. Исходя из вызовов будущего городского развития, в статье рассматриваются характеристики и сценарии сопряжения рисков, его пространственные эффекты, механизмы и соответствующие практики планирования. Далее выделяются ключевые теоретические измерения устойчивости при сопряженных рисках: взаимодействие экологической, социальной, инженерной и экономической устойчивости; длинные и короткие циклы; пороговые значения устойчивости; и межуровневая передача. На этой основе предложена рамка устойчивого территориально-пространственного планирования и сформулированы приоритеты устойчивости для генеральных, детальных и специальных планов. В заключение определены перспективные технические направления подготовки планов, включая сбор и обработку пространственной информации из множества источников, оценку наложения и сопряжения рисков, сценарное моделирование и имитацию, а также планирование с применением искусственного интеллекта и мониторинг реализации. Исследование предлагает теоретические ориентиры и методические рекомендации для планирования и строительства устойчивых городов новой эпохи.

Ключевые слова: множественные риски городского пространства; сопряжение рисков; городская устойчивость; пространственное планирование

Классификация Китайской библиотечной системы: TU984 Код документа: A DOI: 10.16361/j.urpf.202405012 Номер статьи: 1000-3363 (2024) 05-0088-10

* Исследование выполнено при поддержке Общей программы Национального фонда естественных наук Китая «Пространственные эффекты, механизмы устойчивости и планировочное регулирование сопряжения множественных рисков в районах высокой городской плотности: на примере Уханя» (проект № 52378057), а также Междисциплинарной программы поддержки исследований Хуачжунского университета науки и технологий «Механизмы взаимной обратной связи между человеком и территорией, пространственная оптимизация и политическое регулирование городско-сельских систем в сценариях экстремального наводнения: на примере Уханьской агломерации» (проект № 2023JCYJ020).

Неопределенность городских рисков в Китае усиливается, а высококачественное пространственное развитие все чаще сталкивается с вызовами безопасности и устойчивости. Формирование устойчивого территориального пространства, способного противостоять множественным рискам, стало важной задачей пространственного планирования в контексте китайской модернизации.

Эволюцию пространственных рисков можно условно разделить на три этапа (рис. 1). На стадии 1.0 основным вызовом городской устойчивости были устойчивые риски, то есть необходимость реагировать на долгосрочные внутренние давления, например изменение растительности и деградацию экологической среды. Это относительно предсказуемые события типа «серого носорога». На стадии 2.0 акцент сместился на экстремальные события и внезапные риски — «черных лебедей», включая природные бедствия, такие как экстремальные осадки и геологические

процессы, а также техногенные происшествия, в том числе городские пожары и аварии с опасными веществами. В настоящее время Китай вступил в стадию 3.0, характеризующуюся нормализацией рисков. В постпандемическую эпоху усиление городской плотности приводит к сосуществованию долгосрочных давлений и внезапных возмущений. Их временная частота становится регулярной, а пространственные типы все чаще сопрягаются. Множественные неопределенные риски порождают сложные цепные реакции: взаимодействие факторов риска может превратить единичную угрозу в системный и циклический ущерб и вызвать значительно более тяжелые потери.

В связи с этим пространственное планирование должно уделять постоянное внимание нескольким научным вопросам. Во-первых, чем отличаются характеристики и закономерности сопряжения множественных рисков в городском пространстве? Во-вторых, какие пространственные эффекты и механизмы оно формирует? В-третьих, каковы основные теоретические элементы устойчивого реагирования? В-четвертых, каким образом действующая система пространственного планирования может определить приоритетное содержание и технические направления устойчивости? Следуя логике «исследовательские основы сопряжения рисков — теория городской устойчивости при сопряженных рисках — устойчивое пространственное планирование и технические направления», статья обобщает понятия, сценарии, пространственные эффекты, механизмы и практики планирования и предлагает предварительные теоретические и планировочные ответы для будущих исследований и практики.



Рисунок 1. Три этапа развития городских рисков и соответствующие вызовы устойчивости

1 Теоретические основы и опыт планирования, связанные с сопряжением множественных рисков в городском пространстве

1.1 Понятийные характеристики и сценарии сопряжения множественных рисков

Наиболее близким к понятию риска является понятие опасного явления, однако в научной литературе отсутствует полное согласие относительно различий между ними. Городское опасное явление — это возмущение, вызванное опасным фактором и приводящее к физическому ущербу в определенных пространственно-временных границах. Городской риск, напротив, отражает вероятность того, что сложные сопряженные связи между природной средой, функциональной структурой, обществом и другими городскими системами приведут к ущербу [1]. Таким образом, опасное явление связано с событием, ходом его развития и фактическими потерями, тогда как риск характеризует неопределенность потерь и в определенной степени поддается количественной оценке [2-3].

Исследователи давно отмечают одновременное присутствие нескольких рисков в определенных местах и периодах [4]. Множественный риск в городском пространстве представляет собой ситуацию, при которой несколько источников опасности и несколько уязвимых элементов совпадают во времени или пространстве [5-6]. Ему свойственны разнообразие сфер и временное

сосуществование (табл. 1). С точки зрения сфер множественный риск включает природные, технологические, экономические, социальные и политические угрозы; с точки зрения времени — долгосрочные давления и внезапные возмущения [7].

Взаимодействие множественных рисков привлекло значительное внимание в последнее десятилетие, и существенный прогресс достигнут в изучении эволюции и характеристик типичных цепочек бедствий [15-17]. К распространенным для китайских городов цепным реакциям относятся «тайфун — сильные осадки — подтопление/наводнение», «землетрясение — оползень/селевой поток», «высокая температура — засуха — деградация земель/вредители и болезни» и «холодная волна — снеговая катастрофа/биологическое обмерзание». С пространственной точки зрения городская среда во многом определяет пути передачи рисков и формы их сопряжения, тем самым увеличивая потенциальные последствия бедствий [18-19]. Города различаются по уровню опасности и чувствительности пространственной среды, поэтому динамика развития риска также неодинакова. Цепочки бедствий, совпадение опасных явлений, каскадные, индуцированные и домино-эффекты являются проявлениями сопряжения множественных рисков [18,20-23]. Они отражают взаимное влияние и зависимость факторов внутри сложной системы риска и способны усиливать развитие угроз и потенциальные потери.

По способу возникновения сопряжение рисков может быть накопительным или внезапным. По типу оно подразделяется на взаимодействие природных рисков, техногенных рисков и природно-техногенное сопряжение. Последнее изучено сравнительно слабо, хотя природно-технологические риски (Natech) и природно-социальные риски обладают высокой взаимозависимостью и могут вызывать тяжелые вторичные последствия [18]. Отдельные факторы риска могут не быть экстремальными, однако их взаимодействие способно породить экстремальное событие. Ситуации, когда несколько событий происходят одновременно или последовательно, называют составными экстремальными событиями. Вследствие внутреннего сопряжения их пространственные последствия часто превосходят простую сумму отдельных экстремальных событий и создают более серьезные угрозы для подсистем городской жизнедеятельности [24-26].

Таблица 1. Понятия и содержание, связанные с множественными рисками

Понятие	Определение	Источники
Опасное явление	Физическое явление, причиняющее ущерб городской экономике, инфраструктуре, жизни населения, социальным услугам или экологической среде.	UNISDR, 2009; IPCC, 2012; Gallina et al., 2016.
Риск	Количественное выражение потенциальных последствий опасного события для городского пространства, представленное в вероятностных или полуколичественных терминах.	IPCC, 2012; Gallina et al., 2016.
Множественные опасности	Опасные события, угрожающие одним и тем же подверженным элементам и взаимодействующие различными способами; опасности, связанные с одним пространством, возникающие одновременно или последовательно в коротком интервале.	Saarinen et al., 1973; Carpignano et al., 2009; Marzocchi et al., 2012; Komendantova et al., 2014; Terzi et al., 2019.
Риск множественных опасностей	Риск, создаваемый несколькими опасными факторами, обычно без учета корреляции между уровнями уязвимости.	Kappes et al., 2012; Ward et al., 2022.
Множественный риск	Риск, создаваемый независимыми или взаимозависимыми опасными факторами и	Carpignano et al., 2009; Kappes et al., 2012;

Понятие	Определение	Источники
	несколькими уязвимыми элементами, совпадающими во времени и пространстве. Один риск изменяет вероятность, частоту или масштаб другого; обычно учитывается корреляция уровней уязвимости.	Marzocchi et al., 2012; de Ruiter et al., 2020; Ward et al., 2022.

Источник: составлено по материалам источников [5-6, 8-14].

1.2 Практика планирования в ответ на множественные риски

Проблема сопряжения множественных рисков получила внимание в зарубежном городском пространственном планировании. Стратегии реализации охватывают информационные платформы, устойчивые сообщества, городскую инфраструктуру и другие направления. Некоторые планы, включая документы Лос-Анджелеса и Лондона, различают долгосрочные давления и внезапные шоки и организуют профилактику соответственно. Однако в целом теория и методы оценки и управления множественными рисками остаются недостаточно развитыми, а действующие пространственные планы редко глубоко рассматривают эффекты сопряжения (табл. 2).

С 2015 г. пилотные программы городов-губок и климатически адаптивных городов стимулировали постепенное развитие пространственного планирования, ориентированного на устойчивость, в Китае. Большинство городов сегодня рассматривают устойчивость и безопасность как важную тему генерального планирования. Например, «Специализированный пространственный план Пекина по формированию устойчивого города (2022-2035)» включает меры в отношении нескольких рисков. Тем не менее практика планирования сопряженных рисков по-прежнему находится на стадии поиска (табл. 3).

Таблица 2. Репрезентативные мировые практики пространственного планирования в ответ на множественные риски

Город	Политика устойчивости	Год	Типичные риски	Цели и приоритетные направления	Ответ на множественные риски
Роттердам	Стратегия устойчивости Роттердама	2017	Повышение уровня моря, наводнения, экстремальные осадки	Создание систем защиты от наводнений и водоотведения; повышение безопасности обмена городскими данными; стимулирование социальных инноваций и участия.	Основной акцент на природных водных рисках, прежде всего наводнениях, и климатической адаптации.
Лос-Анджелес	Resilient Los Angeles	2018	Землетрясения, пожары, селевые потоки, волны жары	Лидерство и участие населения; подготовка к бедствиям и восстановление; экономическая безопасность; климатическая адаптация; модернизация инфраструктуры.	Создание ориентированной на жителей информационной платформы по множественным опасностям; изменение механизмов межведомственного сотрудничества; укрепление и защита

Город	Политика устойчивости	Год	Типичные риски	Цели и приоритетные направления	Ответ на множественные риски
					сообществ для реагирования на неожиданные катастрофы и долгосрочные скрытые давления.
Нью-Йорк	OneNYC 2050: формирование сильного и справедливого города	2019	Потепление климата, наводнения, штормовые нагоны, повышение уровня моря, городские волны жары	Долгосрочное реагирование на изменение климата; отказ от ископаемого топлива; обеспечение зданий, транспорта и экономики возобновляемой энергией.	Анализ сопряженных городских рисков, включая климатический кризис, экономические угрозы и социальное давление.
Лондон	Стратегия городской устойчивости Лондона 2020	2020	Продолжительные наводнения, засуха, экстремальная жара	Учет внезапных бедствий и развитие более широкой и долгосрочной способности города противостоять рискам.	Анализ рисков в кратко- и долгосрочной перспективе; выявление шоков и давлений. Основной шок — изменение климата, а ключевое давление — неравенство и недостаточная социальная интеграция.
Сингапур	Singapore Green Plan 2030	2021	Экстремальные осадки, засуха, эпидемии	Пять опор: город в природе, энергетическая перестройка, устойчивый образ жизни, зеленая экономика и устойчивое будущее.	Повышение устойчивости к изменениям среды и ливневым/паводковым рискам посредством развития зеленых пространств и программ типа Cooling Singapore.
Чикаго	Chicago Climate Action Plan	2022	Жаркое лето, экстремальная зима, туман, наводнения, сильные осадки, торнадо	Снижение влияния будущей неопределенности и длительная, справедливая адаптация к изменению климата.	Совместное выявление рисков за пределами муниципальных границ и разработка планов для наводнений, экстремальной зимы, торнадо и других природных опасностей.
Токио	Основной план национальной устойчивости	2023	Землетрясения, цунами, тайфуны, наводнения, пожары,	Защита людей; поддержание основных жизненных функций; снижение потерь национального	Укрепление местной профилактики бедствий, активное применение цифровых и других новых технологий, повышение

Город	Политика устойчивости	Год	Типичные риски	Цели и приоритетные направления	Ответ на множественные риски
			эпидемии	имущества и общественной инфраструктуры; быстрое восстановление и реконструкция.	способности реагировать на природные бедствия и качества реализации национальной политики устойчивости.

Источник: составлено на основе общедоступных материалов сети Интернет.

Таблица 3. Примеры китайской практики пространственного планирования в ответ на множественные риски

Город	Планировочный документ	Год	Типичные риски	Цели и приоритетные направления	Ответ на множественные риски
Пекин	Генеральный план Пекина (2016-2030)	2016	Наводнения, лесные пожары, геологические опасности	Предлагает пути формирования устойчивого города с позиций городской системы и управления устойчивостью.	Создание единой системы оценки, мониторинга и раннего предупреждения рисков бедствий.
Пекин	Руководящие мнения об ускорении строительства устойчивого города	2021	Наводнения, лесные пожары, геологические опасности	Координация пространственной устойчивости, укрепление инженерной устойчивости, совершенствование устойчивости городского управления и развитие социальной устойчивости.	Усиление анализа одновременных опасностей и цепных реакций бедствий, совершенствование городских карт риска.
Пекин	Специализированный пространственный план Пекина по формированию устойчивого города (2022-2035)	2024	Наводнения, лесные пожары, геологические опасности	Создание безопасной, надежной, трансформируемой, быстро восстанавливаемой, органично организованной и адаптированной к будущему системы пространственного управления столицей.	Реагирование на сложные экстремальные риски, развитие объектов двойного назначения для обычного и чрезвычайного использования и моделирование бедствий для предварительного определения пространственных мер.
Шанхай	Генеральный план Шанхая (2017-2035)	2018	Тайфуны, жара, наводнения	Формирование более устойчивого экологического города.	Совершенствование мониторинга и раннего предупреждения по множественным городским опасностям.

Город	Планировочный документ	Год	Типичные риски	Цели и приоритетные направления	Ответ на множественные риски
Шэньчжэнь	Пространственный план экстренной эвакуации и спасения Шэньчжэня (2021-2035)	2023	Экстремальные осадки, тайфуны, землетрясения, геологические опасности	Системный анализ рисков природных бедствий, аварий, чрезвычайных ситуаций в здравоохранении и общественной безопасности.	Сочетание обычных и чрезвычайных функций, учет нескольких опасностей и комплексное реагирование.
Гонконг	Hong Kong 2030+: планировочное видение и стратегия за горизонтом 2030 г.	2021	Тайфуны, экстремальная жара, наводнения	Усиление сине-зеленой системы ресурсов для создания природного мегаполиса, адаптированного к изменению климата и биоразнообразию.	Полный учет изменения климата, биоразнообразия и других экологических факторов и включение климатически адаптивного и устойчивого проектирования в новые проекты и городское обновление.

Источник: составлено на основе общедоступных материалов сети Интернет.

2 Теоретические элементы городской устойчивости при сопряжении множественных рисков

Изначально устойчивость понималась как «возвращение к исходному состоянию». В базовом смысле это способность реагировать на кризис, восстанавливаться и поддерживать устойчивое развитие [27-28]. Городская устойчивость распространяет данное понятие на город и обозначает способность городской системы поглощать внешние воздействия, сохраняя ключевые характеристики, структуру и функции [29]. По мере развития концепции ее цель менялась от «восстановления устойчивого состояния» к «формированию устойчивого состояния», а затем к «непрерывной адаптации» [30]. На стадии риска 3.0 центральной задачей становится постоянная адаптация к нормализованным рискам. На основе предыдущего анализа далее формулируются основные теоретические элементы городской устойчивости при сопряженных рисках (рис. 2).

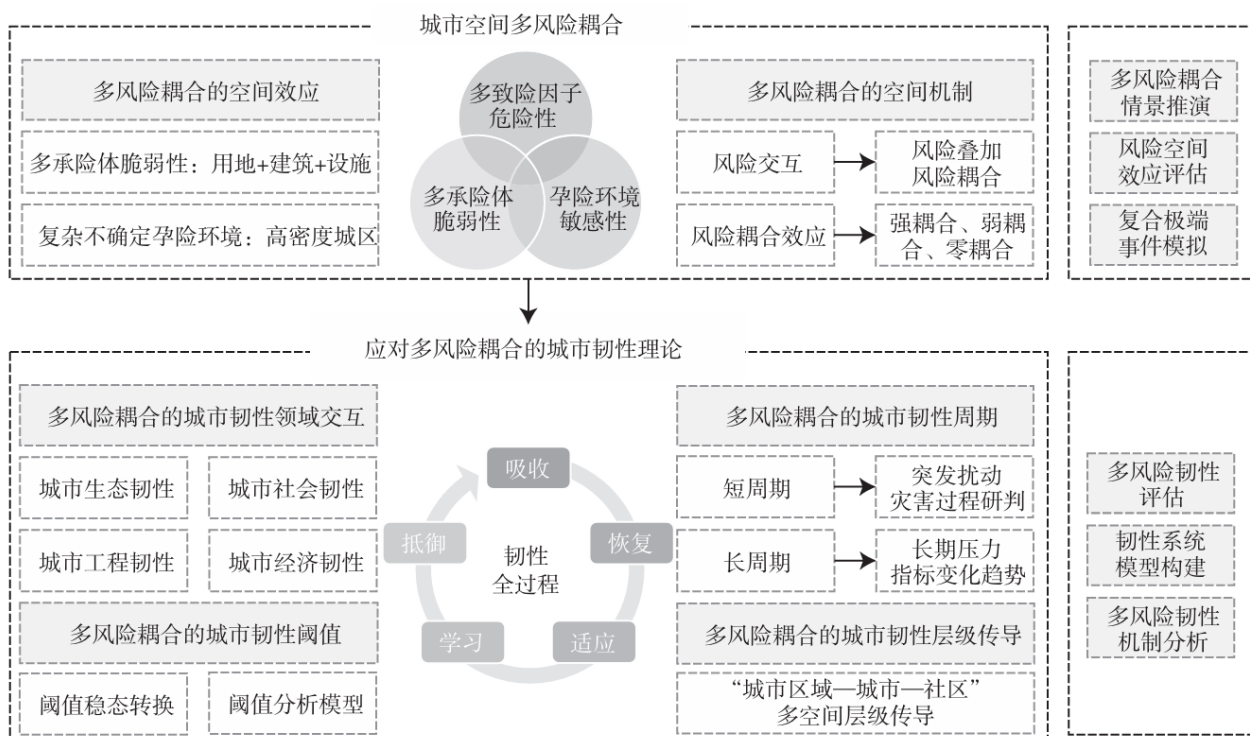


Рисунок 2. Теоретические элементы городской устойчивости в ответ на сопряжение множественных рисков

2.1 Пространственные эффекты и механизмы устойчивости при сопряжении множественных рисков

Городскую систему, воспринимающую риск, можно представить как три пространственные подсистемы: землепользование, здания и сооружения, а также инфраструктуру. Все они подвергаются воздействию множественных рисков. Пространственные эффекты сопряжения — это ущерб, возникающий из взаимодействия интенсивности опасных факторов и уязвимости подверженных элементов внутри среды формирования риска, например разрушение зданий, прекращение транспортного сообщения и повреждение инфраструктуры. Центральные деловые районы, городские центры и старые кварталы [31-33] являются основными объектами исследования, поскольку плотная городская застройка представляет типичную зону сопряжения. Высокая плотность способна усиливать взаимодействие рисков и их пространственные последствия.

Разнообразие факторов риска взаимодействует со сложностью и неопределенностью городских пространственных систем, порождая различные составные механизмы, прежде всего наложение и сопряжение. Наложение означает совокупное воздействие нескольких рисков, когда между опасными явлениями нет явной связи либо взаимосвязями между процессами можно пренебречь. Исследования в планировании преимущественно сосредоточены на анализе наложения рисков в конкретных пространственно-временных условиях. С точки зрения системы риска сопряжение включает взаимодействие как элементов формирования риска, так и процессов его эволюции [21]. Факторы разных систем могут увеличивать, снижать или взаимно компенсировать потенциальный ущерб [34-36], образуя сильное, слабое или нулевое сопряжение. Эти отношения могут быть представлены матрицей риска (рис. 3). Внутренний механизм сопряжения заключается в пространственно-временной взаимозависимости опасных факторов, среды формирования риска и подверженных элементов, которые совместно определяют его развитие и могут привести к более тяжелым потерям [18,37].

Устойчивость проявляется на всем протяжении процесса «до бедствия — во время бедствия — после бедствия» через сопротивление, поглощение, восстановление, адаптацию и обучение [38].

Она тесно связана с жизненным циклом и управлением полным процессом в чрезвычайных ситуациях. До бедствия город должен снижать вероятность события или возможные потери; во время бедствия — поддерживать стабильность функционирования, поглощать и смягчать шоки; после бедствия — быстро восстанавливаться и использовать адаптацию и обучение для повышения готовности к будущим угрозам.

При сопряжении множественных рисков городскую устойчивость можно анализировать по трем измерениям: интенсивность опасных факторов, чувствительность среды формирования риска и уязвимость подверженных элементов (рис. 4). Сложность и неопределенность городских пространственных систем повышают вероятность событий в определенных условиях. Сопряжение интенсивностей может усиливать угрозы городскому пространству, а элементы с различными профилями уязвимости испытывают неодинаковые эффекты. Следовательно, устойчивость в конкретной среде формирования риска связана как с множественностью опасных факторов, так и с уязвимостью нескольких подверженных систем.

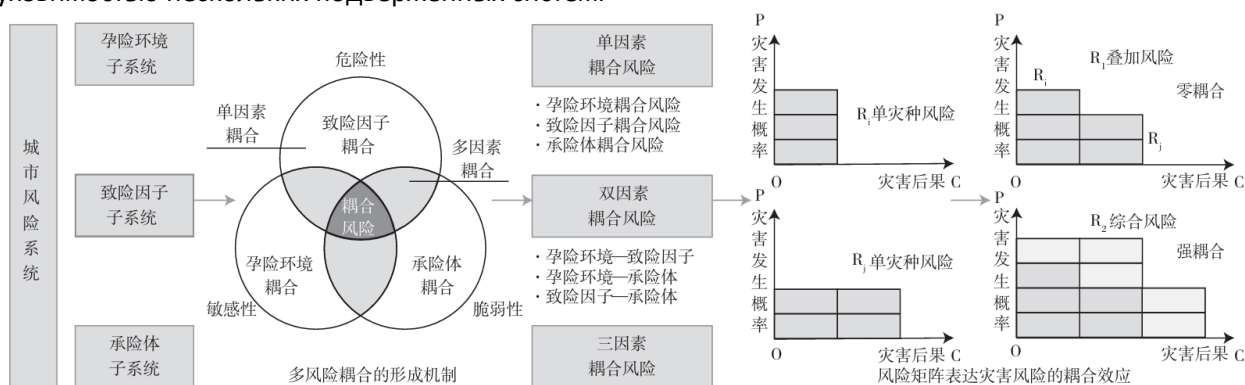


Рисунок 3. Внутренние эффекты сопряженных городских рисков

Источник: переработано по материалам источников [34-36].

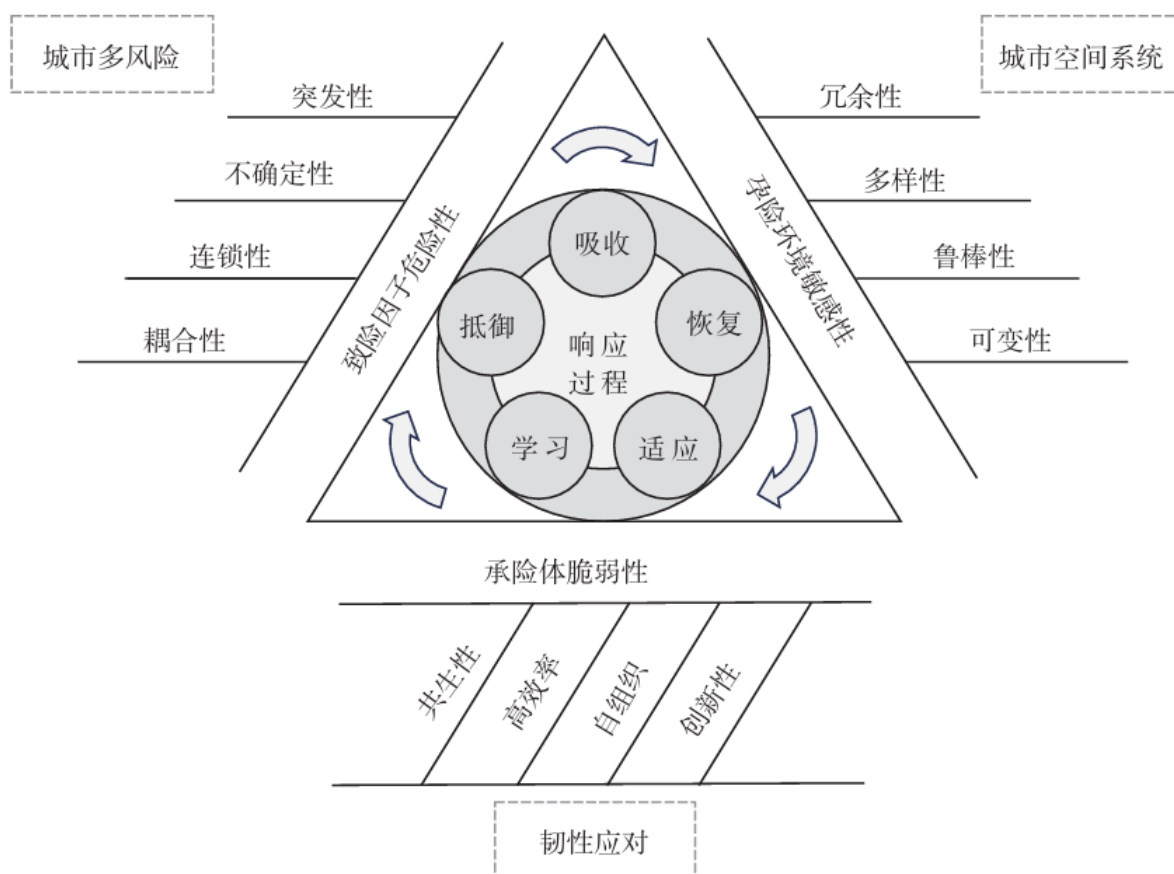


Рисунок 4. Характеристики городской устойчивости в условиях сопряжения множественных рисков

2.2 Сферы и взаимодействия устойчивости при сопряжении множественных рисков

Исследования городской устойчивости в планировании начались с одномерной экологической устойчивости и постепенно расширились до четырех основных сфер: экологической, социальной, инженерной и экономической [39]. В экологической сфере нормализованные риски, связанные с урбанизацией и изменением климата, создают давление на городские экосистемы и ослабляют их способность обеспечивать ключевые экосистемные услуги. Сопряжение множественных рисков может приводить к экологической деградации, нарушать поддержку человеческой деятельности и обратные связи, а также снижать регулирующие функции, связанные с наводнениями, микроклиматом, выбросами и поглощением углерода. Поэтому восстановление экологических функций и сохранение городской структуры при регулярных рисках являются центральными аспектами экологической устойчивости [40-41].

В социальной сфере человеческие системы должны повышать способность противостоять сопряженным рискам, а сообщества и жители — адаптироваться к нормализованным угрозам. Социальная устойчивость подчеркивает самоорганизацию и обучение, укрепление социальных сетей, участие сообществ, культурную идентичность, социальную справедливость и благополучие [42-43]. В инженерной сфере оценка устойчивости инфраструктуры должна прямо учитывать сопряжение множественных рисков. Системное резервирование жизненно важных объектов повышает способность справляться с составными экстремальными событиями; особенно важно усиление адаптивности зеленой инфраструктуры для снижения пространственных последствий [44-46]. В экономической сфере внезапные возмущения требуют диверсифицированной отраслевой структуры, связанности сетей факторов и надежности производственных, логистических и инновационных цепочек. При долгосрочном давлении устойчивость зависит от способности

реагировать на финансовые и иные кризисы и от гибких структур, поддерживающих экономическое восстановление [7,47].

Различные риски и их взаимодействия влияют не только на устойчивость внутри каждой сферы, но и на отношения между сферами. Их временно-пространственное взаимодействие может вызывать локальный ущерб в конкретной сфере и межсферное ухудшение, усиленное сопряжением. Внутренние элементы четырех сфер в разной степени влияют друг на друга и совместно формируют эволюцию городской устойчивости. Например, транспортная доступность является ключевым управляющим фактором инженерной устойчивости. Она напрямую воздействует на пространственную и отраслевую структуру, меняет направления и формы развития и затем влияет на разделение труда и сотрудничество между отраслями. Тем самым она важна для согласованного и устойчивого функционирования при множественных рисках и сохранения внутреннего импульса устойчивости. Напротив, чрезмерное пространственное расширение и высокая плотность могут усиливать социальную нестабильность и повышать требования к поддержанию порядка. Поскольку ведущие факторы различаются по сферам, планирование должно не только укреплять каждую сферу изнутри, но и выявлять ключевые межсферные связи и оптимизировать синергии, формируя взаимно поддерживающую городскую пространственную систему, эффективно реагирующую на сопряженные риски.

2.3 Циклы и пороги устойчивости при сопряжении множественных рисков

Городская устойчивость развивается циклически [48-50]. Модель адаптивного цикла является классическим объяснением циклов устойчивости [51-52]: городские системы восстанавливаются и обновляются через последовательные фазы с различными характеристиками, формируя спиральную циклическую эволюцию. На стадии 3.0 города постоянно испытывают влияние как долгосрочных давлений, так и внезапных возмущений, а устойчивость изменяется одновременно. Поэтому анализ должен исходить из двойного цикла: длинного цикла, связанного с длительным давлением, и короткого цикла, отвечающего на внезапный шок.

Короткоциклические изменения можно наблюдать, идентифицируя внезапные события сопряженного риска и анализируя процесс бедствия. Краткосрочная эволюция не является простой суммой изолированных событий; она должна учитывать эффекты сопряжения. Короткий цикл включает фазу сокращения устойчивости во время воздействия и фазу расширения при восстановлении. В фазе сокращения доминирует сопротивляемость, уменьшающая пространственные последствия множественных опасностей. В фазе расширения ведущую роль играют восстановление и адаптация, поддерживающие возврат к функционированию и возможное трансформационное развитие. Однако краткосрочная перспектива может скрывать долгосрочные изменения через множество событий. Длинный цикл представляет статистически обобщенный результат многих эпизодов сопряженных рисков. Он измеряется долгосрочными изменениями набора показателей, обычно в годовом масштабе, чтобы выявлять тенденции уровня устойчивости и темпов ее роста, обобщать закономерности и поддерживать моделирование и прогнозирование. Короткие циклы оценивают сопротивление, восстановление и адаптацию до и после конкретных шоков, а длинные используют системы индикаторов для измерения устойчивости отдельной сферы или города в целом. Их сочетание дает более полное представление о пространственно-временной эволюции.

Порог устойчивости — ключевое понятие для сопряжения множественных рисков в городском пространстве. Города являются сложными системами, чья структура, функции и состояние формируются множеством факторов. Если отдельные показатели выходят за определенный диапазон, система может потерять равновесие, разрушиться или деградировать и перестать сохранять прежнее состояние [53]. С точки зрения системной динамики городские функции не

обязательно возвращаются к исходному уровню; они могут стабилизироваться ниже или выше него. Подобно смене режимов [54-55], сопряженное воздействие вызывает колебания системы устойчивости; когда его интенсивность превышает порог, город покидает текущее устойчивое состояние и переходит в новое. Изменение порога под влиянием множественных рисков представляет собой процесс смены режима.

Сопряжение также может смещать пороги устойчивости относительно исходного состояния и вызывать колебания. В рамках двойного цикла как внезапные возмущения, так и долгосрочные давления способны преодолеть порог. В коротком цикле неопределенность высока, а быстрые переменные могут вызвать мощный шок и практически мгновенно изменить систему. В длинном цикле воздействие развивается медленнее, однако постоянное давление медленных переменных после преодоления порога непосредственно изменяет состояние. Порог можно определить как минимальный уровень устойчивости, при котором городские функции продолжают нормально работать в длинных и коротких циклах, либо как максимальное сопряженное событие, которое система способна поглотить. Конкретная городская среда влияет на пространственные последствия, изменяя этот порог. На рисунке 5 показаны три возможных исхода взаимодействия двух событий: повышение устойчивости благодаря обучению, снижение в результате ущерба или переход в неустойчивое состояние.

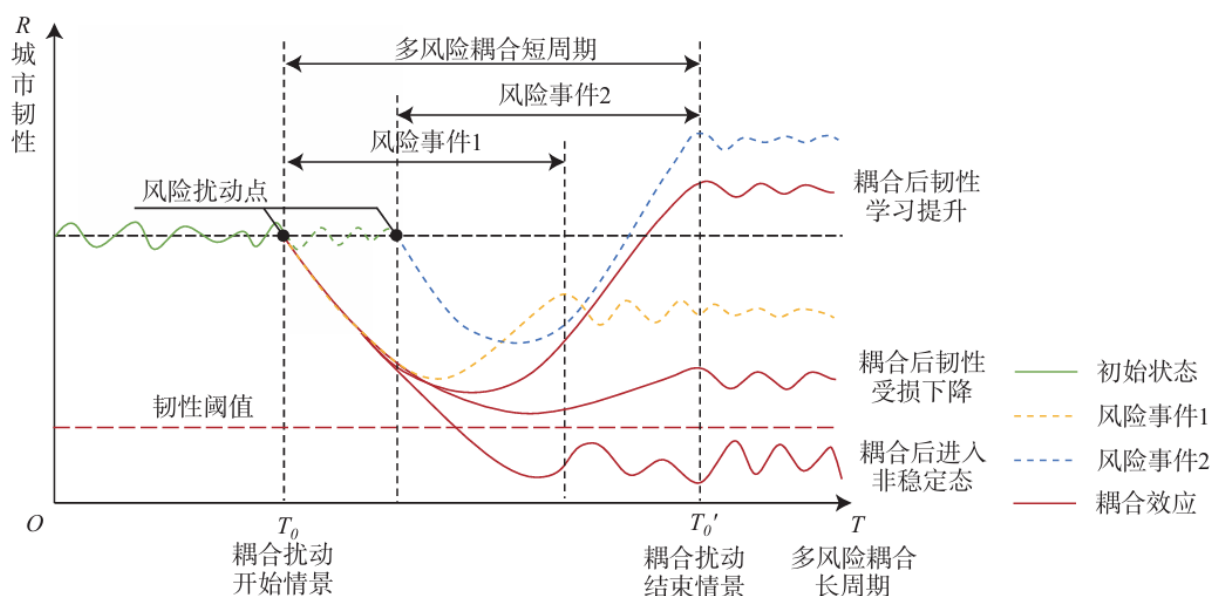


Рисунок 5. Теоретическая модель циклов устойчивости в ответ на множественные риски

2.4 Уровни устойчивости и межмасштабная передача при сопряжении множественных рисков

Городская устойчивость охватывает несколько пространственных уровней: городской регион (агломерация или метрополитенский район), город и сообщество. Каждый уровень имеет собственные риски, характеристики устойчивости и стратегии реагирования, а взаимодействия между ними сложны. Например, внешние транспортные и логистические сети регионального уровня обеспечивают эффективное реагирование городов на множественные риски. На городском уровне убежища и медицинские сети поддерживают сообщества. Устойчивые сообщества могут использовать свои организации и ресурсы для помощи соседним районам, повышая устойчивость всего города. Взаимное влияние и поддержка внутри уровней и между ними образуют основу системной городской устойчивости.

Передача устойчивости означает ее распространение и перенос внутри одного уровня или между разными уровнями. В пространственном отношении она является межмасштабной, разнонаправленной, системной и взаимосвязанной. С точки зрения сложных систем

взаимозависимости между уровнями меняются вместе с долгосрочной и краткосрочной динамикой города под воздействием сопряженных событий. Передача обеспечивает поддержку и буферизацию: если один уровень подвергается удару, другие могут предоставить необходимые ресурсы и ускорить восстановление. Поскольку устойчивость при сопряжении множественных рисков охватывает масштабы от макро- до микроуровня, анализ должен учитывать особенности каждого уровня, их отношения и совместный вклад в устойчивость системы. Пространственное планирование может повысить общую устойчивость путем систематического выявления и укрепления возможностей каждого уровня и развития сотрудничества и взаимной поддержки.

3 Подготовка устойчивых пространственных планов для реагирования на сопряжение множественных рисков

Теория городской устойчивости при сопряженных рисках дает ориентиры для подготовки устойчивых пространственных планов. Поэтому важно исследовать, как принцип безопасности и устойчивости при множественных рисках может быть встроен в китайскую систему территориально-пространственного планирования «пяти уровней и трех типов планов». Предварительная рамка представлена на рисунке 6.

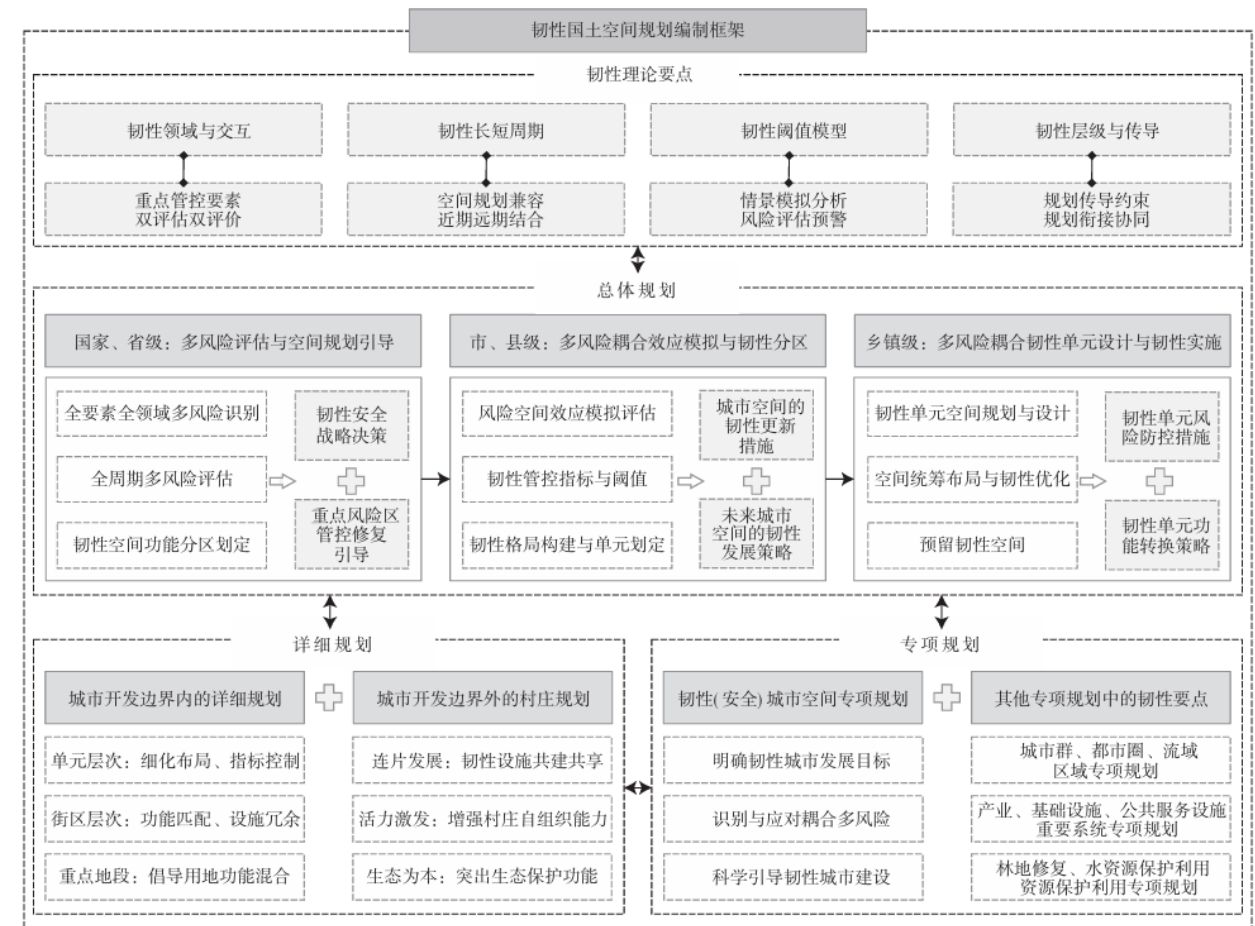


Рисунок 6. Рамка устойчивого территориально-пространственного планирования

3.1 Приоритеты устойчивости в генеральном планировании

Формирование устойчивого территориального пространства в ответ на нормализованные риски стало важным принципом городского планирования. Национальные и провинциальные генеральные планы задают стратегическое направление устойчивого пространственного развития. В согласовании с национальными стратегиями устойчивости и безопасности провинциальные планы должны выявлять пространственные риски и проводить двойную оценку ресурсно-экологической

емкости и пригодности к развитию. Они должны формировать устойчивую региональную структуру, определять функциональные зоны территориальной безопасности и предоставлять общие ориентиры для управления рисками и экологического восстановления, прежде всего в ключевых рисковых зонах.

Генеральные планы муниципального, уездного и поселенческого уровней должны переводить стратегии вышестоящих документов в реализацию. На муниципальном и уездном уровнях тема устойчивого города может рассматриваться отдельно при необходимости. Планы должны выявлять сопряжение множественных рисков и оценивать устойчивость по всем элементам, сферам и циклам; формировать базовую карту городской безопасности; определять минимальные ограничения и регулирующие функции индикаторов; создавать полицентрические и сетевые структуры развития и охраны пространства; формировать открытые, непрерывные и связанные экологические системы; и выделять единицы устойчивости. Следует определять природные пространства, способные поглощать последствия бедствий, продвигать экологическое восстановление, улучшать регулирующие функции экосистем и смягчать рискованные воздействия [56]. Необходимо также повышать способность объектов противостоять нескольким рискам, улучшать адаптивность и эффективность инфраструктуры и разрабатывать стратегии устойчивого обновления существующего и развития будущего городского пространства. На поселенческом уровне планирование и проектирование следует строить вокруг единиц устойчивости, совершенствовать организацию пространственных систем, повышать эффективность использования ресурсов, координировать производственные, жилые и экологические пространства, резервировать гибкие территории и устанавливать меры профилактики в обычное время и стратегии функционального преобразования в чрезвычайных ситуациях. В совокупности это формирует многоуровневую сетевую систему устойчивости.

3.2 Приоритеты устойчивости в детальном планировании

В 2023 г. Министерство природных ресурсов опубликовало «Уведомление об усилении детального территориально-пространственного планирования», установив новые требования к реформе и практике. Детальные планы конкретизируют и реализуют генеральные планы, непосредственно определяя способы землепользования и размещение городской инфраструктуры. Поэтому они являются основным инструментом воплощения идеи устойчивого города в пространственной системе. Поскольку среда и характеристики устойчивости существенно различаются внутри и за пределами границ городского развития, приоритеты также должны различаться.

Внутри границ городского развития планирование на уровне единицы должно использовать оценку сопряженных рисков для выявления опасных зон и критических точек, уточнять размещение убежищ, объектов гражданской обороны и других устойчивых сооружений и определять контрольные показатели. На уровне квартала необходимо поддерживать соразмерность населения, интенсивности застройки и городской формы; обеспечивать инфраструктуру, объекты государственного управления и общественного обслуживания, зеленые пространства и площади; разумно повышать резервирование устойчивых систем; и обеспечивать реализацию аварийной инфраструктуры. В ключевых зонах следует усиливать разнообразие и трансформируемость пространства и поощрять смешанное использование земель в районах обновления, общественных центрах, горных и прибрежных ландшафтах.

За пределами границ городского развития сельские территории являются сравнительно слабым звеном устойчивого пространства. Планирование нескольких деревень может содействовать совместному строительству и использованию объектов устойчивости и укреплять горизонтальную передачу между территориями одного уровня. Деревни, предназначенные для укрупнения,

повышения качества или пригородной интеграции, должны активизировать развитие посредством модернизации отраслей и улучшения среды, укреплять самоорганизацию и резервировать гибкое пространство. Деревни с функциями характерной охраны или переселения и консолидации должны отдавать приоритет экологической защите и улучшению среды проживания. Национальные парки, охраняемые территории, важные водосборы, сельскохозяйственные земли и другие экологические или производственные пространства, требующие детальных планов, должны проверяться на пожарные, геологические и сейсмические риски с приоритетом сохранения целостности экосистемных услуг.

3.3 Приоритеты устойчивости в специализированном планировании

В Китае идеи устойчивости при сопряжении множественных рисков сегодня распределены по специализированным планам городов-губок, комплексной профилактики и снижения ущерба от бедствий [57], общественных объектов, транспорта, зеленых систем и других сфер. На новом этапе городская устойчивость предлагает теоретическую рамку и технические средства для решения вопросов безопасности. Принципы полного процесса, нескольких сфер и разных уровней могут быть интегрированы в городскую профилактику бедствий посредством специального пространственного плана устойчивого или безопасного города. На рисунке 7 предложена начальная рамка, основанная на опыте Пекина и других городов.

Специализированный пространственный план устойчивого города должен отвечать на общие вопросы стадии 3.0: каковы цели устойчивого развития города? Как управлять нормализованными рисками для повышения устойчивости? Каким образом направлять его пространственную структуру? План может включать пять задач: (1) интеграцию данных о рисках разных ведомств, системное выявление потенциальных городских рисков, оценку устойчивости и определение слабых звеньев; (2) формирование перспективных целей на основе долгосрочных потребностей развития и безопасности, позволяющих адаптироваться к неопределенным будущим взаимодействиям; (3) рациональное распределение ресурсов, совершенствование структуры, размещения и зонирования устойчивого города, координацию общественной инфраструктуры двойного назначения для обычного и чрезвычайного использования и создание органически интегрированной пространственной системы; (4) разработку детальных экологических, социальных, инженерных и экономических мер и стратегий для различных сценариев; и (5) установление ясного графика реализации и ответственных субъектов, регулярную оценку эффективности и обновление содержания.

Китайские города существенно различаются по географии и масштабу, поэтому планы должны учитывать конкретный контекст. Географически следует выявлять типичные формы сопряжения — например, сочетание тайфунов и сильных осадков в прибрежных городах Юго-Востока или землетрясений и геологических опасностей в сейсмических зонах — и разрабатывать специализированные меры, совмещающие обычные и чрезвычайные функции и обеспечивающие быстрое преобразование. Малые и средние города и уездные центры имеют относительно простую среду и профиль опасностей; их приоритет — снижение потенциальных последствий распространенных сочетаний и укрепление устойчивости сообществ. Крупные города более сложны и требуют определения ключевых пространственных единиц и моделирования нескольких сценариев с многоуровневым руководством: «вся территория — центральная городская зона — ключевая пространственная единица — сообщество». В мегаполисах и крупнейших городах население и факторы высоко концентрированы в центре. Поэтому необходимо укреплять совместное строительство и управление на региональном уровне, повышать передачу устойчивости через координацию агломераций и метрополитенских районов, стратегически готовиться к сложным сочетаниям экстремальных климатических событий и тяжелых чрезвычайных ситуаций,

организовывать преобразование функций и потоки ресурсов в экстремальных сценариях и использовать цифровые двойники и другие технологии для улучшения восприятия, реагирования и управления как долгосрочными давлениями, так и внезапными шоками.

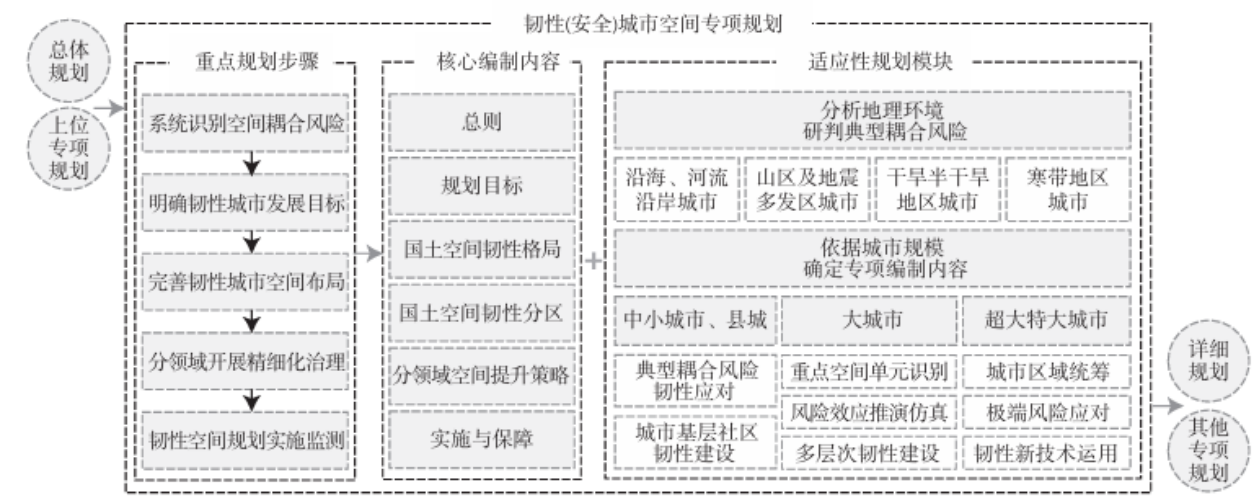


Рисунок 7. Предварительная рамка специализированного пространственного плана устойчивого (безопасного) города

4 Технические направления подготовки устойчивых пространственных планов

Анализ изложенных приоритетов показывает, что весь процесс планирования требует сбора городских пространственных данных из множества источников, выявления сложных рисков и моделирования их последствий с помощью информационных технологий и искусственного интеллекта. У Чжицян и соавторы [58] отмечают, что ИИ делает планирование интеллектуальным в разных аспектах, одновременно порождая новые вызовы во взаимодействии ИИ и города. Пэн Чжунжэнь и соавторы [59] выделяют четыре этапа развития ИИ в городском планировании: помощь, усиление, автоматизация и автономность. Ключевые технические направления включают сбор и обработку пространственной информации, оценку наложения и сопряжения рисков, сценарный анализ и имитацию, интеллектуальное планирование и мониторинг реализации.

4.1 Сбор и обработка пространственной информации

Дистанционное зондирование, Интернет вещей и Интернет широко применяются для сбора и обработки пространственных и рискованных данных. Расширение использования разнообразных потоковых данных и повышение их качества значительно увеличат возможности исследований устойчивости при множественных рисках и эффективность подготовки планов. Искусственный интеллект обладает существенными преимуществами при глубоком анализе городских больших данных, и участие новых технологий в городском анализе становится важной тенденцией. Алгоритмы машинного обучения могут связывать, объединять и интегрировать исторические и текущие данные и поддерживать автоматизированное построение городских моделей [58]. Цифровое усиление устойчивого планирования должно уделять приоритет расширению применения больших данных, повышению их качества, глубокому интеллектуальному анализу и интеграции нескольких источников. ИИ способен поддерживать автоматизированную обработку информации, генерацию текстов и графики и построение моделей сложных городских систем, повышая эффективность и качество планирования и обеспечивая управляемую данными интеллектуальную устойчивость.

4.2 Оценка наложения и сопряжения рисков

Оценка наложения и сопряжения рисков является важным направлением исследований опасностей и ключевым компонентом устойчивого пространственного планирования. Методы переходят от «оценки единичного опасного явления» и «многофакторной интеграции» к «сопряжению множественных рисков» в сложных городских системах. Были разработаны модели, основанные на теории систем бедствий, правилах запуска, рамке «давление — состояние — реакция», многоагентных моделях и других подходах [17,60-62]. По типу результата существующие методы можно разделить на две категории: оценку уровней множественного риска, которая классифицирует индексы и показывает пространственное распределение, и вероятностную оценку, которая углубленно анализирует связи и рассчитывает вероятность и ущерб на уровне событий.

По мере урбанизации пространственные системы становятся сложнее, и оценка, сосредоточенная на отдельных рисках и игнорирующая их связи, перестанет отвечать будущим потребностям и может недооценивать реальную угрозу. Необходимо углублять выявление и оценку пространственных эффектов в городской среде. Будущие исследования могут объединять дистанционное зондирование и более богатую пространственную информацию для создания высокоточных карт и выявления критических точек. Машинное и глубокое обучение способны поддерживать математические модели сопряжения и модели городских сетей, обеспечивая более детальную и даже динамическую оценку, распознавание рискованных конфигураций, изучение сложных связей и механизмов их формирования, а также оценку чувствительности и уязвимости территориального пространства.

4.3 Сценарный анализ и имитационное моделирование

Планирование при сопряжении множественных рисков должно проводить сценарный анализ типичных городских угроз. На основе разнообразных данных следует строить системы элементов риска, определять ключевые сценарии сопряжения, формировать модели эволюции посредством вероятностной оценки и выявлять функциональное состояние пространственных элементов. В соответствии с закономерностями развития сценариев модели естественного языка могут применяться для построения графов знаний, формирования сценариев, анализа процессов множественного риска и извлечения факторов и пространственных элементов. Байесовские сети, сети Петри, гидродинамические модели и другие методы могут поддерживать пространственно-временное моделирование процессов [63-66], выявление потенциальных зон ущерба и оценку эффектов для подверженных элементов.

Механизмы устойчивости можно исследовать с помощью моделей системной динамики и имитаций, которые фиксируют сложные взаимодействия рисков и объясняют отношения между влияющими факторами. В дальнейшем городское моделирование может использовать интеллектуальные методы для построения моделей множественного риска и выявления пороговых эффектов пространственной эволюции [58]. Виртуальная реальность, цифровые двойники и связанные технологии позволят глубже исследовать связи между рисками и пространственными закономерностями, моделировать несколько сценариев сопряжения и отбирать реально эффективные меры и политики устойчивости.

4.4 Интеллектуальное планирование и мониторинг реализации

Интеллектуальные технологии уже обеспечивают практическую поддержку генерации, реализации и мониторинга планов. Генетические алгоритмы могут имитировать естественный отбор и мутации и находить оптимальные решения для устойчивых пространственных структур. Интеллектуальное распознавание изображений позволяет анализировать городские данные дистанционного зондирования и Интернета вещей, отслеживать реализацию и предоставлять пространственную обратную связь. Обработка естественного языка может автоматически

мониторить и анализировать тексты социальных сетей во время чрезвычайных ситуаций, оценивать эффект устойчивых планов и обеспечивать социальную обратную связь.

Искусственный интеллект также делает возможным адаптивное динамическое планирование. Генеративный ИИ позволяет планировщикам принимать интеллектуально поддержанные решения по устойчивому проектированию и быстро создавать качественные тексты и изображения [58,67]. Китайские исследователи предложили применять глубокое обучение с подкреплением в пространственном планировании городских сообществ [68], что позволяет динамически корректировать и обновлять планы. В будущем интеллектуальные адаптивные рекомендации смогут поддерживать реализацию в условиях неопределенной и изменяющейся городской среды.

5 Заключение

По мере вступления управления городскими рисками в стадию 3.0 теория городской устойчивости при сопряжении множественных рисков требует дальнейшего углубления. Планирование для нормализованных сопряженных рисков является неизбежным направлением новой эпохи и важным средством повышения устойчивости и согласования обычных и чрезвычайных функций. Исходя из вызовов будущего городского развития, статья обобщила исследовательские основы и опыт планирования сопряжения рисков в городском пространстве, рассмотрела соответствующую теорию и практику устойчивости и определила приоритеты подготовки устойчивых планов и технического развития.

Особого внимания требуют три вопроса. Во-первых, с точки зрения самого риска необходимо уточнять характеристики и закономерности типичных городских угроз, уделяя основное внимание их сопряжению. Во-вторых, в отношениях между риском и городом следует исследовать пространственные эффекты и механизмы, определять реакцию систем землепользования, инфраструктуры и зданий на множественные риски и изучать устойчивость через взаимодействие человека и территории. В-третьих, в отношениях между риском и планированием устойчивые пространственные планы должны включать анализ сценариев сопряжения для конкретных многорисковых объектов и на его основе формулировать адресные меры планирования и проектирования. Исследование призвано предоставить теоретические и методические ориентиры для планирования и строительства безопасных и устойчивых городов на стадии риска 3.0.

Список литературы

- [1] Zhou Shutian, Zhai Guofang, Shi Yijun, et al. Обзор исследований по оценке рисков городских природных бедствий. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 180-186. [на кит. яз.]
- [2] Ni Changjian, Wang Jie. Повторное рассмотрение определения риска природных бедствий. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 1-5. [на кит. яз.]
- [3] Zhai Guofang. Устойчивые ответы на городские ливневые и паводковые риски в условиях изменения климата с позиции планирования: ключевые понятия, базовые подходы и общая рамка. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 29-37. [на кит. яз.]
- [4] Shi Peijun. Пятая дискуссия о теории и практике исследований систем бедствий. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(5): 1-9. [на кит. яз.]
- [5] Carpignano A., Golia E., Di Mauro C., et al. Методологический подход к определению региональных карт множественного риска: первое применение. *Journal of Risk Research*, 2009, 12(3-4): 513-534.
- [6] Gallina V., Torresan S., Critto A., et al. Обзор методологий множественного риска для природных опасностей: последствия и вызовы для оценки воздействия изменения климата. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 123-132.

- [7] Pendall R., Foster K. A., Cowell M. Устойчивость и регионы: углубление понимания метафоры. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1): 71-84.
- [8] Saarinen T., Hewitt K., Burton I. Опасность места: региональная экология разрушительных событий. *Geographical Review*, 1973, 63: 134.
- [9] Komendantova N., Mrzyglocki R., Mignan A., et al. Инструменты поддержки решений по множественным опасностям и рискам как часть партисипаторного управления рисками: обратная связь от участников гражданской защиты. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 8: 50-67.
- [10] Marzocchi W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., et al. Основные принципы оценки множественного риска: исследование на примере Италии. *Natural Hazards*, 2012, 62(2): 551-573.
- [11] Kappes M. S., Keiler M., von Elverfeldt K., et al. Проблемы анализа риска множественных опасностей: обзор. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [12] de Ruiter M. C., Couasnon A., van den Homberg M. J. C., et al. Почему последовательные бедствия больше нельзя игнорировать. *Earth's Future*, 2020, 8(3): e2019EF001425.
- [13] Terzi S., Torresan S., Schneiderbauer S., et al. Оценка множественного риска в горных регионах: обзор подходов моделирования для адаптации к изменению климата. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 759-771.
- [14] Ward P. J., Daniell J., Duncan M., et al. Приглашенные перспективы: исследовательская повестка для траекторий управления риском бедствий в оценке множественных опасностей и рисков. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(4): 1487-1497.
- [15] He Jinping, Li Shuangshuang. Построение пространственно-временных сетей сопряжения множественных опасностей: от многомерной сети к сети с одной вершиной. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2314-2330. [на кит. яз.]
- [16] Guo Rui, Wang Qing, Zhang Huan, et al. Механизмы реагирования и стратегии формирования городской и сельской среды при каскадных бедствиях, вызванных тайфунами: исследование Хунцяо в Юэцине. *Urban Planning Forum*, 2024(2): 110-118. [на кит. яз.]
- [17] Lu Ying, Hou Yunyue, Guo Liangjie, et al. Предварительная оценка сопряженного риска множественных опасностей в прибрежных городах: на примере Цюаньчжоу, Фуцзянь. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1): 211-216. [на кит. яз.]
- [18] Wei Jiuchang. Сопряжение и каскадирование рисков: сложные причины эволюции новых социальных угроз. *Xuehai*, 2019(4): 125-134. [на кит. яз.]
- [19] Liu H., Wang J., Liu J., et al. Совместные и отсроченные последствия эпидемий и экстремальной погоды для восстановления городской мобильности. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104872.
- [20] Zhang B., Li X., Wang S. Новый метод адаптации случаев на основе усовершенствованного интегрированного генетического алгоритма для чрезвычайных ситуаций, вызванных ветровыми повреждениями электросетей. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(21): 7812-7824.
- [21] Kong Feng. Эффекты сопряжения бедствий с позиции теории систем бедствий. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(1): 1-5. [на кит. яз.]
- [22] Shi Peijun, Lü Lili, Wang Ming, et al. Системы бедствий: группы бедствий, цепочки бедствий и встречи опасностей. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12. [на кит. яз.]
- [23] Pescaroli G., Alexander D. Понимание составных, взаимосвязанных, взаимодействующих и каскадных рисков: целостная рамка. *Risk Analysis*, 2018, 38(11): 2245-2257.
- [24] Zscheischler J., Westra S., van den Hurk B. J. J. M., et al. Будущие климатические риски от составных событий. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.
- [25] Zscheischler J., Martius O., Westra S., et al. Типология составных погодных и климатических событий. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7): 333-347.

- [26] Hao Z. Составные события и связанные с ними последствия в Китае. *iScience*, 2022, 25(8): 104689.
- [27] Folke C. Устойчивость: становление перспективы анализа социально-экологических систем. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [28] Meerow S., Newell J. P., Stults M. Определение городской устойчивости: обзор. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [29] Shao Yiwen, Xu Jiang. Городская устойчивость: понятийное толкование на основе обзора международной литературы. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54. [на кит. яз.]
- [30] Yan Wentao, Li Zihao, Jian Tianyu, et al. Экологическое обновление старых сообществ, ориентированное на здоровье воздушной среды: теоретическая рамка и практические примеры. *Urban Development Studies*, 2022, 29(1): 121-132. [на кит. яз.]
- [31] Kondo T., Lizarralde G. Неадаптивность, фрагментация и другие вторичные эффекты централизованного послекатастрофического городского планирования: случай «каскадной» катастрофы 2011 г. в Японии. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 58: 102219.
- [32] Zeng Jian, Zuo Chang'an. Стратегии предупреждения и снижения ущерба от бедствий в пространственном планировании и проектировании CBD. *Architectural Journal*, 2010(11): 75-79. [на кит. яз.]
- [33] Lin Zhanpeng. Планирование парков и зеленых пространств для предупреждения бедствий в городах высокой плотности: пример Гонконга. *Chinese Landscape Architecture*, 2008(9): 37-42. [на кит. яз.]
- [34] Xue Ye, Liu Yaolong, Zhang Taotao. Механизмы формирования сопряженного риска бедствий. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2): 44-50. [на кит. яз.]
- [35] Chen Weike, Zhang Xin. Динамика многофакторного сопряжения пожаров и взрывов при хранении и транспортировке опасных веществ. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(6): 49-54. [на кит. яз.]
- [36] Li Hongnan, Li Gang, Zheng Xiaowei, et al. Развитие исследований инженерных конструкций при сопряженном воздействии множественных опасностей. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(5): 1-14. [на кит. яз.]
- [37] Acemoglu D., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. Системный риск и устойчивость финансовых сетей. *American Economic Review*, 2015, 105(2): 564-608.
- [38] Peng Chong, Guo Zuyuan, Peng Zhongren. Развитие теории и практики устойчивости сообществ за рубежом. *Urban Planning International*, 2017, 32(4): 60-66. [на кит. яз.]
- [39] Cai Jianming, Guo Hua, Wang Degen. Обзор зарубежных исследований устойчивых городов. *Progress in Geography*, 2012, 31(10): 1245-1255. [на кит. яз.]
- [40] Alberti M., Marzluff J. M. Экологическая устойчивость городских экосистем: связь городской структуры с человеческими и экологическими функциями. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265.
- [41] Jabareen Y. Планирование устойчивого города: концепции и стратегии реагирования на изменение климата и экологические риски. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [42] Adger W. N. Социальная и экологическая устойчивость: связаны ли они? *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.
- [43] Adger W. N., Safrade Campos R., Siddiqui T., et al. Комментарий: неравенство, нестабильность и устойчивые экосистемы как элементы городской устойчивости. *Urban Studies*, 2020, 57(7): 1588-1595.
- [44] Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., et al. Рамка количественной оценки и повышения сейсмической устойчивости сообществ. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [45] Lovell S. T., Taylor J. R. Обеспечение городских экосистемных услуг посредством многофункциональной зеленой инфраструктуры в США. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.

- [46] Meerow S., Newell J. P. Пространственное планирование многофункциональной зеленой инфраструктуры: повышение устойчивости Детройта. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [47] Martin R., Sunley P. О понятии региональной экономической устойчивости: концептуализация и объяснение. *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(1): 1-42.
- [48] Yang L., Yang H., Zhao X., et al. Исследование городской устойчивости с позиции теории сложных адаптивных систем: пример агломерации Ланьчжоу-Синин. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(20): 13667.
- [49] Simmie J., Martin R. Экономическая устойчивость регионов: к эволюционному подходу. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1): 27-43.
- [50] Chen Mengyuan. Развитие международных исследований региональной экономической устойчивости: эволюционная теоретическая рамка. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1435-1444. [на кит. яз.]
- [51] Xie W., Sun C., Lin Z. Пространственно-временная эволюция устойчивости городской формы к климатическим возмущениям в адаптивном цикле: пример Чанчуня. *Urban Climate*, 2023, 49: 101461.
- [52] Zheng Yan, Zhai Jianqing, Wu Zhanyun, et al. Классификация и оценка устойчивых городов на основе адаптивного цикла: китайские пилотные города-губки и климатически адаптивные города. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(3): 31-38. [на кит. яз.]
- [53] Zhu Jinxia, Pan Yi, Zhang Yanbin, et al. Критические пороги влияния изменений типов посевов на устойчивость систем пахотных земель. *China Land Science*, 2022, 36(4): 49-58. [на кит. яз.]
- [54] Folke C., Carpenter S., Walker B., et al. Смена режимов, устойчивость и биоразнообразие в управлении экосистемами. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1): 557-581.
- [55] Tang Haiping, Chen Jiao, Xue Haili. Экологические пороги: понятия, методы и перспективы исследований. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932-940. [на кит. яз.]
- [56] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Планирование устойчивого города в Шанхае: ключевые вопросы, общая рамка и стратегии. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28. [на кит. яз.]
- [57] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Система подготовки и механизмы реализации территориально-пространственного планирования предупреждения и снижения ущерба от бедствий. *Urban Planning Forum*, 2023(1): 48-53. [на кит. яз.]
- [58] Herzog O., Pan Haixiao, Deng Zhituan, et al. Искусственный интеллект нового поколения в городском планировании: возможности и вызовы. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 1-11. [на кит. яз.]
- [59] Peng Z. R., Lu K. F., Liu Y., et al. Траектория развития искусственного интеллекта в городском планировании: от поддержки планирования к разработке планов. *Journal of Planning Education and Research*, 2023, 0(0): 0739456X231180568.
- [60] Xue Ye, Chen Baozhang, Huang Chongfu, et al. Мягкая иерархическая модель комплексной оценки риска множественных опасностей. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 353-360. [на кит. яз.]
- [61] Niu Yanhe, Jiao Sheng, Cao Tingting, et al. Оценка городского риска множественных опасностей и планировочные ответы на основе модели PSR. *Urban Development Studies*, 2022, 29(4): 39-48. [на кит. яз.]
- [62] Wang Fei, Yin Zhan'e, Wen Jiahong. Многоагентная модель динамической оценки риска природных бедствий. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(2): 85-88. [на кит. яз.]
- [63] Rao Wenli, Luo Nianxue. Построение сценариев и пространственно-временное моделирование тайфунных штормовых нагонов. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(2): 187-197. [на кит. яз.]

- [64] Li Siyu, Liang Da, Wei Yanfang, et al. Количественное моделирование цепочки «засуха — лесной пожар» на основе байесовской сети. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1): 38-46. [на кит. яз.]
- [65] Li Yongjian, Wang Xunqing, Qiao Xiaojiao. Модель эволюции вторичных бедствий после землетрясения на основе стохастических сетей Петри. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(4): 264-273. [на кит. яз.]
- [66] Chen Bilin, Li Yinglong. Планировочная оценка адаптивной трансформации высокоплотных прибрежных городов, ориентированной на устойчивость к наводнениям: район Mangrove Bay в Шэньчжэне. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 77-86. [на кит. яз.]
- [67] Gan Wei, Wu Zhiqiang, Wang Yuankai, et al. Построение теоретической модели городского дизайна с применением AIGC. *Urban Planning Forum*, 2023(2): 12-18. [на кит. яз.]
- [68] Zheng Y., Lin Y., Zhao L., et al. Пространственное планирование городских сообществ с использованием глубокого обучения с подкреплением. *Nature Computational Science*, 2023, 3(9): 748-762.

Исправлено: июнь 2024 г.

Перевод выполнен с использованием ИИ