“韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究

□ 刘亚丽，曹春霞，龚 浩

[摘 要] 文章针对山地城市的自然地理、空间布局、气候水文、降雨产流等特性，结合城市防涝与韧性发展需求，开展“韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究，通过对山地城市进行立体化防涝顶层设计，优化山地水系“韧性海绵”格局，维护“韧性海绵”水循环系统，统筹协调“韧性海绵”用地、空间及设施布局，实现“上游海绵蓄洪削峰、城市海绵韧性防涝、末端海绵弹性行泄”，并构建了“外涵、内敛、韧性、安全”的山地城市立体防涝体系。

[关键词] 韧性城市；海绵城市；耦合；山地城市；防涝规划

[文章编号] 1006-0022(2022)11-0097-07 **[中图分类号]** TU984 **[文献标识码]** A

[引文格式] 刘亚丽，曹春霞，龚浩．“韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究 [J]．规划师，2022(11)：97-103．

Mountainous City Water Logging Prevention Planning with the Coupling Concept of “Resilient City and Sponge City”/Liu Yali, Cao Chunxia, Gong Hao

[Abstract] Based on the characteristics of physical geography, spatial distribution, climate, hydrology, rainfall and runoff in mountainous cities, the paper combines the requirements of waterlogging prevention and resilience development in cities, to study the waterlogging prevention planning of mountain cities from the perspective of the coupling of “Resilient city” and “Sponge City”, through the “Three-dimensional” waterlogging prevention top-level design of mountain cities, to optimize the distribution of “Resilient sponges” in mountain water systems, maintain the “Resilient sponges” water cycle, and co-ordinate the distribution of land, space and facilities for “Resilient sponges”, a three-dimensional waterlogging prevention system of Mountain City is constructed, which includes “Upstream sponges flood storage, peak reduction, flexible waterlogging prevention of urban sponges and flexible discharge of end sponges”.

[Key words] Resilient city, Sponge city, Coupling, Mountainous city, Water logging prevention planning

0 引言

在全球变暖、城市扩张的双重影响下，极端气候的发生频率、强度、持续时间日益增加，城市暴雨引发的内涝灾害日渐严重，我国 60%以上的城市每年都要遭受不同程度的洪涝灾害。山地城市降雨丰富但分布不均，空间变化丰富且用地破碎，地形复杂起伏且持水力差，产流系数大且易受雨水冲刷，导致洪涝灾害频发、洪涝风险偏高，洪涝灾害已经成为制约山地城市可持续发展的重要因素 [1-2]。

“海绵城市”通过规划管控可以系统性解决水问题，能在下雨时吸水、蓄水、渗水、净水，需要时“释放”蓄存的水并加以利用，在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的适应性和抗冲击性。然而，“海绵城市”应对的是常态化、中小雨的积水问题，可通过渗、滞、蓄将 70% 的降雨就地消纳，但是仅仅依靠常态化的“源头削峰、过程吸纳、末端控制”不能防御非常态、高风险的极端气候，必须同时建构洪涝风险预警系统、源头径流控制系统、城市韧性管渠系统和超标雨洪排放系统四大山地城市洪涝灾害管理韧性系统，才能应对山地城

[作者简介] **刘亚丽**，博士，注册城乡规划师，正高级工程师，现任职于重庆市规划设计研究院。
曹春霞，硕士，注册城乡规划师，正高级工程师，重庆市规划设计研究院城乡发展战略研究所所长。
龚 浩，硕士，注册城乡规划师，高级工程师，现任职于重庆市规划设计研究院。

市高风险内涝灾害问题[1-2]。

“韧性城市”强调凭自身能力应对和抵御灾害，并通过合理的资源调配、冗余缓冲、动态平衡和自我修复，保持抗压、存续、适应和可持续发展能力，使城市从灾害中快速恢复。“韧性城市”涉及自然、生态、经济等各个领域，其规划内容比“海绵城市”更丰富，侧重通过事先预防，让城市做好充分准备来抵御非常态状况的冲击，并将单一的防灾减灾措施向后端延伸，更加强调城市的适应性和创新性，提升城市系统受到冲击后的“回弹”“重组”“学习”“转型”能力[3-4]。“韧性城市”在规划实践中得到了广泛应用，在世界范围内获得普遍认可，目前已上升为我国的国家战略。2021 年 3 月，第十三届全国人民代表大会四次会议通过的《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》明确提出“建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”。

为有效提升山地城市在极端气候下应对和防御灾害的能力，有必要针对山地城市的特性开展防涝规划探索，强化“韧性城市”与“海绵城市”的耦合规划研究，通过构建山地城市“韧性海绵”防涝系统，切实解决严峻的山地城市内涝问题[5-6]。

1 山地城市内涝成因与特性分析

1.1 山地城市内涝灾害成因分析

1.1.1 气候水温原因

山地城市降雨具备以下特点：一是雨旱分明，降雨集中，60% ～ 80% 的降雨集中在 6 ～ 9 月；二是雨峰靠前，雨型急促，降雨历时短，短时形成暴雨或强降雨。遭遇暴雨的山地城市，短时间内会形成流量高、流速快的地表径流，城市排水系统难以承受则会出现严重的地面积水，易使城市出现重大内涝灾害。

1.1.2 地形地貌原因

山地城市多坐落在山体之间，或位于两侧临山的峡谷之中，城市地势低于外围山地，与此同时城市高低起伏，内部低洼点广泛分布。在遭遇暴雨时，由于地形地势较陡，城市上游洪水高速汇集的同时，城市内部地表径流也在快速汇聚，造成径流急剧增加，并积存在城市低洼地带，极易造成严重的城市内涝灾害[7-8]。

山地区域岩层厚、土壤薄、含水介质不丰富，含水层相对较薄，常常被不透水岩层阻断，而且隔水层分布广泛，地下水之间、地表水与地下水之间难以相互连通。暴雨期间，山地城市地表水难以向下渗透，即强降雨形成时，地表径流与地下水之间的转换难度大，加剧了内涝的危害程度。

1.1.3 开发建设原因

山地城市用地局促，在开发建设中对自然生态和水文循环系统的破坏程度要高于平原城市，洪涝灾害威胁更大：一是山地城市开发建设中的削山造地现象突出，加上山地城市水文循环和生态系统自身的脆弱性，水文循环系统和自然生态系统遭到极大的破坏。地形改造、地面硬化后，山地城市可以渗透到地下的雨水聚集在地表，加之原有水塘、洼地、水沟、天然河道被人为填堵，原有的透水地面被破坏，水文循环受阻，雨水径流量急剧增加，短时间内无法及时排出，洪涝灾害的威胁极大。二是山地城市受地形所限，用地局促，建设密度普遍较高，建筑密集更加剧了城市地表、生态、水文的变化。高强度的硬质铺装大大减少了雨水入渗滞留量，水文循环系统被破坏的程度更深，地表的滞、蓄雨水能力显著下降，骤增的雨水径流量、缩短的汇流时间显著增加了内涝风险[9-10]。

1.1.4 排水系统原因

山地城市排水防涝的特殊性未得到重视，在排水系统规划设计和建设中没有得到充分体现，导致防涝问题更加突出：一是山地城市传统用地规划缺失雨洪风险评估，原本适宜规划成洪涝通道、调蓄水面、低洼绿地的地块常常被规划为建设用地，导致自然生态防涝设施缺失；二是山地城市河道水位陡涨陡降，与城市排水系统高程衔接困难，洪涝灾害“来得快、去得快”，难以对雨洪进行综合利用，容易忽略排水系统与蓄洪的紧密联系，进一步加剧了洪涝风险；三是山地城市多为组团发展，开发中的不可控因素较多，扩张过程中新增管网常常与原有排水系统无序衔接，致使转输汇水面积过大，造成原有排水系统负荷加大，暴雨期容易产生溢流积水；四是山地城市在扩张过程中会改变水循环系统，蒸发量增加、下渗量降低，城市土地不透水硬化后，地面摩阻减小，水流速度加快，径流系数和洪峰流量显著加大，极大地增加了雨水系统的负担，局部低洼地区的排水系统过载，大大增加了城市洪涝灾害风险。

1.2 山地城市在防涝规划方面的优劣势

1.2.1 山地城市在防涝规划方面的优势

山地城市大面积的山体、水系等非建设用地区域为构建自然积存、自然渗透和自然净化的“韧性海绵”提供了广阔的空间载体，其在防涝规划方面具有以下优势：山地地形丰富且“凹凸有致”，尤其是上游区域为蓄水、保水提供了充足的“韧性海绵”集水空间；山地城市内部、组团之间丰富的绿地、湿地、组团隔离带为城市雨水渗透、滞留创造了立体“韧性海绵”蓄滞空间；山地城市密集、丰富、落差较大的水系、水网、河道、冲沟为城市防涝提供了“韧性海绵”径流通廊。

1.2.2 山地城市在防涝规划方面的劣势

山地城市在防涝规划方面具有明显的劣势：山地地区降雨时空分布不均，降水集中、峰值靠前、强降水频率高、暴雨强度高，发生洪涝灾害的风险高；山地地形复杂、坡度较陡，洪峰流量大、

洪水流速快，洪灾的威胁大；城市扩张的破坏力强，低洼地区分布较多，局部地区积水严重，涝灾隐患多；山地的地下含水层薄、不透水岩层分布广泛，渗水、保水和滞水能力差，滞洪防涝难度大。

2 “海绵城市”与“韧性城市”理念下的防涝规划比较

在规划理念方面，“海绵城市”防涝规划以“低影响开发”“源头渗滞”“过程控制”“慢排缓释”为主要规划理念，将自然途径与人工措施相结合，充分发挥建筑、道路、绿地、水系等对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用，直接减少了因地表硬化而增加的雨洪径流，延缓了径流汇流时间，减轻了排水系统压力，对预防城市内涝发挥了重要作用，在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”，在确保排水防涝安全性的前提下，能最大限度地实现雨水的自然积存、渗透和净化；“韧性城市”防涝规划以“安全性、可靠性、抗冲击性、可持续性”为规划理念（图 1），保证城市在遭遇极端天气的冲击后依然能够凭借提前预警、冗余缓冲、动态平衡、自我修复等特性，保持抗压、存续、适应和可持续发展的能力。

在规划目的上，“海绵城市”防涝规划的目的是最大限度地就地消纳和利用降雨，甚至实现“零径流”（即土地开发前后地表径流量保持不变），以此促进雨水资源化利用，保障城市水安全，保护城市水生态、水环境，维护城市正常水循环，引导城市水资源的可持续利用；“韧性城市”防涝规划构建的城市系统在受到洪涝灾害后，能够快速分散风险、自动调整优化，不仅能有效抵御洪涝灾害冲击，还能迅速恢复到稳定状态。

在规划视角上，“海绵城市”防涝规划从流域水资源规划及雨洪管理视角出发，制定流域水资源控制和管理目标，注重生态海绵格局的构建，并根据城市各功能分区，保护原有河湖、湿地、坑塘、沟渠等“海绵体”，使其免遭开发活动的影响，同时保障受到破坏的“海绵体”能通过物理、生物和生态等手段逐步修复，并维持一定比例的生态空间，从而实现对城市雨水的收集、储存、利用和管理。“韧性城市”防涝规划更侧重洪涝灾害的事先预防，使城市做好充分准备去抵御涝灾的冲击，同时增加城市的灵活性、多样性、冗余性和稳健性，一旦洪涝灾害发生，城市的部分功能丧失，多样冗余的后备设施即可补充缺陷，促使瘫痪的城市系统迅速恢复。

在规划策略方面，“海绵城市”防涝规划严格遵循“渗、滞、蓄、净、用、排”六字方针，通过生态措施组织排水，实现城市开发建设过程的可持续发展。“海绵城市”建设并非是要取代传统的排水系统，而是对传统排水系统进行“减负”和“补充”，以发挥城市及周边生态系统的协同作用。“韧性城市”防涝规划通过大数据、情景分析等方法，强化内涝风险评估；运用生态智慧开展防涝顶层设计，优化韧性城市防涝格局；优化设施空间布局，将绿色基础设施与灰色基础设施、存量与增量防涝设施相融合；通过智慧城市建设，提高防涝设施的运行维护水平和应急韧性。

在规划设施方面，“海绵城市”防涝规划的“海绵设施”种类丰富，既包括河、湖、池塘等水系，也包括绿地、花园、可渗透路面等配套设施，可以将城市建筑、小区、道路、广场等作为载体，让城市屋顶“绿”起来，让道路、广场可渗透，让绿地“沉下去”。“韧性城市”防涝规划综合利用了灰绿基础设施，既包括自然排水系统，还包括综合防灾预警设施、智慧城市防涝设施等，设施的多样化特征更显著。

3 “韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划建议

3.1 促进由传统工程排涝向“韧性海绵防涝”转变

山地城市的防涝规划应从保障流域水安全角度出发，融合“韧性城市”“海绵城市”两大理念，强调生态优先、规划引领、顶层设计，实现五大理念转变：一是实现从传统单一工程治水向“多元融合、智慧应对、海绵吸纳、韧性恢复”治水转变；二是实现从传统末端集中控制向从源头到末端的全过程生态智慧防涝管控转变；三是实现从传统机械快排方式向海绵调蓄与弹性行泄相结合的复合防涝方式转变；四是实现从以传统管

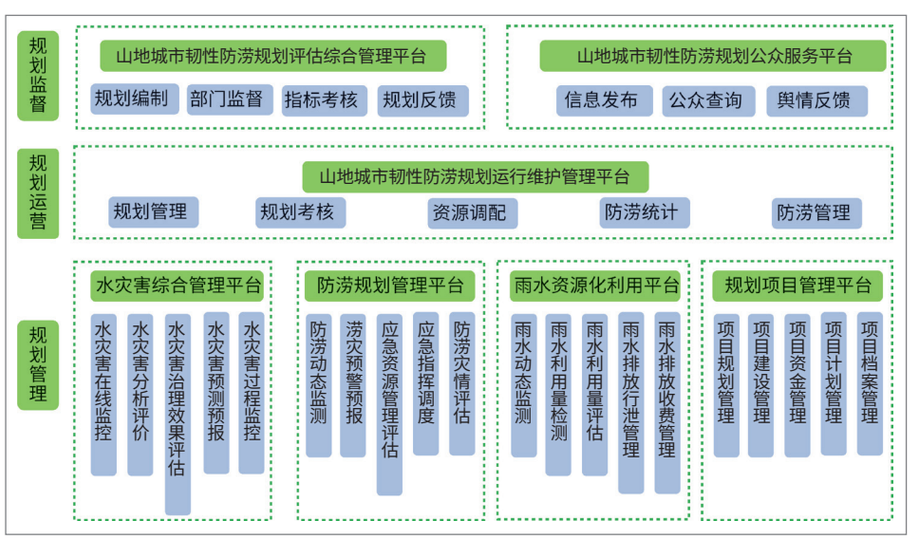

图 1 “韧性城市”防涝规划及多样化管理机制框架图

渠、泵站、处理厂站等灰色基础设施为主的工程排水向绿色基础设施与灰色基础设施相结合的“韧性海绵”防涝排水转变；五是实现从传统的行政区“画地为牢”、流域上下游条块分割向流域“韧性海绵”综合统筹管理转变。

3.2 确定山地“韧性海绵”防涝规划指标体系

根据山地城市的自然特征和环境条件，融合“韧性”“海绵”两大理念，采用蓄、滞、渗、净、用、排等措施，构建以内涝防治重现期、径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制等为主要内容的山地防涝指标体系，确保“小雨不积水、大雨不内涝”。

(1) 根据山地城市规模、防护地区和地段保护要求，分区确定内涝防治重现期。

经技术经济比较后，根据山地城市特点、积水影响程度和内河水位调控等因素，确定防涝重现期。对于山地城市而言，洪涝灾害威胁大，建议适当提高防涝标准；城市组团发展的差异较大，应根据防护用地规模和地段保护要求，分区提出防涝重现期标准 (表 1)。

(2) 根据山地城市生态基础和发展需求控制径流总量。

山地城市雨水径流总量大、峰值高，难以控制，应根据山地城市多年逐日降雨量分析适合的径流控制量和对应的径流控制率，提出年径流总量控制率的目标以及源头减控的设施布局并计算设施规模 (表 2)。

(3) 基于情景分析结果，耦合基础数据，控制径流峰值。

山地城市洪峰流量大，洪涝风险高，应通过情景分析法，运用水力模型软件，耦合降雨、下垫面和管网等基础数据，模拟极端气候下城市降雨情景、内涝情况、受灾程度、功能运转情况，再根据评估分析结果，通过山地城市自然和人工调蓄规划设计，控制汇水区出流的速率，降低径流峰值速率，调蓄洪峰径流量，控制排入受纳水体的水量、水质、径流峰值和速度 (表 3)。

表 1 山地城市防涝重现期建议

城市类型	设防对象	内涝防治重现期	国家标准规定的雨水管渠规划重现期	国家防洪标准规定的防洪重现区
特大山地城市	一般地区和路段	50 ～ 100 年	2 ～ 5 年	100 ～ 200 年或以上
	重要地区和路段	100 年	重要地区 5 ～ 10 年；立交、地道下沉广场 30 ～ 50 年	100 ～ 200 年或以上
山地大城市	一般地区和路段	30 ～ 50 年	2 ～ 5 年	50 ～ 100 年
	重要地区和路段	50 年	重要地区 5 ～ 10 年；立交、地道下沉广场 20 ～ 30 年	50 ～ 100 年
山地中等和小城市	一般地区和路段	20 ～ 30 年	2 ～ 3 年	20 ～ 50 年
	重要地区和路段	50 年	重要地区 3 ～ 5 年；立交、地道下沉广场 10 ～ 20 年	20 ～ 50 年

表 2 我国部分山地城市年径流总量控制率目标值

城市	年径流总量控制率	多年平均降水量 / 毫米	多年平均水资源量 / 亿立方米	天然径流系数
厦门	不低于 85%	1 533.3	12.35	0.40 ～ 0.45
宁波	不低于 75%	1 517.1	73.34	0.50 ～ 0.55
镇江	不低于 75%	1 051.2	10.84	0.24 ～ 0.27
遂宁	不低于 75%	852.1	14.12	0.27 ～ 0.31
临海	不低于 80%	1 550.0	22.18	0.49 ～ 0.55
南宁	不低于 75%	1 462.0	139.80	0.38 ～ 0.43
重庆	不低于 70%(建议)	1 184.0	567.76	0.44 ～ 0.50

表 3 山地城市径流系数控制建议取值

序号	用地类别	径流系数	
		一般强度区	高强度区
1	居住用地	≤ 0.50	≤ 0.60
2	公共管理与公共服务用地	≤ 0.50	≤ 0.60
3	商业服务业用地	≤ 0.60	≤ 0.65
4	工业用地	≤ 0.60	≤ 0.65
5	物流仓储用地	≤ 0.60	≤ 0.65
6	交通及公用设施用地	≤ 0.60	≤ 0.65
7	绿化用地	≤ 0.15	≤ 0.20

3.3 开展山地城市立体化“韧性海绵”防涝顶层设计

3.3.1 构建“韧性海绵”立体防涝系统

结合山地自然本底和地形地势，通过有效组织城市空间、“韧性海绵”、排水设施、行泄通道，实现 “上游海绵蓄洪削峰、城市海绵韧性防涝、末端海绵弹性行泄”，构建“外涵、内敛、韧性、安全”的立体生态防涝系统。

(1) 外涵——上游海绵蓄洪削峰。

山地城市的上游区域多为大面积的山体。规划在严格保护上游山体、增强区域雨水涵养功能的同时，应该顺应山地城市的自然地形特性，加强上游蓄水设施建设，增强上游山体谷地蓄水、保水、滞洪能力，通过“雨往高处留”，有效缓解城市洪涝灾害，保障下游城市的水安全。

(2) 内敛——城市海绵韧性防涝。

在城市内部，促进雨水的自然滞渗，加强对雨水的积存和利用。对于大面积建成区，大尺度蓄水不现实，如果过多机械化地建设人工雨水调节池，将占用大量宝贵的城市用地，而且投资高、运行难、不易管理。因此，规划应充分利用山地城市内部高低起伏的地形地势，强化绿地绿道、开敞空间、河湖水系、湿地涂滩的滞存功能，构建滞水、渗水、保水的立体、韧性“城市海绵”，在削减雨水峰值流量的同时，兼顾水质的改善，保障城市水安全。

(3) 安全——末端海绵弹性行泄。

山地城市面临着较高的洪涝灾害风险，必须遵循“韧性城市”“海绵城市”规划理念，通过构建末端旱涝交替、平急结合的行泄排涝系统，保证城市水安全。规划应深入分析城市地形、降雨产流特征、地表径流和汇流路径，结合城市空间、道路布局来合理布局行泄通道，疏导雨水汇入河道、湖库、水塘、下凹绿地、低洼广场等末端调蓄、行泄、排涝设施，提升山地城市应对内涝风险的能力。同时，规划应充分考虑末端海绵行泄通道的弹性空间预留和利用。山地城市的溪河、湖库、湿地等水体作为末端海绵设施和行泄通道，水位往往变化较大，规划应合理预留末端海绵设施的韧性、弹性空间，并加以复合使用，实现“水来韧性控、水走弹性用”(图 2)。

3.3.2 协调山地城市“韧性海绵”用地、空间及设施布局

山地城市地形丰富，生态系统多样，但总体生态环境脆弱，发生地质灾害的风险高。防涝规划必须以可持续发展为基本原则，根据内涝风险韧性评估，对山地城市用地空间和设施布局进行优化协调，并结合不同设施在防涝规划中的定位，制定“韧性海绵”规划措施，以增加山地城市的防涝能力，引导城市有序建设和安全发展。

随着大数据技术、数学模型、智慧软件的广泛运用，可通过情景分析法，运用水力模型软件，耦合降雨、下垫面、管网等基础数据，模拟极端气候下城市降雨情景、内涝情况、受灾程度和城市运转情况，找出山地城市水安全“病灶”；通过保护山体、绿地、河流、湖泊、湿地等水生态敏感地区，科学布局城市韧性设施、公共海绵设施、雨水行泄通道，在优化“韧性海绵”设施布局的基础上，完善管网排水系统，缓解城市内涝问题，提升城市应对暴雨灾害的韧性 (图 3)。

3.3.3 强化城市韧性体检，融合存量和增量防涝设施

一般而言，山地城市建成区存在开发建设不合理、水循环破坏程度大、防涝设施老化、建设标准偏低和超负荷运转等问题，这些是防涝的重点和难点。此外，城市新区还存在韧性设施建设滞后或不适应长远发展的安全需求等问题。因此，需要通过城市韧性体检，找出防涝设施配置短板，采用集约整合、分步配置、智能布局等方式推进防涝系统有机更新，加强对潜在涝灾隐患的治理。同时，做好存量与增量地区的设施衔接，建立多元保障方案，提高防涝设施的建设标准，并通过防涝设施冗余度设置提升城市韧性。

3.3.4 提出“韧性海绵”防涝规划标准与措施

山地城市各区域之间自然地理、地形地势、径流特征和灾害风险存在较大差异，尤其是城市新区与建成区海绵城市建

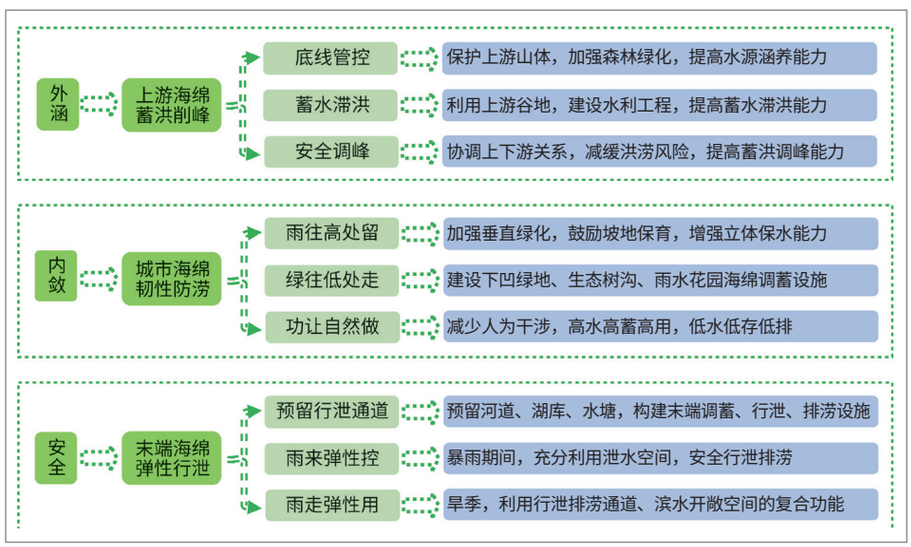

图 2 山地城市“韧性海绵”防涝空间框架图

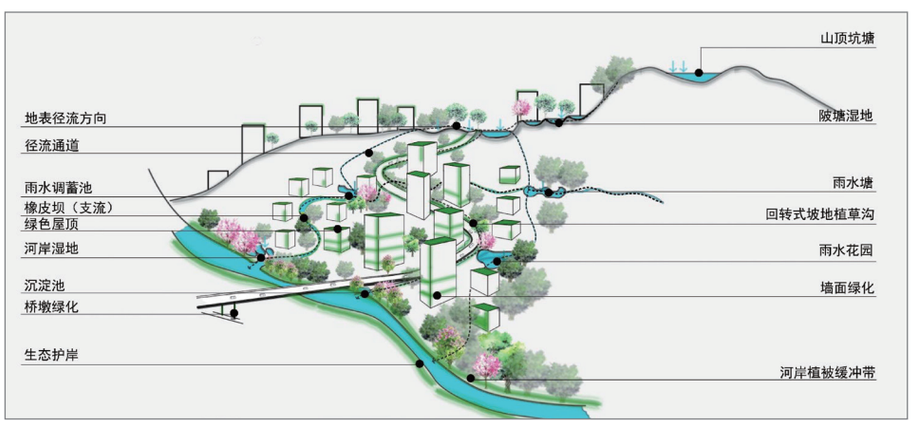

图 3 山地城市立体“韧性海绵”防涝规划示意图

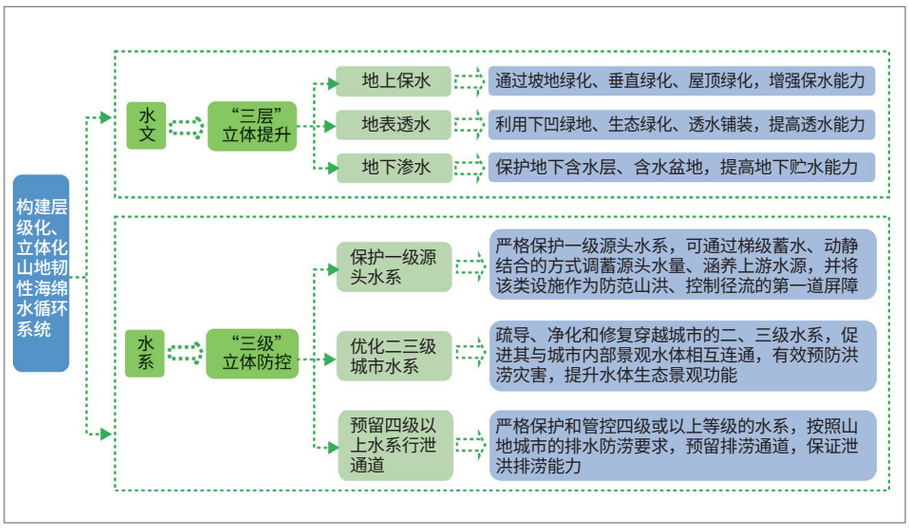

图 4 山地城市“韧性海绵”水循环系统优化框架图

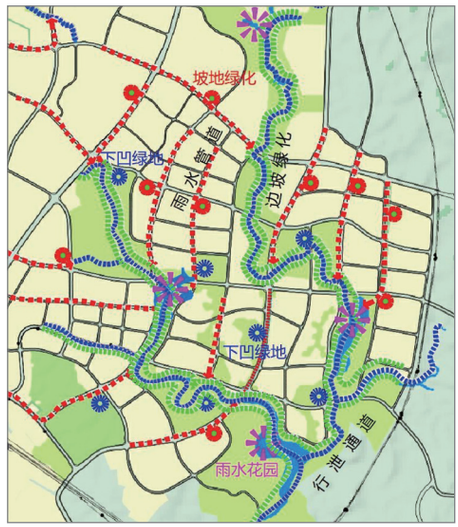

图 5 山地城市“韧性海绵”防涝设施布局优化图

设条件差异较大，需要因地制宜地提出防涝规划标准和措施。新建地区应充分考虑自然本底和地形地貌，做好排水管网和生态防涝双系统规划，高标准建设“韧性海绵”防涝体系。城市建成区的防涝规划应以预防为主、以治为先、防治结合。

3.4 优化山地水系格局，构建“韧性海绵”水循环系统

保护山地自然水系，充分考虑现状水系统特征和功能，优先保护原有水系格局，合理保护蓝线水系 (包括河流、湖泊、沟渠、池塘、季节性湿地等) 不被侵占，对已经遭破坏的生态防涝系统进行恢复和修复，完善城市排水防涝系统并使其与“韧性海绵”防涝系统充分衔接，以科学维护、修复、优化流域水循环格局。

3.4.1 构建层级化、立体化“韧性海绵”水循环系统

遵循山地水文特性，结合水体的分布和落差情况，打造网络丰富、循环流畅的“三层三级”立体弹性海绵水空间，实现山地水系的“层级网连水循环”(图4)。

“三层”水文立体空间即遵循山地水文特性，注重地上保水、地表透水、地下渗水。“三级”水系立体保护即构建水源涵养、生态净化、径流通畅的“三级”水域“韧性海绵”空间，其中一级水系作为山地水系之源，具有水源涵养、固定水土的功能，由于河谷深切、河床狭窄、落差大、水流急湍，下切侵蚀力强，必须对一级水系及其周边自然植被进行严格保护，可在源头适当的地方修建水库或设置生态蓄水设施，通过梯级蓄水、动静结合的方式调蓄源头水量、涵养上游水源，并将该类设施作为防范山洪、控制径流的第一道屏障；对于穿越城市的二、三级水系主要采取疏导、滞留、净化的方式进行水系生态修复和韧性整治，将从周边山地汇集进入城市的部分水流疏导至二、三级水系中，促进二、三级水系与城市内部景观水体相互连通，有效预防洪涝灾害，提升水体生态景观功能；对于四级或以上等级的水系或水体，严格按照山地城市的排水防涝要求，预留排涝通道，保证泄洪排涝能力。

3.4.2 利用城市开敞空间，提升涉水设施调蓄防涝能力

若要提高山地城市涝水行泄系统的经济性，则不仅要排水，还要考虑坑塘、沟渠、湖泊、水体、湿地等开放空间对雨水的滞留、调蓄和排放作用。通过协调用地 (如绿地、坑塘、水池、洼地等)，以及其他用途的设施，使涝水行泄通道发挥韧性防涝复合功能，快速消纳暴雨径流。

3.4.3 结合自然地形和水循环，预留防涝行泄通道

在涝水行泄通道中复合其他的使用功能，使其在满足城市内涝防治要求的同时，还能承担其他的城市功能。例如，道路、有坡度的地面、明渠上部空间、体育场、下凹式广场、下凹式绿化和水体上部空间等都可以复合涝水行泄通道的使用功能。

3.4.4 结合竖向规划和水循环要求，优化“韧性海绵”防涝设施

山地城市地形复杂、河网密集且洪涝频发，建立在对山地城市地形地貌深入系统的定性定量分析基础上的竖向规划，对于排水防涝至关重要，合理的竖向规划有利于雨水的控制、利用和排出，对山地地表径流的合理组织、有序控制具有重要作用。因此，应结合防涝规划与城市竖向规划，通过用地规划的竖向控制合理组织径流，有效落实重力流雨水排放系统、低影响开发雨水设施、超标准雨水径流通道等“韧性海绵”防涝设施。

在此基础上，山地城市还应充分考虑水循环要求，根据用地地形、性质、功能，结合建筑密度、容积率、绿地率等具体指标，合理预测地表径流情况，优化“韧性海绵”设施的布局 (图 5)。具体措施包括：注重源头控制，落实低冲

击开发理念，结合生态景观规划，明确绿色屋顶、透水铺装比例，以小区、建筑、道路与广场等为载体，结合绿地和水体等海绵要素，建设雨水花园、下沉式绿地、生态树池、植草沟、湿地、湿塘等雨水调蓄和生态修复的立体“韧性海绵”设施；结合山体、林地、绿地、湿地、水系，构建生态海绵绿色基础设施；进行低影响开发雨水系统规划，并与城市雨水管渠系统和超标雨水径流排放系统相衔接，充分发挥绿色雨水系统的滞水、渗水、蓄水、排水功能，促进地块及道路径流有组织地汇入周边绿地系统或水系。

3.5 统筹协调，多元融合，为山地城市防涝提供多重保障

3.5.1 协调各专项规划，预留防涝设施与韧性空间

应充分考虑山洪、江河等外水、客水的影响，以及受纳水体水位对城市排水系统的影响，做好各专项规划之间设计水位和流量的衔接与预留，必须保留蓄滞洪区，同时预留自然排水通道并将其作为暴雨径流的末端必经水路；将超标降雨径流控制到排水管网能够安全承载的量级，并与受纳水体和防洪排涝标准相匹配。

3.5.2 结合“生态城市”理念，统筹规划绿色基础设施和灰色基础设施

“韧性城市”“海绵城市”都利用了“生态城市”理念，融合了绿色基础设施和灰色基础设施，在灾害应对中不限于雨后泄涝，还注重提前预防、先期规划，以减少洪涝灾害的发生。通过在灰色基础设施 (排水管网) 前端设置绿色基础设施 (绿地、湿地、透水地面等低影响开发设施)，削减初期雨水污染及暴雨产汇流，并在灰色基础设施末端增加绿色基础设施 (公共海绵设施、泄水街道) 等，在削减面源污染的同时还大大提升了山地城市对暴雨灾害的适应性。

3.5.3 结合智慧城市建设，提升“山地海绵”防涝韧性

立足战略层面，结合智慧服务、数据处理等业务需求统筹布局用地，并预留数据中心用地，积极推进智慧水务、智慧预警、智慧防涝等设施融合建设，实现水务系统、预警系统、防涝系统运行管理的智能化，以大数据、云计算、物联网、深度学习、人工智能和虚拟现实等新一代技术为核心，打造全系统、全方位、全天候、立体动态的安全风险信息管理平台。搭建城市公共安全的智慧信息系统，促进数据资源共享，增进信息联动，利用智能网络提升防涝设施日常运行管理效率，利用智能平台营造开放的应急环境和弹性空间，利用智能管理提高风险预警趋势研判和应急决策的智能化水平。从信息基础设施和防涝融合设施两个方面，适度超前预留山地城市“韧性海绵”防涝弹性空间。将“韧性城市”“海绵城市”与智慧城市相结合，共同助推山地城市优化升级，建设具有智慧城市大脑的“韧性海绵”防涝系统。提升城市的应急和响应能力，使城市防涝更可靠、更安全、更高效、更友好。

4 结语

本文针对山地城市自然地理、气候水文、降雨产流和空间布局等特性，结合城市防涝与韧性发展需求，开展了“韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究，并构建了山地城市“韧性海绵”防涝规划指标体系，希望通过山地城市立体化防涝顶层设计，优化山地水系“韧性海绵”格局，维护“韧性海绵”水循环系统，统筹协调“韧性海绵”用地、空间及设施布局，实现“上游海绵蓄洪削峰、城市海绵韧性防涝、末端海绵弹性行泄”，构建“外涵、内敛、韧性、安全”的山地城市立体防涝体系。

[参考文献]

[1] 陈智乾．韧性城市理念下的市政基础设施规划策略初探 [J]．城市与减灾，2021(6)：36-42.

[2] 任晓炜，梁苑苑，陈婧霆，等．广西气象信息网络业务发展与展望 [J]．气象研究与应用，2020(4)：88-93.

[3] 肖文涛，王鹭．韧性城市：现代城市安全发展的战略选择 [J]．东南学术，2019(2)：89-99.

[4] 张亮，汤钟，俞露，等．新型城镇化背景下城市内涝防治规划的编制思考 [J]．给水排水，2021(6)：43-49.

[5] 莫琳，俞孔坚．构建城市绿色海绵——生态雨洪调蓄系统规划研究 [J]．城市发展研究，2021(5)：4-8.

[6] YanYun Nian, Xin Li, Jian Zhou, et al. Impact of Land Use Change on Water Resource Allocation in the Middle Reaches of the Heihe River Basin in Northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2021(3): 26-30.

[7] 赵万民．中国西南山地城市规划适应性理论研究的一些思考 [J]．南方建筑，2020(4)：15-19.

[8] 关群，刘彤凯．探索山地城市的城市规划方法 [J]．建筑设计管理，2020(5)：36-40.

[9] 钟华山．关于山地城市规划设计的探讨 [J]．现代装饰，2021(1)：42-46.

[10] 苏经宇，刘朝峰．山地城市灾害风险与规划控制 [J]．城市规划，2020(2)：28-31.

[收稿日期]2022-06-02