引用格式：葛伟亚, 王睿, 李云峰, 等. 地质安全约束下长三角城市地下空间高质量开发战略路径. 中国科学院院刊, 2026, 41(2): 260-275, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251216009.
Ge W Y, Wang R, Li Y F, et al. Strategic path for high-quality development of urban underground space in the Yangtze River Delta region under geological safety constraints. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(2): 260-275, doi: 10.3724/j. issn. 1000-3045.20251216009. (in Chinese)

地质安全约束下长三角城市地下空间高质量开发战略路径

葛伟亚* 王 睿 李云峰 华 健 杨 洋

1 中国地质调查局南京地质调查中心 南京 210016
2 自然资源部城市地下空间探测评价工程技术创新中心 南京 210016

摘要 长三角作为我国经济最具活力的核心区域之一，地面空间开发强度已接近承载上限，地下空间正成为区域城市更新、要素集约配置与韧性城市建设的重要战略增量资源。在地面空间紧约束和地下空间开发加速的双重背景下，多类型地质安全风险在长三角叠加显现，已成为制约地下空间高质量利用的关键瓶颈。文章以长三角地区为中国城市发展的典型案例，识别了地下空间开发面临的地面沉降、岩溶塌陷、崩滑流、采空塌陷、地震及道路下方不当施工引发的道路地面塌陷等主要地质风险，分析其对地下空间规划、建设与运营的影响机理，并指出区域存在深部地质结构认识不足、风险评价体系缺失、工程扰动叠加效应显著及城市群协同不足等突出问题。提出构建多尺度地下空间地质调查体系、建立地质安全约束下的资源评价与准入机制、强化城市群协同规划管控、完善风险监测预警体系、推动科技创新等对策，旨在支撑长三角地区率先形成地下空间高质量开发利用示范区，为国家城市空间治理体系现代化提供战略支撑。

关键词 长三角城市群，地下空间，地质安全，地面沉降，岩溶塌陷，城市韧性，协同规划，风险防控

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20251216009
CSTR 32128.14.CASbulletin.20251216009

1 迈向立体化城市发展的战略必然

地下空间是国家战略性国土空间资源，是应对地面空间紧约束、提升城市治理体系和治理能力现代化的重要载体。地下空间既承担着缓解地表空间约束、提升城市空间利用效率的重要功能，也是城市更新过

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金地质联合基金（U2444220）
修改稿收到日期：2026年1月29日

程中实现功能重构与安全增韧的重点对象。党的二十大提出“实施城市更新行动”，党的二十届四中全会强调“坚持统筹发展和安全”，要求提高公共安全治理水平，完善社会治理体系。地下空间开发应牢固树立安全发展理念，坚持统筹发展和安全，把防范化解重大风险贯穿于规划、建设和运营全过程，将其作为提升城市防灾减灾救灾能力、保障城市“生命线”工程安全运行的重要基础。2025年中央城市工作会议指出，“城市发展正从大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段”[2]，亟须通过优化空间结构、强化基础设施安全保障，化解深层次发展约束。在此背景下，地下空间开发利用已从工程建设领域的技术性议题，转变为关乎国家现代化战略全局的空间治理问题。

长三角作为全国经济最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一，以全国3.7%的国土面积承载约24%的经济总量和16.7%的人口[3]（图1），区域土地开发强度持续攀升，资源环境约束愈发突出。随着《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》《长三角国土空间规划（2023—2035年）》等国家战略部署深入实施，都市圈同城化加速推进、跨区域交通基础设施加快构建，对地下空间这一战略增量资源的需求显著增强。

然而，与深度开发需求同步增长的是区域日益凸显的多类型复合地质安全风险，地下空间施工建设会诱发地质环境负效应，引发地面沉降、塌陷、坍塌等灾害事故[4]。长三角41个城市普遍存在地面沉降、岩溶塌陷、崩滑流、采空塌陷、地震、道路地面塌陷等6类主要地质风险（表1）。其中，上海、徐州、衢州等城市面临多驱动复合型地质安全约束；杭州、嘉兴、湖州等地道路地面塌陷风险突出；南京、镇江等地隐伏岩溶发育强烈；温州、台州等城市存在大规模崩滑流风险；部分沿海城市还面临浅层气导致的灾害链风险。与此同时，66起典型塌陷案例显示，60%由地下工程、管网破损和不当施工诱发，表明地下空间开发强度提升与地质安全风险叠加趋势显著。

表1　长三角各城市主要地质问题统计一览表

Table 1　Statistics of major geological problems in Yangtze River Delta cities

城市	地面沉降	地震	采空塌陷	崩滑流	岩溶塌陷	道路地面塌陷
上海	√					√
杭州			√	√	√	√
宁波						√
温州				√		
嘉兴	√					√
湖州	√		√			√
绍兴				√		√
金华				√		
衢州			√	√	√	

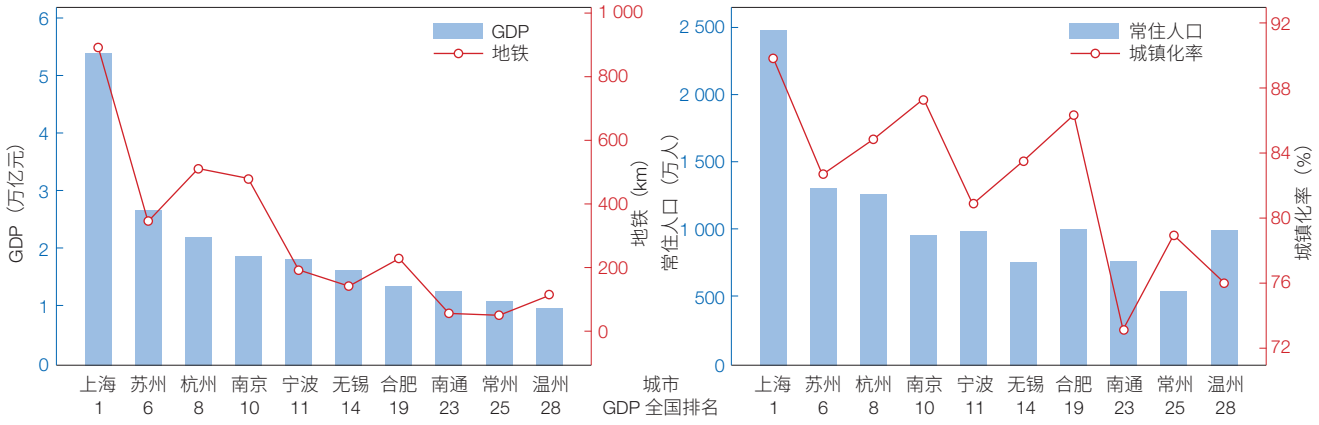


图1　2024年长三角地区主要城市经济社会发展概况

Figure 1　Overview of economic and social development in major cities of the Yangtze River Delta region of 2024

（续表1）

城市	地面沉降	地震	采空塌陷	崩滑流	岩溶塌陷	道路地面塌陷
舟山						
台州			√	√		
丽水				√		
南京			√		√	
无锡	√		√			√
徐州		√	√		√	
常州	√		√		√	√
苏州	√			√		√
南通	√					
连云港						
淮安					√	
盐城	√					
扬州						√
镇江					√	√
泰州	√					√
宿迁		√				
合肥			√		√	
芜湖			√		√	
蚌埠					√	
淮南			√		√	
马鞍山			√		√	
淮北			√		√	
铜陵			√			
安庆						
黄山			√	√	√	
滁州					√	
阜阳			√			
宿州			√		√	
六安						
亳州			√			
池州			√			
宣城			√	√		

注：根据国家自然科学基金地质联合基金（U2444220）成果编制

Note: Data based on results from the Project No. U2444220, supported by the Joint Fund for Geology of the National Natural Science Foundation of China.

在地下空间全面进入深度利用阶段的今天，很多城市地质安全问题都会直接或间接作用到城市地下空间，造成重大损失乃至直接威胁到城市正常运行[5]。如果不能提前识别、精准评估和有效防控地质风险，不仅会制约城市地下空间开发的尺度与深度，更可能危及区域重大基础设施、公共安全和城市韧性。因此，安全是地下空间高质量发展的前提，地下空间建设和运行安全是人民群众生命安全的重要保障[6]，在推进地下空间高质量开发利用过程中，必须坚持地质安全底线思维，将地质调查、风险识别、精准评价和协同管控置于核心位置，实现“在安全基础上的开发”和“以开发促进安全治理”的双向驱动。

本文系统阐述长三角地下空间开发利用的战略意义，辨析区域地下空间开发面临的地质安全约束，提出构建区域协同、地质安全支撑、科技驱动的地下空间高质量开发利用体系等对策，旨在为长三角在全国率先形成地下空间高质量利用示范区提供战略支撑。

2 长三角城市地下空间资源开发利用的重大战略意义

面对城市地面资源逼近“天花板”的现实约束，将城市发展空间由地面及其上部向地下延伸，不仅是空间形态上的被动选择，更是将“空间约束”转化为“发展增量”的主动战略路径。通过系统开发利用地下空间，可在不突破生态与建设边界的前提下，实现城市安全韧性、绿色低碳和运行效率的协同提升，推动城市功能在三维尺度上的结构性重组与优化。

2.1 破解地面土地紧约束，提高城市宜居性与运行效率

长三角地区大城市中心区地面空间已高度饱和，城市功能亟须向地下拓展。例如，上海陆家嘴金融城、南京新街口商圈、杭州武林商圈的开发强度（建筑面积与用地面积之比）普遍在3.0—8.0之间甚至更高，部分标志性建筑单体容积率超过10.0，这意味着

地面空间在二维平面上的建设容量已接近或达到规划极限。此外，城市核心区道路网络即便高度发达，高峰时段拥堵指数仍长期居高不下。大量地面空间被车行道路和静态停车占据，挤压了人行、绿化和公共活动空间，导致地表公共空间严重不足，人均公园绿地面积、广场等开放空间指标，在核心区远低于城市平均水平。面对城市地面资源“天花板”，城市发展空间由地面及其上部空间向地下空间延伸，是世界城市发展的趋势[7]，也成为长三角大城市破解核心区发展困境的唯一系统性出路，是城市功能在三维尺度上的结构性重组与优化。

2.2 拓展城市发展空间，提升综合承载能力

城市地下有大量未被开拓的广阔空间，是拓展城市发展空间，提升综合承载能力的重要载体。通过功能转移与空间置换，将交通、市政、停车及部分公共服务等低附加值或高占地功能设施有序置入地下，可显著释放地面空间资源，为高端产业布局、公共服务提升和城市品质塑造创造条件，从而实现土地要素的高效配置与价值跃升。以上海北外滩地下空间整体开发为例，规划建设规模约50万平方米的立体化地下城，将区域内的交通枢纽、商业服务、市政设施、停车库等大量功能设施置入地下，不仅释放了宝贵的滨江地面空间用于打造世界级公共开放空间，更通过地下连接网络，将割裂的地块整合为统一、高效的“地面-地下”复合功能区，有效提升了核心区单位用地的综合产出效率和高端功能承载能力。南京江北新区中心区地下空间项目，总建筑面积达145万平方米，相当于将200多个足球场面积的设施移入地下，为核心区地面产业功能升级、城市形态优化与生态空间留白提供了坚实支撑，推动城市功能由“规模扩张”向“质量提升”转变①。

2.3 增强防灾减灾能力，强化区域韧性安全体系

长三角地区人口密集、开发强度高，同时面临洪涝、台风、地面沉降等复合型灾害威胁，同时在高密度建成环境下，地面开发面临着工程技术复杂化、经济可行性降低及次生灾害风险加剧等多重困境[8]。开发地下空间成为增强区域防灾减灾能力、筑牢韧性安全体系的关键路径。2024年《自然资源部 住房城乡建设部 水利部 应急管理部关于加强城市地质安全风险防控的通知》（自然资发〔2024〕19号）明确要求高度重视城市工程建设及资源开发等方面的地质安全风险[8]。2025年，国务院关于《长三角国土空间规划（2023—2035年）》的批复中明确要求划定地质灾害、洪涝等风险控制线，落实战略性矿产资源、历史文化保护等安全保障空间，全面锚固高质量发展的空间底线。例如，上海市建设深层排水隧道（苏州河段）等工程，是应对极端降雨、缓解城市内涝的关键工程措施，目前已发挥重要作用。此外，合理规划建设具备防护功能的地下空间，可作为应急避难所、物资储备库和抢险抢修基地，显著提升城市应对突发事件和灾害的“容灾”能力。

2.4 支撑区域一体化交通体系，提升城市运行效率

地下空间开发利用是构建高效、可靠、多层次区域综合交通系统的基石。通过系统规划建设地下轨道交通网络（地铁、市域快线）、地下快速路、综合交通枢纽及连接通道，能极大突破地面空间割裂与交通拥堵的物理瓶颈，实现区域核心节点间的高密度、大容量、准时化连通，直接支撑“一小时通勤圈”等一体化目标。更重要的是，地下交通廊道与地上高铁、城际、航空枢纽无缝衔接，形成立体化交通骨架，能从根本上重塑区域时空关系，促进人才、资本、技术等要素的高速流动与优化配置。同时，结合地下空间

① 郑天文. 南京江北国家级新区中心区超大型地下空间一期建设工程高性能混凝土研究：绿地金融中心500米超高层建筑厚大底板成功浇筑完成. (2021-10-28). https://smse.seu.edu.cn/jc/2021/1028/c24840a387940/page.psp.

实施的“公交导向开发”（TOD）模式，以站点为核心进行高强度、功能混合的地下地上综合开发，能有效引导城市空间结构优化，大幅提升通勤效率与整体运行效能，为区域经济一体化注入强劲动能。

2.5 推动绿色低碳转型，提升城市生态环境质量

地下空间的集约利用本身就是一项根本性的绿色低碳战略。它将大量交通、市政、仓储乃至部分公共服务功能转入地下，直接减少了地面建筑对土地、能源的消耗及热岛效应，为地面腾退出更多空间用于建设公园、绿地、水系等生态基础设施，实现“灰绿空间”的置换，显著提升城市碳汇能力与生态品质。具体而言，大规模的地下公共交通体系直接替代了大量私人机动车出行，是削减交通运输领域碳排放的核心举措；地下综合管廊实现了市政管线集约敷设与智慧管理，减少了反复开挖的“马路拉链”现象，降低了能耗与材料浪费；地下物流、能源储存等系统也能优化城市物流体系、提升可再生能源利用效率。因此，系统性开发地下空间是从空间源头上推动城市发展方式向集约、节能、生态友好转型的关键路径。

2.6 促进城市更新与存量优化，提升公共服务供给能力

*在城市从增量扩张转向存量提质的新阶段，地下空间成为激活老旧城区、弥补功能短板、实现“无感增容”的战略资源。*在建成区，通过合理开发地下空间，可以在避免大规模拆迁、不增加地面容积率的前提下，有效增补停车设施、社区服务、文化体育、商业配套等公共服务功能，直接缓解老城区停车难、活动空间不足等痛点，提升居民生活品质与满意度。结合城市更新项目，统筹建设地下公共空间、连廊和基础设施，能够系统性地整合碎片化的地上空间，打通区域慢行系统，提升城市空间的整体性与活力。这种“向下要空间”的模式，使城市在实现功能升级与风貌保护的同时，保持了适宜的密度与尺度，是推动城市内涵式、可持续更新的精明增长策略。

2.7 提升国土空间治理现代化水平，促进区域协同

*地下空间的系统性开发利用，是对国土空间治理能力现代化的直接检验与提升。*它要求打破行政分割与部门壁垒，在区域层面进行跨城市、跨流域的地下空间资源调查评估、战略规划与协同布局，特别是统筹规划穿越行政边界的地下交通、市政廊道，这本身就是深化区域协同治理的重要实践。在技术与管理层面，它驱动我们必须建立覆盖“调查—规划—建设—运营—更新”全生命周期的法规标准体系，并广泛应用地理信息系统（GIS）、建筑信息模型（BIM）、数字孪生等信息技术，实现地下空间资源资产化管理、三维立体化管控和智慧化运维。这种对隐蔽性、不可逆性资源的精细管控，将倒逼规划、建设、管理各部门形成合力，推动国土空间治理向更加系统化、法治化、智能化的方向发展，为更高水平的区域协同提供坚实的空间治理基础。

3 长三角城市地下空间开发利用面临的主要问题与挑战

3.1 多类型地质安全风险叠加，区域差异性显著

长三角地区第四纪多源沉积地层结构呈现西薄东厚的显著特征，广泛分布有滨海相软土，其中以江苏省的东部沿海地区、上海市和浙江省的大部分地区为主[9]，叠加软土蠕变、砂土液化及人工填土隐患等复杂不良地质条件，构成高风险的地质背景。例如，上海市全新统软土层厚10—30米，含水量超过40%，在荷载下易发生长期固结沉降，在地铁4号线施工期间，软土蠕变导致地下空间毁损，经济损失巨大。而苏锡常地区浅部为粉质黏土粉砂，深部含多层高压缩性淤泥质土，长江古河道区域粉细砂层埋深5—20米，标准贯入击数N=5—10，属严重液化等级。同时，城市建成区人工填土厚度普遍2—5米，杭州部分区域因历史河道回填形成10米厚杂填土，密实度低且含建筑垃圾，易引发差异沉降。巨厚的软土、砂土叠加发育多

层的含水层系统，造成该地区区域性地面沉降、局部地面塌陷、工程事故频发[9]。

基于涵盖了10多个城市的长三角城市群典型城市地质安全问题案例库，研究认为长三角城市地质安全呈现“人为扰动加剧、多灾种链式演化”的特征。整合崩塌、滑坡、地面塌陷等灾害数据，形成包含地点、地质背景、伤亡损失等10项指标的标准化案例库，覆盖上海、南京、杭州等10余个城市，重点聚焦地面塌陷这类高频灾害类型。研究认为长江三角洲地区城市地质安全风险演化呈现出3个特点：① 风险类型从自然因素主导（20世纪80年代岩溶塌陷）向人为活动驱动（2010年后地下工程开发塌陷）演变，城市扩张与地下空间开发成为新致灾因子；② 80%地面塌陷存在“渗漏—潜蚀—空洞”隐性发展过程，区域上又多伴随工程性地面沉降，从隐患形成到突发塌陷平均历时2—3年，传统监测手段难以预警；③ 区域差异显著，上海以软土沉降为主，苏南地区多岩溶塌陷，浙南地区和皖南山区崩滑流密集。

通过多源数据融合与空间建模，量化评价了长三角地面沉降、崩滑流、地面塌陷、地震等地质安全风险（图2）。长三角高风险区具有聚集特征，上海—苏锡常—嘉兴构成地面沉降风险走廊，皖北—苏北形成采空塌陷密集带，浙南—皖南山区崩滑流风险突出。城市区城市地质安全风险呈现人地耦合机制，上海、南通、杭州道路地面塌陷87%集中于中心城区，主因为填土扰动与管网老化。

3.2 城市地下空间开发与地质环境扰动安全风险相互强化

长三角地区高强度、密集化的地下空间开发，与区域地质环境系统形成了显著的动态互馈与风险强化机制[10]。该过程并非简单的“工程扰动-地质响应”线性模式，而是构成了一个涉及应力场、渗流场、化学场、温度场等多物理场深度耦合的非线性动态系统。开发活动打破了地质结构系统原有的动态平衡状态，而系统为寻求新的平衡所产生的系列行为，又反作用于工程结构本身，形成相互强化、风险叠加的恶性循环。以上海市为例，大规模地下工程扰动（如基坑降水、隧道掘进）剧烈改变了区域地下水流场与应力场，引发地面沉降与塌陷等地质灾害问题[11,12]；而嵌入地下的永久性构筑物（如连续墙、桩基）则进一步割裂水文地质单元，固化不利的水文地质环境格局；同时，在该区广泛分布深厚软土层中的施工与运营所产生的循环荷载激活软土体的长期流变与时效变形特性，导致土体性能进一步劣化[13]；施工导致应力场叠加与协同变形，严重威胁既有工程。地下空间开发所导致的地质环境扰动具有链式传导与灾害耦合的特征，单一地质问题可能诱发系统性危机，其孕灾机制、演化过程及成灾模式远超传统地上工程认知范畴。当前，对地下空间综合系统在多场耦合作用下的互馈机理、动态平衡阈值及灾变临界条件等关键科学问题仍认知不清，使得传统静态、孤立的工程风险管理模式面临根本性挑战。

3.3 地下空间地质信息不足，深部结构与风险要素底数不清

长三角地区地质工作程度相对较高，但作为我国率先尝试深层地下空间开发的地区（如开挖深度达58米的上海苏州河深层排水调蓄工程[14]，51米的南京江北新区地下空间工程等），为满足城市地下洪水调蓄、洪水排涵、地下存储、垃圾输运、深层资源开采甚至人防和国防要求，需要更深、更系统的地质信息。长三角地区位于扬子板块与华北板块的交汇地带，地质构造基底由多期次沉积层叠加而成，形成复杂地质结构。区域内经历多期构造运动，存在多条隐伏断裂带，导致基岩面起伏剧烈，为差异性沉降等灾害埋下隐患；区内饱和砂土层、软土等不良土体的广泛分布增强了地面沉降、地面塌陷等地质灾害的易发性。针对这些情况，目前全区域的调查缺乏系统性，专业监测设备也未能全面布设，导致地面沉降、地面塌

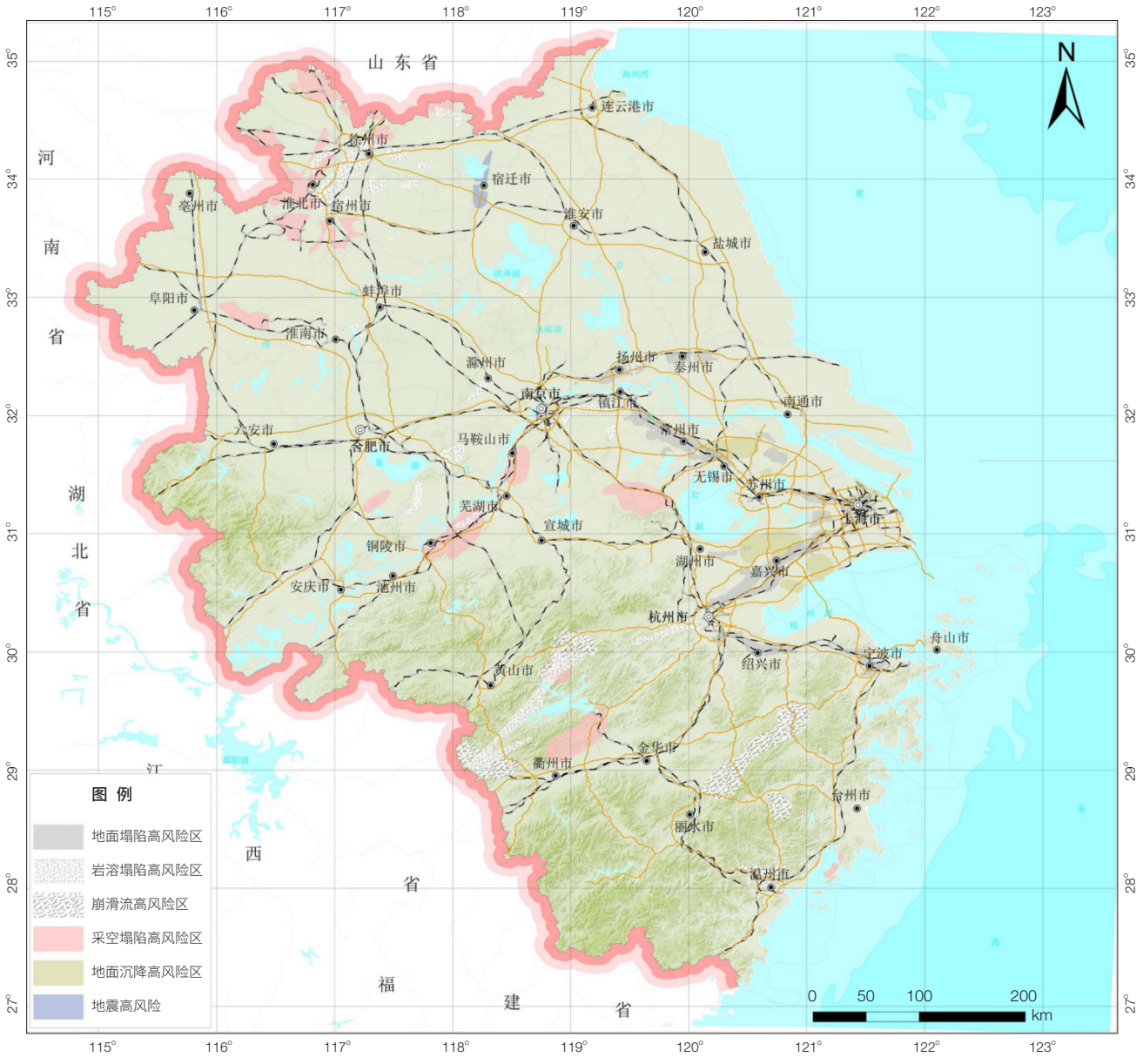


图 2　长三角城市地质问题高风险区分布图

Figure 2　Distribution map of high-risk areas for various geological issues in the Yangtze River Delta region

根据国家自然科学基金地质联合基金（U2444220）成果编制

Prepared based on results from the Project No. U2444220, supported by the Joint Fund for Geology of the National Natural Science Foundation of China

陷等隐患的实时监测存在空白区域。山区及沿海地带隐蔽性强的地质灾害点依赖人工巡查和群测群防[15]，但基层人员专业技能不足，信息化装备配备率低，影响隐患识别的及时性和准确性，深部结构与风险要素底数不清。

目前，江苏、浙江、安徽、上海等在地质调查标准、评价监测体系和应急响应流程上仍存在差异。例如，地质灾害危险性评估缺乏统一的量化标准，部分地区仍依赖定性分析，影响跨区域风险评估的客观性和可比性。数据的分散及不统一使得地下空间地质信

息不足，难以实现高精准应用[16]。

3.4 地质风险评价体系不完善，城市群层面协同不足

当前，长三角部分城市虽已启动地质风险调查与评价工作，并形成了初步的地质风险评价体系，但未能推广应用到全区，在评价结果的应用方面也不够完善，未能充分融入城市规划体系[17]，导致地质约束在空间布局和工程设计中“缺位”。例如，地质调查评价成果（如地质灾害易发区划分、资源环境承载力评估）与国土空间规划、专项规划缺乏有效对接。城市扩张或重大工程选址时，未优先避让高风险地质区域，反而在隐患区集中布局居住或产业项目，加剧潜在安全风险。

城市群层面地质风险管控的协同性不足，主要体现在跨部门、跨区域联动机制的缺失：地质调查、规划编制、工程建设分属不同部门管理，缺乏统一协调平台。同时，城市群内各城市地质数据共享不足，跨行政区的地质灾害链（如滑坡影响下游城市）难以联合防控。部分地区虽建立监测预警系统[18]，但预警信息未实时推送至规划、交通等部门，延误应急响应。

3.5 科技支撑不足

（1）深部地质条件精细探测与表征能力不足，核心装备技术亟待突破。随着开发深度增加，地质环境复杂性和不确定性显著增强[19]。当前深层地下空间勘察仍以传统钻探和常规地球物理方法为主，在探测分辨率、深度及隐伏不良地质体精准识别方面存在明显局限。针对长三角地区普遍存在的深厚软土结构变异、深部承压含水层系统精细刻画及隐伏活动断裂监测等问题，尚缺乏经济高效的高精度原位探测技术与装备。高端地球物理仪器、智能钻探及原位测试设备对进口依赖度高，数据处理与解释能力不足，制约了深部地质条件“透明化”认知水平，影响重大地下工程选址与设计的安全性和优化程度。

（2）智能化建模、风险预警与决策支持的理论与工具基础薄弱。地下空间属于多场耦合的动态复杂系统，但现有数字化、智能化应用仍停留在初级阶段。三维地质建模多为静态表达[20]，受数据精度限制，难以有效刻画岩土体参数空间变异性和地质过程的时空演化，尚不足以支撑真正的“数字孪生”[21]。同时，深层开挖引发的地面沉降、岩溶塌陷、软土流变及多工程扰动叠加效应等灾害机制研究不充分，缺乏基于多源监测数据融合和机器学习的动态预警模型[22]。现有安全评价仍以经验公式和静态分析为主，难以实现灾害风险的前瞻性预警与过程调控。

（3）跨学科交叉融合与协同创新机制有待加强。地下空间高质量开发涉及地质、岩土工程、规划、交通、环境、信息技术及公共管理等多学科协同，但当前仍存在学科壁垒和行业分割[23,24]。基础地质调查成果与工程设计衔接不足，规划与地下空间开发在目标、尺度和数据标准上不统一，导致地上地下空间统筹不够。高校、科研院所、企业与政府之间尚未形成高效稳定的“产学研用政”协同机制，使技术研发多聚焦单一环节，缺乏贯通“地质认知—风险评估—规划管控—工程实施—智能运维”的系统性技术体系，难以支撑区域尺度地下空间协同开发与安全管控。

3.6 规划统筹性不足导致碎片化开发问题突出，制约整体效能

当前，长三角区域地下空间开发在规划层面面临的核心挑战是缺乏一个权威、刚性与弹性相结合的跨区域、跨层级统一规划体系。各城市的地下空间规划多以自身行政辖区为界，属于城市总体规划下的专项规划，虽在市级层面有一定统筹，但一旦涉及跨市域的连接线、衔接枢纽或共同廊道，如城际地铁对接段、跨区域综合管廊等，便极易出现规划目标、技术标准、建设时序上的错位与脱节。例如，某市规划的地铁线路希望在边界处与邻市对接，但邻市相应线路的规划可能尚在雏形或走向不符，导致“断头路”或艰难的后期协调。

即使在单一城市内部，规划衔接不畅的问题也普

遍存在。城市总体规划、地下空间专项规划、交通规划、市政规划、人防规划及各重点片区的控制性详细规划之间，缺乏有效的“多规合一”协同机制。这导致地下空间的功能布局常出现冲突。例如，市政管线廊道与地下商业开发空间重叠，或深层地下空间预留的竖向发展序列被浅层项目意外阻断。更深层次的问题在于，大多数规划仍停留在二维或简单分层的思维，对地下空间作为连续、复杂三维实体的特性考虑不足，缺乏前瞻性的分层开发导则和重要战略资源的预控，导致宝贵的深层空间资源被浅层、低效开发过早占用，形成“空间割裂”和“未来锁定”效应，为长远的系统性、网络化开发埋下隐患。

3.7 管理机制不健全与协同治理能力薄弱制约可持续运营

如果说规划是蓝图，那么管理就是确保蓝图落地的制度保障。

（1）长三角地区在地下空间管理上面临的挑战更为复杂，首当其冲的是权属界定与产权登记的制度性缺失。《中华人民共和国民法典》虽明确了建设用地使用权可在地下设立，但如何科学划分竖向边界、如何界定公共地下空间（如连接通道）与私有产权地块下方空间的权责关系、如何办理三维不动产权登记等，尚缺乏清晰、统一、可操作的法律细则。这直接导致了投资主体权益保障不足，社会资本进入犹豫，也引发了后期运营中安全管理责任难以厘清的问题。

（2）管理体制条块分割，协同治理能力薄弱。地下空间涉及自然资源、住建、交通、人防、应急、市政等多个部门，在现行体制下，“九龙治水”现象突出。一个地下综合体项目，可能面临规划、用地、施工、消防、运营等多个环节的审批，标准不一、程序复杂、周期漫长。各部门往往从自身职能出发，缺乏一个强有力的常设协调机构进行统筹决策与全过程监管。此外，市场化运作模式不成熟也是关键短板。地下空间开发投资巨大、回报周期长，目前仍严重依赖政府主导和财政投入。如何在保障公共安全与公共利益的前提下，设计合理的“投资—建设—运营”（BOT、PPP等）模式，明确政府与市场主体的权责利边界，建立公平透明的收益分配与风险共担机制，仍是亟待探索的课题。管理机制的滞后，使得许多已建成的地下空间设施面临运营效率不高、维护资金不足、品质难以持续提升的困境。

3.8 区域发展不均衡与协同开发壁垒阻碍一体化进程

长三角三省一市之间，以及各省内部不同能级城市之间，在地下空间开发的理念、阶段、财力、技术能力上存在显著差距。上海、南京、杭州等核心城市已进入网络化、深层化、综合化开发的高级阶段，而不少中小城市仍处于满足基本停车和市政功能的初级阶段。这种发展的“势差”本身是客观规律，但问题在于缺乏有效的协同机制来弥合差距、实现互补。

最直接的体现是城际地下交通网络的“硬连接”不足。尽管长三角高铁网络举世瞩目，但体现同城化深度的市域（郊）铁路、地铁在跨市界衔接上仍存在大量空白或“最后一公里”障碍。这背后不仅是技术问题，更是规划协调、投资分摊、运营收益分配等复杂的利益协调问题。同样，对于区域性的大型跨市域地下基础设施，如区域备用水源储库、战略物资储备库、超高压电力隧道等，其共建共享共维的机制远未形成。各城市往往倾向于自建自用，从区域整体安全与效率角度看，这造成了重复投资和资源利用效率低下。

更深层的壁垒在于行政边界带来的无形阻隔。跨行政区项目的成本共担与收益分享缺乏法定依据和协商平台。地方政绩考核机制也促使地方政府更关注辖区内的显性项目，对跨区域、打基础、利长远的地下战略性工程缺乏足够动力。这种行政壁垒，使得长三角地下空间难以像地面交通网络那样，真正按照区域一体化的经济地理规律进行最优配置和系统构建，制约了区域整体竞争力的进一步提升。

4 推进长三角城市地下空间高质量开发利用对策

总体来看，长三角地下地质条件复杂，存在厚层软土、岩溶、浅层气、活动断裂等多种地质风险且跨省、市间的协调机制不完善，制约了地下空间大规模、系统性、安全性的开发利用。因此，推进其高质量开发利用，应以地质安全为基石，以协同规划为引领，以科技创新和制度创新为双轮驱动（图3）。

4.1 构建多尺度、多类型的地下空间地质调查体系

（1）建立不同尺度下的分级地质调查体系。城市群尺度应开展区域性宏观地质背景与重大地质问题调查。重点查明区域性地层结构、主要活动断裂分布、区域性含水层系统、历史地面沉降漏斗分布、大型岩溶发育带及采空区范围等，评估其对跨区域重大地下工程的潜在影响，为区域总体战略规划提供依据。中心城市尺度应开展针对性的工程与水文地质详细勘查。聚焦城市密集区、重要经济带和规划重点开发区，查明工程地质层组划分、不良地质体分布（如古河道、暗浜等）、地下水化学特征与腐蚀性、岩土体物理力学参数，服务于城市总体规划和地下重大基础设施选址。中心城区尺度应实施高精度的勘查与监测。采用钻探、物探（如高密度电法、微动勘探）、原位测试等手段，精细刻画地层结构与不良地质体分布区域，获取关键土层的基础参数、力学指标等，为场地工程建设提供坚实基础地质数据支撑。

（2）实施关键地质风险因子的全要素普查。长三角地区软土层、隐伏岩溶、采空区及浅层气等多种不良地质体分布广泛。调查工作需从单一的工程地质勘察向多要素综合调查转变。重点查明软土层的流变特性、分布区域与厚度；精准圈定岩溶发育区的溶洞位置与充填状况；详细探测开采遗留采空区边界；运用

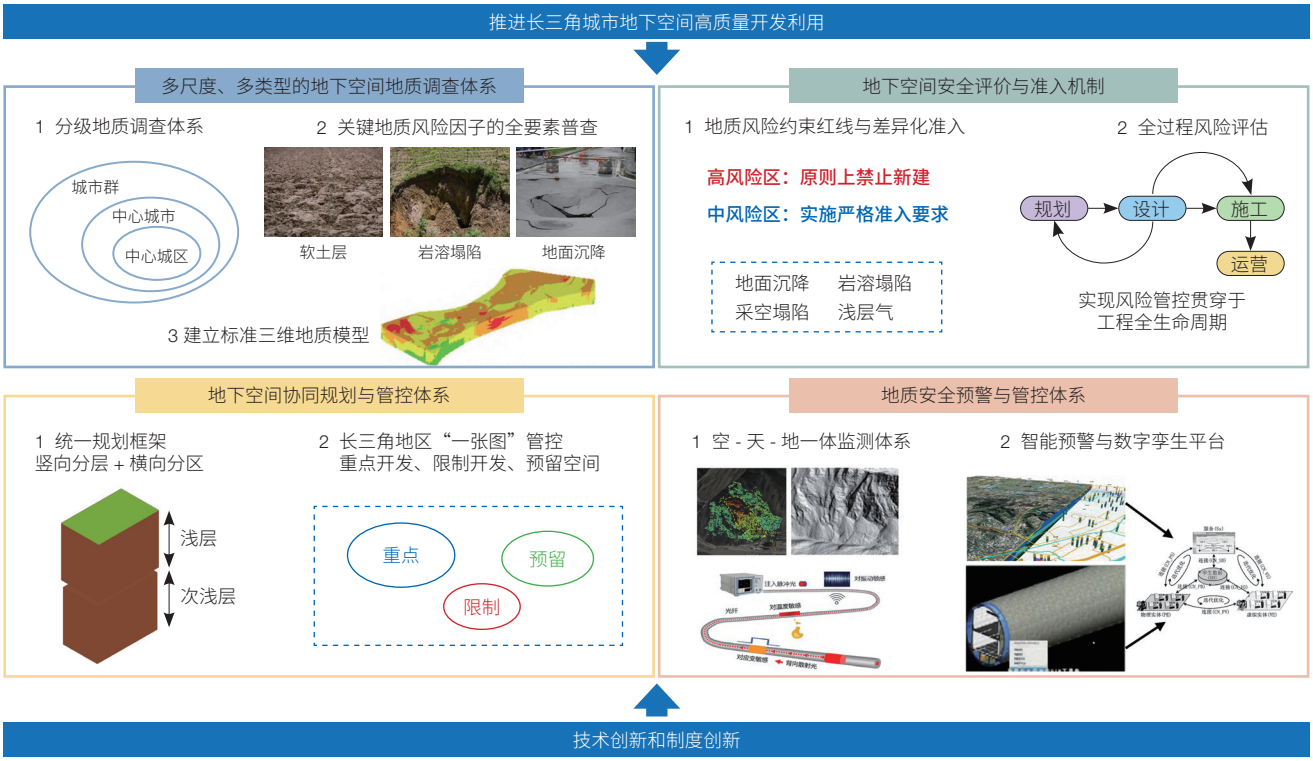


图3 长三角城市地下空间高质量开发利用的对策建议[11-14]

Figure 3 Policy recommendations for high-quality development and utilization of underground space in Yangtze River Delta cities[11-14]

高精度地球物理手段，查明浅层气的赋存层位与气压特征，防止工程施工中发生气体突涌或爆炸事故；同时查明地下水含水层结构及断裂构造的活动性，彻底摸清地质风险底数。

（3）建立标准三维地质模型，实现资源与风险立体可视化。传统二维地质图件已无法满足复杂的地下空间开发需求，必须构建统一标准的三维地质模型与地下空间资源图谱。在统一调查基础上，制定长三角区域统一的地层编码、数据格式与建模技术标准。进而整合多源数据并构建多尺度、可动态更新的三维地质模型，以此为基础生成地下空间可利用资源分布图和地下空间开发地质风险分区图，实现地下空间透明化。

4.2 建立面向地质风险的地下空间安全评价与准入机制

（1）设立地质风险约束红线与差异化准入条件。将地质安全约束前置，贯穿于地下空间开发的全生命周期。对于高风险区（如岩溶强发育带、采空区密集区），原则上应避免新建大型地下工程，确有需要的应进行详细勘察评估、可行性论证并制定专项防控措施。中风险区实施严格的准入要求。例如，针对地面沉降影响区，应限制开发区位，设立软土层厚度、含水层数量、近5年地面累计沉降量、年均沉降速率等准入指标；针对岩溶塌陷影响区，应明确施工前期勘察密度、溶洞处理标准及运营期监测要求；针对采空塌陷影响区，应限制开发范围，对中深层的开发需进行稳定性专项论证与长期监测；针对活动断裂带，应划定足够安全的工程避让区；针对浅层气潜在富集区，应规定泄压排放或隔离保护措施。将上述高风险区域划定为“地下空间地质约束红线”，纳入国土空间规划强制性内容，实行负面清单管理，对上述中风险区，在“约束红线”之外实行差异化准入条件与专项管控，确保地下空间的安全开发。

（2）推行全过程风险评估与规划融合机制。确保所有地下工程项目在不同阶段必须进行专项地质安全风险评估，并将量化评估报告作为工程审批要件，实现风险管控贯穿于规划、设计、施工、运营全生命周期。通过法规或规范确保地下空间专项规划前地质安全适宜性评价的开展，提升对重大地质风险的响应能力。

4.3 构建城市群层面的地下空间协同规划与管控体系

（1）统一规划框架，实施分层分区引导。编制长三角城市群地下空间区域协同发展规划纲要，明确战略目标与总体格局。在此基础上，建立统一的竖向分层体系，界定各层主导功能；并实施横向分区管控，根据地质条件和地面功能划定重点开发区、限制区等，制定差异化的开发强度与控制指标。在编制区域协同规划纲要、建立分层分区体系时，必须确保其作为一项关键专项规划，与长三角各级国土空间总体规划进行强制性衔接，将核心指标与管控要求逐级传导至详细规划层面。同时，为切实支撑基础设施一体化，必须率先统一跨区域的地下空间规划技术标准与接口规范，并对城际地下通道、管廊等战略性廊道实施严格的坐标、标高与断面预控，为未来互联互通预留刚性条件。

（2）推进设施互联互通与“一张图”管控。重点统筹规划长三角地区跨省域、市域的地下交通、综合管廊、市政管网及战略性储运设施，确保在开发线位、设计标高、技术标准和建设时序上的有序衔接。同时，集成三省一市的规划、地质、产权及建设项目信息，构建长三角地下空间规划建设管理“一张图”平台，以支持跨区域的项目冲突协调、资源统筹与协同决策。

4.4 完善地质安全预警与管控体系

（1）加密监测网络，构建立体监测体系。基于前期地质调查成果，优化并加密覆盖地面沉降与地裂缝、岩溶、浅层气分布区以及重大工程沿线的监测网络。综合运用干涉合成孔径雷达（InSAR）、激光探测

及测距系统（LiDAR）、分布式光纤传感等多种技术手段，构建“空-天-地”一体化的立体监测体系，实现对关键地质参数和建设工况的实时、精准感知。

（2）建设智能预警平台与数字孪生系统。基于监测数据与地质实体模型，建立地面沉降、塌陷等风险的智能预警模型，实现风险分级预警与信息实时发布。同时，融合三维地质模型、建筑信息模型（BIM）与数字信息平台，构建重点区域与重大工程的数字孪生系统，用于安全状态的实时诊断、风险演化模拟推演与应急处置方案仿真，提升动态管控与科学决策能力。

4.5 推动技术创新和制度创新

（1）攻关核心技术，推动技术创新。① 攻关地下空间地球物理精细探测技术，突破联合反演技术瓶颈，实现地下空间高分辨率的精细刻画与表征；② 攻关地下空间智能建模与数字孪生灾害预警技术，实现地下空间结构单元三维定量表征及不确定性评价，基于数字孪生系统进行工况模拟并实现实时灾害预警；③ 攻关深层地下空间开发地质灾害孕育机制及预警判据，揭示深层地下空间开发致灾机制，构建灾害发生发展敏感特征参数的预警判据。

（2）明确责任分工，推进制度创新。① 健全地下空间权属与管理法规体系。推动制定长三角区域地下空间开发利用管理条例，统一界定地下空间权属登记规则、分层设立使用权标准、纵向边界划分原则。明确地质风险责任主体（勘察、设计、施工、运营、监测各单位责任边界），建立覆盖全生命周期的工程安全管理制度[25]。② 健全风险分担与协同治理机制。鉴于地下工程的高风险性，还应构建地下空间开发地质灾害强制保险制度，引入市场化风险分担机制并探索建立跨区域地下空间开发的利益共享机制、成本分担机制与地质生态补偿机制。③ 完善协同治理机制，强化区域联防联控。建立跨省市的地质灾害应急联动、信息通报、联合执法机制。同时成立由自然资源、住建、交通、应急等多部门专家组成的地下空间安全发展顾问委员会，指导重大政策协调与技术审查。在制度创新中，需同步创新投融资与运营模式。探索“政府引导、市场运作、专业运营”的机制，针对经营性项目设计合理的PPP等合作模式与收益机制，并设立地下空间发展基金，吸引社会资本参与。关键是要在项目前期明确长期运维的资金来源与专业运营主体，形成可持续的“投资—建设—运营”闭环，保障设施全生命周期的健康运行与效能发挥。

4.6 践行绿色低碳开发，构建可持续地下空间体系

在推进长三角城市地下空间高质量开发利用的进程中，必须将绿色低碳与可持续发展理念贯穿于规划、建设、运营的全生命周期。

首要对策是系统降低开发活动本身的环境影响。应在规划阶段即开展精细化的环境承载力评估，明确生态敏感区域与保护红线。在施工环节，需严格落实施工降水回灌与地下水环境实时监测，确保地下水资源不受破坏；同时，必须对受污染场地土壤进行先治理后开发，阻断污染物迁移扩散。大力推广装配式结构、精准微扰动开挖、渣土资源化利用等绿色建造工艺，最大限度减少能耗、排放与周边干扰。

核心路径在于强化低碳技术应用与智慧运营管理，实现地下空间自身的节能降碳。应强制推行绿色建筑标准，规模化应用高效节能照明、智能通风与空调系统，并利用地道风、余热回收等被动式技术调节环境。通过建设区域能源地下管网、分布式储能设施，助力城市能源结构优化。更重要的是，依托物联网与人工智能技术，构建智慧管控平台，实现对能源消耗、室内环境质量的实时监测与动态优化，大幅提升地下空间整体能效。这一系列从源头防控到全过程降碳的举措，是地下空间开发支撑区域实现“双碳”目标不可或缺的关键实践。

5 结论与展望

党的二十届四中全会审议通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》提出“建设创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧的现代化人民城市”。《国务院办公厅转发生态环境部〈关于建设美丽中国先行区的实施意见〉》（国办函〔2025〕2号）提出“持续建设长三角区域高水平保护推动高质量发展样板区”。长三角城市群在全国现代化建设格局中具有举足轻重的战略地位。面对地面空间开发强度高、城市功能复杂度攀升、公共安全要求提升等新形势，地下空间正成为支撑区域城市更新、提升空间效率和保障城市韧性的关键战略资源。但区域多类型、广分布、强扰动的地质风险，使地下空间开发呈现出显著的安全约束，地质安全已成为决定开发深度、开发边界和开发模式的核心变量。

地面沉降、岩溶塌陷、崩滑流、采空塌陷、地震和道路地面塌陷等风险在长三角集中叠加，与人口密集、工程密集的城市空间高度耦合；同时，地下工程施工、地下水变化、软弱地层等因素进一步放大了地质风险的不确定性与复杂性。若不能实现对地质环境的科学认知和对风险的系统管控，地下空间开发不仅难以支撑城市更新和基础设施体系建设，甚至可能引发城市安全隐患，削弱城市群整体韧性。

未来长三角地下空间高质量开发的根本路径，在于坚持地质安全的前提性和基础性地位，把地质工作作为规划编制、工程建设和运营管理的共同起点。只有通过高精度地质调查构建可靠底板，通过监测预警体系掌握动态风险，通过科技创新提升认知深度与治理能力，才能实现“以地质安全保障空间安全”，推动地下空间从分散式开发走向系统性、协同化、可持续的现代治理模式。

在这一进程中，长三角完全有条件、有责任率先形成地下空间开发利用的新范式，为全国城市群高质量发展探索新路径、提供新经验，并为中国式现代化构建安全、高效、韧性的城市空间体系作出战略性贡献。

参考文献

1 彭芳乐. 高质量推动城市地下空间开发利用. 国家治理, 2025, (19): 70-76.
Peng F L. High-quality promotion of urban underground space development and utilization. Governance, 2025, (19): 70-76. (in Chinese)

2 中央城市工作会议在北京举行 习近平发表重要讲话 李强作总结讲话 赵乐际王沪宁蔡奇丁薛祥李希出席会议. 人民日报, 2025-07-16(01).
The central urban work conference was held in Beijing, Xi Jinping delivered an important speech, Li Qiang gave a concluding speech, Zhao Leji, Wang Huning, Cai Qi, Ding Xuexiang and Li Xi attended the conference. People’s Daily, 2025-07-16(01). (in Chinese)

3 孙兰, 张琪, 陈瑜婷. 长三角地区城市经济韧性水平测度及空间特征分析. 江苏科技信息, 2025, 42(19): 121-125.
Sun L, Zhang Q, Chen Y T. Measurement of urban economic resilience level and spatial characteristics analysis in the Yangtze River Delta region. Jiangsu Science and Technology Information, 2025, 42(19): 121-125. (in Chinese)

4 易荣, 刘俊卿. 我国城市地下空间开发利用存在的问题及应对建议. 新华智库研究, 2024, (3): 68-71.
Yi R, Liu J Q. Challenges in urban underground space development and utilization in China and countermeasures. Xinhua Institute Research, 2024, (3): 68-71. (in Chinese)

5 王睿, 窦帆帆, 李云峰, 等. 城市地下空间地质安全风险三维评价方法与实践. 地质与勘探, 2024, 60(1): 185-196.
Wang R, Dou F F, Li Y F, et al. 3D evaluation method and practice of geological safety risk for urban underground space. Geology and Exploration, 2024, 60(1): 185-196. (in Chinese)

6 钟茂华. 发展地下空间安全科学, 构筑重大工程安全屏障. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(3): 413.
Zhong M H. Develop safety science for underground space,

construct safety barrier for major engineering project. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2025, 65(3): 413. (in Chinese)

7 田聪, 苏晶文, 倪化勇, 等. 城市地下空间资源评价进展与展望. 华东地质, 2021, 42(2): 147-156.
Tian C, Su J W, Ni H Y, et al. Progress and prospect of urban underground space resources evaluation. East China Geology, 2021, 42(2): 147-156. (in Chinese)

8 王威, 朱峻佚, 王国盛, 等. 城市地下空间“平急两用”规划建设思路与路径研究. 中国工程科学, 2025, 27(4): 82-94.
Wang W, Zhu J Y, Wang G S, et al. Urban underground space planning idea and path based on a “dual-use” concept. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 82-94. (in Chinese)

9 于伟, 折学森. 长江三角洲区域性软土路基沉降特性研究. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 102-108.
Yu W, Zhe X S. On the particular settlement features of the soft soil subgrade in the area of Yangtze River Delta. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(6): 102-108. (in Chinese)

10 胡志平, 彭建兵, 张飞, 等. 浅谈城市地下空间开发中的关键科学问题与创新思路. 地学前缘, 2019, 26(3): 76-84.
Hu Z P, Peng J B, Zhang F, et al. The critical issues and creative concepts in the development of urban underground space. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 76-84. (in Chinese)

11 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36.
Zheng G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36. (in Chinese)

12 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 1-25.
Wang W D. Analytical methods and controlling techniques for deformation and environmental influence of deep excavations in soft soils. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 1-25. (in Chinese)

13 冷建, 叶冠林, 刘学增, 等. 循环荷载对上海软土动力特性影响规律的试验研究. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1049-1052.
Leng J, Ye G L, Liu X Z, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of Shanghai soft clay subjected to cyclic loading. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1049-1052. (in Chinese)

14 孙立飞, 周凌安. 城市深层排水隧道工程适用性研究// 第四届防汛抗旱抢险新技术、新产品应用研讨会论文集. 北京: 中国防汛抗旱, 2025: 85-90.
Sun L F, Zhou L A. Research on the applicability of urban deep drainage tunnel engineering// Proceedings of the Fourth Symposium on the Application of New Technologies and Products for Flood Control and Drought Relief. Beijing: China Flood & Drought Management, 2025: 85-90. (in Chinese)

15 彭伟. 水文地质和工程地质在地质灾害防治工程中的应用. 城市建设, 2025, (25): 92-94.
Peng W. Application of hydrogeology and engineering geology in geological disaster prevention engineering. City Construction, 2025, (25): 92-94. (in Chinese)

16 宋小刚. 煤矿地质测量空间信息系统及关键技术的研究. 能源与节能, 2025, (5): 42-45.
Song X G. Coal mine geological survey spatial information system and key technologies. Energy and Energy Conservation, 2025, (5): 42-45. (in Chinese)

17 许晓旭, 任思远, 殷世旭. 大数据统计分析在城市规划建设中的应用. 科技与创新, 2025, (21): 226-229.
Xu X X, Ren S Y, Yin S X. Application of big data statistical analysis in urban planning and construction. Science and Technology & Innovation, 2025, (21): 226-229. (in Chinese)

18 陈云鹏, 吴比. 乌东德水电站库尾水环境监测预警系统构建研究//《水资源保护》创刊40周年学术交流会暨2025(第十三届)水生态大会论文集. 南京: 河海大学, 2025: 783-789.
Chen Y P, Wu B. Research on the construction of water environment monitoring and early warning system at the tail reservoir area of Wudongde Hydropower Station// Academic Exchange Conference for the 40th Anniversary of Water Resources Protection and the 13th Water Ecology Conference (2025). Nanjing: Hohai University, 2025: 783-789. (in Chinese)

19 李鹏, 罗玉钦, 田有, 等. 深部地质资源地球物理探测技术研究发展. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2011-2033.

Li P, Luo Y Q, Tian Y, et al. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2011-2033. (in Chinese)

20 钮强. 基于三维地质建模技术的煤矿隐蔽致灾因素透明化实现方法. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(11): 213-215.
Niu Q. Realization methods for transparency of hidden disaster-causing factors in coal mine based on 3D geological modeling technology. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2025, 51(11): 213-215. (in Chinese)

21 曾仕琪, 苏栋, 龚浩锋, 等. 数字孪生技术在城市地下空间运维阶段的应用与研究进展. 隧道建设(中英文), 2025, 45(1): 57-76.
Zeng S Q, Su D, Gong H F, et al. Application of digital twin technology in operation and maintenance of urban underground space and its research progress. Tunnel Construction, 2025, 45(1): 57-76. (in Chinese)

22 韩凯航, 黎俊轩, 陈湘生, 等. 超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略研究. 中国工程科学, 2025, 27(4): 95-105.
Han K H, Li J X, Chen X S, et al. Development strategy for intelligent resilience of underground space system in megacities. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 95-105. (in Chinese)

23 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战. 地学前缘, 2019, 26(3): 22-31.
Zhu H H, Ding W Q, Qiao Y F, et al. Issues and challenges in urban underground space utilization in China. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 22-31. (in Chinese)

24 吴立新, 刘帝旭, 杨洋, 等. 论城市地下空间资源评价:现状与未来. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 35-49.
Wu L X, Liu D X, Yang Y, et al. On the assessment of urban underground space resources: Actuality and future. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 35-49. (in Chinese)

25 葛伟亚, 王睿, 张庆, 等. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想. 地质通报, 2021, 40(10): 1601-1608.
Ge W Y, Wang R, Zhang Q, et al. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1601-1608. (in Chinese)

Strategic path for high-quality development of urban underground space in the Yangtze River Delta region under geological safety constraints

GE Weiya* WANG Rui LI Yunfeng HUA Jian YANG Yang

（1 Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;
2 Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, China）

Abstract As one of China's most dynamic economic regions, the Yangtze River Delta (YRD) has approached the upper limit of surface land development, making underground space a critical strategic resource for urban renewal, compact spatial restructuring, and resilient city construction. Nevertheless, rapid expansion of underground development, combined with increasingly tight surface constraints, has led to the superposition of multiple geological hazards, which has become a key bottleneck restricting high-quality underground space utilization in the YRD. Based on comprehensive geological safety assessments of YRD cities, this study identifies

*Corresponding author

six major geological risks, namely, land subsidence, karst collapse, landslides and debris flows, mining-induced subsidence, earthquakes, and road ground collapse, and analyzes their impacts on underground space planning, construction, and operation. Key challenges include insufficient understanding of deep geological structures, inadequate risk assessment systems, significant engineering-induced disturbances, and weak regional coordination. Correspondingly, this study proposes a set of policy recommendations: establishing multi-scale geological survey systems for underground space, developing resource evaluation and access mechanisms under geological safety constraints, enhancing region-wide collaborative planning and regulation, improving risk monitoring and early-warning capabilities, and fostering technological innovation. These strategies will support the YRD in becoming a national demonstration zone for high-quality underground space development and contribute to the modernization of China's urban spatial governance.

Keywords Yangtze River Delta, underground space, geological safety, land subsidence, karst collapse, urban resilience, coordinated planning, risk prevention and control

葛伟亚 中国地质调查局南京地质调查中心教授级高级工程师，自然资源部城市地下空间探测评价工程技术创新中心主任。主要研究领域：城市地下空间探测评价、城市地质发展战略等。E-mail: gewy@mail.cgs.gov.cn

GE Weiya Ph.D. in geological engineering, professor of Nanjing Center, China Geological Survey and director of the Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, Ministry of Natural Resources. His research focuses on urban underground space exploration and evaluation, urban geological development strategy, etc.
E-mail: gewy@mail.cgs.gov.cn

■责任编辑：张帆