

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.12.005

引文格式: 董杰, 孙萍, 张鹏, 周大永, 李兰俊, 于鹏. 2024. 青岛市地下空间开发建设: 进展与展望[J]. 华东地质, 45(3): 264-280. (DONG J, SUN P, ZHANG P, ZHOU D Y, LI L J, YU P. 2024. The progress and prospects of underground space development and construction in Qingdao[J]. East China Geology, 45(3): 264-280.)

青岛市地下空间开发建设: 进展与展望

董杰^{1,2}, 孙萍^{1,2}, 张鹏³, 周大永⁴, 李兰俊⁵, 于鹏^{1,2,6}

(1. 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东 青岛 266101; 2. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 山东 青岛 266101; 3. 青岛青咨工程咨询有限公司, 山东 青岛 266100; 4. 中国冶金地质总局青岛地质勘察院, 山东 青岛 266109; 5. 山东全程通项目管理有限公司, 山东 青岛 266100; 6. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055)

摘要: 城市地下空间开发是解决“城市病”的重要途径, 且开发不可逆转, 需要总结经验, 综合统筹开发。青岛市地下空间开发趋向成熟, 但缺乏对开发现状的梳理、总结及研究, 影响了地下空间的高效开发进程。文章厘清了青岛市地下空间发展历程, 全面总结了地下空间各功能开发建设现状和研究进展, 分析了青岛市地下空间开发的特点和存在的问题, 提出青岛市地下空间开发一体化规划、建设和管理的重点, 明确了城市高质量发展、资源与环境对地下空间开发的需求和支撑, 指出了“透明青岛”的建设趋势。该研究对科学合理利用地下空间、推进青岛市地下城市建设具有重要意义。

关键词: 城市地下空间; 青岛市; 发展历程; 开发利用规划; 空间资源潜力

中图分类号: TU984.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)03-264-17

随着全球城市化进程加快, 城市人口不断增长, 预计到 2050 年, 70% 的人口将居住在城市, 这将导致人们对城市基础设施的需求持续增加 (Broere, 2016)。城市横向发展受限, 地下空间的综合开发利用将成为解决这一问题的有效途径之一。国内外发达城市地下空间 (例如: 伦敦和上海的地铁系统、马德里的地下高速公路、蒙特利尔和多伦多的地下行人系统以及巴黎卢浮宫等) 的利用, 不但具有缓解交通拥堵和土地利用紧张、保护历史遗产以及减少地上环境噪音与环境污染等功能, 同时也具备防灾、存储、供能、文化及娱乐等作用 (Broere, 2016; Cui et al., 2021)。因此, 城市地下空间开发可以在不对地表环境产生负面影响的情况下, 实现城市更新和可持续发展。

青岛市位于中国东部沿海, 在国家及山东省的空间经济配置布局体系中发挥了重要作用。随

着青岛市的快速发展和大面积扩张, 土地资源短缺、地价上涨和商业中心交通拥堵严重等问题层出不穷, 限制了城市空间功能的提升 (Ma and Peng, 2018)。因此, 城市地下空间的开发利用成为解决这些问题的必要途径。近 20 年来, 青岛市地下空间开发高速发展, 取得了显著成果, 特别是地铁建设以来, 地下空间开发建设飞跃发展, 开发量居山东省前列。地铁、隧道的建造技术和装备也得到了升级, 建设了地铁 1 号线、海底隧道和第二海底隧道等独具青岛特色的地下空间轨道交通设施 (李志强等, 2023; 王守慧等, 2023)。同时, 轨道交通站点周边的地下商业, 如栈桥 PARKCITY、李村维客广场、中防商业街、新都心美思佰乐地下商业街、市北 CBD 中央广场以及青岛北客站地下广场等, 均得到了综合开发。青岛市地下空间开发的相关研究也取得了丰硕成果, 研究领域涉及

* 收稿日期: 2023-12-13 修订日期: 2024-04-03 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 山东省地矿局科技攻关“胶州湾重大项目建设地质探测与评价技术研究(编号: KY202223)”和“自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(编号: 2024KFKT017)”项目联合资助。

第一作者简介: 董杰, 1981 年生, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工环地质研究工作。Email: 13853286966@163.com。

通信作者简介: 于鹏, 1992 年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事环境地质工程研究工作。Email: 13210276328@163.com。

法规政策、规划策略、开发设计、地下交通空间模式、布局优化、开发适宜性评价、资源量评估和开发控制技术等诸多方面(徐美君等, 2021)。这些研究多从具体技术应用和实践案例分析出发, 积累了大量地下空间建设经验和专项成果, 目前亟需进行成果的全面总结和趋势分析, 以便更好地促进地下空间开发提质增效, 推动青岛市高质量发展和地下空间可持续发展。

本文通过广泛的文献调研和专题研究, 总结分析了青岛市地下空间开发利用的历史演变规律, 全面评估了青岛市地下空间开发的现状、成就和特色, 分析了存在的问题, 并提出开发建议和展望, 以期为青岛市地下空间的未来发展提供重要的科学决策支撑。

1 研究方法

本研究基于 Web of Science 核心合集及中国

知网数据库, 对青岛市地下空间开发方面的研究进展进行综述。检索方法主要是利用数据库, 对标题和摘要进行关键词检索。检索关键词涉及青岛市地下空间的相关研究, 包括城市地下空间、青岛市地下空间、地铁、隧道、轨道交通和管廊等, 检索对出版年份没有限制。本研究所涉及的地下空间开发区域指青岛市行政区, 引用的部分研究成果主要限于青岛市主城区。检索结果表明: 相关研究自 21 世纪以来整体呈升高趋势, 但相比较于全国范围内的城市地下空间研究, 青岛市地下空间相关研究起步较晚(图 1)。本文侧重分析涉及主题“青岛市地下空间开发建设及研究现状”的相关研究成果, 其中, “青岛市地下空间”主题的研究相对较少, 研究领域多涉及建筑科学与工程(57.8%)、地质学(8.7%)和铁路运输(4.9%)等(图 2), 对地下空间开发现状和研究进展等内容进行总结和问题分析的研究还不充分, 不利于在总结规律的基础上指导城市地下空间开发的可持续发展。

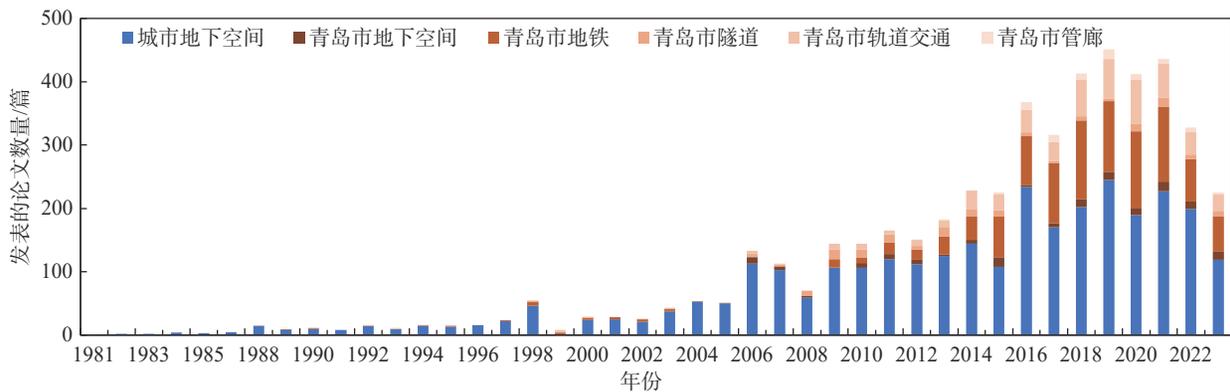


图1 “青岛市地下空间”主题文献发表数量年趋势

Fig. 1 Annual trend of the number of publications on the topic of “Qingdao Underground Space”

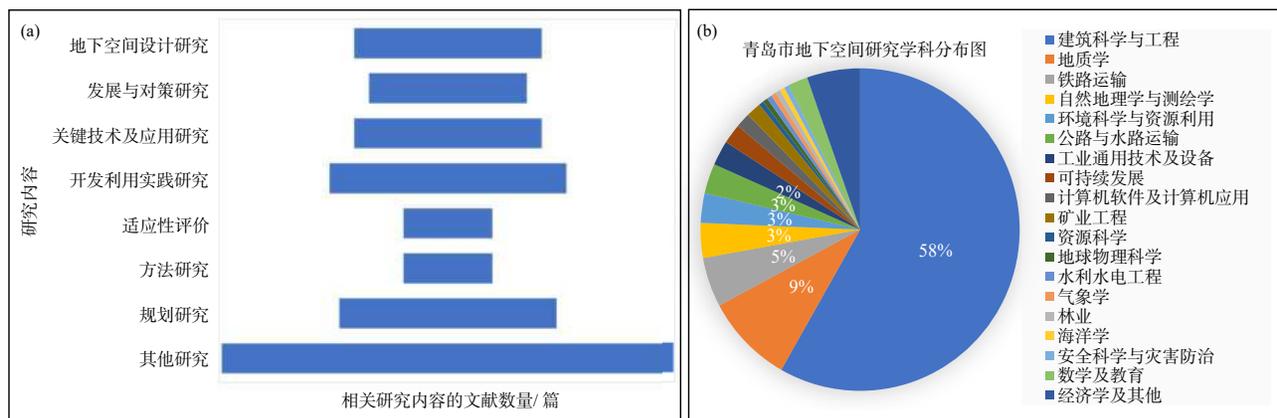


图2 “青岛市地下空间”主题文献涉及的研究内容图(a)和学科分布图(b)

Fig. 2 Distribution of research contents (a) and disciplines (b) involved in the literature on the topic of “Qingdao Underground Space”

2 青岛市地下空间开发历史与现状

2.1 青岛市地下空间开发历史

地下空间开发进程受到社会进步、政治制度和文明程度等时代背景的影响,在不同的历史时期具有不同的功能,如早期的贮藏和防御功能,现在的交通运输和服务等功能。总结城市地下空间开发的历史规律对调控开发的方向和秩序,推进地下空间的综合利用具有重要的指导意义(Vähäaho, 2016)。根据历史数据和地下空间开发的功能特征,总结出青岛市地下空间开发历史主要经历了4个演变阶段(表1)。

表1 青岛市地下空间开发利用阶段及特征
Table 1 Stages and characteristics of underground space development and utilization in Qingdao

发展阶段	时间/年	布局形态	功能类型	发展特征
初始阶段	1887—1949	散点分布	地下市政设施、军事防御设施	规模较小,功能单一
起步阶段	1949—1999	散点分布	地下市政设施、人防工程、过街通道	规模依旧较小,功能单一,不成体系
发展阶段	2000—2012	聚点扩散	地下停车场、地下商业、综合管廊	地下空间利用功能开始多样化,初现网格化布局
繁荣阶段	2013至今	网络延伸	轨道交通带动周边地下空间建设,功能多样化、人性化	形成以地铁站点及大型商业综合体开发为节点的地下空间开发体系

2.1.1 殖民时期—初始阶段(1887—1949年)

德国侵占时期(1887—1914年),青岛市形成了“地上和地下同步进行城市建设”的概念,首次铺设3 500 m下水管道,部分路段雨污分流。1899年修筑俾斯麦山炮台(今青岛山炮台遗址),是地下空间军事防御体系的开端。日本侵占时期(1914—1922年和1938—1949年),地下市政管网得到扩充,修建了大量地下涵洞和防御壕沟等地下军事防御工程。国民党统治时期(1922—1938年),修挖明沟暗渠总计37条,总长度达1.5万m,地下水网基本成型。1935年青岛市城市规划提出修建地铁,并规划了42 km的地铁

网,最终由于战乱被搁置。

2.1.2 人防主导期—起步阶段(1949—1999年)

建国初期,青岛市地下空间的开发利用方式较单一,主要集中在市政地下管线和人防工程领域。1980年以来,地下空间开发的重要作用逐步被发现,青岛市在交通和建筑等领域开发建设了地下仓库、过街通道和地铁一期工程等。1991年,青岛市成为第一批获得国家批准建设轨道交通项目的八个城市之一,1994年青岛地铁1号线试验段开工,长度约1.4 km。

2.1.3 地下交通形成期—发展阶段(2000—2012年)

进入21世纪以来,随着城乡一体化融合发展,青岛市人口规模迅速增长,地下空间开发快速发展,涉及工业、民用、交通以及国防等多个领域,开发类型也多样化,出现了地下商业、地下停车场和地下综合管廊等新形式,初现网格化布局。2009年8月,《青岛市城市轨道交通近期建设规划(2009—2016年)》(国家发展和改革委员会,2009)通过了国务院批准,地铁项目再次启动。

2.1.4 综合开发利用期—繁荣阶段(2013年至今)

2013年以来,地下空间建设数量高速增长。“十三五”期间青岛市建成的标准化地下综合管廊达93.7 km。自国家发展和改革委员会批准《青岛市城市轨道交通近期建设规划(2013—2018年)》(国家发展和改革委员会,2013)以来,青岛地铁建设发展迅速,截至2023年11月,在建线路7条,线路总长185.55 km。目前已开通运营线路7条,运营总里程318 km,地铁站166座。轨道交通带动了站点周边的地下空间建设,功能上更加多样化、人性化,并形成网络延伸。

不同发展程度的城市,其地下空间利用目的和驱动因素亦不同。但在城市化进程加快和人口、资源聚集的过程中,地下空间发展趋势则有较大的相似性(程光华等,2019)。许多城市的地下空间开发证明了地铁等轨道交通系统与外部区域交通可达性的重要性(Lin et al., 2022)。例如:加大拿蒙特利尔、法国巴黎和英国伦敦等城市,地下空间规模化发展均以轨道交通系统为基础构建地下空间脉络,逐步形成商业、交通以及防护等空间联合系统(Broere, 2016; Besner, 2017);北京和上海是国内地下空间开发利用程度最高、规模最大

的两个城市,同样经历了初始化和规模化的发展阶段,现已形成由地下轨道交通、地铁站点、地下商业、停车场、公路和隧道等紧密联系的地下网络系统(程光华等, 2019; 韩中阳等, 2022);南京市和青岛市均为我国副省级市,目前南京市围绕地铁等交通枢纽建立起来的地下交通和商业综合体已逐步成型(余苑航等, 2021)。因此,青岛市地下空间开发借助在历史发展进程中的积累和进步,依托青岛地铁的飞速发展,未来有望形成串联各城区的地下空间网络化布局。

2.2 青岛市地下空间开发现状

根据检索的文献,青岛市地下空间开发研究主要涉及了四类科学问题,即地下空间规划策略和管理模式、地下空间资源潜力和承载力评估、深层地下空间开发利用以及低碳战略下的地下空间开发(图 3)。针对青岛市地下空间开发建设和研究现状,本文重点综述内容涉及多个科学问题,主要从地下空间开发的法规、规划与管理,规模与深度,功能概况,安全技术与实践,智慧运维,以及资源利用与可持续发展等方面展开讨论。

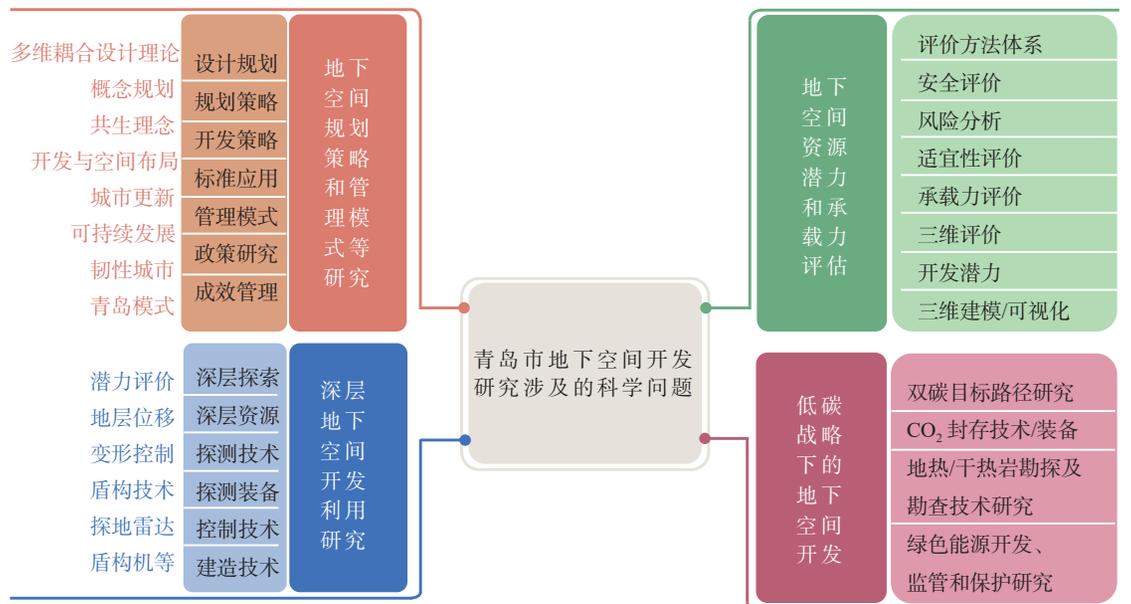


图3 “青岛市地下空间”主题文献涉及的科学问题

Fig. 3 Scientific issues involved in the literature on “Qingdao Urban Underground Space”

2.2.1 地下空间开发相关法规、规划与管理

青岛市城市空间定位由“十三五”规划时期的“建设全域统筹的海湾型都市区”,逐步演变为“十四五”规划期的“建设高能级湾区大都市”,城市空间格局也实现由沿胶济铁路的带状分布,发展为向主城区三区协同的“品”字型布局,再到“三轴三带”格局的转变。空间格局的改变,带动了轨道交通建设和城市更新发展。有关专家提出,青岛市地下空间开发需把握当前发展的黄金机遇,将地下空间开发相关规划等顶层设计视为城市规划的永久组成部分,以便更好地实现城市地下空间未来愿景(Zhao et al., 2016)。近年来,青岛市在综合法规、人防、轨道交通、市政管线、地下管廊建设和地下资源管理等方面颁布了管理

条例和管理办法,发布了地下空间开发总体规划与专项规划(表 2)。《青岛城市地下空间资源综合利用总体规划(2014—2030年)》(青岛市人民防空办公室, 2014)提出贯彻“三城联动”战略,以轨道线网为依托,构建地下空间开发利用总体布局,规划2030年“地下青岛”初具规模,2050年“地下青岛”基本形成。《青岛市城市更新专项规划(2021—2035年)》(青岛市自然资源和规划局, 2023a)明确了城市更新需要结合轨道交通站点,进行地上地下空间一体化设计,提升轨道站效能,带动周边区域转型发展。《青岛市国土空间总体规划(2021—2035年)》(草案)(青岛市自然资源和规划局, 2021)指出“加快交通互联互通,建设轨道上的经济圈”。以上相关政策与规划推动了青岛

表2 青岛市现行地下空间相关法规及规划统计表
Table 2 Current regulations and planning related to underground space in Qingdao

序号	类型	法规政策和规划	参考文献
1	综合法规	青岛市地下空间开发利用管理条例	(青岛市国防动员办公室, 2020)
2	专项法规-人防工程	青岛市人民防空工程建设管理办法(2022年修订) 青岛市人民防空法治建设实施意见(2021—2025年)	(青岛市人民政府, 2022) (青岛市人民防空办公室, 2021)
3	专项法规-轨道交通	青岛市轨道交通条例	(青岛市交通运输局, 2021)
4	专项法规-市政管线	青岛市城市地下管线管理条例	(青岛市住房和城乡建设局, 2018)
5	专项法规-综合管廊	青岛市地下综合管廊规划建设管理办法(青政办发〔2021〕7号) 关于加快地下综合管廊建设的实施意见(青政办发〔2016〕9号)	(青岛市人民政府办公厅, 2021a) (青岛市人民政府办公厅, 2016)
6	专项法规-地下资源	青岛市地下空间国有建设用地使用权管理办法(青自然资规(规)字〔2020〕1号)	(青岛市自然资源和规划局, 2020)
7	总体规划	青岛城市地下空间资源综合利用总体规划(2014—2030年) 青岛市中心城区地下空间开发利用专项规划(2021—2035年)	(青岛市人民防空办公室和青岛市规划局, 2014) (青岛市自然资源和规划局, 2023b)
8	专项规划	青岛市城市更新专项规划(2021—2035年) 青岛市城市轨道交通第三期建设规划(2021—2026年)	(青岛市自然资源和规划局, 2023a) (国家发展和改革委员会, 2021)

市地下空间形成“轨道交通引领、节点建设突出、地上地下互联”的开发利用格局。

2.2.2 地下空间开发规模与开发深度

青岛市地下空间呈点状分布,目前的开发范围主要集中在中心城区(赵景伟等, 2018),周边各市则以生态保护区和可充分开发空间为主,未来具有巨大的开发潜力(图4)。

开发深度上,青岛市人防、商业等功能的地下空间开发利用主要集中在浅层0~15 m,可开发地下空间面积约为2 720.84 km²,占地下空间开发总面积的71.8%(图5)(夏伟强等, 2019),主要分布于西海岸新区、胶州、市北区和蓝色硅谷等区域,目前中心城区浅层地下空间利用已趋于饱和。深层地下空间开发利用对提高城市韧性、创造更多空间具有重要意义,青岛市地下空间在15~30 m深度的可开发资源占比为75.81%(图5),极具开发潜力。据调查,地铁9号线正阳中路地下连续墙平均深度约36.5 m,是青岛地铁建设以来最深的地连墙;青岛胶州湾第二海底隧道最深点距海平面达115 m。有研究认为青岛市南区30 m以下地下空间开发利用限制因素较少,未来可用于解决城市交通拥堵和内涝等问题(李子玉等, 2022)。

地下空间更深层次的探索均离不开先进的探测、施工技术和装备(陈湘生等, 2021),青岛市目前拥有地层位移和变形控制技术、盾构隧道智能建造技术、富水地层冻结等技术,以及全地形三维探地雷达及“国信号”盾构机等装备,将支撑深层地下空间的开发。

2.2.3 地下空间开发功能概况

青岛市地下空间开发功能利用主要为轨道交通、人防、市政和地下公共服务等。

轨道交通功能方面,青岛市地铁运营线路地下里程208.95 km,地下车站135座(图6(a));地下步行系统以过街通道为基础形式,与地铁站点相连的步行通道多达489处,初步形成地下步行网络;城市隧道共有10余条,全长约65 km,地道段长约48 km。青岛地铁1号线(国内首条穿越海底的地铁)、胶州湾海底隧道和第二海底隧道等工程打通了胶州湾东西两岸的交通屏障(图6(b)),显著降低了城区交通成本,推动了环胶州湾一体化发展,成为地下空间开发的“青岛特色”。

人防和市政功能方面,青岛市已建成的防护空间达到0.5 m²/人的标准,建有国标I类地震应急避难场所4处、综合性避难场所40处,充分发



图4 青岛市地下空间布局结构(据赵景伟等(2018)修改)

Fig. 4 Layout structure of underground space in Qingdao (Modified from Zhao et al., 2018)

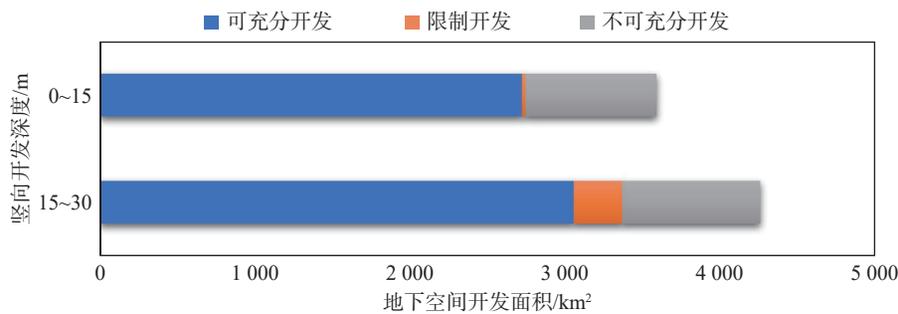


图5 青岛市竖向地下空间开发面积统计图(据夏伟强等(2019)修改)

Fig. 5 Vertical statistic of development area of underground space in Qingdao(Modified from Xia et al., 2019)

挥了地下空间的防灾功能。按照平战结合原则,青岛市对早期老旧人防工程进行整修,将人防工程与地铁、地下道路互联互通,增加了地下车位,有效缓解了西部老城区的交通拥堵。另外,青岛市主城区地下已建市政管线总长达 2 000 km,雨污合流管道清零,其中管线、变电站、换热站等市政设施达到入廊要求的,进入地下综合管廊。胶东机场地下管廊是国内第一个将污水和燃气管线入廊的综合管廊(图 6(c))。作为全国第二批地下综合管廊试点城市,青岛市已建成地下综合管廊 121 km,且

搭建了市级地下综合管廊监管平台,实现了管廊一体化综合监控和智慧化运维管理(图 6(d))。

地下公共服务功能方面,青岛市已建成具有商业、停车、人防和公共服务等多种功能的地下综合体 20 余处,分布于北站东西广场、上合广场、中防商业街、海琴广场、长江第一城和国际邮轮港等区域。这些综合体多依附于轨道交通站点和地上商业建设,青岛市仍缺少单独建设的大型地下工程,较为繁华的中山路商圈也仅建设了中山商城。

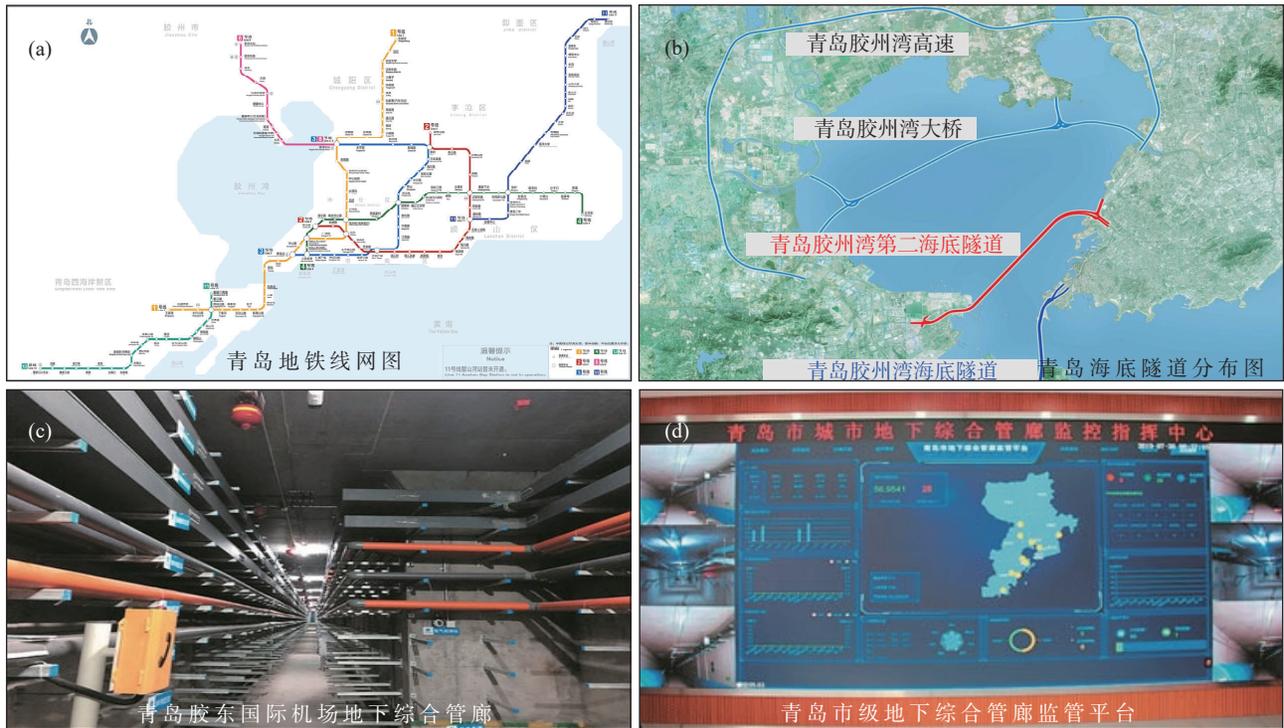


图6 青岛市中心城区地下空间的轨道交通和综合管廊建设情况

Fig. 6 Construction of rail transit and comprehensive pipeline corridors in the underground space of Qingdao's central city

2.2.4 地下空间开发安全技术研究与实践

《青岛市“十四五”应急管理体系建设规划》(青政办字〔2021〕81号)([青岛市人民政府办公厅, 2021b](#))中强调了地下空间安全,要求探索开展地下空间风险研判研究,提升灾害防治水平。青岛市主要从加强应急演练、创新防汛和防火技术等方面来保障地下空间安全。2017年青岛市发布并实施了全国轨道交通运营安全疏散领域的首部地方标准《青岛市轨道交通运营安全疏散规范》,推进应急预案演练向实战化、常态化转变。地铁出入口处安装水动力全自动防洪闸、钢制及轻型防洪挡板等,有效防止洪涝灾害。地下综合管廊中安装悬挂式超细干粉自动灭火装置,设置防火门和独立舱,并加装应急呼叫系统感温线圈等,实时保障地下管廊空间安全。此外,青岛市建设了城市安全风险综合监测预警平台,布设了覆盖市内200多万 m^2 的感知网络,实现了对轨道交通、供排水、消防及综合管廊等地下设施的实时监测,保障城市生命线安全。

青岛市复杂的地质条件推动了地下工程三维建模、地球物理探测和地质安全保障等技术的创新研究。双护盾TBM创新型技术保障了青岛地

铁和隧道建设的顺利进行([郭志等, 2021](#); [王守慧等, 2023](#));综合超前预报技术在胶州湾海底隧道建设中集成并应用,可准确预报含水断层,确保施工安全([薛翊国等, 2009](#));综合运用GPS和WebGL等技术建成的陆海一体地质环境监测网和地质信息服务与决策支持平台,可实时传送地下水、地质和地热等监测信息,实现二三维一体的监测预警数据展示、分析和挖掘,保障了地下空间的地质安全([朱妍等, 2023](#))。

2.2.5 地下空间开发的智慧运维

地下空间的高质量发展离不开智慧运维。2023年7月青岛地铁发布智慧新蓝图,即《青岛地铁数字化转型总体规划》及《青岛市城市轨道交通智慧城轨顶层规划》,青岛市成为了率先在全域系统开展数字化转型和智慧城轨建设工作的城市。“十四五”期间,青岛地铁在以上规划指引下,围绕“数字青岛建设”要求,全面推动数字化转型和智慧城轨建设实施落地,提出“1-N-3-1”的数字化转型愿景目标蓝图和“1-1-3-4-N”的地铁智慧城轨体系架构([图7](#)),实现数字化建设和智慧运营,形成安全、便捷、高效、绿色、经济的新一代智慧城轨体系。

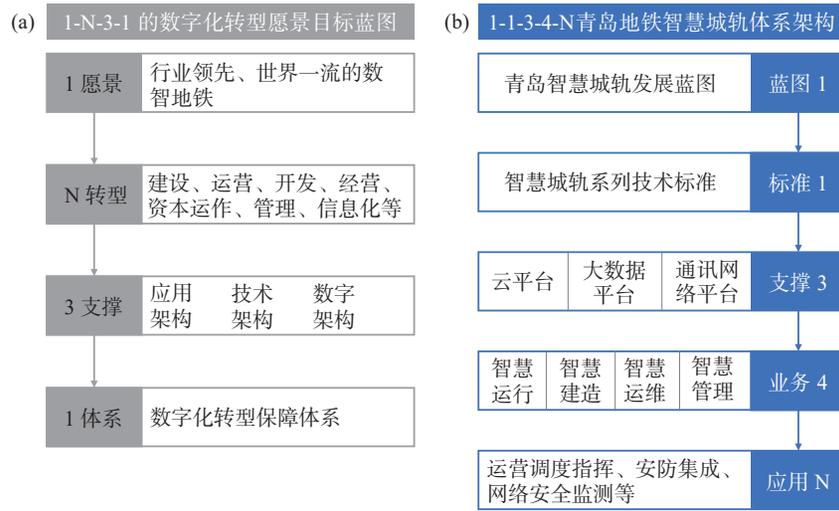


图7 青岛市全域系统数字化转型目标蓝图(a)和智慧城轨体系架构图(b)

Fig. 7 Blueprints of digital transformation target of the trans-Qingdao system (a) and smart city-rail system architecture (b)

2.2.6 地下空间资源利用与可持续发展

地下物理空间、地热能、地下水 and 地质材料等均可作为地下空间资源。不同地下空间功能区的资源量评估和承载力评价具有支持规划和避免冲突的作用(图 8)(Yu et al., 2023)。基于特殊的地质特点,青岛市地下空间开发适宜性评价需要构建多层次评价体系(AHP)(夏伟强等, 2019),研究认为反向传播神经网络综合评价-层次分析法(BPCE-AHP)是滨海基岩城市的资源承载力和地质安全评价的有效方法(Zhao et al., 2023; 杨洋等, 2022; 刘洪华等, 2024)。而通过建立三维地质模型,利用 GIS 的空间分析运算功能,将资源开发的难易程度、潜在价值和资源综合质量的相关因

子叠加运算,可实时对现青岛市地下空间资源质量及容量的评估(徐美君等, 2021)。

城市地下空间中,碳捕集和封存途径以及地下能源合理利用技术等研究可以助力实现碳达峰和碳中和(钱七虎等, 2022)。青岛市是全国沿海城市探索海底碳封存路径的“先行者”之一,是我国首个海上二氧化碳封存示范工程设备建设地。由于地质构造条件导致碳封存具有 CO₂ 腐蚀泄露等环境风险(阳平坚等, 2024),因此,青岛市碳封存项目环境风险评估和场地潜力评价等相关研究需要引起重视(邓一荣等, 2023; 张少鹏等, 2023)。地热能是城市可持续发展的地下资产(韩中阳等, 2022),青岛市对浅层地热和深层干热岩的研究仍

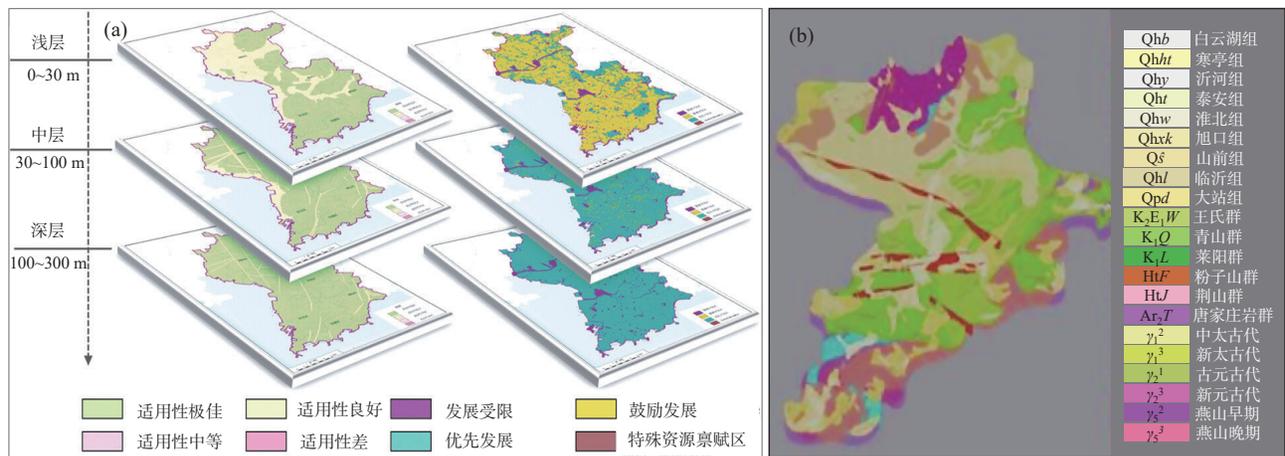


图8 青岛市地下空间适宜性与可开发性分区图(a)和 3D 地质模型图(b)(Yu et al., 2023)

Fig. 8 Suitability and feasibility zonation of Qingdao underground space (a) and 3D geological model (b) (Yu et al., 2023)

处于探索和不断完善的阶段。地热勘查定井方法(何鹏等, 2023)和干热岩储层勘查开发方法(付佳妮等, 2021)等研究, 明确了音频大地电磁测深(AMT)和高精度电磁频谱法(MES)相结合的方法在青岛市浅层地热资源勘查中的有效性, 以及遥感技术用于干热岩选区的可行性。未来青岛市需要加大地热能的开发、监管和保护力度, 确保地下空间资源的可持续利用, 推进绿色能源转型。

2.3 青岛市地下空间开发特色

2.3.1 体现青岛市独特的地理与地质环境

青岛市位于山东半岛东南端, 濒临黄海, 坐拥崂山和胶州湾, 形成的特殊的“山、海、湾”地理特征, 决定了其地下空间开发的复杂性。由于地下空间开发具有成本高、不可逆性强的特点, 因此开发前置的地质调查尤为重要(Hao et al., 2019)。迄今为止, 青岛市已进行了地形地貌和水文与工程地质等一系列调查研究(图9), 结合近年各类工程突发事故应急处置和防治经验, 明确了青岛市的基岩地质特征, 以及影响地下空间开发的主要地质因素(软土、地下水和断裂构造等)(Zhao et al., 2023; 杨洋等, 2022)。其中, 软土的触变性和强流变性、富水砂砾石层的自稳性差以及构造破碎带内易形成差异性风化(朱妍等, 2023)等问题, 造成了地下空间开发过程中的主要安全风险。为此, 青岛市于2019年11月印发实施了《青岛市城市地质调查工作方案》, 聚焦“滨海基岩型城市地下空间资源地质调查示范”, 探索可复制、可推广的滨海城市地下空间开发典范。

2.3.2 支撑军民融合发展战略

青岛市是扼守京津海洋门户的海防重镇, 也是连通南北经济的海上桥梁。青岛市经历了近代德国和日本侵占的殖民地时期, 使得人防、洞库和雨污分流的地下水管道等地下空间设施的初始形态和发展均与军事国防密切相关, 形成“青岛特色”。党的十九大提出军民融合发展的国家战略, 青岛市作为深海战略基地, 打造了古镇口国家级军民融合创新示范区, 从地质环境、战略资源和地质安全等方面进行地下空间开发利用评价研究(邹亮等, 2021), 集聚创新要素, 形成强干扰条件下基岩海岸地质结构地球物理探测技术, 为军民融合区地下空间的资源科学分层、综合开发和

统筹利用提供依据。

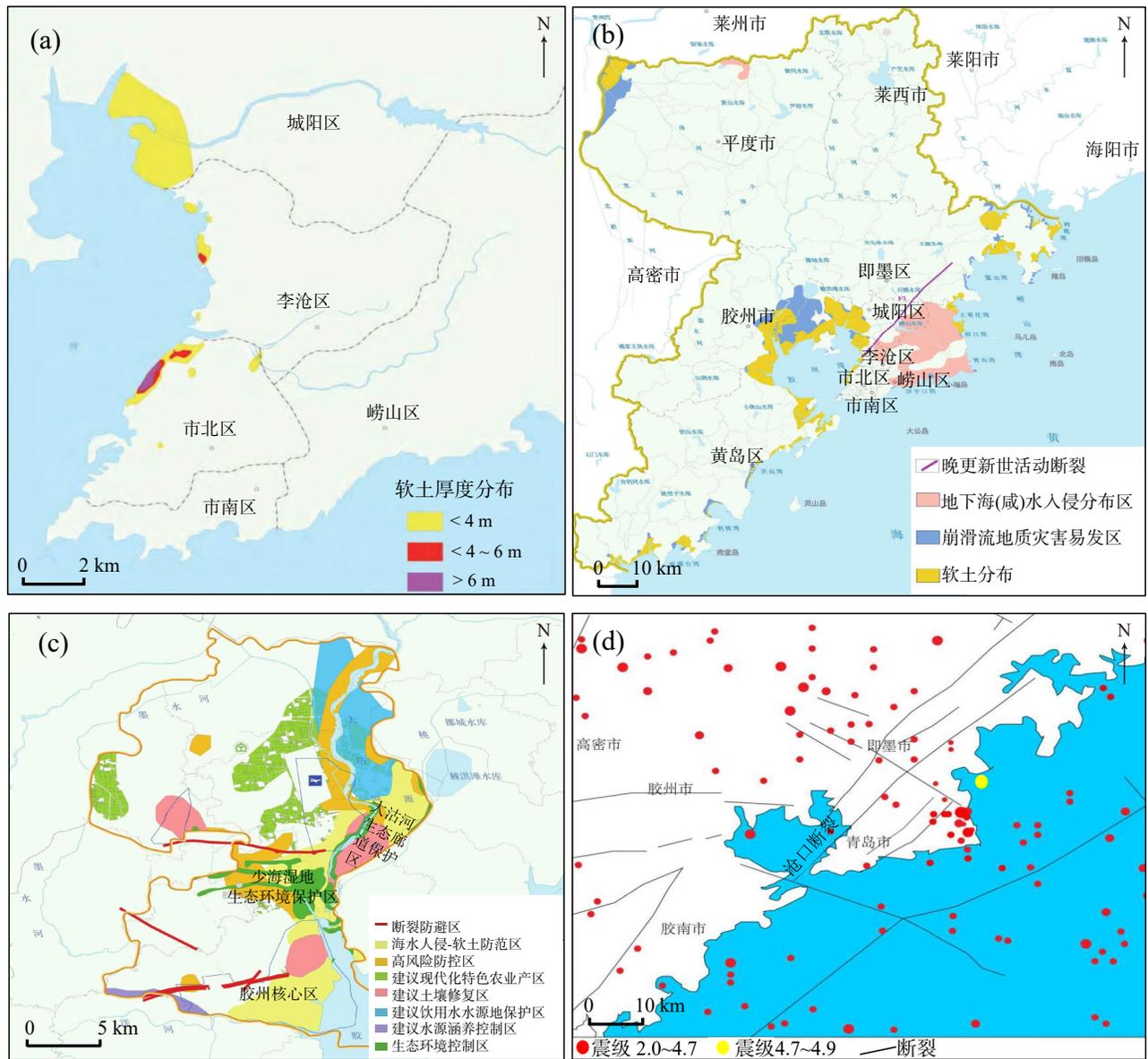
2.3.3 融入海绵城市建设理念

2016年青岛市成为第二批全国海绵城市建设和地下综合管廊“双试点”城市之一, 标志着青岛市具有海绵城市和地下空间开发并重发展的特点。海绵城市建设以低影响开发为理念, 注重恢复城市自然生态, 地下空间开发影响雨水自然积存和地下水渗流状态, 但也集约土地利用, 改善地表生态环境, 两者相互矛盾又相互依存。青岛市在海绵城市建设背景下, 启动了地下空间资源评估、承载力评价和安全运维等建设与研究工作, 从两条路径上实现生态文明导向下的城市绿色发展。

3 青岛市地下空间开发存在的问题分析

(1)地下空间开发相关规划和管理机制的完整性仍有待提高。钱七虎院士认为, 我国城市地下空间利用管理与发展需求不匹配, 存在地下空间法规、规划和政策不完整, 及管理系统未集成等问题, 城市地下空间需要布局完善的规划、建设与管理机制(Qian, 2016)。国土空间规划是国家空间发展的指南和各类开发保护建设活动的基本依据。北京中央商务区(CBD)、上海世博会和宁波南部商圈等城市地下空间开发在采用与国土空间规划一体化管理共建模式后, 形成了地下网络连接, 实现了地下空间的综合开发利用(Admiral and Cornaro, 2016)。《青岛市国土空间总体规划(2021—2035年)》(草案)提出“加快交通互联互通, 建设轨道上的经济圈”、“建立功能清晰、组织高效的综合枢纽体系”, 以及“建设综合性市政设施廊道, 加强廊道管控”, 反映了地下空间开发中轨道交通和综合管廊等基础设施建设的重要性, 但未对地下空间开发整体发展方向提出的新要求, 这使得建立在总体规划基础上的地下空间开发的相关专项规划和详细规划的制定具有挑战性。目前青岛市地下空间开发建设总体上仍由不同行政部门负责, 缺乏统一、有效且长效的管理机制, 导致实际建设中统筹协调难度大。因此, 地下空间相关规划和管理机制的完整性仍然是青岛市建成综合高效地下空间网络的限制因素。

(2)建成区地下空间利用效率仍存在不足。



(a) 青岛市软土分布图(夏伟强等, 2019); (b) 青岛市海岸带主要地质环境问题分布图(朱妍等, 2023); (c) 青岛市上合示范区国土空间规划地质建议图(窦衍光等, 2021); (d) 青岛市及附近地区震中及断裂分布图(李志强等, 2023)

图9 青岛市地质调查部分成果图

Fig. 9 Partial maps of Qingdao geological survey

青岛市中心城区浅层(0~15 m)地下空间在地铁、停车场、商业等功能的利用,虽然一定程度的缓解了地面交通的压力,但仍存在地下空间整体利用效率不高、潜力发挥不足的问题。这主要与地下空间开发利用的孤立分散、区域连通性不足以及缺乏分层管控等因素有关。青岛市地下空间开发在建设地下生态网络过程中仍需注重地上地下整体性开发,提高地下交通设施和市政设施的综合集约程度。

(3) 地下空间开发建设的市场化运作机制仍

有待完善。青岛市地下空间在顶层规划和设计的指导下飞速发展,但仍存在地铁、地下综合体和停车场等地下空间规划与开发不协调的问题。在综合规划发布时,许多地下空间已经建成,市场需求和政府机制之间出现了协调偏差(Lin et al., 2022),导致一些地下空间与地铁、商业等功能没有建立起连通关系,地下空间的服务功能得不到充分利用,也阻碍了青岛市地下生态网络的建成和可持续发展。

(4) 长远布局仍有待优化。青岛市院士港、

中德生态园、上合广场、地铁站和邮轮港等地下空间开发分别聚焦商业、停车、交通和服务等不同功能(Shao et al., 2021; 赵景伟等, 2015)。然而, 受社会经济形态转变和城市发展格局转变的影响, 可能出现地下空间功能使用率降低等问题(Dong et al., 2022)。借鉴国外学者利用智能化新兴技术实现对地下空间的数字化、虚拟化及长期性调控的先进经验(Shao et al., 2022), 青岛市地下空间开发可运用高精度客观算法模型, 进行商业、交通等功能空间的综合布局优化, 获得地下空间长期发展的全局最优解。

4 青岛市地下空间开发展望与建议

(1) 强化地下空间一体化规划、建设与管理质量。地下空间开发利用是一项系统工程, 涉及面广, 需要政府多个部门密切配合、协调联动。构建科学高效的政府管理机制和各职能部门之间的协调配合机制, 有助于提高地下空间开发利用的可行性和科学性, 推动科学开发和高效利用。将青岛市地下空间规划纳入城市国土空间总体规划, 加快建立市级层面的地下空间统筹机构, 成立全市地下空间开发利用工作领导小组, 转变管理观念, 综合考虑地上地下各利益相关者的相互关系(von der Tann et al., 2020)。统筹青岛市独特的地质环境资源, 研究不同政策对地下空间开发指导和干预的实际影响, 探索适合青岛市地下空间开发的法规、规划、管理三位一体的政策管理体系。

(2) 注重资源与环境对地下空间开发的支撑作用。青岛市城市规划区地下空间持力层以工程力学性质稳定的花岗岩为主, 地壳稳定性较好, 但局部区域仍需关注断裂构造、不良岩土体和海水入侵等地质环境约束条件。在城市资源环境的制约下, 城市更新及城市垂向开发是盘活存量用地, 实现内涵增长和高质量发展的重要方式(Lin et al., 2022; 李子玉等, 2022)。例如, 首尔和东京通过大型地下综合体, 形成了地上、地面和地下空间设施相互连接的三维空间(Cui et al., 2021); 香港将地面区域与地铁系统融合, 建立与地铁站相连的地下购物中心通道, 激发了地上及地下空间的活力(Zacharias and He, 2018); 上海虹桥充分利用高

速铁路和航空运输的综合交通枢纽优势, 建设地下行人系统、停车设施、公路隧道、物流、市政和应急防护设施, 以提升区域环境质量, 实现资源可持续利用(Admiraal and Cornaro, 2016; 徐雅洁等, 2023)。因此, 未来青岛市应把握城际交通网络更新时机, 积极促进轨道交通站点区域地上、地下空间一体化开发, 加强地下空间的互联互通, 构建多尺度地下空间可用资源量的三维综合评价技术体系, 实现青岛市地下空间资源与环境的精细化评价, 增强地下空间使用功能的复杂化、多元化。

(3) 提升智慧信息技术对青岛地下空间的精细化管控水平。随着城市的快速发展和信息化水平的提高, 青岛市地下空间将纳入“数字城市”和“智慧城市”的规划建设中(陈湘生等, 2022)。由于地下空间密布着各类管线和隧道, 是人员活动高度密集的场所, 利用智慧信息技术精细化管理地下空间是青岛市面临的新挑战。今后应运用物联网、互联网和大数据等现代化信息技术, 研究共建共享数据管理机制, 建立统一的地下空间资源开发利用与管理信息系统, 促进高效协同管理; 归集地下空间开发利用过程中产生的大量数据资源, 进行三维建模、可视化交互分析和多维感知实时预警, 打造地下空间数智化技术平台, 助力“透明青岛”建设。

5 总结

(1) 青岛市地下空间开发经历了初始、起步和发展阶段, 目前处于繁荣阶段, 功能类型越来越多样化和人性化, 依托青岛市轨道交通系统的飞速发展, 可望形成串联各城区的地下空间网络化布局。

(2) 青岛市具有特殊的“山、海、湾”地理特征和滨海基岩地质特点, 地下空间开发在政策、规划、管理、功能开发、安全运维和信息化建设等方面取得了较大突破, 对形成可复制、可推广的滨海城市地下空间开发典范具有一定的指示意义。

(3) 青岛市地下空间开发可借助城市更新及可持续发展的契机, 在充分协调城市国土资源规划和地下空间规划等顶层设计的基础上, 发挥新

材料、新工艺、新技术和数字化智能建造在轨道交通领域中的作用,实现地下基础设施的韧性提升,推动建设功能完善、幸福宜居、生态良好的地下城市。

References

- ADMIRAAL H, CORNARO A. 2016. Why underground space should be included in urban planning policy – And how this will enhance an urban underground future[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 214-220.
- BESNER J. 2017. Cities think underground – underground space (also) for people[J]. *Procedia Engineering*, 209: 49-55.
- BROERE W. 2016. Urban underground space: solving the problems of today's cities[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 245-248.
- CHEN X S, FU Y B, CHEN X, XIAO H, BAO X H, PANG X C, WANG X T. 2022. Progress in underground space construction technology and technical challenges of digital intelligence[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 35(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- CHEN X S, LI K, BAO X H, HONG C Y, FU Y B, CUI H Z. 2021. Innovations in the development of digital and intelligent construction of urban shield tunnels[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 29(5): 1057-1074 (in Chinese with English abstract).
- CHENG G H, WANG R, ZHAO M H, SU J W, YANG Y, ZHANG X B. 2019. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 39-47 (in Chinese with English abstract).
- CUI J Q, BROERE W, LIN D. 2021. Underground space utilisation for urban renewal[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108: 103726.
- DENG Y R, WANG Y H, ZHAO Y J, GU P K, XIAO J, ZHOU J, LI Z H, YU Z Q, PENG P A. 2023. Carbon dioxide storage in China: current status, main challenges, and future outlooks[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 429-439 (in Chinese with English abstract).
- DONG Y H, PENG F L, ZHA B H, QIAO Y K, LI H. 2022. An intelligent layout planning model for underground space surrounding metro stations based on NSGA-II[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 128: 104648.
- DOU Y G, YIN P, CHEN B, XUE B Y, WANG M L, ZOU L, HU R, XU G, YUE B J, SONG W Y, LIN X, DONG J, FU J N, XU R, HE S, LIN Q G. 2021. Application exploration, theoretical and technological innovation of geological survey results in coastal bedrock city: taking Qingdao as an example[J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(9): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- FU J N, LIU H H, DONG J, DOU Y G, MING Q, LIU H S, XIA W Q, ZOU L. 2021. Application of remote sensing technology to urban geological survey at Qingdao city[J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(9): 69-78 (in Chinese with English abstract).
- GENERAL OFFICE OF QINGDAO MUNICIPAL GOVERNMENT. (2016-04-08)[2024-02-26]. Implementation opinions on accelerating the construction of comprehensive underground pipe corridors (General Office of Qingdao Municipal Government[2016] No. 9)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/zdggk/fgwj/zcwj/zfgb/2016_6_7/202010/t20201019_500528.shtml (in Chinese).
- GENERAL OFFICE OF QINGDAO MUNICIPAL GOVERNMENT. (2021a-04-01)[2024-02-26]. Qingdao underground comprehensive pipe corridor planning and construction management measures (General Office of Qingdao Municipal Government[2021] No. 7)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/bgt/gkml/gwfg/202112/t20211213_3995078.shtml (in Chinese).
- GENERAL OFFICE OF QINGDAO MUNICIPAL GOVERNMENT. (2021b-11-29)[2024-02-26]. Qingdao "14th five-year plan" for the construction of emergency management system (General Office of Qingdao Municipal Government[2021] No. 81)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/bgt/gkml/gwfg/202112/t20211213_3987914.shtml (in Chinese).
- GUO Z, QU Q F, FAN Z G, LIU G T, LU X F, GONG Y L. 2021. Construction technology innovation of double-shield tunnel boring machine in Qingdao metro line 1[J]. *Tunnel Construction*, 41(8): 1385-1391 (in Chinese with English abstract).
- HAN Z Y, WU S S, LIU Y M, HAN Z C, JIANG Y Y, GE C W, SONG W J. 2022. Calculation and evaluation of geothermal resources in northern Jinan geothermal field[J]. *East China Geology*, 43(3): 276-285 (in Chinese with English abstract).
- HAO M, WANG D H, DENG C, HE Z W, ZHANG J L, XUE D J, LING X M. 2019. 3D geological modeling and visualization of above-ground and underground integration—taking the Unicorn Island in Tianfu new area as an example[J]. *Earth Science Informatics*, 12(4): 465-474.
- HE P, DONG J, GUAN Y, WANG Q, XIE Y J, LIU H S, YIN

- Z, FU J N. 2023. The well determination for geothermal resource exploration in typical islands in Xiaoguan Island, Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 39(8): 38-48 (in Chinese with English abstract).
- LI Z Y, QIAO Y K, WU X L, PENG F L. 2022. Planning strategy for underground space development and utilization in urban redevelopment area[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 59(S1): 143-151 (in Chinese with English abstract).
- LI Z Q, XUE Y G, QU L Q, SUN W H, LIU H L, ZHAO S S. (2023-07-26)[2024-04-23]. Primary unfavorable geology and construction risks of the second subsea tunnel of Jiaozhou bay in Qingdao city[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*.doi: [10.13544/j.cnki.jeg.2022-0756](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0756) (in Chinese with English abstract).
- LIN D, BROERE W, CUI J Q. 2022. Underground space utilisation and new town development: experiences, lessons and implications[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119: 104204.
- LIU H H, WANG Z S, GENG L, ZHAO Y T, CHEN Y. 2024. Multilevel variable fuzzy variable weight comprehensive evaluation method for geological safety of urban underground space[J]. *Journal of Safety and Environment*, 24(1): 19-32 (in Chinese with English abstract).
- MA C X, PENG F L. 2018. Some aspects on the planning of complex underground roads for motor vehicles in Chinese cities[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82: 592-612.
- NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. (2009-08-31)[2024-02-26]. Recent construction plan for Qingdao urban rail transit (2009-2016)[EB/OL]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=4679> (in Chinese).
- NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. (2013-12-11)[2024-02-26]. Recent construction plan for Qingdao urban rail transit (2013-2018)[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zdgc/201312/t20131211_1145897.html?state=123 (in Chinese).
- NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. (2021-08-19)[2024-02-26]. Qingdao urban rail transit phase III construction plan (2021-2026)[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/pifu/202109/t20210906_1316572.html (in Chinese).
- QIAN Q H. 2016. Present state, problems and development trends of urban underground space in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 280-289.
- QIAN Q H. 2022. Energy geostructure engineering: promote carbon peak and neutrality, empower green cities[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 39(1): 1-2 (in Chinese with English abstract).
- QINGDAO MUNICIPAL BUREAU OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT. (2018-03-15)[2024-02-26]. Qingdao urban underground pipeline management regulations[EB/OL]. http://sjw.qingdao.gov.cn/cxjsj24/cxjsj127/202112/t20211210_3972499.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL CIVIL AIR DEFENSE OFFICE. (2021-12-10)[2024-02-26]. Qingdao municipal civil air defense rule of law implementation opinions (2021-2025)[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zw/renfb_m1/ybj_gwfg/202112/t20211210_3982497.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL CIVIL AIR DEFENSE OFFICE, QINGDAO URBAN PLANNING BUREAU. (2014-11-28)[2024-02-26]. Qingdao urban underground space resources comprehensive utilization masterplan (2014-2030)[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zw/renfb_m1/ybj_gwfg/202010/t20201018_393288.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL GOVERNMENT. (2022-01-14)[2024-02-26]. Qingdao measures for the management of civil air defence project construction (Revised in 2022)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/zdgb/gfwj/fggz/zfgz/2022/202202/t20220225_4443775.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL NATURAL RESOURCES AND URBAN PLANNING BUREAU. (2020-01-22)[2024-02-26]. Measures for the administration of the right to use state-owned construction land in underground space in Qingdao (Qingdao Natural Resources Regulation[2020] No. 1)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gwfg/gfwj/202312/t20231211_7709368.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL NATURAL RESOURCES AND URBAN PLANNING BUREAU. (2023a-03-10)[2024-02-26]. Qingdao urban renewal special plan (2021-2035)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/zxfw/zrzyghgzzyxx/ghgl/ghcajzjg/zxgh/202303/t20230310_7043945.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL NATURAL RESOURCES AND URBAN PLANNING BUREAU. (2023b-06-08)[2024-02-26]. Special plan for the development and utilization of underground space in Qingdao city Centre (2021-2035)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/gzdt/xyty/202306/t20230608_7219818.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL NATURAL RESOURCES AND URBAN PLANNING BUREAU. (2021-07-27)[2024-02-26]. Territorial spatial planning of Qingdao city (2021-

- 2035)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/zxfw/zrzygh-ggzyxx/ghgl/ghcajpzjg/csztg/202204/t20220402_5165591.shtml (in Chinese).
- QINGDAO MUNICIPAL TRANSPORT BUREAU. (2021-10-19)[2024-02-26]. Qingdao railway traffic regulations [EB/OL]. http://qjdt.qingdao.gov.cn/jtj_zcfg/sjjbmzcfg_54/202112/t20211214_3998988.shtml (in Chinese).
- QINGDAO NATIONAL DEFENSE MOBILIZATION OFFICE. (2020-07-06)[2024-02-26]. Qingdao underground space development and utilisation regulations[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zc/renfb_flg/202205/t20220509_6041673.shtml (in Chinese).
- SHAO F, SHI P Y, DING Y S, DONG C. 2021. The integrated development strategy of coastal industrial areas and city based on underground space development[J]. *Geofluids*, 2021: 4336163.
- SHAO F, WANG Y S. 2022. Intelligent overall planning model of underground space based on digital twin[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 104: 108393.
- VÄHÄÄHO I. 2016. An introduction to the development for urban underground space in Helsinki[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 324-328.
- VON DER TANN L, STERLING R, ZHOU Y X, METJE N. 2020. Systems approaches to urban underground space planning and management – a review[J]. *Underground Space*, 5(2): 144-166.
- WANG S H, YANG X, JIANG Y S, LIU Q W, ZHAO J Z, ZHU Z J, SHAO C Z, TAN Z L, YANG Z Y. 2023. Synchronous backfilling technology for gravel and bottom grouting behind double-shield tunnel boring machine segment: a case study of a section of Qingdao Metro Line 6[J]. *Tunnel Construction*, 43(11): 1954-1963 (in Chinese with English abstract).
- XIA W Q, DONG J, HE P, XIE Y J. 2019. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(S1): 233-240 (in Chinese with English abstract).
- XU Y J, CHEN X S. 2023. Current situation and prospect of comprehensive development of underground space in metro area[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 19(1): 1-12,21 (in Chinese with English abstract).
- XU M J, LIU H H, YANG B K, DONG J, HE P, ZOU L, HU R, LENG Q. 2021. Key technology and its application to evaluation of carrying capacity of geo-resources and geo-environment in Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(9): 79-88 (in Chinese with English abstract).
- XUE Y G, LI S C, SU M X, ZHANG X, ZHAO Y, LI W T. 2009. Practice of comprehensive early-warning geological prediction on aquifer fault in Qingdao Kiaochow bay sub-sea tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(10): 2081-2087 (in Chinese with English abstract).
- YANG P J, PENG S, WANG J, WANG Q, REN N, SONG W N. 2024. Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technology development status and application prospects[J]. *China Environmental Science*, 44(1): 404-416 (in Chinese with English abstract).
- YANG Y, WANG R, ZHAO M H, XING H X, ZHENG H J, ZHANG Q, CHEN C X, LI Y F, CHENG G H. 2022. Study on exploration and evaluation technology system of urban underground space resources[J]. *East China Geology*, 43(2): 245-254 (in Chinese with English abstract).
- YU P, LIU H H, WANG Z S, FU J N, ZHANG H, WANG J, YANG Q. 2023. Development of urban underground space in coastal cities in China: a review[J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2(2): 148-172.
- YU Y H, YAN B. 2021. Present situation and development trend of underground space in megacity in China[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 17(S1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- ZACHARIAS J, HE J. 2018. Hong Kong's urban planning experiment in enhancing pedestrian movement from underground space to the surface[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82: 1-8.
- ZHANG S P, LIU X L, CHENG G W, ZHU C Q, LI Q P, HE Y F. 2023. Geoenvironmental hazard risks and monitoring technologies for marine carbon sequestration[J]. *Strategic Study of CAE*, 25(3): 122-130 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Y T, LIU H H, QU W L, LUAN P Y, SUN J. 2023. Research on geological safety evaluation index systems and methods for assessing underground space in coastal bedrock cities based on a Back-Propagation Neural Network Comprehensive Evaluation-Analytic Hierarchy Process (BPCE-AHP)[J]. *Sustainability*, 15(10): 8055.
- ZHAO J W, LV Z Z, PANG S C, LU X T, PENG F L. 2015. Development control on underground space of ecoparks in the multifunctional city-taking Qingdao Sino-German Eco-park for example[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 11(4): 826-833 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO J W, PENG F L, WANG T Q, ZHANG X Y, JIANG B N. 2016. Advances in master planning of urban under-

- ground space (UUS) in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 290-307.
- ZHAO J W, WANG T L, ZHANG X W, PENG F L. 2018. “1X35” Framework-Based overall planning of urban underground space: a case study of underground space of the west coast new district of Qingdao[J]. *Modern Urban Research*, (8): 59-68 (in Chinese with English abstract).
- ZHU Y, WANG M L, XUE B Y, ZOU L, DOU Y G. 2023. Geological environment issues and spatial planning countermeasures in the coastal zone of Qingdao City[J]. *Marine Geology Frontiers*, 39(8): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- ZOU L, DOU Y G, HU R, LIN X, WANG R L. 2021. Land quality evaluation and development planning for the Guzhenkou innovation and development demonstration region of Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(9): 49-59 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈湘生, 付艳斌, 陈曦, 肖惠, 包小华, 庞小朝, 王雪涛. 2022. 地下空间施工技术进展及数智化技术现状[J]. *中国公路学报*, 35(1): 1-12.
- 陈湘生, 李克, 包小华, 洪成雨, 付艳斌, 崔宏志. 2021. 城市盾构隧道数字化智能建造发展概述[J]. *应用基础与工程科学学报*, 29(5): 1057-1074.
- 程光华, 王睿, 赵牧华, 苏晶文, 杨洋, 张晓波. 2019. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J]. *地学前缘*, 26(3): 39-47.
- 邓一荣, 汪永红, 赵岩杰, 谷培科, 肖瑾, 周健, 李朝晖, 于志强, 彭平安. 2023. 碳中和背景下二氧化碳封存研究进展与展望[J]. *地学前缘*, 30(4): 429-439.
- 窦衍光, 印萍, 陈斌, 薛碧颖, 王蜜蕾, 邹亮, 胡睿, 徐刚, 岳保静, 宋维宇, 林曦, 董杰, 付佳妮, 徐锐, 何松, 林琴岗. 2021. 滨海基岩城市地质调查成果应用探索与理论技术创新——以青岛市为例[J]. *海洋地质前沿*, 37(9): 1-9.
- 付佳妮, 刘洪华, 董杰, 窦衍光, 明强, 刘海松, 夏伟强, 邹亮. 2021. 遥感技术在青岛市城市地质调查中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 37(9): 69-78.
- 国家发展和改革委员会. (2009-08-31)[2024-02-26]. 青岛市城市轨道交通近期建设规划(2009—2016年)[EB/OL]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=4679>.
- 国家发展和改革委员会. (2013-12-11)[2024-02-26]. 青岛市城市轨道交通近期建设规划(2013—2018年)[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zdgc/201312/t20131211_1145897.html?state=123.
- 国家发展和改革委员会. (2021-08-19)[2024-02-26]. 青岛市城市轨道交通第三期建设规划(2021—2026年)[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/pifu/202109/t20210906_1316572.html.
- 郭志, 曲秋芬, 樊治国, 刘桂涛, 路效峰, 宫迎雷. 2021. 青岛地铁1号线双护盾TBM施工技术创新[J]. *隧道建设(中英文)*, 41(8): 1385-1391.
- 韩中阳, 吴沙沙, 刘咏明, 韩子晨, 姜彦玉, 戈成旺, 宋文静. 2022. 济南市北部地热田地热资源量计算与评价[J]. *华东地质*, 43(3): 276-285.
- 何鹏, 董杰, 管勇, 王青, 解永健, 刘海松, 尹政, 付佳妮. 2023. 典型海岛地热资源勘查定井方法研究——以青岛市小管岛为例[J]. *海洋地质前沿*, 39(8): 38-48.
- 李子玉, 乔永康, 吴晓雷, 彭芳乐. 2022. 城市更新地区地下空间开发利用规划策略研究[J]. *现代隧道技术*, 59(S1): 143-151.
- 李志强, 薛翊国, 曲立清, 孙文昊, 刘洪亮, 赵世森. (2023-07-26)[2024-04-23]. 青岛胶州湾第二海底隧道主要不良地质与施工风险分析[J/OL]. *工程地质学报*. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0756.
- 刘洪华, 王忠胜, 耿林, 赵玉婷, 陈闰. 2024. 城市地下空间地质安全多级变模糊变权综合评价法[J]. *安全与环境学报*, 24(1): 19-32.
- 钱七虎. 2022. 能源地下结构与工程——助力“双碳”目标, 赋能绿色城市[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 39(1): 1-2.
- 青岛市国防动员办公室. (2020-07-06)[2024-02-26]. 青岛市地下空间开发利用管理条例[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zc/renfb_flg/202205/t20220509_6041673.shtml.
- 青岛市交通运输局. (2021-10-19)[2024-02-26]. 青岛市轨道交通条例[EB/OL]. http://qdjt.qingdao.gov.cn/jtj_zcfg/sjjb-mzcfg_54/202112/t20211214_3998988.shtml.
- 青岛市人民防空办公室. (2021-12-10)[2024-02-26]. 青岛市人民防空法治建设实施意见(2021—2025年)[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zw/renfb_ml/ybj_gwfg/202112/t20211210_3982497.shtml.
- 青岛市人民防空办公室, 青岛市规划局. (2014-11-28)[2024-02-26]. 青岛城市地下空间资源综合利用总体规划(2014—2030年)[EB/OL]. http://qdrf.qingdao.gov.cn/renfb_zw/renfb_ml/ybj_gwfg/202010/t20201018_393288.shtml.
- 青岛市人民政府. (2022-01-14)[2024-02-26]. 青岛市人民防空工程建设管理办法(2022年修订)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/zdgc/fgwj/fggz/zfgz/2022/202202/t20220225_4443775.shtml.
- 青岛市人民政府办公厅. (2016-04-08)[2024-02-26]. 关于加快地下综合管廊建设的实施意见(青政办发〔2016〕9号)[EB/OL]. <http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/zdgc/fg->

- wj/zcwj/zfgb/2016_6_7/202010/t20201019_500528.shtml.
- 青岛市人民政府办公厅. (2021a-04-01)[2024-02-26]. 青岛市地下综合管廊规划建设管理办法(青政办发〔2021〕7号)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/bgt/gkml/gwfg/202112/t20211213_3995078.shtml.
- 青岛市人民政府办公厅. (2021b-11-29)[2024-02-26]. 青岛市“十四五”应急管理体系建设规划(青政办字〔2021〕81号)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/bgt/gkml/gwfg/202112/t20211213_3987914.shtml.
- 青岛市住房和城乡建设局. (2018-03-15)[2024-02-26]. 青岛市城市地下管线管理条例[EB/OL]. http://sjw.qingdao.gov.cn/cxjsj24/cxjsj127/202112/t20211210_3972499.shtml.
- 青岛市自然资源和规划局. (2020-01-22)[2024-02-26]. 青岛市地下空间国有建设用地使用权管理办法(青自然资规(规)字〔2020〕1号)[EB/OL]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gwfg/gfxwj/202312/t20231211_7709368.shtml.
- 青岛市自然资源和规划局. (2021-07-27)[2024-02-26]. 青岛市国土空间总体规划(2021—2035年)(草案)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/zxfw/zrzyghggzyxx/ghgl/ghcajzjg/csztg/202204/t20220402_5165591.shtml.
- 青岛市自然资源和规划局. (2023a-03-10)[2024-02-26]. 青岛市城市更新专项规划(2021—2035年)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/zxfw/zrzyghggzyxx/ghgl/ghcajzjg/zxgh/202303/t20230310_7043945.shtml.
- 青岛市自然资源和规划局. (2023b-06-08)[2024-02-26]. 青岛市中心城区地下空间开发利用专项规划(2021—2035年)[EB/OL]. http://zrzygh.qingdao.gov.cn/gzdt/xyw/202306/t20230608_7219818.shtml.
- 王守慧, 杨星, 江玉生, 刘泉维, 赵继增, 朱志敬, 邵长志, 谭卓林, 杨志勇. 2023. 双护盾TBM管片壁后豆砾石与底部灌浆同步回填技术研究——以青岛地铁6号线某工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 43(11): 1954-1963.
- 夏伟强, 董杰, 何鹏, 解永健. 2019. 青岛主城区地下空间开发利用地质因素的影响评价及适宜性分区[J]. 地质学报, 93(S1): 233-240.
- 徐雅洁, 陈湘生. 2023. 地铁域地下空间综合开发研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 19(1): 1-12, 21.
- 徐美君, 刘洪华, 杨宝凯, 董杰, 何鹏, 邹亮, 胡睿, 冷琦. 2021. 青岛市地质资源环境承载力评价关键技术与应用[J]. 海洋地质前沿, 37(9): 79-88.
- 薛翊国, 李术才, 苏茂鑫, 张霄, 赵岩, 李为腾. 2009. 青岛胶州湾海底隧道含水断层综合超前预报实践[J]. 岩石力学与工程学报, 28(10): 2081-2087.
- 阳平坚, 彭栓, 王静, 王强, 任妮, 宋维宁. 2024. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望[J]. 中国环境科学, 44(1): 404-416.
- 杨洋, 王睿, 赵牧华, 邢怀学, 郑红军, 张庆, 陈春霞, 李云峰, 程光华. 2022. 城市地下空间资源探测评价技术体系研究[J]. 华东地质, 43(2): 245-254.
- 余苑航, 阎波. 2021. 我国超大城市地下空间开发现状及其发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 17(S1): 1-7.
- 张少鹏, 刘晓磊, 程光伟, 朱超祁, 李清平, 何玉发. 2023. 海底碳封存环境地质灾害风险及监测技术研究[J]. 中国工程科学, 25(3): 122-130.
- 赵景伟, 吕占志, 逢淑超, 鲁晓婷, 彭芳乐. 2015. 功能复合型城市生态园地下空间开发控制——以青岛中德生态园为例[J]. 地下空间与工程学报, 11(4): 826-833.
- 赵景伟, 王太亮, 张晓玮, 彭芳乐. 2018. 基于“1X35”框架的城市地下空间总体规划编制研究——以青岛西海岸新区地下空间为例[J]. 现代城市研究, (8): 59-68.
- 朱妍, 王蜜蕾, 薛碧颖, 邹亮, 窦衍光. 2023. 青岛市海岸带地质环境问题与空间规划对策建议[J]. 海洋地质前沿, 39(8): 1-7.
- 邹亮, 窦衍光, 胡睿, 林曦, 王瑞龙. 2021. 青岛古镇口创新示范区土地质量评价及规划利用[J]. 海洋地质前沿, 37(9): 49-59.

The progress and prospects of underground space development and construction in Qingdao

DONG Jie^{1,2}, SUN Ping^{1,2}, ZHANG Peng³, ZHOU Dayong⁴, LI Lanjun⁵, YU Peng^{1,2,6}

(1. Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266101, Shandong, China; 2. Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute (Qingdao Geological Exploration Development Bureau), Qingdao 266101, Shandong, China; 3. Qingdao Qingzi Engineering Consulting Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China; 4. Qingdao Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, Shandong, China; 5. Shandong Quanchengtong Project Management Co., Qingdao 266100, Shandong, China; 6. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Beijing 100055, China)

Abstract: Urban underground space development is an important way to solve “urban diseases”. Since underground space development is irreversible, it is necessary to summarize experience for guiding the development of underground space in a comprehensive way. The development of underground space in Qingdao is going to reach maturity, but there lacks review and summary on the development status, hindering the efficient exploitation process. This paper systematically sorts out the development history of underground space in Qingdao and comprehensively summarizes the current situation and research progress of constructing each function in underground space. It also analyzes the characteristics and problems of underground space development in Qingdao and proposes suggestions for its integrated planning, construction and management. Finally, it clarifies the demand and support for underground space development in terms of high-quality urban development, resources and environment, and charts the path for constructing a “Transparent Qingdao”. This study is of great significance to scientifically and appropriately utilize underground space and to promote underground construction in Qingdao.

Key words: urban underground space; Qingdao City; development history; development and utilization planning; space resource potential