

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.02.002

地质调查服务国家重大战略区规划建设探索与实践 ——以粤港澳大湾区为例

张傲¹, 赵信文^{1*}, 甘华阳², 孙尧³, 郑小战⁴, 张庆华⁵, 刘伟⁵, 许汉森⁶,
蒙彦⁷, 吴盼¹, 曾敏¹, 江拓¹, 顾涛¹, 何军¹, 赵幸悦子¹, 王世昌¹,
黎义勇¹

ZHANG Ao¹, ZHAO Xin-Wen^{1*}, GAN Hua-Yang², SUN Yao³, ZHENG Xiao-Zhan⁴, ZHANG Qing-Hua⁵,
LIU Wei⁵, XU Han-Sen⁶, MENG Yan⁷, WU Pan¹, ZENG Min¹, JIANG Tuo¹, GU Tao¹, HE Jun¹, ZHAO
Xing-Yue-Zi¹, WANG Shi-Chang¹, LI Yi-Yong¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉430205;2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东广州510700;3. 中国地质科学院地质力学研究所,北京100081;4. 广州市地质调查院,广东广州510440;5. 广州市城市规划勘测设计研究院,广东广州510060;6. 广东省地质调查院,广东广州510080;7. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林541004

1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510700, Guangdong, China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Guangzhou Institute of Geological Survey, Guangzhou 510440, Guangdong, China; 5. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou 510060, Guangdong, China; 6. Guangdong Institute of geological survey, Guangzhou 510080, Guangdong, China; 7. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China

摘要:随着粤港澳一体化国家战略实施,在中央和地方公益性资金资助下,重点围绕大湾区规划发展对地质工作的重大需求,部署实施了自然资源、城市地质、海岸带地质、环境地质、活动断裂等多项地质调查工作,并取得系列调查成果。系统查明了自然资源本底条件,掌握了开发利用现状,评价了开发利用潜力;识别了重大地质安全问题,评估了地质安全风险,提出了防治对策建议;构建了地质信息服务和自然资源环境监测预警平台,掌握了资源环境变化动态,研判了发展趋势,提出了制约粤港澳大湾区发展的资源环境问题的地质解决方案。在智慧城市及韧性城市建设、特色农业发展、重大工程建设、水资源安全保障、绿色低碳发展及地质安全风险防控等6个方面得到较好应用,有效支撑服务粤港澳大湾区高质量发展和生态文明建设,为地质调查服务国家重大战略区规划建设提供典型案例。

关键词:粤港澳大湾区;地质调查;规划建设;典型案例

中图分类号:P642.5

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)02-0195-14

Zhang A, Zhao X W, Gan H Y, Sun Y, Zheng X Z, Zhang Q H, Liu W, Xu H S, Meng Y, Wu P, Zeng M, Jiang T, Gu T, He J, Zhao X Y Z, Wang S C and Li Y Y. 2022. Exploration and Practice of Geological Survey Support and Services in Planning and Construction of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *South China Geology*, 38(2):195-208.

收稿日期:2022-4-9;修回日期:2022-5-15

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190291、DD20221729)

第一作者:张傲(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事水工环地质调查研究,E-mail:zhangao@mail.cgs.gov.cn.

通讯作者:赵信文(1980—),男,硕士,正高级工程师,主要从事水工环地质调查研究,E-mail:zhaoxinwen@mail.cgs.gov.cn

Abstract: With the implementation of the national strategy for the integration of Guangdong, Hong Kong, and Macau, and the support of central and local public welfare funds, focusing on the major needs for geological work in the planning and development of the Greater Bay Area, the deployment and implementation of several geological surveys such as natural resources, urban geology, coastal zone geology, environmental geology, and active faults have been carried out, obtaining series of survey results. The background conditions of natural resources were systematically identified, the current situation of development and utilization was grasped, and the potential for it was evaluated. Preventive countermeasures were proposed after major geological safety problems were identified and geological safety risks were assessed. A monitoring and early warning platform for geological information service and natural resources and environment has been built to put forward geoscience solutions to resource and environmental problems that restrict the development of the Greater Bay Area, after the dynamic changes comprehension and development trends study and judgement in resources and environment. It has been well applied in 6 aspects including smart city and resilient city construction, characteristic agricultural development, major project construction, water resources security, green and low-carbon development, and geological safety risk prevention and control, which effectively supported high-quality services in the Greater Bay Area and the development and construction of ecological civilization, and provided typical cases for geological survey to serve the planning and construction of major national strategic areas.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; geological survey; planning and construction; typical case

地质调查工作是一项基础性、先行性、公益性事业,关系到生态环境保护、国家能源资源安全以及经济社会高质量发展(国务院,2006;张润丽,2014)。面对经济社会高速发展对地质调查工作提出的新需求,围绕解决资源环境重大问题,适应新形势是地质调查工作彰显其基础支撑和服务保障作用的根本出发点(李虹,2013)。“十三五”期间,聚焦国家重大需求和制约经济社会发展的重大问题,全国地质调查工作进行了系列改革探索,其中支撑服务国家重大战略区规划建设,是全国地质调查工作转型升级探索的重点方向之一(殷志强等,2020;马震等,2017,2021)。

2017年3月5日,国务院政府工作报告提出研究制定粤港澳大湾区(以下简称大湾区)城市群发展规划的重大战略决策,是新时代推动形成全面开放新格局的新举措(黄建龙等,2019)。大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,其建设重点涉及国土空间规划、产业布局发展、科技创新平台建设、城镇建设、基础设施建设、重大工程建设、优质生活圈建设、生态文明建设等诸多方面(国务院,2019)。这些内容对地质工作提出了新的

需求和更高要求,需要传统地质工作转型升级,从地球系统科学的角度,提供解决方案。在新形势下,地质调查如何支撑服务国家重大战略区规划建设,需要构建全新的工作思路与模式。中国地质调查局等中央和地方单位通过建立高效顺畅的“央-地”合作模式和协调联动机制,精准对接粤港澳大湾区建设对地质工作需求,先后开展了城市地质调查、海岸带地质调查、活动断裂调查、地下水质量调查、1:5万地质环境综合调查及多项专题研究工作(谢叶彩等,2015;黄长生等,2018)。在林草湿、水、地热、地质遗迹等优质地质资源和岩溶塌陷、软土地面沉降、水土污染、活动断裂等环境地质问题方面取得了重要进展(顾涛等,2021;叶升明等,2021;李瑞等,2021),为大湾区建设提供了重要的资源和安全保障,可作为地质调查工作服务国家重大战略区规划建设典型案例。

1 区域概况

粤港澳大湾区位于广东省中南部,行政区划主体包括广东省的珠三角经济区(广州、深圳、珠海、

佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆等 9 市)以及香港、澳门特别行政区(赵钟楠等,2018),总面积约 5.6 万 km²,拥有超级大城市群、世界性良港、国际金融中心、连片海湾、发达互联网业、制造业中心等众多有利条件,是未来中国南方经济、文化、政治率先一体化的热点区域(吴小明等,2018)。

地形地貌以珠江三角洲平原为主体,其西、北、东三面环山、南面临南海(图 1)。西、北、东被古兜山、天露山(标高达 1251 m)、罗浮山(标高 1281 m)等断续的山地和丘陵环绕。由于西、北、东江夹带的泥沙在湾内不断堆积,逐渐形成了现今的珠江三角洲平原。其北部有较多的台地,残丘散布,南部除台地外,还有山地、丘陵散布。珠江三角洲河口地段河道众多,水系纷杂,构成了平原上稠密的水网,为网河区。

区内地层出露齐全,从中新元古界至第四系均有分布,以泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、第四

系为主。其中,中新元古界云开群及南华系-震旦系分布较零星,见于西部和东部地区,岩性为片岩、片麻岩、石英岩、变质砂岩、板岩等。寒武系分布也较零星,仅见于西北和西南部的肇庆以及台山市一带,岩性为变质砂岩、板岩等。奥陶系-志留系呈条带状零星出露,仅见于西部的肇庆和南部台山一带,岩性为石英砂岩、砂砾岩、板岩及少量的硅质岩等。上古生界出露较分散,主要在三水盆地、高要市南部的盆地和开平-恩平一带的盆地等盆地边缘地带,岩性为碎屑岩及碳酸盐岩建造等,其中灰岩主要分布在广花盆地和肇庆等地。三叠系-侏罗系较零散,主要分布于惠州市西部-东莞市黄江镇-深圳市布吉镇,惠州市的石塘镇-马山镇一带和公庄镇东北一些地区,岩性为泥岩、砂岩、火山碎屑岩等。古近系-白垩系主要分布在三水盆地、高要市南部的盆地、开平-恩平一带的盆地等地区,岩性为砾岩、砂岩、凝灰岩等。第四系分布面积最

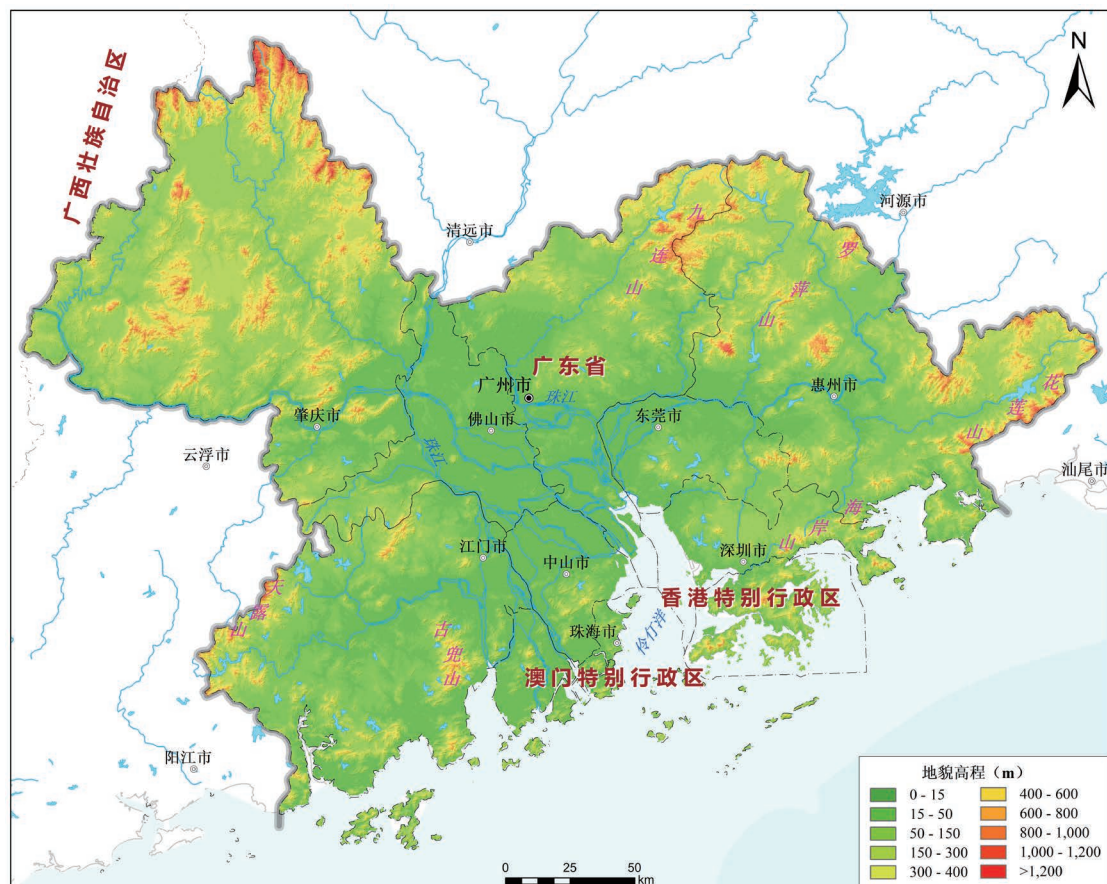


图 1 粤港澳大湾区区域地形地貌图

Fig. 1 Topographic map of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

广,主要见于东江、西江、北江、潭江等水网发育的平原区。地下水可划分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水、基岩裂隙水三大类。其中,碳酸盐岩类裂隙溶洞水依其含水岩性特征,又可分为碎屑岩夹碳酸盐岩类裂隙溶洞水、碳酸盐岩类溶洞水二个亚类;基岩裂隙水根据其含水岩组及水理性质差异,进一步划分为红色碎屑岩类孔隙裂隙水、层状岩类裂隙水、块状岩类裂隙水、玄武岩类孔隙裂隙水四个亚类。区内在构造单元上属华南褶皱系粤北、粤中拗陷带,主要拗陷为三水拗陷盆地。较大的断裂为北东向的吴川-四会深断裂带、恩平-新丰深断裂带;北西向三洲-西樵山大断裂;东西向的高要-惠来深断裂带。

2 技术路线与工作内容

2.1 技术路线

系统梳理制约粤港澳大湾区建设的资源保障和重大环境地质问题风险,对接粤港澳大湾区建设对地质工作需求,以《粤港澳大湾区发展规划纲要》

为蓝本,紧密围绕大湾区建设部署地质调查工作,按照精准对接、精细调查、精确服务的原则,建立高效顺畅的“央一地”合作模式和协调联动机制,推动项目有效运行,保障成果及时服务,为大湾区建设提供地球系统科学建议,技术路线见图2。

2.2 工作内容

聚焦粤港澳大湾区规划、建设、运行、管理的重大需求,围绕大湾区“三极、一带、一网、一区”空间布局,开展粤港澳大湾区综合地质调查,为大湾区规划建设、运行管理提供全过程高效的支撑服务。

(1)开展林草湿、水、地热、地质遗迹等自然资源综合调查,查明资源数量、质量、生态等禀赋条件,掌握资源利用现状和开发潜力,提出开发及保护建议。

(2)开展“空间、资源、环境、灾害”等多要素城市地质调查,建立地质资料汇交、成果转化与共建共享体制机制,构建城市地质信息系统和服务平台。

(3)开展海岸带陆海一体化综合地质调查,摸清海岸带湿地、滩涂、海砂等自然资源家底,查明侵蚀淤积、风暴灾害等环境地质问题现状,分析重点

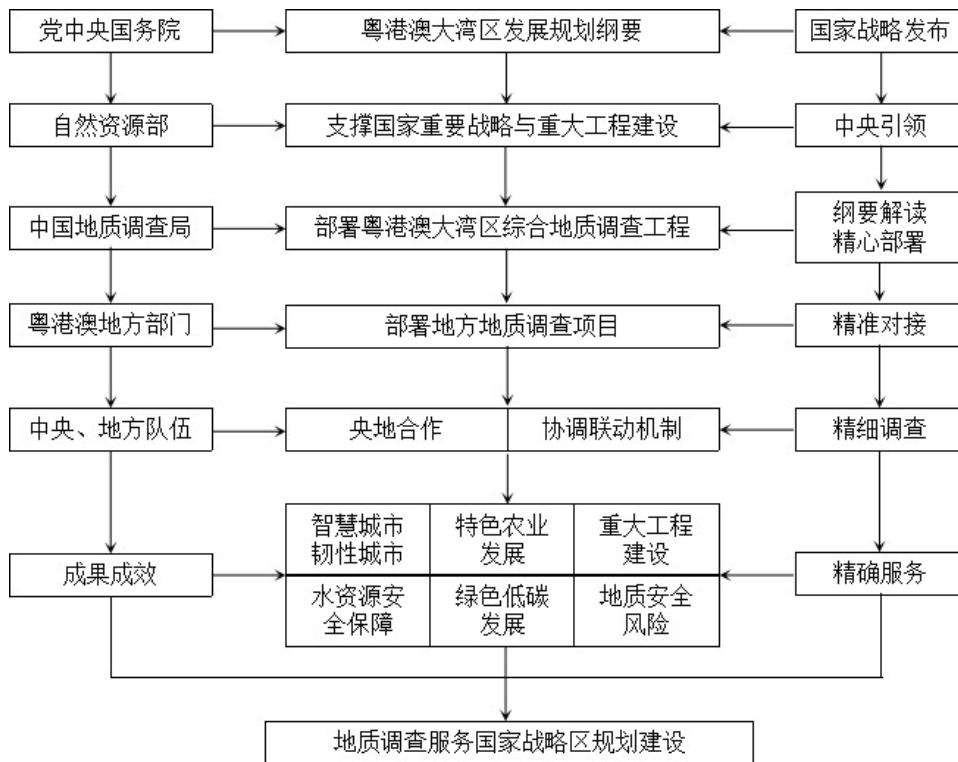


图2 地质调查支撑服务粤港澳大湾区技术路线

Fig. 2 Technical route of geological survey supporting services for Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

区生态地质环境要素,提出海岸带资源开发与保护、生态环境修复地学建议。

(4)围绕重点城镇规划区及重大工程建设区,开展活动断裂、岩溶塌陷、软土地面沉降等重大问题精细化调查评价,提出地质安全风险管控建议。

(5)建立资源环境监测预警及地质信息服务平台,为大湾区智慧城市及韧性城市建设、特色农业发展、重大工程建设、水资源安全保障、绿色低碳发展及地质安全风险防控提供地球系统科学依据。

3 实践与应用

3.1 智慧城市及韧性城市建设

(1)通过横波反射、微动、折射层析成像、瞬态面波、瞬变电磁法、高密度电法、地质雷达和综合测井等多种地球物理勘探方法试验和应用,总结了适用于大湾区不同环境下地下空间探测的地球物理勘探方法组合应用模式,为城市地下空间高精度的探测提供方法指导(表 1)。如针对广深科技创新走廊第四系浅覆盖区,运用陆域浅层高分辨率可控震源进行浅层地震数据采集,并采用矢量波数变换法(Vector Wavenumber Transformation Method)进行数据处理,实现了第四系松散层分层精细化和断裂定位精准化;针对广州市南沙区建成区以及重点规划区不同的探测目的和地质背景,采用地质雷达、高密度电法、浅层地震等多方法组合模式实现了地层结构、隐伏构造、地下空间岩性-构造特征、覆盖层厚度的快速探测(陈松等,2020)。

(2)通过对广州市重点区域南沙新区地下空间的勘查,共实施和收集了 8082 个地质钻孔,查明了南沙新区地下空间结构特征。并将地质钻孔数据导入 ArcGIS 的三维建模及可视化模块,构建了南沙

表 1 地下空间探测技术方法体系

Table 1 Underground space exploration technology and

method system		
目的需求	指标	工作手段
深度	0-20 m	地质雷达、主动 + 被动源面波
	20-60 m	高密度电法、主动 + 被动源面波
	60-200 m	高密度电法、被动源面波、浅震
	>200 m	(音频)大地电磁、浅震
圈定构造	赋水性	(音频)大地电磁、高密度电法偶极装置
	规模、埋深	浅震、音频大地电磁
剖面延展性	连续性	(音频)大地电磁、被动源面波
第四系	软土	地质雷达、被动源面波
	覆盖层	高密度电法温纳装置、被动源面波
抗干扰能力	电磁、震动	浅震、被动源面波
分辨力	异常体识别	地质雷达、浅震、主动源面波
适用场地	建成区	地质雷达、浅震、主动 + 被动源面波
	规划区	均适用

新区 200 m 深度的三维地质模型。模型实现了地质体的任意剖切、开挖、切块、虚拟孔钻取、地层等值线图生成等基础功能,并创建了属性统计分析、地质风险分析、规划建设建议、地质模型 web 端的公众共享服务应用系统,为城市地下空间智慧化开发、建设与管理提供有力支撑。

(3)以广州市南沙区为重点区域,开展地下空间开发利用适宜性评价理论、方法及标准流程研究工作。构建地下空间开发利用适宜性评价指标体系,采用层次分析法确定各个指标权重,并基于改进后的模糊综合评判法建立了地下空间开发利用适宜性评价模型,对广州市南沙区地下空间浅层(0~20 m)、中层(20~50 m)、次深层(50~100 m)、深层(100~200 m)进行了分层适宜性评价(表 2)。

表 2 南沙新区地下空间开发利用适宜性评价结果

Table 2 Evaluation results of the suitability of underground space development and utilization in Nansha New Area

深度	适宜性好		适宜性较好		适宜性较差		适宜性差		
	评价结果	面积 (km ²)	百分比	面积 (km ²)	百分比	面积 (km ²)	百分比	面积 (km ²)	百分比
0-20m		60.55	8.01%	157.04	20.78%	429.63	56.86%	108.37	14.34%
20-50m		245.42	32.48%	252.73	33.45%	240	31.76%	17.43	2.31%
50-100m		122.7	16.24%	447.89	59.28%	169.68	22.46%	15.32	2.03%
100-200m		287.87	38.10%	381.2	50.45%	81.11	10.73%	5.4	0.71%

(4)按照共建共享理念,打造地质灾害气象风险预警共享系统、地质环境实时监测系统、“地质随身行”APP等模块,构成具有查询、更新、监测、预警功能的城市地质信息共享服务平台,纳入广州“穗智管”政府行政管理平台和“智慧广州时空信息云平台”,创新实现地质调查成果服务与政务信息互连互通。

3.2 特色农业发展

大湾区优质耕地和富硒耕地分布面积广泛,可大力发展富硒产业。硒是世界卫生组织确定的人体必需微量元素,与人体健康密切相关。万物土中生,食以土为本,土壤是植物硒的直接来源。大湾区分布着得天独厚的富硒优质耕地,是发展绿色生态农业的珍贵资源。根据土地质量和有益元素分析,大湾区土地总面积约54666.67 km²,其中耕地面积约6566.67 km²,约占全区土地面积的12%;优质耕地1586.7 km²,占全区耕地面积的24.2%,成片分布在惠州市、江门市、广州市和肇庆市,各市分别占全区优质耕地面积的28%、25%、18%、11%;富硒优质

耕地1358 km²,约占全区耕地面积的20.68%、优质耕地面积的86%,主要分布于江门市鹤山市-台山南部、惠州惠阳-惠东东部、广州花都-从化、肇庆鼎湖-四会(图3),这些区域硒含量最高值为2.209 μg/g,平均值0.55 μg/g,远超过《广东富硒土壤(T/GDBX 018-2019)》(硒平均含量≥0.50 μg/g)的标准(广东省标准化协会,2019),适合种植富硒特色农产品。调查成果助推了江门打造广东省首个天然富硒农业产业示范基地,带动广东新会、台山、阳西、化州、饶平富硒农业产业园建设。

3.3 重大工程建设

摸清了广东近海海砂资源家底,估算远景资源量约700亿m³(图4),详查圈定珠海等地20个拟出让海砂资源区块,推断资源量约3.25亿m³。大湾区近海(50m水深以浅)总体发育4种类型的海砂,分别为古河道砂、古海岸砂、沿岸流砂和现代沙波砂。对万山岛海域内海砂进行检测,发现海砂中主要伴生矿物均未达到边界品位,海砂的放射性照射指数小于1,符合《建筑用砂(GB/T 14684-2011)》

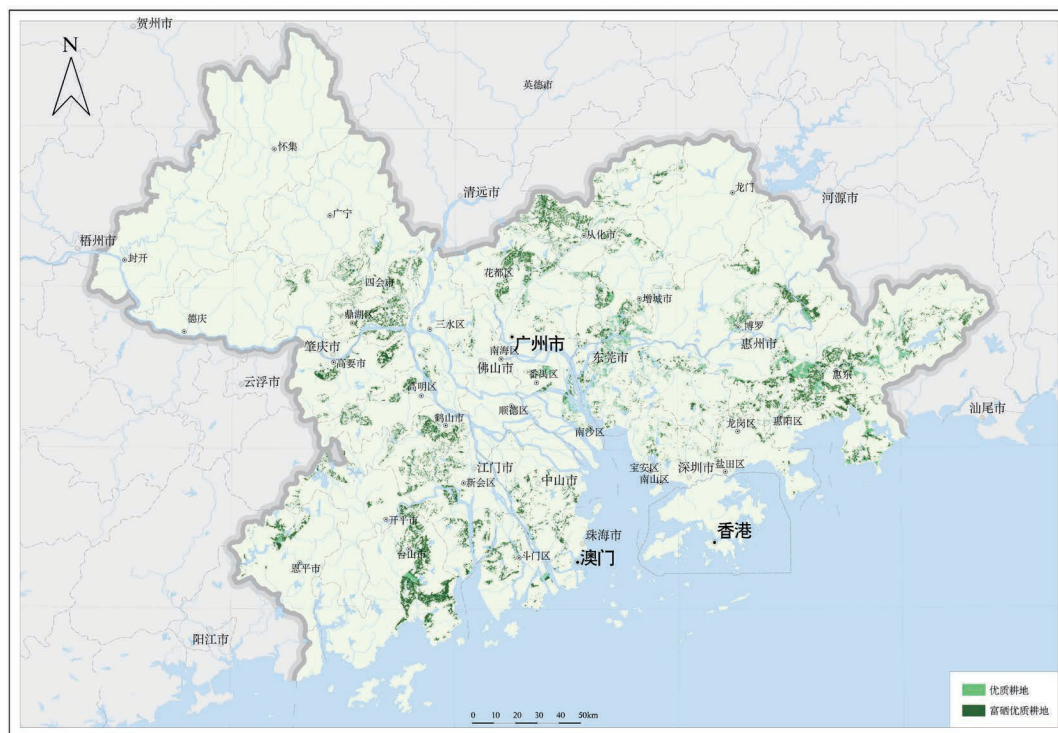


图3 粤港澳大湾区富硒优质耕地分布图

Fig. 3 Distribution map of selenium rich and high-quality cultivated land in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

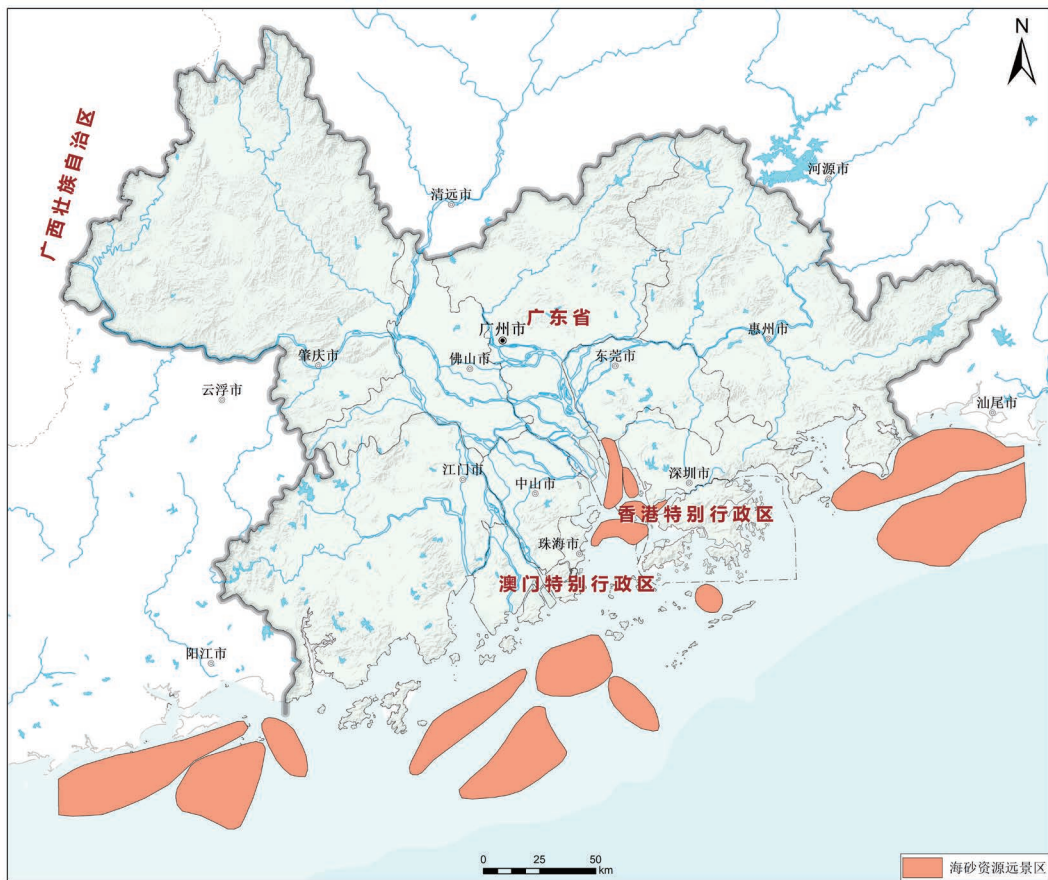


图 4 粤港澳大湾区海砂资源远景区分布图

Fig. 4 Distribution map of prospective areas of sea sand resources in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

(国家质量监督检验检疫总局, 2012)规范要求, 对环境对人体无危害性。采用海域使用权和海砂采矿权“两权合一”的模式, 支撑完成 7 个区块挂牌出让, 海砂资源的查明可有效缓解大湾区内海砂资源供应紧张局面, 切实保障重大项目用砂需求。

3.4 水资源安全保障

随着大湾区经济和社会的不断发展, 水资源供需矛盾凸显, 区域水资源问题严峻, 成为严重制约大湾区可持续发展的重要瓶颈(Varis et al., 2001; Yang D W et al., 2004; 文琦等, 2008; 张捷旋等, 2016; Ren C F et al., 2016; 吴盼等, 2021)。水资源除作为基本的自然资源、生态环境的关键要素, 进一步上升成为决定未来大湾区可持续发展的战略性经济资源(Fitts, 2002; 夏军等, 2011, 2015; Gorelick and zheng C, 2015; Guo H P et al., 2015; 吴斌等, 2019)。《粤港澳大湾区发展规划纲要》中明确指出

要“加强饮用水水源地和备用水源安全保障达标建设及环境风险防控工程建设, 保障珠三角以及港澳供水安全”(殷志强等, 2018; Wang P et al., 2019; 曹建文等, 2021)。通过开展大湾区地下水资源调查与评价, 系统梳理了大湾区地表与地下水资源量、开发利用现状、应急水源地和矿泉水点状况, 并结合社会经济与水资源现状进行了协同演化规律研究。

(1)大湾区地下水资源丰富, 地下水应急供水保障能力强。大湾区珠三角九市地下淡水天然资源量约为每年 149.4 亿 m^3 , 允许开采资源量约为每年 80 亿 m^3 。地下水类型可划分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水三大类(图 5)。松散岩类孔隙水天然资源总量 36.6 亿 m^3/a , 可开采资源量为 16.1 亿 m^3/a ; 基岩裂隙水天然资源总量为 105.7 亿 m^3/a , 可开采资源量为 61.3 亿 m^3/a ; 岩溶水天然资源总

量为 7.1 亿 m³/a,可开采资源量为 2.6 亿 m³/a。

(2)已圈定后备 / 应急地下淡水水源地、远景区 24 处,水质优良,允许开采量约 12 亿 m³/a,在应急状态下,按供水标准定额每人 0.105 m³/d 计算,可解决约 3000 万人口应急供水。发现多处地下天然矿泉水,主要为偏硅酸型矿泉水,部分兼具富锶、锌、硒等特征。偏硅酸型矿泉水达 103 处,矿泉点多,分布面广。主要分布在广州、深圳、珠海、中山、佛山市等地,允许开采资源量为 0.99 亿 m³/a。

(3)大湾区人口、GDP 稳步增长的同时,水资源却存在时空分布不均、供需矛盾突出、开发强度大等问题。大湾区水源供给结构较为单一,西江、北江及东江等地表水为最主要的供水来源(杜庆棠, 2006; 赵钟楠等, 2018),供水率超过 98%,其中中部三角洲及沿海地区的广州、佛山、东莞、深圳、中山、江门以及珠海地表水供水率更是超过 99%。单一的供水结构使得大湾区大部分地区水资源开发

利用率较高,其中佛山、中山、东莞、广州以及深圳河流开发利用率分别为 100.25%、89.27%、81.53%、81.53%、43.45%,均超出国际公认的河流开发利用警戒线(40%) (安新代, 2007)。供水结构不合理及水资源分布不均的现状导致大湾区水资源量与人均水资源量均呈现出“中部低,四周高”的态势。按照国际用水标准,中部地区基本处于重度缺水甚至极度缺水状态,区域发展核心引擎的四大中心城市中,澳门、香港以及深圳处于极度缺水状态,而广州属于重度缺水状态(吴盼等, 2021)。相比地表水,大湾区地下水开发利用程度低、潜力大,开采利用地下水可以优化大湾区供水结构。建议按照“广佛肇、深莞惠港、珠中江澳”三大区域调控地下水资源开发格局,将已探明的 24 处地下水应急(后备)水源地作为优化大湾区供水结构的主要水源;将优质天然矿泉水资源作为生活用水供给的有效补充,提升大湾区居民生活品质,助力大湾区宜居宜业宜游

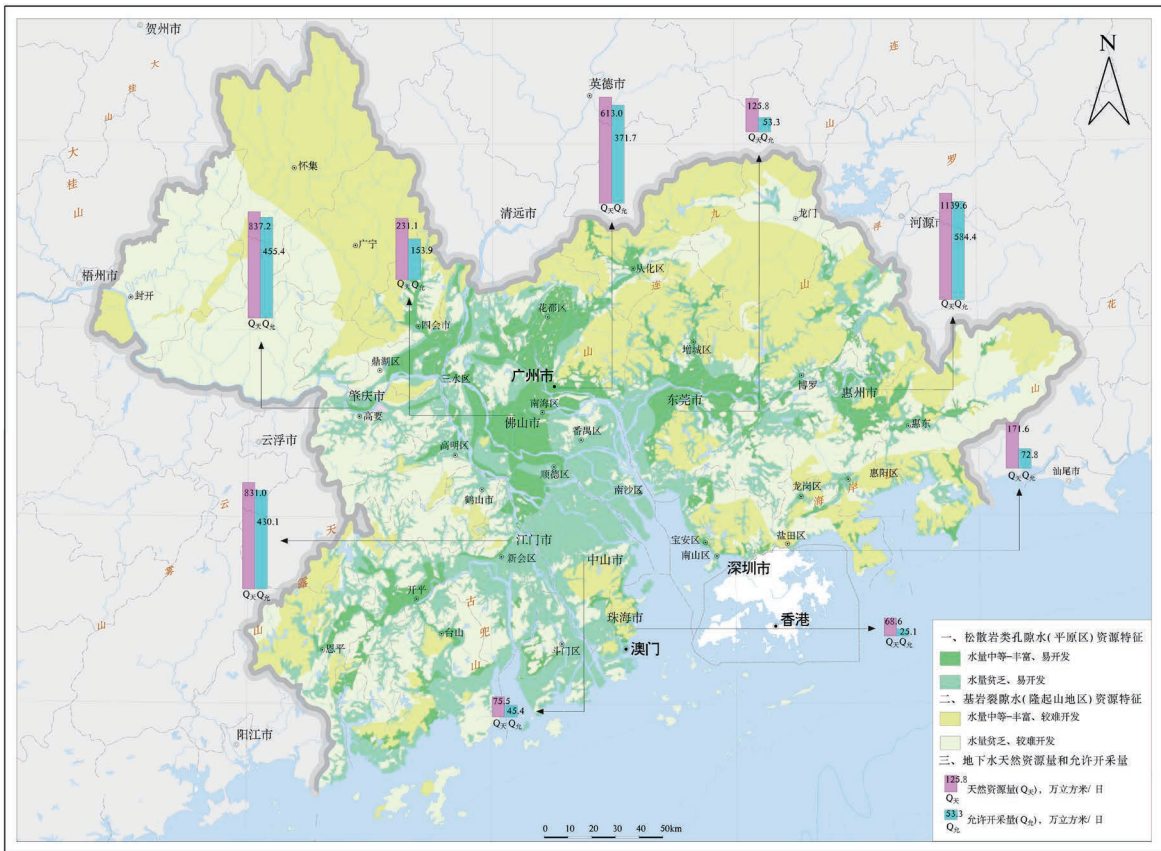


图 5 粤港澳大湾区地下水资源分布图

Fig. 5 Distribution map of groundwater resources in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

的优质生活圈建设;适当开发平原区松散孔隙水,作为分散式供水水源,缓解局部地区供水矛盾问题。

3.5 绿色低碳发展

(1)大湾区林地面积为 28011.22 km²,有林地面积最大,为 26322.49 km²,占全区林地面积的 93.97%;灌木林地面积最小,为 332.88 km²,占 1.19%;其他林地面积 1355.84 km²,占 4.84%。草地资源面积为 326.24 km²,其他草地占地面积最大,达 304.94 km²,占全区草地面积的 93.47%;人工草地次之,面积仅 11.31 km²,占 3.47%;天然草地面积最小,仅 9.99 km²,占 3.06%。湿地面积为 8649.87 km²,主要集中在珠江口西侧的中山、珠海和江门,分为人工湿地、滨海湿地、河流湿地、沼泽湿地、湖泊湿地等五大类,所占比例分别为 46.85%、37.73%、14.81%、0.44%、0.17%,以人工湿地为主,占比近一半。滩涂资源面积达 480 km²,滩涂资源主要分布在珠江口伶仃洋两岸以及珠江口西部。其

中,伶仃洋两岸滩涂面积约 150 km²,约占 31%;珠江口西部滩涂面积达 258 km²,占 54%;珠江口东部滩涂面积约 72 km²,约占 15%(图 6)。

(2)地热资源潜力丰富,开发程度低,具有广阔的利用前景。目前已发现地热田 75 处,包括裂隙型带状热储 74 处,岩溶型层状热储 1 处。水热型地热资源总量达 14000×10^{15} J,可开采热量 800×10^{15} J。地热资源量可折合标准煤每年 2730 万吨,若代替燃煤发电,每年可减少二氧化碳排放 6514 万吨,减少二氧化硫排放 46.41 万吨。惠州惠热 1 井成功探获 127℃ 的自喷地热资源,出水稳定温度 118℃,流量 137 m³/h,是我国东南部迄今为止水温最高、压力和流量最大的高产能自喷地热井,对应总结出了对流型地热勘查评价技术方法与成藏模式,可为绿色低碳发展提供重要参考价值。

(3)拥有省级以上地质遗迹 66 处,其中世界级 1 处、国家级 26 处、省级 39 处。涵盖基础地质、地



图 6 粤港澳大湾区滩涂资源分布图

Fig. 6 Distribution map of tidal flat resources in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

貌景观和地质灾害三大类,包括地层剖面、地质构造、古生物化石、典型矿山、典型地貌、水体景观、火山遗迹、海岸带、地震遗迹和地质灾害遗迹等14种类型。建议将地质遗迹资源丰富的“三区一带一中心”纳入粤港澳大湾区旅游产业规划,丰富旅游资源的科学内涵,提升旅游品质。优化增城地质公园、巽寮湾海蚀地貌等的资源配置,推进佛山南海古脊椎动物化石产地、紫洞火山岩地貌、黄圃和七星岗海蚀地貌等地质遗迹的有序开发,积极申报地质文化村助力乡村振兴。

(4)海岸线分布范围广,变迁演化过程中受围填海工程影响最为严重,需优化人工岸线开发,加强自然岸线生态保护与修复。通过对大湾区2016年Landsat遥感影像的解译,大湾区海岸线总长3201.20 km(含岛屿),海岸类型分为基岩海岸、泥质海岸、砂质海岸、生物海岸、人工海岸五类,其中基岩海岸和人工海岸约占岸线总长的96%。自1975年至2017年,自然岸线减少了553.46 km,人

工岸线则增加了635.63 km(图7)。结合历史影像数据,岸线变化以围填海工程影响最大。区内岸线变化强烈地区主要为大亚湾、盐田港、深圳新机场、广州南沙新区、新垦镇、珠海金湾围填海建设,鹤洲围垦区等,变化强度最大达到68.81 m/a(杨晨晨,2021)。

3.6 地质安全风险防控

(1)大湾区可溶岩分布面积大于2600 km²,主要位于广州、佛山、肇庆等地。岩溶类型分为裸露型、覆盖型和埋藏型三类,其中覆盖型岩溶占90%以上。岩溶区蕴藏着丰富的地下水资源,为城市应急地下水源地,也存在着岩溶塌陷等环境地质问题。从地质条件分析,岩溶塌陷高易发区面积大于1500 km²,占可溶岩面积的50%以上(图8),已查明的岩溶塌陷90%以上位于高易发区。106段、186 km的线性基础设施和重大工程建设存在岩溶塌陷安全隐患。岩溶塌陷地质安全风险的调查与评价为大湾区多起典型岩溶塌陷事故应急处置和防治提供了重要技术支撑。



图7 粤港澳大湾区海岸类型图

Fig. 7 Coastal Type Map of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

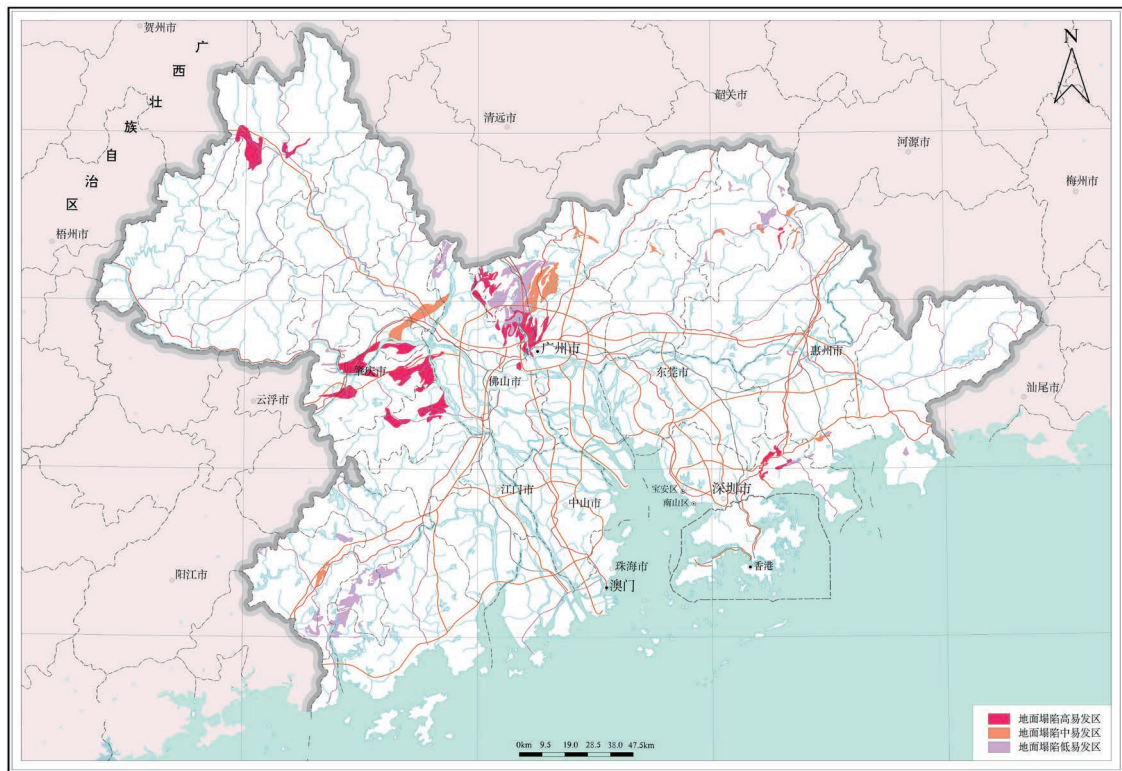


图 8 粤港澳大湾区岩溶塌陷易发性分布图

Fig. 8 Distribution map of karst collapse susceptibility in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

(2)大湾区软土分布总面积 11187 km²,约占全区面积的 20%(图 9)。其中,厚度超过 30 m 的区域面积 325.8 km²,占软土分布区的 3%,主要分布于珠海、中山、江门和广州的河口地区;厚度超过 10 m 的区域面积达 2846.3 km²,占软土分布区的 25%,主要分布于广州、中山、东莞、珠海、江门的八大入海口地区及江门至中山、佛山的部分地区。软土地面沉降高风险区,面积约为 737 km²,大湾区内受软土地面沉降威胁的公路、输油管道和天然气管道有 115 段、999 km。软土地面沉降地质安全风险的调查与评价为大湾区软土地面沉降防治提供了重要基础。

4 主要结论

(1)通过横波反射、微动、折射层析成像等多种地球物理勘探方法试验和应用,形成了大湾区地下空间探测方法组合应用模式,实现了地层结构、隐伏构造、地下空间岩性-构造特征的精准定位与快

速探测。开展了南沙新区地下空间开发利用适宜性评价,浅层-中层地下空间评价结果为较差-较好,需防范饱和砂土液化、软土地面沉降等问题,次深层-深层评价结果为较好-好,需防范断裂构造、基岩面起伏较大等问题。构建了南沙新区 200 m 深度的三维地质模型,实现了地质体的任意剖切、开挖、虚拟孔钻取。建立了城市地质信息共享服务平台,开发完善了“地质随身行”APP,创新了地质调查成果,有力支撑服务现代智慧城市和韧性城市建设。

(2)大湾区现有优质耕地面积为 1586.7 km²,其中天然富硒耕地面积为 1358 km²,占耕地总面积 20.68%,主要分布于江门市鹤山市-台山南部、惠州惠阳-惠东东部、广州花都-从化、肇庆鼎湖-四会,区域内硒含量最高值为 2.209 μg/g,平均值 0.55 μg/g。调查成果助推江门打造广东省首个天然富硒农业产业示范基地,促进农业高质高效发展。

(3)大湾区近海总体发育 4 种类型的海砂,分别为古河道砂、古海岸砂、沿岸流砂和现代沙波砂。估算海砂远景资源量约 700 亿 m³,圈定 20 个区块

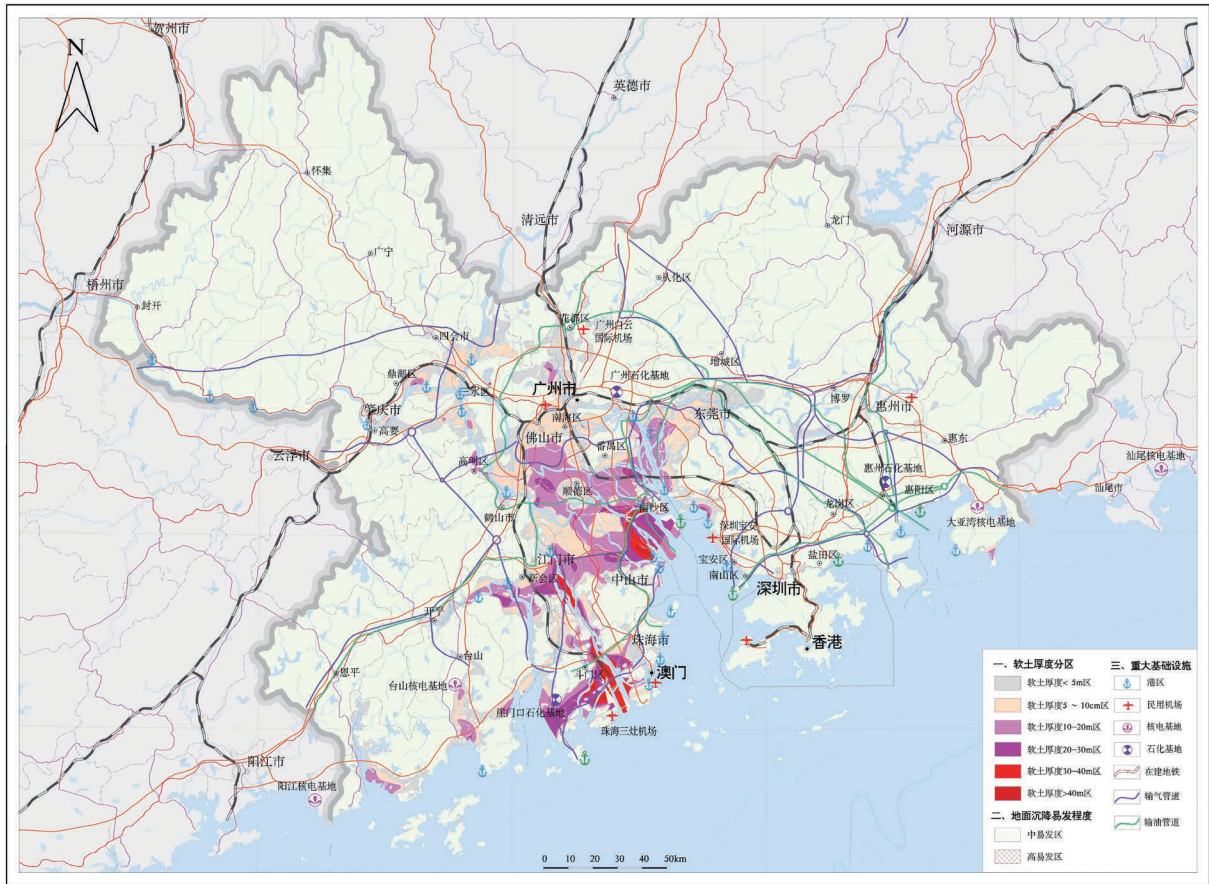


图9 粤港澳大湾区软土厚度分布图

Fig. 9 Distribution map of soft soil thickness in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

资源量 3.25 亿 m^3 , 支撑完成 7 个区块挂牌出让, 为香港机场、深中通道等重大工程建设提供资源保障。

(4) 大湾区地下淡水天然资源量约为 149.4 亿 m^3/a , 允许开采资源量约为 80 亿 m^3/a , 圈定后备 / 应急地下淡水水源地、远景区 24 处, 允许开采量约 12 亿 m^3/a 。但水资源存在时空分布不均、供需矛盾突出、开发强度大等问题。建议调控区域地下水资源开发格局, 将已探明的 24 处地下水后备 / 应急水源地作为优化大湾区供水结构的主要水源; 充分利用优质天然矿泉水资源作为生活用水供给的有效补充; 适当开发平原区松散孔隙水, 作为分散式供水水源, 缓解局部地区供水矛盾问题。

(5) 大湾区林草湿自然资源禀赋条件优越, 林地面积为 28011.22 km^2 , 草地资源面积为 326.24 km^2 , 湿地面积为 8649.87 km^2 , 滩涂资源面积为 480 km^2 ; 地热资源潜力丰富, 现发现地热田 75 处, 其中裂隙型带状热储 74 处, 岩溶型层状热储 1 处, 水热型地

热资源总量达 $14000 \times 10^{15} J$, 可开采热量 $800 \times 10^{15} J$; 拥有省级以上地质遗迹 66 处, 其中世界级 1 处、国家级 26 处、省级 39 处; 海岸线 (含岛屿) 总长 3201.20 km, 基岩海岸和人工海岸约占岸线总长的 96%。1975 年至 2017 年, 自然岸线减少 553.46 km, 人工岸线增加 635.63 km。

(6) 大湾区整体地质构造较稳定, 工程地质条件较好, 有利于大型工程建设, 但局部存在岩溶塌陷、软土地面沉降等环境地质问题。岩溶塌陷易发区 1937 km^2 , 岩溶塌陷点 541 处, 查明 106 段 186 km 的线性基础设施和重大工程存在岩溶塌陷安全隐患; 软土分布面积为 11187 km^2 , 地面沉降高风险区面积约为 737 km^2 , 115 段 999 km 线性基础设施受软土地面沉降威胁。基于重大地质问题与风险的识别与刻画, 有效指导了大湾区地质安全风险防控及应急处置, 保障人民生命和财产安全。

参考文献:

- 安新代.2007.黄河水资源管理调度现状与展望[J].中国水利,(13):16-19.
- 曹建文,夏日元,唐仲华,赵良杰,王喆,栾崧,王松.2021.粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力[J].中国地质,48(4):1075-1093.
- 陈松,陈长敬,黄理善,赵信文,曾敏.2020.音频大地电磁测深反演南沙新区地下空间岩性构造特征[J].华南地质,36(3):246-253.
- 杜庆棠.2006.珠江三角洲地区地下水资源的开发利用[J].广东科技,(11):108-110.
- 顾涛,郑小战,邱啸飞,江拓,赵信文,帅琴.2021.中山市神湾镇晚中生代花岗岩风化壳剖面元素地球化学特征[J].华南地质,37(4):406-417.
- 国家质量监督检验检疫总局.2012.建筑用砂(GB/T 14684-2011)[S].
- 国务院.2006.国务院关于加强地质工作的决定(国发[2006]4号)[Z].北京:国务院.
- 国务院.2019.粤港澳大湾区发展规划纲要[N].人民日报,2019-02-1(A01).
- 广东省标准化协会.2019.广东富硒土壤(T/GDBX 018-2019)[S].
- 黄长生,王芳婷,黎清华,赵信文,刘广宁,余绍文,刘怀庆,顾涛.2018.泛珠三角地区地质环境综合调查工程进展[J].中国地质调查,5(3):1-10.
- 黄建龙,刘亦农,曾伟国.2019.粤港澳大湾区地质特点与地质环境保护策略分析[J].人民珠江,40(9):103-109.
- 李虹.2013.中国地质调查局人才保障问题与对策研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 李瑞,王建荣,凌慧,曾钧跃,胡弦,朱世博.2021.粤东丰顺地区中生代火山活动旋回划分[J].华南地质,37(1):29-44.
- 马震,谢海澜,林良俊,胡秋韵,钱永,张素荣,王贵玲,李建国,谭成轩,郭海朋,张福存,赵长荣,刘宏伟.2017.京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J].中国地质,44(5):857-873.
- 马震,夏雨波,李海涛,韩博,余学中,周亚龙,王雨山,郭旭,李洪强,裴艳东.2021.雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J].中国地质,48(3):677-696.
- 文琦,刘彦随,丁金梅,陈锋.2008.银川市水资源胁迫与生态系统健康状况研究[J].资源科学,30(2):247-253.
- 吴斌,王赛,王文祥,安永会.2019.基于地表水-地下水耦合模型的未來气候变化对西北干旱区水资源影响研究——以黑河中游为例[J].中国地质,46(2):369-380.
- 吴盼,赵信文,顾涛,江拓,王旭升,冯雨晴.2021.粤港澳大湾区水资源现状及其与社会经济协同演化趋势——与国际湾区对比研究[J].中国地质,48(5):1357-1367.
- 吴小明,王凌河,贺新春,汝向文,刘晋.2018.粤港澳大湾区融合前景下的水利思考[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),39(4):11-15.
- 夏军,翟金良,占车生.2011.我国水资源研究与发展的若干思考[J].地球科学进展,26(9):905-915.
- 夏军,石卫,雒新萍,洪思,宁理科, Gippel C J. 2015.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].水科学进展,26(2):279-286.
- 谢叶彩,庄文明,何翔,黄雪飞,龙桂,商建林.2015.广东1:5万厚街圩、小榄镇、容奇镇、太平镇幅区域地质调查项目进展及主要成果[J].中国地质调查,2(7):1-7.
- 杨晨晨,甘华阳,万荣胜,张耀明.2021.粤港澳大湾区1975—2018年海岸线时空演变与影响因素分析[J].中国地质,48(3):697-707.
- 叶升明,李宏卫,何翔,李锐,何斌.2021.粤中从化地区佛冈岩基白垩纪花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J].华南地质,37(3):265-279.
- 殷志强,李瑞敏,李小磊,孟晖,刘琼,杨楠,王轶,全晓霞,李春燕,高萌萌.2018.地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J].中国地质,45(6):1103-1115.
- 殷志强,卫晓锋,刘文波,李霞,邢英梅,陈亮,王瑞丰,杨瑞,马光伟,彭超.2020.承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果[J].中国地质调查,7(3):1-12.
- 张捷旋,李明.2016.广东省环境污染治理问题研究[J].资源节约与环保,(7):147-147.
- 张润丽.2014.中国地质调查科学发展途径与战略研究[D].中国地质大学博士学位论文.
- 赵钟楠,陈军,冯景泽,张越,袁勇.2018.关于粤港澳大湾区水安全保障若干问题的思考[J].人民珠江,39(12):81-84,91.
- Fitts C R. 2002. Groundwater Science [M]. San Diego California: Academic Press.

- Gorelick S M, Zheng C. 2015. Global change and the groundwater management challenge[J]. Water Resources Research, 51(5):3031-3051.
- Guo H P, Zhang Z C, Cheng G M, Li W P, Li T F, Jiao J J. 2015. Groundwater- derived land subsidence in the North China Plain[J]. Environmental Earth Sciences, 74(2):1415-1427.
- Ren C F, Guo P, Li M, Li R H. 2016. An innovative method for water resources carrying capacity research-Metabolic theory of regional water resources[J]. Journal of Environmental Management, 167:139-146.
- Varis O, Vakkilainen P. 2001. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st century[J]. Geomorphology, 41(2-3):93-104.
- Wang P, Shen L C, Chen X H, Wang Z J, Liang X, Hu B X, Lan J C, Zhai X X. 2019. Response of soil water hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ to changes in spatiotemporal variations under different land covers in SW China karst catchment [J]. Hydrology Research, 50(3):925-944.
- Yang D W, Li C, Hu H P, Lei Z D, Yang S X, Kusuda T, Koike T, Musiaka K. 2004. Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data[J]. Water Resources Research, 40(6):308-322.

《华南地质》参考文献著录格式

自 2022 年起,《华南地质》参考文献的著录格式改为著者 - 出版年制。引用格式举例:“在当前复杂的国际国内形势下,关键金属矿产成矿作用的研究成为固体地球科学领域研究热点(翟明国等, 2019;毛景文等,2019;蒋少涌等,2019)。”“高山和金振民(1997)最早将‘拆沉作用’的概念引入国内。”

文后参考文献著录格式如下:

1 普通图书

作者(全部列出). 出版年. 书名 [M]. 版次(第 1 版不写). 出版地: 出版者. 起止页码. 例如:

史明魁, 傅必勤, 靳西祥, 周雪昌. 1993. 湘中锑矿 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社. 56-67.

2 普通图书、会议论文集等中析出的文献

作者(全部列出). 题名 [文献类型标识] // 原文献编者(全部列出). 原文献题名. 版次(第 1 版不写). 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码. 例如:

陈丕基, 万晓樵, 曹流, 李罡. 2008. 中国陆相白垩系富饶阶研究进展 [M]// 见: 王泽九, 黄枝高. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001-2005). 北京: 地质出版社. 65-73.

3 连续出版物中析出的文献

论文作者(全部列出). 出版年. 题名 [J]. 连续出版物名, 卷号(期号): 起止页码. 例如:

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题 [J]. 中国科学基金, 33(2):106-111.

4 学位论文

作者. 年份. 题名 [D]. 学位授予单位 + 学位类型, 例如:

刘锐. 2009. 华夏地块前海西期地壳深熔作用 [D]. 中国地质大学博士学位论文, 65-69.

5 参考文献类型及其标识

文献类型	普通图书	会议论文集	报纸文章	期刊文章
类型标识	M	C	N	J
文献类型	学位论文	报告	汇编	档案
类型标识	D	R	G	B
文献类型	标准	专利	参考工具	其他
类型标识	S	P	K	Z