

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.02.005

## 多要素城市地质调查的实践及成效 ——以武汉市为例

何 军<sup>1</sup>, 陶 良<sup>2</sup>, 徐德馨<sup>2</sup>, 黄长生<sup>1\*</sup>, 彭汉发<sup>2</sup>, 李 朋<sup>3</sup>, 庞设典<sup>4</sup>,  
王芮琼<sup>5</sup>, 刘 磊<sup>6</sup>, 华 杉<sup>7</sup>, 杨艳林<sup>1</sup>, 赵永波<sup>1</sup>

HE Jun<sup>1</sup>, TAO Liang<sup>2</sup>, XU De-Xin<sup>2</sup>, HUANG Chang-Sheng<sup>1\*</sup>, PENG Han-Fa<sup>2</sup>, LI Peng<sup>3</sup>, PANG She-Dian<sup>4</sup>,  
WANG Rui-Qiong<sup>5</sup>, LIU Lei<sup>6</sup>, HUA Shan<sup>7</sup>, YANG Yan-Lin<sup>1</sup>, ZHAO Yong-Bo<sup>1</sup>

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. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430022;
  3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 4. 武汉市勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430022; 5. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430034;
  6. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北 武汉 430056; 7. 湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队, 湖北 武汉 430051
1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;  
2. Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, Hubei, China; 3. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China;  
4. Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Co., Ltd, Wuhan 430022, Hubei, China; 5. Geological Environmental Center of Hubei Province, Wuhan 430034, Hubei, China; 6. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, Hubei, China; 7. The Institute of Hydrogeologic and Engineering Geological of Wuhan, Hubei Province Geological Survey, Wuhan 430051, Hubei, China

**摘要:**为精准服务武汉市新型城镇化建设,聚焦城市规划、建设、运行、管理的重大地质环境问题,中国地质调查局联合武汉市人民政府实施了“武汉多要素城市地质调查”,通过环境地质调查、评价、监测以及综合研究相结合等方法,取得了一批重要成果 and 认识。调查研究表明武汉市绝大部分地区适宜工程建设和地下空间开发,局部地区受隐伏岩溶和软土等不良工程地质体的影响需谨慎开展工程建设和地下空间开发。武汉市具有6个中深层地热靶区和11处深部富水地段、5处集中连片富硒耕地、73处地质文化资源、9处应急(后备)地下水水源地、13处锶或偏硅酸天然饮用矿泉水水源地以及丰富的浅层地温能。武汉市生态环境质量总体较好,需要重点关注入江河渠的汞、氟化物以及总磷超标、长江消落带重金属元素富集、河湖湿地萎缩、水体富营养化等问题。武汉市地壳整体较为稳定,区域深大断裂处于基本稳定状态;岩溶塌陷高风险区约130 km<sup>2</sup>,岩溶发育程度、覆盖层厚度和结构、地下水是岩溶地面塌陷的原生地质条件,可采用不同的地球物理方法组合进行探测。采用多级结合表的技术构建了不同尺度的三维地质模型,初步建立了武汉城市地质辅助决策信息系统,可为城市规划、建设和安全等领域决策提供支撑。

**关键词:** 武汉; 空间; 资源; 环境; 灾害; 城市地质调查

**中图分类号:** P642.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2097-0013(2022)02-0240-10

He J, Tao L, Xu D X, Huang C S, Peng H F, Li P, Pang S D, Wang R Q, Liu L, Hua S, Yang Y L and Zhao Y B. 2022. Practice and Effect of Multi Factor Urban Geological Survey: A Case Study of Wuhan City. *South China Geology*, 38(2): 240-249.

**Abstract:** In order to serve the construction of new urbanization in Wuhan accurately, the China Geological

收稿日期: 2022-4-6; 修回日期: 2022-5-5

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190282)

第一作者: 何军(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境地质调查评价工作, E-mail: 05302105hj@163.com

通讯作者: 黄长生(1964—), 男, 正高级工程师, 博导, 主要从事水工环地质调查研究工作; E-mail: 185236157@qq.com

Survey has organized and implemented “Wuhan Multi-factor Urban Geological Survey” in conjunction with the Wuhan Government, focusing on the major geological environment problems of urban planning, construction, operation and management. A number of important achievements and understandings have been achieved by means of environmental geological survey, evaluation, monitoring, and comprehensive research. The investigation shows that most region of Wuhan are suitable for engineering construction and development of underground space, while the adverse effect of engineering geological bodies such as concealed karst and soft soil should be considered in some local areas. There are 6 medium-deep geothermal target areas, 11 deep water-richlands, 5 concentrated contiguous selenium-rich farmlands, 73 geological cultural resource areas, water source places as 9 for emergency ( backup ) groundwater and 13 strontium or metasilicate natural drinking mineral water in Wuhan City, as well as abundant shallow geothermal energy sources. With the mostly good ecological environment, the city has to focus on the exceeding of mercury, fluoride and total phosphorus in rivers and canals entering the Yangtze River, the enrichment of heavy metal elements in fluctuation zone, the atrophy of river and lake wetlands, as well as the eutrophication of water bodies. The crust of Wuhan is relatively stable, so are the regional deep faults. The high-risk area of karst collapse, about 130 km<sup>2</sup> wide, can be detected by different combined geophysical methods on the primary geological conditions as development degree, thickness and structure of cover layer and groundwater. Three-dimensional geological models of different scales are constructed by surveying and mapping technology of multi-level combination table. The urban geological assistant decision-making information system is preliminarily established to provide references for urban planning, construction and security problems.

**Key words:** Wuhan City; space; resources; environment; hazard; urban geological survey

我国正在大力推进新型城镇化建设,提出了集约、智能、绿色、低碳的城市发展理念(林良俊等, 2017)。随着城市化水平的不断提高,城市规模的急剧扩大,城市空间拥挤、交通堵塞、环境恶化、土地资源匮乏等“城市病”已在我国一些大城市出现,并在一定程度上制约了城市的可持续发展(谢连平等, 2009; 葛伟亚等, 2021)。城市作为人为地貌作用形成的巨大建筑群体,坐落在自然地貌下垫面上,城市的形成和发展无疑要受到作为下垫面的地表形态制约(彭建兵等, 2019)。近年来,地铁、隧道、地下综合管廊等城市地下空间开发利用过程中因对地质结构的认识不清而引发了大量的工程地质、环境地质问题,甚至工程事故(周圆心等, 2019; 黄强兵等, 2019),亟需为城市规划建设提供空间、资源、环境、灾害等基础要素数据和服务支撑(林良俊等, 2017)。城市地质工作是城市规划建设的重要基础,贯穿于城市运行管理全过程(张茂省等, 2018),开展多要素城市地质调查对于支撑城市规划建设、保障城市安全方面具有重要的意义。

武汉市作为湖北省省会,是国家中心城市、长江经济带核心城市和国际化大都市。《武汉市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出,加快打造全国经济中心、国家科技创新中心、国家商贸物流中心、国际交往中心和区域金融中心,努力建设现代化大武汉。为此,中国地质调查局联合武汉市人民政府部署实施了“武汉多要素城市地质调查”项目,基本查明了武汉市地下空间结构特征,梳理了城市优势地质资源,摸清了城市生态环境现状,开展了针对重大地质环境问题专项调查研究。这些成果可为城市规划、建设和安全等领域决策提供支撑。

## 1 城市地质调查工作现状

我国城市地质调查大致经历了单要素或专项调查、三维城市地质调查和多要素城市地质调查三个阶段。新中国成立初期至 1999 年,初期的城市地质工作是以城市供水的水资源调查为主,零星的开

展了地基稳定性、地质灾害及环境地质问题调查(张茂省等,2018)。专门性的城市地质调查工作起步于改革开放初期(林良俊等,2017),主要在地下水勘查、工程地质勘查和地质灾害与环境地质问题防治方面做了大量工作(冯小铭等,2003;罗国煜等,2004)。1999年以后,为了摸清我国城市环境地质问题状况,中国地质调查局组织开展了大量的城市地质工作,形式由单要素或专项调查转向了城市资源环境和三维地质结构调查。2004年起,在全国范围内开展了287个地级以上城市和19个地州盟所在地县级城市的摸底调查,基本摸清了我国主要城市地质资源环境状况(文冬光等,2006);2004年至2009年,开展了上海、北京、天津、广州、南京、杭州6个城市三维地质调查试点;2009年以经济区(城市群)为单元开展了综合地质调查以及央地合作完成了福州、厦门、石家庄等28个城市地质调查工作。2017年原国土资源部出台了《关于加强城市地质工作的指导意见》,发布了《城市地质调查总体方案》(2017-2025),部署了雄安新区、西安、成都等城市的空间、资源、环境、灾害等多要素城市地质调查示范。

由于武汉市前期的地质工作基础扎实,在武汉市政府提出了明确的需求前提下,中国地质调查局将武汉市列为了本次多要素城市地质调查的试点城市之一,工作周期是2018-2021年。2000年以来,中国地质调查局就武汉市的区域地质(田望学等,2011)、工程地质(李长安等,2019)、水文地质(肖尚德等,2007)、环境地质(官善友等,2011)、岩溶塌陷(范士凯,2006;徐贵来,2016;涂婧等,2019)、隐伏断裂(庞设典,2005)、软土地面沉降(陈志浩等,2015)、水土污染以及崩塌、滑坡、泥石流灾害等方面开展了相应的地质调查工作(王焰新等,2002;熊峰等,2019)。2012-2014年,中国地质调查局在武汉市部署了三维地质调查项目,通过开展武汉市三维地质调查,编制了武汉地区系列基础图件,建立了武汉三维地质调查数据库和三维地质模型。2011-2015年,武汉市自然资源和规划局组织实施武汉城市地质调查工作,围绕制约城市可持续发展的地质资源、地质环境等综合因素,在武汉都市发展区范围内,开展了综合城市三维地质调查,取得了系

列成果(彭汉发等,2018)。

## 2 研究区概况

武汉市位于江汉平原东北部边缘,长江和汉江呈“Y”字形在市区交汇,地势总体南高北低。汉口的南部、汉阳以及武昌的沿江地区以长江一、二级阶地为主,垄岗平原穿插其中,地形波状起伏。沿江一带的冲积平原地势平坦,具明显的二元结构,上部为全新统黏土,下部为砂性土及卵砾石层。南部主要为垄岗平原,相对高差10-30 m不等,以更新统亚黏土、亚砂土和黏土为主。中部分布少量条带状丘陵和残丘,主要位于蔡甸新农至汉阳永丰、洪山区的九峰和花山一带,南部江夏乌龙泉和郑店一带零星分布,岩性多为泥盆系、志留系石英砂岩、砂质页岩和石灰岩等。

武汉市新生代构造运动形成了NW向和NE向两组断裂的构造格架。以襄(樊)—广(济)基底深大断裂与团(风)—麻(城)活动性大断裂呈“十字”交汇于东缘,构成了武汉地区地壳的基本结构面。武汉市内的主要深大断裂有团风—麻城断裂、襄樊—广济断裂、长江断裂、新城—黄陂断裂、天门河断裂、武汉—岳阳断裂、麻洋潭断裂和天子山断裂等8条。武汉市可溶岩分布面积约1161 km<sup>2</sup>,其中96%为隐伏岩溶区。共发育东西向8条岩溶条带,分别为天兴洲条带、大桥条带、白沙洲条带、沌口条带、军山条带、汉南条带、法泗条带和斧头湖条带。截至2019年,武汉市先后发生岩溶塌陷38次(33处)。武汉市软土地面沉降主要发生在后湖地区,软土以淤泥类土为主,软土厚度一般为3~7 m,局部地段,如辛安渡、四新农场、沙湖北岸等地,厚度达16 m以上。2021年现存的地质灾害隐患点为68处,除去地面塌陷外的地质灾害49处。主要分布于北部和东北部的低山丘陵区(图1)。

## 3 总体目标与工作内容

### 3.1 总体目标

按照生态保护,绿色发展的理念,以地球系统科学理论为指导,围绕武汉市城市规划建设运营的



需求,根据我国中部河湖丘陵复杂区、超大型城市的特点,开展武汉市“国土空间、自然资源、生态环境、灾害地质”等多要素综合城市地质调查。查明武汉市地下三维地质结构,评价地质环境条件、多门类自然资源、生态环境质量现状与特征,针对岩溶快速探测技术方法和水土污染机理开展专题研究,建立城市发展面临的主要地质问题的监测体系,为武汉市规划、建设、运行和管理的全过程提供科技支撑和决策服务。

### 3.2 主要工作内容

(1)查明工作区三维地质结构,分析工程建设与地下空间开发条件,建立国土空间开发利用适宜性评价体系,提出地质环境保护、防灾减灾、规划功能分区、建设项目布局等方面的建议。

(2)查明武汉市山水林田湖草多门类自然资源、浅层地温能与地热资源、地质文化资源、矿产资源等多门类自然资源的分布特征、资源量、开发利用现状和圈定一批自然资源靶区。

(3)开展土壤地球化学测量为主的调查工作,分析土壤有益及有害元素的时空分布特征和迁移

转化机理,系统评价武汉市全域土壤环境质量现状,为武汉市生态保护与系统修复提供科学依据。

(4)查明各种地质环境问题发育特征、分布规律以及形成的地质环境条件和成灾机理,进行风险评价,探索快速探测技术方法。

(5)以长江新城为重点区,部署实施高精度多要素城市地质调查,建立三维地质结构模型,支撑服务长江新城国土空间规划、资源开发利用、生态环境保护、地质灾害防治。

(6)在已有地面沉降、岩溶地面塌陷、地下水监测工作的基础上,进一步完善地质环境监测体系。

(7)探索城市三维地质结构模型建设技术方法,建立城市地质“一张图”和辅助决策信息平台,支撑服务城市规划、工程建设、防灾减灾和应急调查。

## 4 主要进展与成果

### 4.1 工程建设和地下空间适宜性评价

完成 1:5 万水工环综合地质调查 2650 km<sup>2</sup>,基本查明了武汉市国土空间开发利用条件。选择影响

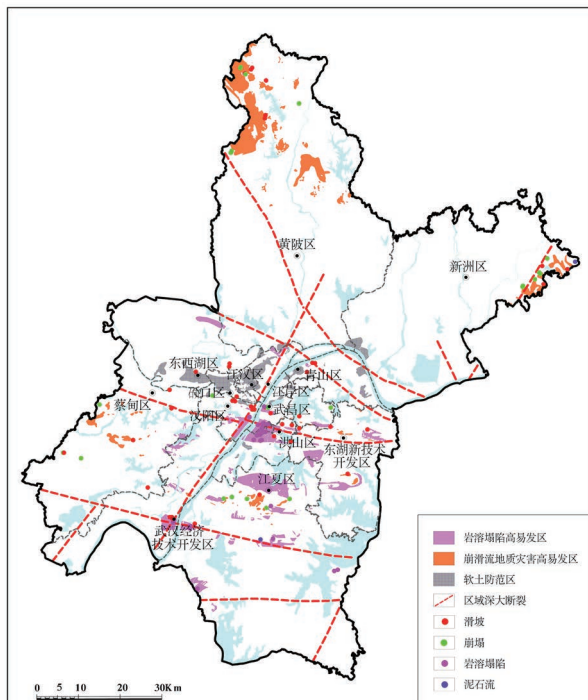


图 1 武汉市主要地质环境问题分布图

Fig. 1 Distribution of Major Geological Environmental Problems in Wuhan City

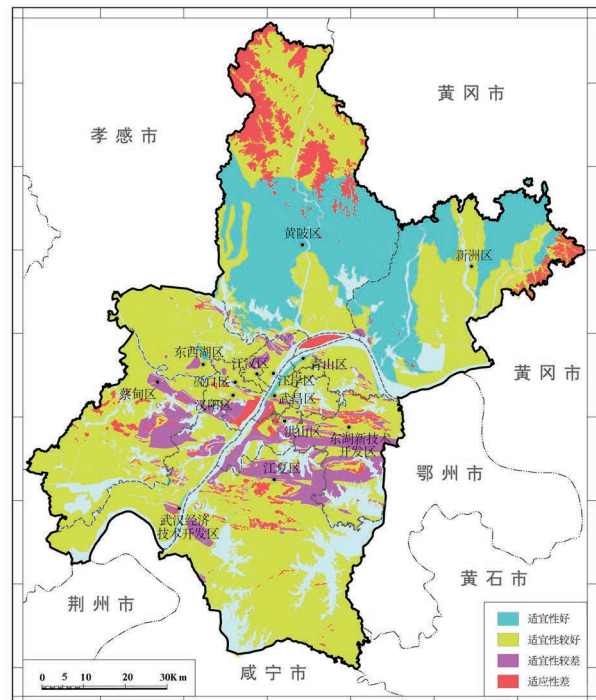


图 2 武汉市工程建设适宜性评价图

Fig. 2 Evaluation chart of Suitability of Engineering Construction in Wuhan

武汉市工程建设的地形地貌、地下水富水性、土体厚度、土体地基适宜性、岩体结构、岩溶塌陷易发程度、断裂、特殊土发育程度以及人类工程活动强度等指标,采用层次分析法对武汉市工程建设适宜性进行了评价。结果显示,武汉市的大部分地区(约 6568 km<sup>2</sup>)均适宜工程建设,约占总面积的 76.65% (图 2)。工程建设适宜性差区主要分布于白沙洲一带以及石门峰、八分山、花山、乌龙泉街道一带山区,面积约 40 km<sup>2</sup>,多为潜在岩溶地面塌陷区,上覆第四系松散一稍密砂土、粉土,隐伏型灰岩埋深一般小于 30 m;孔隙水与地表水有直接水力联系,止水排水困难,裂隙岩溶水丰富,存在地面塌陷的安全隐患。

地下空间是城市发展中的一种宝贵资源(张茂省等,2019),可为城市的基础设施、生活服务提供新的空间(Bobylev,2009;Hunt et al., 2016),是城市可持续发展的必要条件(李晓昭等,2019)。选取武汉市地下空间开发利用的主要影响因子,建立开发利用深度、岩土体工程条件、水文地质条件、不良地质作用与灾害、特殊性岩土和社会经济等指标体系(图 3),分浅层(0-15 m)、次浅层(15-30 m)、次深层(30-50 m)和深层(50-100 m)开展地下空间开发适宜性评价,同时结合城市已有的地下空间开发现状和重要生态功能区进行修正。结果表明,武汉市总体地下空间结构有利于开发利用,限制建设的区域主要是地下水水源地、地质灾害高易发区、生态保护红线等区域,面积约为 1766.7 km<sup>2</sup>。长江与

汉江两岸及汉南 - 乌龙泉一线浅层(0-15 m)地下空间受岩溶塌陷的影响,慎建区面积约 793.8 km<sup>2</sup>;硚口主城区、蔡甸 - 九峰沿线和汉南 - 乌龙泉沿线地区的次浅层(15-30 m)地下空间受岩溶塌陷的影响,慎建区面积约 488.3 km<sup>2</sup>;新洲阳逻长江沿岸、主城区长江与汉江两岸及汉南 - 乌龙泉沿线地区地区的次深层(30-50 m)地下空间受岩溶和岩土体强度的影响,慎建区面积约 829.6 km<sup>2</sup>;蔡甸 - 九峰沿线和汉南 - 乌龙泉沿线地区深层(50-100 m)地下空间主要受地基失稳、基坑稳定、岩溶塌陷和围岩稳定等因素控制,慎建区面积 633.3 km<sup>2</sup>。

#### 4.2 优势地质资源梳理

武汉市的优势地质资源主要包括中深层地热、富硒土地、地质文化资源、优质地下水和浅层地温能,主要分布如图 4 所示。

武汉市地热热源主要为地球内部的传导热,地热流体的温度取决于地温梯度和流体循环深度。武汉市的平均地温梯度一般为 2-2.5℃/100 m,远低于全国平均值(3.3℃/100 m)(牛俊强等,2019)。导热导水的构造主要有襄 - 广断裂、团 - 麻断裂、五通口 - 汤逊湖断裂等及其次级断裂,深部的岩溶裂隙也是地热流体主要的导热导水通道。武汉市发育较为稳定的志留系、上二叠统 - 侏罗系、白垩系 - 古近系热储盖层,对其下部的寒武系 - 奥陶系碳酸盐岩、白垩系 - 古近系底部砂砾岩以及石炭系 - 二叠系碳酸盐岩热储具有保温作用。通过综合分析武汉市地热地质条件,结合断裂调查、综合物探以及

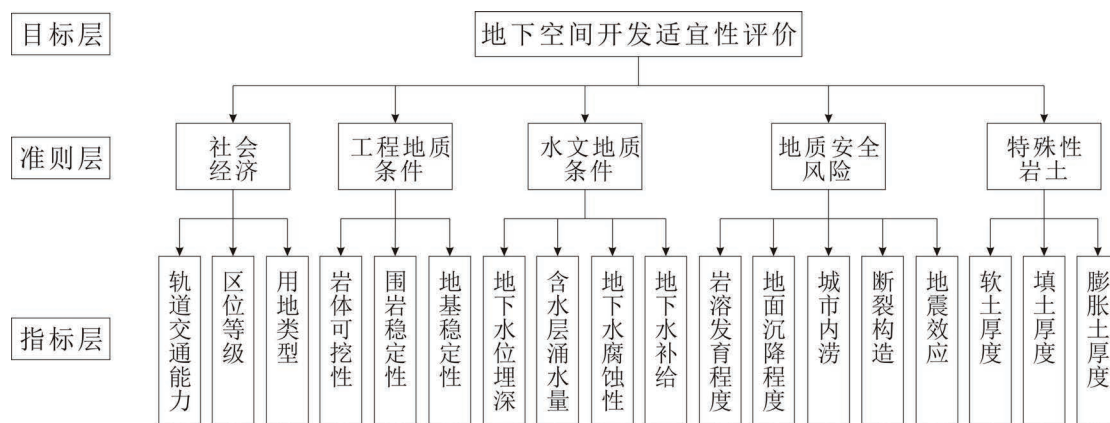


图 3 武汉市地下空间开发适宜性评价指标体系

Fig. 3 Suitability Evaluation index system of Underground Space in Wuhan

同位素地球化学等技术,圈定了蔡甸索河、中法生态城、黄陂源泉村、江夏土地堂、沌口小军山和长江新城起步区 6 个具有中深层地热潜力的靶区和 11 处深部富水地段。在蔡甸区索河成功实施 1 口 1880 m 的勘查示范井,日均出水量超过 2000 m<sup>3</sup>,温度达 50.2℃,地下水锶含量 12.20 mg/L、偏硅酸含量 35.15 mg/L,实现了武汉市中深层地热资源勘查的重大突破,成为武汉市目前获取的水量最大、水质最优的中深层地热资源。

硒是人体和动物必需的一种微量元素,具有增强人体免疫力、预防心血管疾病、抗肿瘤以及抗衰老等作用(周小娟等,2016),因此富硒土壤的分布、硒元素的赋存状态以及迁移转化特征一直受到广泛的关注(Sharma et al., 2009;杨忠芳等,2012)。武汉市表层土壤硒含量一般为 0.07—22.62 mg/kg,平均值为 0.37 mg/kg,背景值为 0.273 mg/kg,总体空间分布特征表现为主城区、东湖开发区、江夏区的锦绣山、纸坊大道一带为高值,东西湖区一带含量较高。根据土壤硒元素的分布特征,圈定了 5 处集中连片富硒耕地,分布于消泗乡、新沟镇-辛冲街、鲁湖西部、龙泉街和武湖等地区,面积约 360 km<sup>2</sup>,具有富硒产业园试点和富硒耕地资源开发潜力。

武汉市地质文化资源丰富,拥有地质剖面、古生物化石遗址、典型地质与地貌景观等各类地质文化资源 73 处,文化价值较高、开发利用潜力大,其中最为典型的包括阳逻化石木产地、锅顶山汉阳鱼化石产地、木兰山含红帘石片岩露头。武汉市丰富的地下水资源,可供储备地下水资源,以有效应对城镇突发事件(吴庆华等,2022)。根据武汉市水文地质条件,综合考虑可供水量、水质和经济成本等因素,圈定汉口城区、天兴洲、武湖地区等 9 处应急(后备)地下水水源地,地下水资源储量为 16170 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,同时武汉市目前有 13 处锶或偏硅酸天然饮用矿泉水水源地,允许开采量约为 2490 m<sup>3</sup>,应急供水潜力大。武汉市地下水埋藏浅,大部分地区的松散岩类孔隙水、承压水均适宜水源热泵的运行,地下水常温 15-17℃,可开发利用的浅层地热能资源折合标准煤为 38 万吨/年,浅层地热能资源开发潜力大(李伟等,2012)。根据调查结果,武汉中心城区内浅层地热能年可利用资源量为

4.84 × 10<sup>14</sup> kJ,折合标准煤 2753.78 × 10<sup>4</sup> t,夏季可制冷面积 6.05 × 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>,冬季可供暖面积 7.09 × 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>。

#### 4.3 生态环境质量调查

武汉市主城区面临着重金属以及有机污染物多环芳烃的高度污染,极大威胁人体健康(党丽娜等,2015;彭汉发等,2018);武汉市水体也受到不同程度的污染,湖泊出现了富营养化现象(温周瑞等,2013),长江武汉段近岸水域工业污染和生活污染并重(柳七一等,1994),王焰新等(2002)研究表明,武汉市地下水污染程度较高区主要分布在人口密集区和工业、商业区。为落实长江大保护,在长江沿岸带 1 km 范围和后官湖、汤逊湖、沉湖等典型河湖湿地地区部署实施生态地质调查。结果表明长江沿岸地表水水质总体较好,以 II 类和 III 类水为主,总体受工矿活动影响较为强烈,受农业、生活污水影响的程度则较为复杂,这与沿岸农田、污水分布不均有关(朱睨亭等,2020),需要关注入江河渠的汞、氟化物以及总磷超标等问题。长江消落带表现出重金属元素易富集的特征,水体中携带的各种重金属离子易被土壤中的胶体等颗粒吸附而产生聚集,并表现出随着与水体距离增大,重金属元素含量递减的趋势。武汉市长江沿岸带的生态地质环境总体情况较好,97% 以上为优良。

多期遥感解译表明,1980 年以来后官湖、汤逊湖和沉湖 3 个典型湖泊湿地面积均呈现减小的趋势,后官湖和汤逊湖主要受城市建设的影响,沉湖受围湖养殖的影响(陈钰等,2021)。3 个典型湖泊地表水以 IV-劣 V 类为主,主要超标指标为总磷、总氮、氨氮和高锰酸盐指数;地下水主要受铁锰等高背景值的影响。湖泊周边表层土壤局部出现 Cd 超标,垂向上表现为随深度的增加而减少的趋势,60 cm 以上土壤垂直剖面中重金属的淋失比率较高,迁移作用较强。

#### 4.4 地质安全风险评价

影响武汉市城市地质安全的主要问题有隐伏深大断裂、岩溶地面塌陷、软土地面沉降和崩滑流地质灾害,由于后两者分布区域较小,危害性相对较小,故本次重点针对前两个问题部署了专项调查。

基于重力小波多尺度分析、多尺度边缘检测技术,结合高精度地形数据查明了武汉市深大断裂的



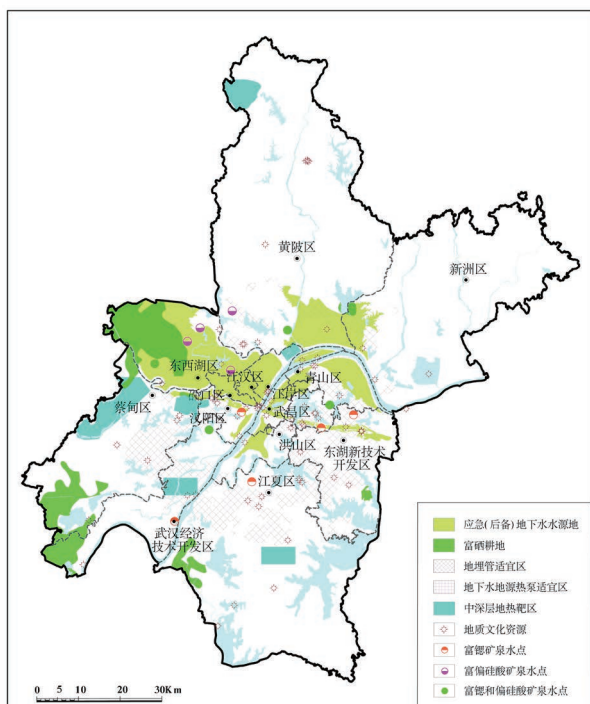


图4 武汉市优势地质资源分布图

Fig. 4 Distribution of Dominant Geological Resources in Wuhan

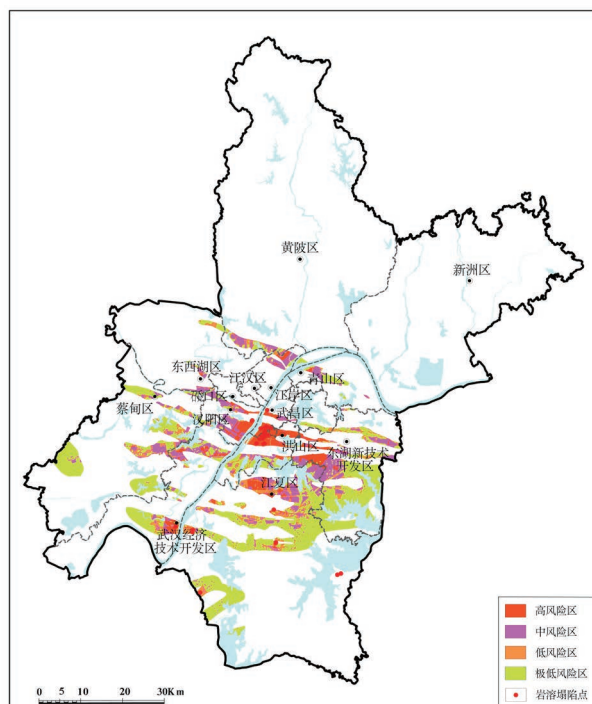


图5 武汉市岩溶塌陷风险评价图

Fig. 5 Risk Assessment of Karst Collapse in Wuhan City

分布特征。高密度重力资料和地震台站记录显示武汉市莫霍面整体深度较浅,变化平缓,由中部向NE、SW 两侧逐渐变深,密度为  $2.574 \sim 3.181 \text{ g/cm}^3$ ,横波速度为  $3.2 \sim 4.3 \text{ km/s}$ ,武汉市地壳整体较为稳定。重力资料多尺度分析结果和分层密度分析表明,武汉市地壳各层应力分布与断裂分布和性质具有一定的相关性,整体上各层基本处于平面等压状态,断裂处于基本稳定状态。

在综合集成前人 1:5 万岩溶专项调查成果的基础上(范士凯,2006;徐贵来,2016;涂婧等,2019),精准部署实施了白沙洲地区 1:1 万岩溶塌陷专项调查,形成了武汉市不同尺度的岩溶地面塌陷调查评价成果。武汉市岩溶塌陷高风险区总面积  $130 \text{ km}^2$ (图 5),主要分布于白沙洲、青菱乡、鹦鹉大道、楚雄大街、南湖大道一带(徐贵来,2016)。白沙洲地区是武汉岩溶最为发育的地区,基于工作精度的提高,白沙洲重点区 1:1 万岩溶专项调查将原 1:5 万尺度评定为高易发区范围由  $50 \text{ km}^2$  缩小为  $11 \text{ km}^2$ 。在分析武汉市岩溶地面塌陷的成因机理上,提出岩溶发育程度、覆盖层厚度和结构、地下水是岩溶地面塌陷的原生地质条件。通过对比分析地质雷达、

高密度电阻率法、浅层地震、微动、孔间层析成像和地面磁共振等地球物理探测方法对岩溶的探测效果和适用性(图 6),形成了适用于武汉市的岩溶探测技术方法(何军等,2020)。

#### 4.5 三维地质结构模型和信息平台建设

城市三维地质结构模型给人直观的视觉感受,三维分析越来越多用于城市地质、矿产、油气、水利水电工程、城市规划等领域(许珂等,2019)。城市规划、场地施工等不同规模的城市建设与管理工作中对地质信息的精细度要求不一样,因此需要构建不同尺度的三维地质模型。本次工作建立了基于测绘结合表的多级工程地质建模方案,采用地质剖面、地质图、断层作为约束的人机交互式建模方法,构建了武汉市五级尺度的工程地质三维模型,实现了模型的多级一体化管理与可视化,更高效地为不同应用需求提供地质信息服务。初步建立了武汉城市地质辅助决策信息系统,主要包括地质成果一张图系统、三维地质可视化系统、地下空间开发利用系统、地质信息服务辅助决策系统和地质环境监测预警平台等功能模块,可为城市规划、建设和安全等领域提供辅助决策。

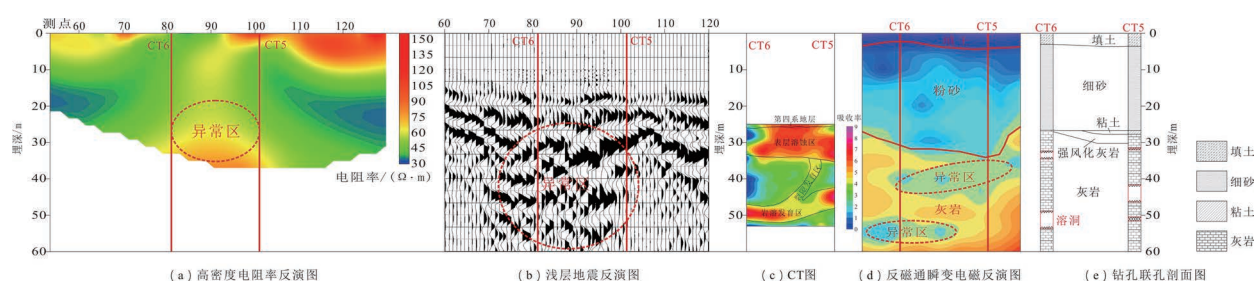


图 6 烽火村综合物探解译与钻孔剖面图(据何军等,2020)

Fig. 6 Comprehensive geophysical prospecting and boreholes cross-section in Fenghuo village

## 5 主要特色

武汉多要素城市地质调查的成果特色主要体现在工作机制和成果服务上。一是中国地质调查局与武汉市人民政府建立了高效顺畅的“中央引领、地方主体、多方联动”的工作机制。二是武汉地质调查中心与武汉市自然资源和规划局深度合作,及时将调查成果纳入武汉市“国土空间一张图”管理平台和城市仿真实验室,作为武汉市国土空间规划编制和管控的基础依据之一。尤其是针对武汉市重点关注的岩溶塌陷,研编完成《支撑服务武汉市规划建设岩溶地面塌陷防控建议报告》和规划建议图。从国土空间规划、轨道交通建设和岩溶监测等三个方面提出对策建议,武汉市已将相关成果作为城市总体规划、分区规划和控制性详细规划的重要约束条件。三是信息平台服务重大工程建设和防灾减灾,为轨道交通规划和线路比选提供了决策支撑,研发的地质信息实时查询的微信小程序纳入武汉市地质灾害隐患巡排查体系中。四是开展地质环境管理研究,推进《武汉市地质灾害防治和地质环境保护条例》立法工作。

## 6. 主要结论

(1)武汉市绝大部分地区适宜工程建设,面积约 6568 km<sup>2</sup>,适宜性较差区域主要是受隐伏岩溶的影响。武汉市总体地下空间结构有利于地下空间开发利用,禁止建设的区域主要是地下水水源地、地质灾害高易发区、生态保护区等区域,面积约为

1766.7 km<sup>2</sup>,局部地下空间受岩溶和软土等不良工程地质体的影响需要谨慎开发。

(2)武汉市发育 6 个具有中深层地热潜力的靶区和 11 处深部富水地段,在蔡甸索河区块得到了验证。武汉市拥有 5 处集中连片富硒耕地,面积约 360 km<sup>2</sup>,各类地质文化资源 73 处,应急(后备)地下水水源地 9 处,地下水资源储量为  $16170 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,锶或偏硅酸天然饮用矿泉水水源地 13 处,允许开采量约为 2490 m<sup>3</sup>,中心城区内浅层地热能年可利用资源量为  $4.84 \times 10^{14} \text{ kJ}$ 。

(3)武汉市生态环境质量总体较好,需要重点关注入江河渠的汞、氟化物以及总磷超标,长江消落带表现出的重金属元素易富集,河湖湿地萎缩,水体富营养化以及湖泊周边土壤重金属淋溶作用等环境地质问题。

(4)通过重力资料多尺度分析、多尺度边缘检测技术、地震台站记录等综合研究表明,武汉市地壳整体较为稳定,整体上各层基本处于平面等压状态,断裂处于基本稳定状态。综合集成形成了武汉市不同尺度的岩溶地面塌陷调查评价成果,提出岩溶发育程度、覆盖层厚度和结构、地下水是岩溶地面塌陷的原生地质条件,并针对性的提出了地球物理探测技术方法。

(5)基于测绘多级结合表,构建了不同尺度的三维地质模型。初步建立了武汉城市地质辅助决策信息系统,可为城市规划、建设和安全等领域提供辅助决策。

项目实施过程中得到了武汉市自然资源和规划局刘奇志、赵中元、万能、胡卉;湖北省地质局吴



德宽、杨明银、孙仁先、郑金龙;蔡甸区自然资源和规划局谢纪海;武汉市测绘研究院肖建华、肖辉、刘传逢、黄群龙、刘顺昌、夏冬生;武汉市勘察设计公司官善友、江丹、熊峰;湖北省地质调查院胡元平、胡正祥、罗华、杜小锋、罗红、刘力;湖北省地质环境总站赵德君、熊启华、陈标典;湖北省地质科学研究院谭文专、朱文晶、刘述德;湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队李依平、刘红卫、徐连三;湖北省地质局地球物理勘探大队李成香、徐元璋、王斌战;中国地质大学(武汉)陈金华、焦玉勇、李长安、周宏;武汉大学张双喜等各级领导和专家的关心和支持,在此一并表示感谢!

#### 参考文献:

- 陈钰,雷琨,杜尧,马腾.2021.沉湖湿地近50年退化过程识别[J].地球科学,46(2):661-670.
- 陈志浩,陈少平,吴礼生.2015.武汉地区软土特征的分析[J].资源环境与工程,29(6):974-977.
- 党丽娜,杨勇.2015.武汉市土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].华中农业大学学报,34(6):66-72.
- 范士凯.2006.武汉(湖北)地区岩溶地面塌陷[J].资源环境与工程,20(S1):608-616.
- 冯小铭,郭坤一,王爱华,刘红樱,王敬东,龚建师.2003.城市地质工作的初步探讨[J].地质通报,22(8):571-579.
- 葛伟亚,王睿,张庆,邢怀学,周洁.2021.城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J].地质通报,40(10):1601-1608.
- 官善友,廖建生,庞设典,杨育文.2011.武汉市都市发展区规划用地地质环境调查与评价[J].城市勘测,(5):151-154+158.
- 何军,刘磊,黎清华,刘道涵,陈标典,张傲,赵永波.2020.隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例[J].水文地质工程地质,47(6):47-56.
- 黄强兵,彭建兵,王飞永,刘妮娜.2019.特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J].地学前缘,26(3):85-94.
- 李伟,聂邦亮,康俊杰.2012.武汉市浅层地温能地质勘查评价方法探讨[J].资源环境与工程,26(S1):79-82.
- 李晓昭,王睿,顾倩,周丹坤,辛韞潇.2019.城市地下空间开发的战略需求[J].地学前缘,26(3):32-38.
- 李长安,张玉芬,庞设典,官善友.2019.以地貌单元为依据的工程地质分区研究——以武汉市都市发展区城市地质研究为例[J].地质论评,65(3):645-652.
- 林良俊,李亚民,葛伟亚,胡秋韵,李晓昭,李云,孟晖,张礼中,杨建锋.2017.中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J].中国地质,44(6):1086-1101.
- 柳七一,孙志伟,王郝立.1994.长江武汉江段近岸水域水质污染致突变性研究[J].人民长江,25(8):37-40.
- 罗国煜,李晓昭,阎长虹.2004.我国城市地质研究的历史演化与发展前景的认识[J].工程地质学报,12(1):1-5.
- 牛俊强,李嵘,江越潇,苏呈,王富强.2019.武汉市中深层地热赋存模式研究[J].资源环境与工程,33(4):530-535.
- 庞设典,姚建伟,占爱民.2005.武汉市区域地壳稳定性分析[J].土工基础,19(5):9-11.
- 彭汉发,谢纪海,张娅婷,夏冬生.2018.武汉城市地质调查成果应用探索与思考[J].探矿工程(岩土钻掘工程),45(10):1-5.
- 彭建兵,黄伟亮,王飞永,刘阳.2019.中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J].地学前缘,26(3):9-21.
- 田望学,毛新武,何仁亮,李雄伟,胡万强,江天凤,黄建军.2011.武汉地区1:5万区调第四系研究进展[J].华南地质与矿产,27(4):286-291.
- 涂婧,魏瑞均,杨戈欣,刘长宪,金小刚,李海涛.2019.湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,30(6):68-73+93.
- 王焰新,李义连,付素蓉,蔡鹤生,Broder Merkel, Dana Ihm.2002.武汉市第四系含水层地下水有机污染敏感性研究[J].地球科学,27(5):616-620.
- 温周瑞,王丛丹,李文华,叶嵘,张从义.2013.武汉城市湖泊水质及水体富营养化现状评价[J].水生态学杂志,34(5):96-100.
- 文冬光,刘长礼.2006.中国主要城市环境地质调查评价[J].城市地质,1(2):4-7.
- 吴庆华,汪啸,崔皓东,范越,张伟,王金龙,肖利.2022.地下水资源战略储备评价与应急利用——以武汉市为例[J/OL].长江科学院院报,https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20220224.1406.002.html.

- 肖尚德,牛俊强,李 嵘.2007.武汉市地下水开发利用的环境地质问题与防治对策[J].资源环境与工程,21(S1): 57-60.
- 谢连平,钟洛加,周衍龙.2009.武汉城市地下空间开发利用与环境地质[J].环境科学与技术,32(12):209-214.
- 熊 峰,吴 超,陶 良,庞设典.2019.地质灾害危险性区域评估方法探讨[J].城市勘测,(5):191-194.
- 徐贵来.2016.武汉市覆盖层岩溶地面塌陷形成机理与危险性评价[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 许 珂,徐亚杏.2018.基于 MapGIS-K9 软件的城市三维地质建模方法探讨——以武汉市为例[J].华南地质与矿产,34(3):244-252.
- 杨忠芳,余 涛,侯青叶,杨 奕,傅杨荣,赵相雷.2012.海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J].现代地质,26(5): 837-849.
- 张茂省,李同录,程秀娟,孙萍萍,李 强,乔志甜,赵权利.2019.山区城市地下空间资源评价与开发利用模式——以延安市为例[J].山地学报,37(3):303-315.
- 张茂省,王化齐,王 尧,董 英,孙萍萍.2018.中国城市地质调查进展与展望[J].西北地质,51(4):1-9.
- 周小娟,张 嫣,祝莉玲,万 翔,徐宏林.2016.武汉侏儒-消泗地区农田系统中硒的分布特征及有效性研究[J].地质科技情报,35(4):158-163+171.
- 周圆心,郑桂森,何 静,李 超,刘 予,何晗晗,肖景泽.2019.北京平原区地下空间建设地质安全监测问题探讨[J].中国地质,46(3):455-467.
- 朱睨亭,罗 红,陶 良,祝安安,徐 聪.2020.武汉市长江沿岸带地表水化学特征及成因[J].环境科学与技术,43(7):180-186.
- Bobylev N. 2009. Main streaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use[J]. Land Use Policy, 26(4): 1128-1137.
- Hunt D V L, Makana L O, Jefferson I, Rogers C D F. 2016. Liveable cities and urban underground space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 8-20.
- Sharma N, Prakash R, Srivastava A, Sadana U S, Acharya R, Prakash N T, Reddy A V R. 2009. Profile of selenium in soil and crops in seleniferous area Punjab, India by neutron activation analysis[J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry,281(1):59-62.