苏南都市圈城市地下空间资源开发利用现状与地质调查对策

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

唐鑫[1,2],龚绪龙[1,2],许书刚[1,2],张其琪[1,2],郭慧[1,2],邓峰丽[1,2]

1) 江苏省地质调查研究院,南京,210049;

2) 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室,南京,210049

内容提要:地下空间资源是地表基质层中宝贵的自然资源之一,其作为城市有机体的重要组成部分,在未来城市建设中起着举足轻重的作用。苏南都市圈城市地下空间资源开发在全国处在领先地位,地下空间规划管理方面已形成较为完善的体系,城市地质调查也在全国率先实现全覆盖。依据地下空间资源开发现状和地质结构“软硬”两个方面条件对苏南都市圈城市地下空间资源进行分类,划分为宁镇丘陵岗地型、苏锡常平原型和长江中下游冲积平原型三种类型。不同类型城市地下空间资源开发的地质背景和城市需求不尽相同,需根据实际情况定制不同的地下空间调查、规划、建设、管理体系。城市地下空间资源地质调查作为城市地质调查工作的延伸,需要提出更高的要求。本文从城市地下空间资源地质调查精度和深度、多参数多尺度一体化建模、地下空间资源评价、多种地下资源协同利用、地质资料信息数据库与平台建设等方面提出对策建议,用于指导未来城市地下空间资源调查的工程实践,为地质调查成果支撑城市地下空间全生命周期发展提供借鉴意义。

关键词:苏南都市圈;地下空间资源;多种地下资源;协同利用;地质资料信息

我国对地下空间资源的开发历史悠久,从最早对于天然洞穴或地穴的利用,伴随着科学技术的进步和社会生产力的大幅提高,演变至如今建设规模庞大的“地下城市”,地下空间资源开发利用水平不断提高,重视程度不断加大,城市地下空间资源开发迎来新的机遇(邵继中,2005)。苏南都市圈对于城市地下空间资源的主动开发总体上分为四个阶段:① 民国时期,南京作为民国政府首都,其城市内的一些民国建筑设有地下储藏室等地下空间,据统计,国民政府“五院八部”等行政机关地下建筑面积约5000m^2;② 新中国成立至20世纪70年代,按照“深挖洞、广积粮、不称霸”的方针,围绕人防建设进行地下空间资源开发利用,开发总量和单体规模较小;③ 改革开放至20世纪末,地下空间进入平战结合的多样化快速发展阶段,功能类型逐步呈现出多样化,总体上以地下停车为主,逐步增加地下商业、地下交通等功能;④ 21世纪以来,地下空间资源进入大规模综合开发利用阶段,依托城市轨道交通网建设,各城市地下空间呈现全面开花态势,无论是地下空间资源开发规模还是治理体系方面均进入全国领先行列。

自然资源管理体制改革以来,发布的《自然资源调查监测体系构建总体方案》[1]中明确指出自然资源包括地表覆盖层、地表基质层和管理层,为完整表达自然资源的立体空间,在地表基质层下设置地下资源层,包括矿产资源以及城市地下空间为主的地下空间资源。地下空间资源一般指地表以下空间范围内实在和潜在的空间场所总称(黄莉等,2018),包括岩土体的密实部分和无岩土体的空间部分,既是重要的自然资源,又是其他地下自然资源的载体(钱七虎,2006;程光华等,2014)。不同于地表土地资源和其他自然资源,城市地下空间资源综合利用应是基于地质条件,将地下水、矿产、地热等自然资源作为限制条件或协同利用对象后,满足城市发展需求的地下空间开发利用。城市地下空间资源地质调查是以岩土体密实部分为对象,综合运用

注:本文为常州市人民政府、江苏省自然资源厅合作项目“常州城市地质调查”、“常州市金坛区城市地质调查”;江苏省地质勘察基金项目“苏锡常都市圈西部环境地质调查”(编号:苏财建[2017]160号)、“苏南现代化建设示范区综合地质调查”(编号:苏财建[2016]140号);江苏省矿地融合试点项目“南京城市地下空间资源综合开发利用评价”的成果。

收稿日期:2021-08-24;改回日期:2021-12-13;网络首发:2021-12-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.125

作者简介:唐鑫,男,1991年生,硕士,地质工程专业,工程师,主要从事地下空间地质调查与研究工作;Email:465206216@qq.com。

地质学理论和技术方法进行分析评价,服务城市地下空间规划、建设和运行管理。与城市地质调查不同,城市地下空间资源地质调查无论是在调查精度和深度、地下空间三维模型构建、地下空间资源评价、多种地下资源协同利用等方面都提出了更高的要求(杨洋等,2019)。本文依据苏南现代化建设示范区综合地质调查项目调查成果,建立苏南都市圈城市地下空间资源分类体系,总结城市地质调查工作支撑城市地下空间规划管理建设中的不足,针对地下空间资源地质调查方法和内容提出对策建议,为其他城市开展地下空间资源地质调查工作打造样板。

1 城市地下空间资源开发利用现状

苏南都市圈人口众多,城镇化率远高于中国其他地区,截止 2019 年,区内常住人口超过 3378 万人,城镇化率 78.5%,大、中、小城市齐全,各具特色的小城镇星罗棋布,城镇分布密度是全国平均水平的 4 倍左右。此外,苏南都市圈经济高度发达,2019 年 GDP 总量达到 5.66 万亿元,人均 GDP 突破 16 万元,远超全国平均水平和其他都市圈/城市群,是中国经济最发达区域之一。过高的人口密度和发达的经济实力为都市圈地下空间资源的发展提供了强劲的动力和保障。

经过多年的发展,苏南都市圈地下空间资源开发利用位居全国前列。截至 2019 年底,都市圈内地下空间资源开发总量达到 152 km^2。其中南京、苏州二市地下空间资源开发总量分别达到 65 km^2 和 42.6 km^2,地下空间综合实力排名全国前十,轨道交通网络系统完善,地下商业、交通市政等多种功能的地下设施形成规模,地下一层的建筑面积约占 70%,有相当比例的地下空间已经开发至地下二层或者更深,局部地区地下空间开发深度向地下 50 m 延伸。无锡、常州二市地下空间资源开发总量分别为 19.96 km^2 和 17.04 km^2,主要集中在 0~15 m 的浅层地下空间,在城市主城区地下空间资源开发深

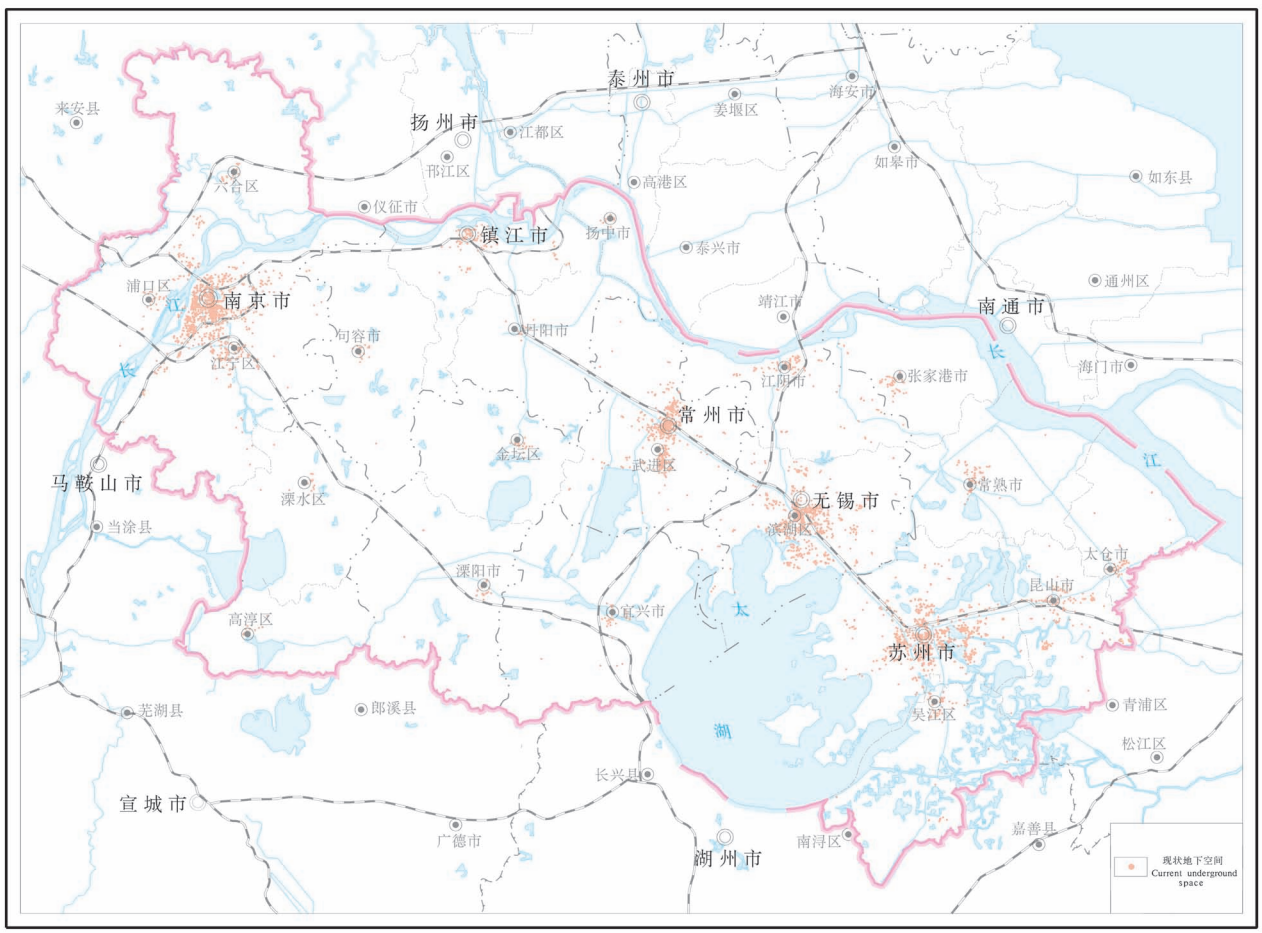


图 1 苏南都市圈地下空间开发现状图

Fig. 1 Current situation of underground space development in southern Jiangsu metropolitan area

度已经向 15~30m 的次浅层地下空间发展,主要用于轨道交通建设,出现重点利用节点及地下综合体,以轨道交通为框架的地下网络初步形成。镇江市地下空间资源开发总量约 10 km^2,以 0~15 m 的浅层地下空间开发为主,建设有地下商业街、文化娱乐场所等,但轨道交通尚未开通(图 1)。

此外,苏南都市圈在地下空间规划管理方面已形成较为完善的体系,省政府和地方管理部门制定了一系列法规政策引导和控制地下空间资源开发利用。2010 年和 2020 年,省政府分别发布《关于加强城市地下空间规划和管理工作的通知》(苏建规[2010]180 号)和《省政府办公厅关于加强城市地下空间开发利用的指导意见》(苏政办发[2020]58 号),对全省地下空间规划、建设、管理提出明确要求。各设区市针对地下空间规划建设、管理监督以及信息和政策支持等各个方面明确了地下空间开发的具体措施和要求,初步形成"3+1"地下空间规划体系,即地下空间总规(专项)—控制性详细规划—修建性详细设计+课题研究。

通过梳理国内外地下空间资源利用特征,城市地下空间的发展总体上可以归纳为五个阶段(陈志龙等,2005)(表 1)。① 初始化阶段,开发深度主要集中在 10 m 以浅,单体建设为主,规模小,功能类型单一,用于地下停车场、人防工程等;② 规模化阶段,开发深度延伸至地下 15~20 m,初步显现综合开发利用的标志,有地下商业街、文化娱乐场所等大型联合体;③ 初始网络化阶段,开发深度至地下 30 m,以轨道交通为框架的地下网络初步形成;④ 规模网络化阶段,开发深度向地下 50 m 延伸,轨道交通网络系统完善,地下商业、交通市政等多种功能的地下设施形成规模;⑤ 地下城阶段,开发深度可至地下 200m,市政、交通、物流等实现地下系统化,立体城市构建完成。通过对比分析,苏南都市圈内的南京、苏州已经进入规模网络化阶段,无锡、常州正从初始网络化阶段向规模网络化阶段过渡,镇江仍处于规模化阶段。

2　城市工程地质条件

苏南都市圈地处长江以南低山丘陵和平原地带,主要有构造—剥蚀类型的低山丘陵,剥蚀—堆积类型的岗地、高亢平原和堆积类型的平原等地貌类型。低山丘陵位于西部,海拔 30~611m,相对高度 30~300m,丘陵主要分布于宁镇山脉、宁芜—溧水、茅山等地区,仅宜溧地区(宜兴—溧阳地区,下同)有低山分布,少量岛状孤山和玄武岩台地突起于平原之上。黄土岗地、堆积台地分布于低山丘陵外围,河谷平原和冲沟分布于山间。长江下游冲积平原位于长江及沿岸,地势低洼,边滩和心滩发育;在张家港以下为长江新三角洲平原,地势低平,水网发育。太湖水网平原位于东部,海拔高程多为 0~4m,200m 以上的低山零星分布,按其地貌形态可分为高亢平原、河网平原、湖荡平原、滨湖滩地和洼地。

地貌类型控制着工程地质条件,不同地貌单元岩土体的性质和分布变化较大,但同一地貌单元内的工程地质条件存在明显规律性。任何城市都是建立在工程岩土体之上,城市地下空间开发与工程地质条件之间存在着密切的联系(韦人山,2008)。综合考虑地貌类型和地质结构,对苏南都市圈进行工程地质分区。其中一级分区考虑地形地貌,划分为太湖冲湖积平原工程地质区、长江三角洲冲积平原工程地质区和宁镇—宜溧低山丘陵岗地工程地质区共 3 个工程地质区;二级分区考虑次一级地貌和地层岩性,划分为水网洼地平原工程地质亚区、高亢平

表 1 城市地下空间发展阶段分级表

Table 1 Classification of development stages of urban underground space

发展阶段	重点功能	发展特征	布局形态	开发深度	代表城市/地区
初始化阶段	地下停车	人防工程为基础,单体建设、规模较小	散点分布	以 10m 以浅开发为主	中国西部城市和县级市等
规模化阶段	地下停车、地下公共服务等	城市核心区等除地下停车外的其他功能类型逐步增多,单体规模增加	据点扩散	开发至地下 15~20m	镇江等
初始网络化阶段	轨道交通节点以及综合体	地铁线路开始交叉出现重点利用节点及地下综合体	初始网络	开发至 30m	常州、无锡等
规模网络化阶段	各种公共设施	地铁网络系统完善,综合开发商业、交通、市政等地下设施	网络延伸	开发至 50m	南京、苏州等
地下城阶段	各类地下设施融合	功能齐全,生态良好的生态系统	立体城市	200m 以内关键层	远景目标

原工程地质亚区、残丘岩体工程地质亚区、长江下游河道平原工程地质亚区、长江新三角洲平原工程地质亚区、山前岗地台地工程地质亚区、河谷冲沟工程地质亚区、低山丘陵岩体工程地质亚区及石臼湖冲湖积平原工程地质亚区共 9 个工程地质亚区。三级分区考虑岩土体成因、结构、物理力学性质和工程地质问题,水网洼地平原工程地质亚区和高亢平原工程地质亚区根据第一硬土层和第二硬土层的分布规律,划分为第一、二硬土层存在亚区、第一硬土层存在第二硬土层缺失亚区、第一硬土层缺失第二硬土层存在亚区及第一、二硬土层缺失亚区;长江下游河道平原工程地质亚区和长江新三角洲平原工程地质亚区根据全新世软土的分布情况,划分为软土分布亚区和软土缺失亚区;河谷冲沟工程地质亚区根据天然地基适宜性情况划分成天然地基较好亚区和天然地基一般亚区;低山丘陵岩体工程地质亚区根据岩体类型和地理位置划分成宁镇低山丘陵工程地质亚区、宁芜—溧水火山岩低山丘陵工程地质亚区、茅山低山丘陵工程地质亚区、宜溧低山丘陵工程地质亚区和六合玄武岩丘陵工程地质亚区(图 4)。总体上,宁镇—宜溧低山丘陵岗地工程地质区基岩埋深浅,第四纪松散层以黏性土为主,呈单一结构,滑坡崩塌、岩溶塌陷、膨胀土的涨缩性是最主要的工程地质问题;太湖冲湖积平原工程地质区第四纪松散层厚,土体类型丰富,黏性土和砂性土交织沉积,呈多元结构(图 2),软土沉陷、砂层涌水涌砂、地面沉降和地裂缝是最主要的工程地质问题;长江三角洲冲积平原工程地质区则以砂性土和软土为主,呈二元结构(图 3),涌水涌砂是最大的工程地质问题。

3 城市地下空间资源分类

城市地下空间资源开发现状和地质条件是影响地下空间资源开发的两大关键因素(郭培国等,2014),地下空间资源开发现状反映城市规模和对地下空间的需求,同时又是社会经济发展的一面镜子。地下空间处于地质环境中,地质条件对于地下空间资源开发适宜性影响巨大(夏友等,2014)。城市地下空间资源分类应以地质条件为主(彭建兵等,2019),兼顾地下空间资源开发现状,做到同一类型中地质条件相似,地下空间现状呈阶梯型,形成“一带多”的一体化发展结构。依据城市地质条件作为一级划分单元,城市

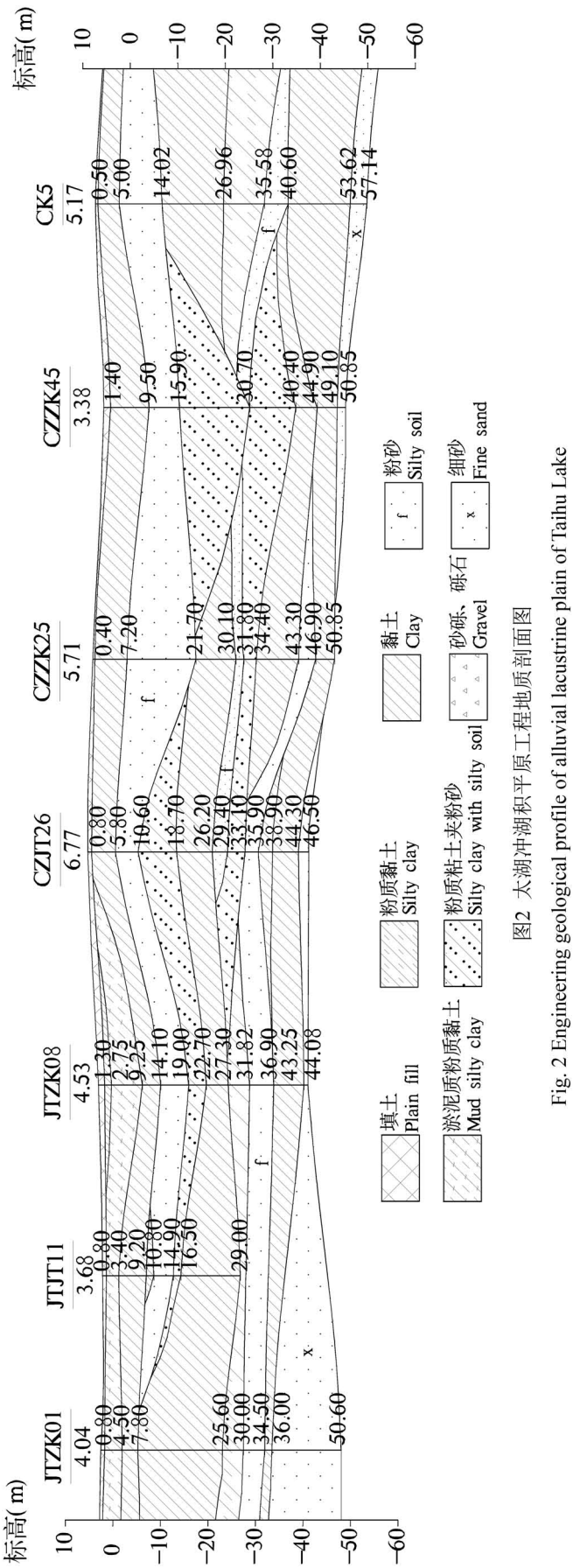


图2 太湖冲湖积平原工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of alluvial lacustrine plain of Taihu Lake

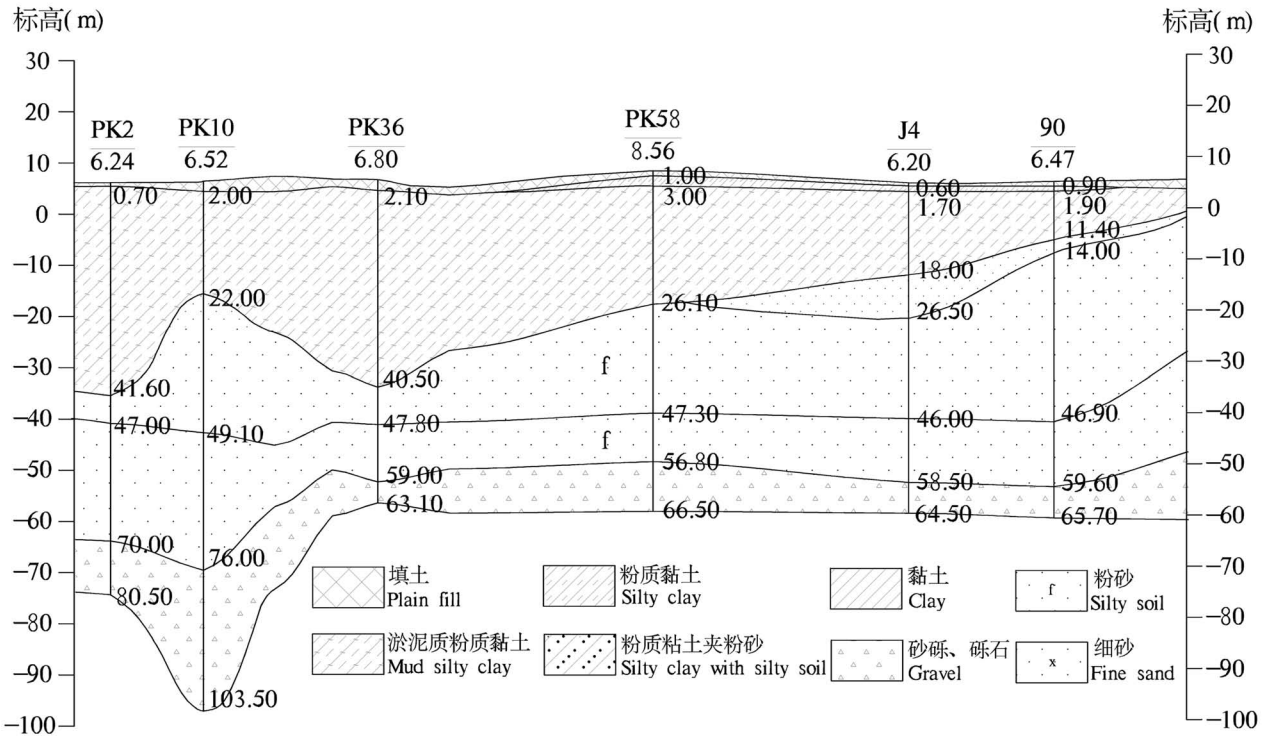


图 3 长江三角洲冲积平原工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of alluvial plain of Yangtze River Delta (lower)

地下空间资源开发现状作为二级单元,将苏南都市圈城市地下空间资源划分为宁镇丘陵岗地型、苏锡常平原型和长江中下游冲积平原型三种类型。宁镇丘陵岗地型城市包括南京、镇江二市,以丘陵岗地为主,区位上同属南京都市圈,以南京为中心,辐射镇江的地下空间的一体化发展也是都市圈建设的核心内容。苏锡常平原型城市包括苏州主城区、无锡、常州,以太湖水网平原为主,区位上同属苏锡常都市圈,城市建成区早已连成一片,其地下空间发展大有一体化的趋势。长江中下游冲积平原型城市涵盖张家港、江阴、太仓等县级市,以漫滩为主,同属于中小型县级市,对地下空间资源的需求较地级市低(表 2)。

4　地下空间资源地质调查对策

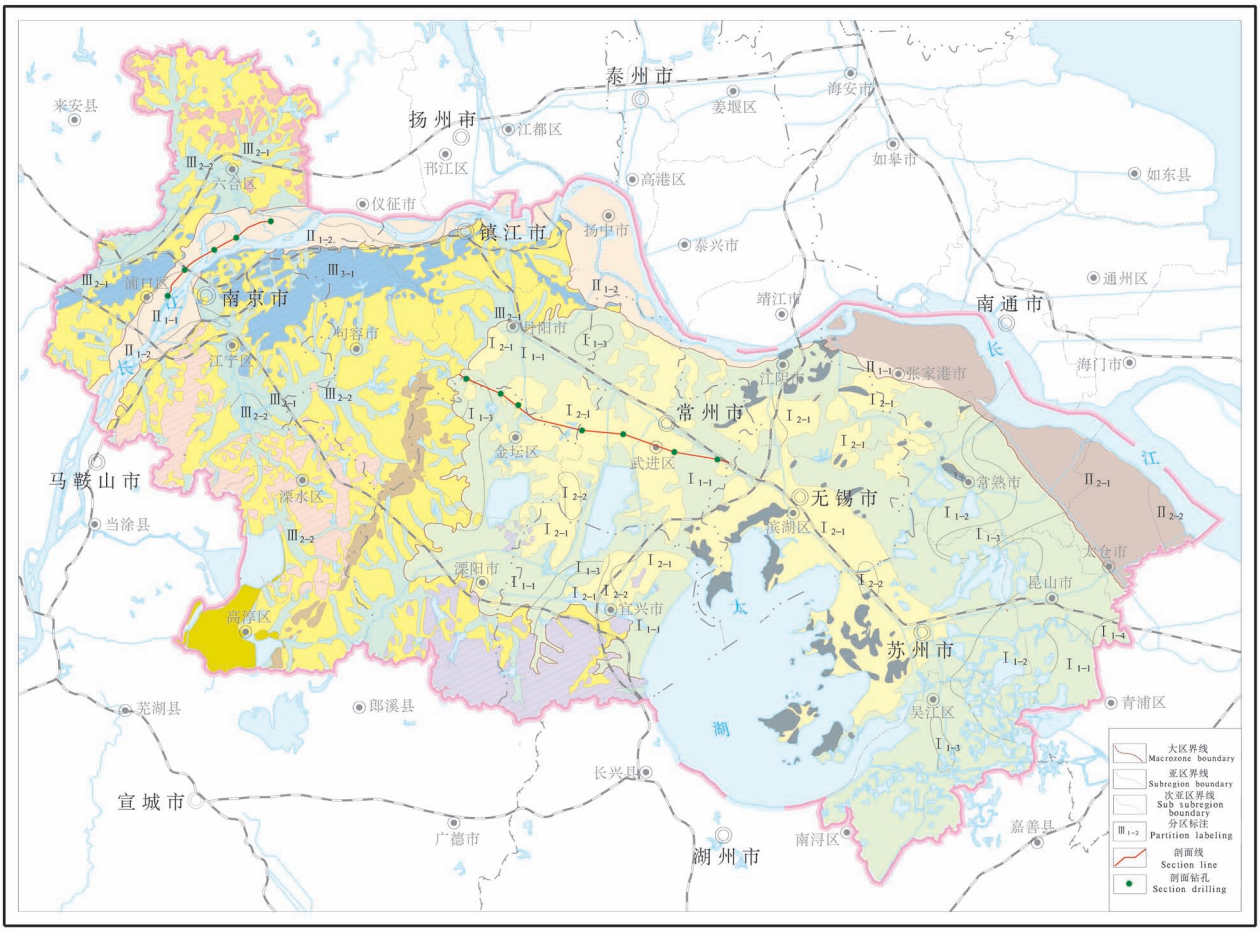
城市地质调查是城市规划建设和运营管理的基础工作(郭培国等,2014)。传统城市地质调查工作多为水工环单项调查,尚不能满足自然资源管理的需要,主要体现在几个方面:① 城市地质调查工作

表 2 苏南都市圈城市地下空间资源分类表

Table 2 Classification of urban underground space resources in southern Jiangsu metropolitan area

城市地下空间类型	地貌类型	城市名称	第四系厚度(m)	出露岩体类型	土体类型	区域特征
宁镇丘陵岗地型	低山丘陵和岗地	南京	5~80	火山岩、灰岩	粉质黏土为主	南京都市圈
		镇江	10~150	火山岩、灰岩		
苏锡常平原型	太湖水网平原	苏州*	200	花岗岩、闪长岩	粉质黏土、粉细砂、淤泥质软土为主	苏锡常都市圈
		无锡	200~300	石英砂岩、粉砂岩、泥岩		
		常州	200	石英砂岩		
长江中下游平原型	长江冲积平原	张家港	180~250	石英砂岩	淤泥质软土、粉细砂为主	沿江中小县级市
		江阴	100~200	石英砂岩、粉砂岩		
		太仓	200~350	无		
		常熟	120~280	石英砂岩、粉砂岩		

注:*—苏州主城区。



工程地质分区图说明表

太湖冲湖积平原工程地质区(Ⅰ)	水网洼地平原工程地质亚区(Ⅰ$_1$)		Ⅰ$_{1-1}$第一、二硬土层存在亚区
			Ⅰ$_{1-2}$第一硬土层存在第二硬土层缺失亚区
			Ⅰ$_{1-3}$第一硬土层缺失第二硬土层存在亚区
			Ⅰ$_{1-4}$第一、二硬土层缺失亚区
	高亢平原工程地质亚区(Ⅰ$_2$)		Ⅰ$_{2-1}$第一、二硬土层存在亚区
			Ⅰ$_{2-2}$第一硬土层存在第二硬土层缺失亚区
	残丘岩体工程地质亚区(Ⅰ$_3$)		
长江三角洲冲积平原工程地质区(Ⅱ)	长江下游河道平原工程地质亚区(Ⅱ$_1$)		Ⅱ$_{1-1}$软土分布亚区
			Ⅱ$_{1-2}$软土缺失亚区
	长江新三角洲平原工程地质亚区(Ⅱ$_2$)		Ⅱ$_{2-1}$软土分布亚区
			Ⅱ$_{2-2}$软土缺失亚区
宁镇-宜溧低山丘陵岗地工程地质区(Ⅲ)	山前岗地台地工程地质亚区(Ⅲ$_1$)		
	河谷冲沟工程地质亚区(Ⅲ$_2$)		Ⅲ$_{2-1}$天然地基较好亚区
			Ⅲ$_{2-2}$天然地基一般亚区
	低山丘陵岩体工程地质亚区(Ⅲ$_3$)		Ⅲ$_{3-1}$宁镇低山丘陵工程地质亚区
			Ⅲ$_{3-2}$宁芜-溧水火山岩低山丘陵工程地质亚区
			Ⅲ$_{3-3}$茅山低山丘陵工程地质亚区
			Ⅲ$_{3-4}$宜溧低山丘陵工程地质亚区
			Ⅲ$_{3-5}$六合玄武岩丘陵工程地质亚区
	石臼湖冲湖积平原工程地质亚区(Ⅲ$_4$)		

图 4 苏南都市圈工程地质分区图

Fig. 4 Topographic and geomorphic zoning map of southern Jiangsu metropolitan area

区集中在城市规划区,与国土空间规划区域不匹配(黄敬军等,2020);② 用于服务地下空间规划的地质调查成果精度不高,系统性不够;③ 地下空间资源开发利用评价多将地质条件作为限制性因素,缺少协同利用观念,评价成果与规划管理效衔接不够;④ 城市地质调查数据和平台与规划管理数据和平台缺乏有效融合,数据管理和共享服务支撑能力亟待提高。

城市地下空间资源开发对地质资源禀赋和地下空间协同规划要求极高(杨洋等,2019)。因此,苏

南都市圈在城市地质调查工作之后相继开展南京、苏州二市城市地下空间资源综合开发利用调查评价试点工作,旨在将城市地下空间资源地质调查与地下空间规划管控进行有效衔接,依托国土空间基础信息平台和城市信息模型(CIM)平台,实现地下空间多要素信息融合可视化与共享服务,为城市地下空间资源合理利用和地上地下全空间资源优化布局提供决策依据。

城市地下空间资源调查评价包括调查(地质调查、资源开发现状调查等)、多源数据融合数据库建设、三维可视化建模、地下空间资源潜力与管控评价、宏观微观管控体系构建、信息共享服务平台建设等环节,每个环节相辅相成,构成了城市地下空间综合评价管控体系(图 5)。城市地下空间资源地质调查是全生命周期的第一环节,重要性不言而喻,需要提出更高的要求,以满足后续生命周期运行的不同需求。

4.1　提高调查精度

城市地质调查精度一般以 1∶5 万为主(卫万顺等,2016),仅能满足城市总体规划,对于地下空间专项规划支撑性不足(黄敬军等,2020)。因此,城市地下空间资源地质调查首要工作便是提高调查精度。调查精度由地质条件和城市区位共同决定。基岩出露区由于地形坡度较大,多作为生态管控区,工程建设少,以地面调查为主,比例尺一般为 1∶10 万~1∶5 万(程光华等,2013);松散层覆盖区以钻孔控制为主,岗地地区由于地质结构简单,比例尺一般确定为 1∶5 万;平原漫滩地区第四纪松散层厚度较大,结构复杂,比例尺适宜 1∶5 万~1∶2.5 万。构造断裂带等对地下空间影响较大的区域需进一步提高调查精度,比例尺适宜 1∶1 万。城市区位方面,城市开发边界以外区域由于未来工程建设少,1∶5 万精度基本满足要求。城市开发边界以内区域是城市规划建设重点地区,应将钻孔控制精度提高到 1∶1 万甚至更高,重点工程项目边界内调查精度应满足地下空间规划需求。

4.2　拓展调查深度

考虑到当前城市地下空间发展程度,城市地质调查深度一般集中在 0~50m 的地下空间,少数中心城市调查深度拓展到 100m(程光华等,2018;程光华等,2019)。随着城市的不断发展,地下能源存储、地下实验室等重大基础设施利用地下空间深度越来

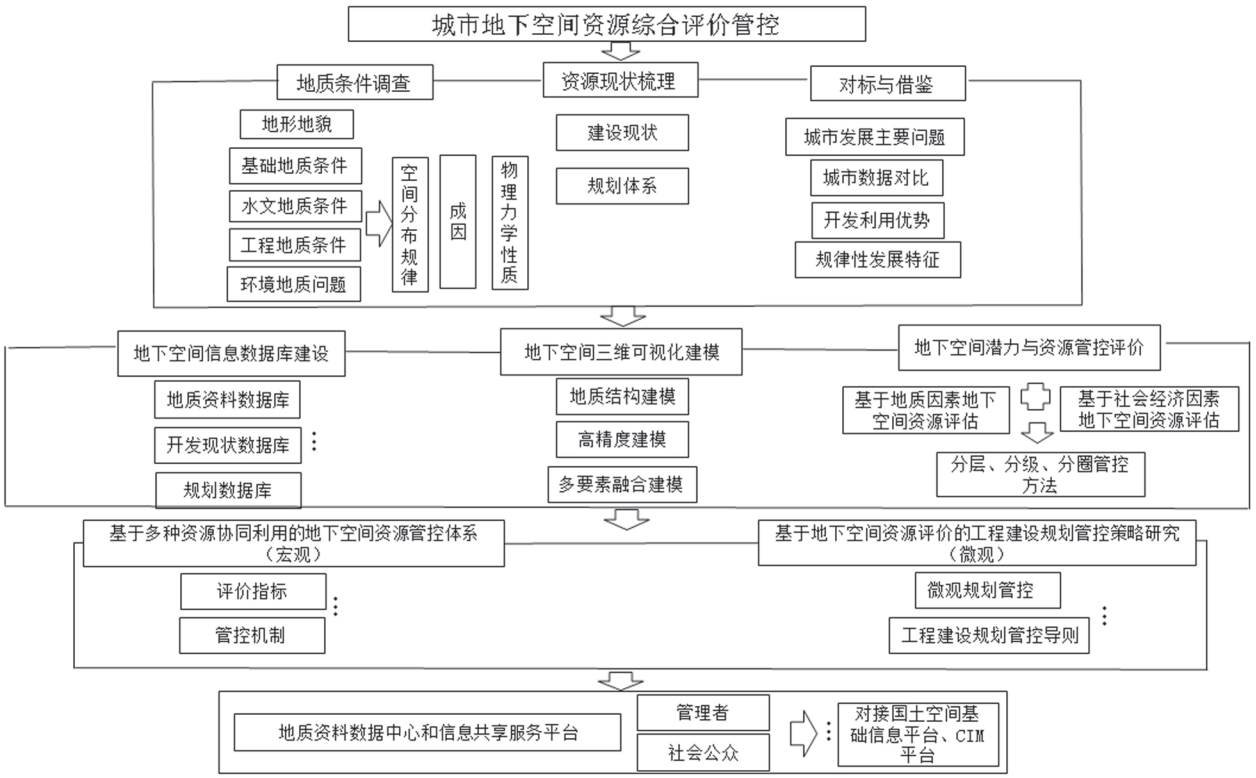


图 5 城市地下空间资源综合评价管控体系

Fig. 5 Comprehensive evaluation and control system of urban underground space resources

越深。因此,城市地下空间资源地质调查深度应进一步拓展,将地下 200m 以浅的地表关键层作为目标调查深度。调查深度由钻孔控制,钻孔可分为控制性钻孔和一般性钻孔。控制性钻孔深度需满足未来一定时限内城市发展所涉及的地下深度,以 200m 为界。一般性钻孔深度需满足当前城市发展所涉及的地下深度,丘陵岗地型城市以揭露基岩为主,苏锡常平原型城市适宜以 100m 为界,长江中下游平原中小型城市适宜以 50m 为界。

4.3 多参数多尺度一体化建模

城市地质调查工作构建包括基础地质模型、工程地质模型、水文地质模型在内的多专业模型,多个模型孤立不利于地下空间资源协同融合评价(林良俊等,2017;董延涛,2018)。城市地下空间资源地质调查应进行多参数多尺度一体化建模,以岩土体分层为基本框架,在地层结构中融合工程地质、水文地质、地质资源等多元参数。苏南都市圈构建了涵盖基础地质分层、工程地质分层、水文地质分层和浅层地热能分层的多参数一体化分层表(表 3)。基础地质分层以地质时代为分层原则,构建区域地层格架,为水工环地质研究提供基础背景支撑;工程地质分层综合考虑物质成分、结构特征和工程特性指标指标,注重岩土体的物理力学性质;水文地质分层重点关注地层的富水状态,分为含水层和隔水层;浅层地热能分层从地层的储热和换热性能出发,提供浅层地温能开发潜力的重要参数。三维地质模型构建从多尺度可嵌套角度分级构建,宁镇丘陵岗地型城市由于地貌类型多样,地质结构复杂,需采用基于地貌类型的分区建模与模型嵌套方法实现,苏锡常平原型和长江中下游平原中小型城市采用钻孔一体化建模。建模尺度根据钻孔控制精度不同体现多尺度效果。可嵌套性体现在多个尺度模型并不是孤立存在,而是支持以模型尺度进行分区嵌套展示。为了保证各尺度三维模型具备科学性和可验证性,分级地层物理建模技术和隐式建模技术是当前最主流的建模技术。

4.4 地下空间资源地质环境三维评价

地下空间资源地质环境评价是一个综合性课题,主要依据基础地质、水文地质、工程地质等多指标多参数建立地下空间开发地质环境正负面清单,基于时间、空间纬度评价地下空间资源开发地质环境适宜性,为地下空间的综合管控分区提供依据(郭培国等,2014)。目前,国内外学者对于地下空间资源开发地质环境适宜性评价进行了诸多研究(汪侠等,2010),普遍采用分层评价体系开展,分层上一般按照浅层(0~15m)、次浅层(15~30m)、次深层(30~50m)和深层(50~100m)划分。分层评价虽然对地下空间的竖向层次进行了划分,但仍然是

表 3 苏南都市圈多参数一体化分层表

Table 3 Multi parameter integrated stratification table in southern Jiangsu metropolitan area

基础地质分层		工程地质分层		水文地质分层		浅层地热能分层	
统	组	层号	层位名称	层号	层位名称	层号	层位名称
全新统	如东组	1	填土	1	填土	1	C1 热储层
		2-1	粉质黏土	2	隔水层		
		2-2	淤泥质粉质黏土				
		2-3	粉砂、粉土				
		2-4	粉质黏土与粉土粉砂互层				
		2-5	粉(细)砂	3	潜水含水层	2	K1 换热层
		2-6	粉质黏土(与粉土粉砂互层)				
		2-7	砾石层				
		3-1	粉质黏土、黏土	4	隔水层	3	C2 热储层
		3-2	粉质黏土				
		3-3	粉土、粉砂	5	微承压含水层	4	K2 换热层
		3-4	粉质黏土				
		3-5	砂性土、混合土				
上更新统	滆湖组	4-1	黏土、粉质黏土	6	隔水层	5	C3 热储层
		4-2	粉质黏土				
		5-1	粉质黏土(夹粉土)				
		5-2	粉砂、粉土	7	Ⅰ承压上段含水层	6	K3 换热层
		5-3	粉质黏土(夹粉土、粉砂)				
		5-4	粉质黏土				
		5-5	粉细砂				
		6-1	粉质黏土、黏土	8	隔水层	7	C4 热储层
		6-2	粉质黏土				
		6-3	粉质黏土、黏土				
	昆山组	7-1	粉质黏土(夹粉土)			8	K4 换热层
		7-2	粉土、粉砂	9	Ⅰ承压下段含水层		
		7-3	粉质黏土夹粉土			9	C5 热储层
		7-4	粉质黏土				
		8-1	粉质黏土			10	K5 换热层
		8-2	粉细砂、粉土				
		8-3	粉质黏土				
		8-4	(含砾)中细砂、中粗砂				

表 4 苏州古城区地下空间资源评价指标量化标准

Table 4 Quantitative standards for evaluation indexes of underground space resources in the ancient city of Suzhou

一级因子	二级因子	分级标准			
		1	4	7	10
工程地质	土体工程地质条件	条件好,主要为可—硬塑黏性土	条件较好,可塑黏性土夹有少量粉土砂土层	条件一般,软弱土层	条件较差,砂土层
	岩性组合	简单,以黏性土地层为主	较简单,以黏性土地层为主,夹有粉土砂土或软弱土层	较复杂,以软弱土、粉土砂土地层为主	软弱土、砂土和黏性土的复杂组合
水文地质	潜水埋深(m)	-	>2.5	2.0~2.5	<2.0
	含水层厚度(m)	0~5	5~10	10~15	>15
	地下水富水性(t/d)	<10	10~100	100~500	>500
地质灾害	地面沉降	不易发区	低易发区	中易发区	高易发区

二维平面评价,存在一张图代表某一特定深度范围的结果。具有三维属性的地下空间若进行二维评价会造成三维空间信息丢失,显著影响评价结果,城市地下空间资源开发地质条件应从三维角度开展评价(郝英红等,2021)。以苏南重点地区(苏州古城区)为例,首先将三维地质模型进行体素化,确定评价空间的体素数量与范围;其次,根据地质环境特点,选取工程地质、水文地质、地质灾害等一体化模型中与地下空间紧密相关的参数建立评价指标体系(表 4、表 5),利用专家调查法对评价因子进行分级,分值越高,其对地下空间开发影响越大,构建层次结构模型。通过层次分析法(AHP)计算权向量、组合权向量等;再将评价因子分级、权重等信息赋值到体素单元,通过三维空间分析获取各个评价因子的三维体素模型,丰富三维评价结果的内涵(图 6)。最后将单因子三维体素模型进行空间叠加,采用三维空间插值方法补全体素集合信息,得到地下空间资源地质环境评价的三维模型(图 7)。三维模型可展现地下空间资源开发地质环境适宜性立体空间情况,也可提取不同适宜性等级的空间分布范围,此外还可根据不同竖向层次进行划分,展现特定深度范围内适宜性分级。

4.5　多种地下资源协同利用

城市不仅有着巨大的地下空间资源开发潜力与需求,以地下水、浅层地热能以及地质材料资源为主导的多种地下资源禀赋也有着鲜明特点。苏南都市圈深层地下水资源虽全面禁采,但在地下水禁采措施持续开展 20 年来深层地下水水位持续回升,仍具备应急供水功能。此外,浅层地热能越来越成为城市的潜在利用能源,随着开山采石的全面禁止,地质材料资源也有着巨大需求缺口。多种地下资源之间如果不进行协同而以以往的单一模式进行开发,则不仅会造成资源浪费,甚至可能对其他资源和环境产生严重破坏。因此,积极探索地下多种资源之间的相互影响机制,进行多种地下资源协同利用,是顺应科学发展的要求。

城市地下多种地质资源共生共存于复杂的地质环境系统中,相互联系,相互制约。某一资源开发往往会对其它资源的开发潜力产生影响。例如,地下空间资源的开发造成地下水流场、水质和水位的改变;地下水资源的开发对浅层地热能利用效率的影响;浅层地热能的利用(埋管式地源热泵)可能对地下空间资源的开发形成阻碍等(周丹坤等,2020)。

多种地下资源协同利用的前提需要对多种地下资源的协同潜力进行相关研究。协同潜力由协同供给能力和协同关系共同决定,供给能力越强,可协同的关系越多,协同潜力越大。所谓协同供给能力,就是判别多种地下资源平面优势赋存区,划定某一范围内存在一种或多种优势资源。协同关系则是结合空间、环境、经济等条件,判别对于地下资源的需求程度和先后顺序。一般情况下,城镇化地区由于空间资源紧缺,空间拓展和节能减排矛盾突出,对地下空间和浅层地热能资源需求较大,多种地下资源的需求排序应为“地下空间>浅层地热能>地下水资源>地质材料”。农产品主产区以提供农产品服务为

表 5 苏州古城区地下空间资源评价结果分级表

Table 5 Classification of underground space resources evaluation results in the ancient city of Suzhou

评价等级	评价分值区间	综合评价
Ⅰ级(好)	<2.5	地质条件好,开发难度小,地质安全风险低
Ⅱ级(较好)	2.5~4.0	地质条件较好,开发难度较小,地质安全风险较低
Ⅲ级(一般)	4.0~5.5	地质条件一般,有一定开发难度,整体采取措施风险可控,地质安全风险一般
Ⅳ级(较差)	>5.5	地质条件较差,开发难度较大,有较大地质安全风险

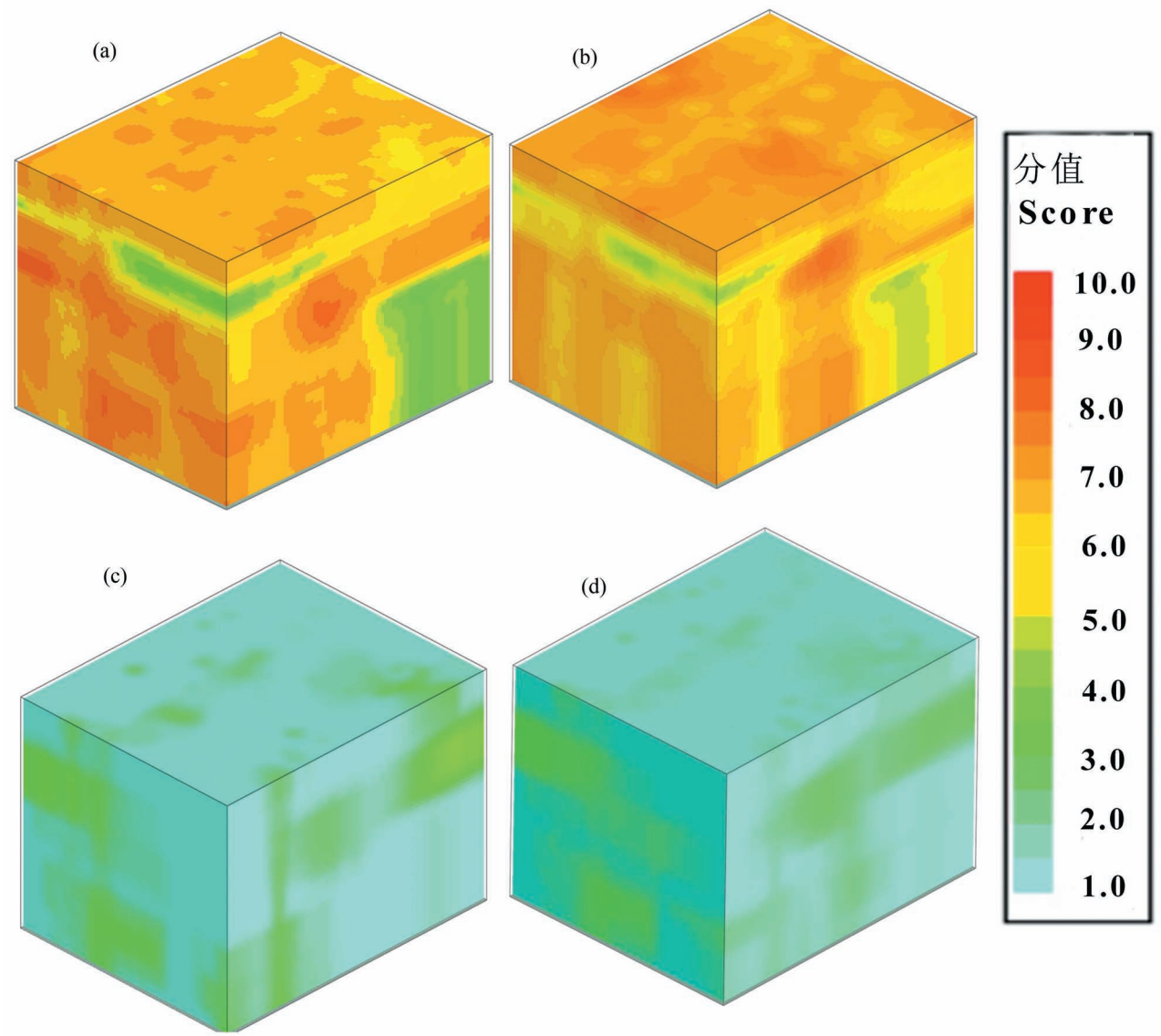


图 6 苏州古城区各评价因子三维体素模型：(a)土体工程性质；(b) 岩性组合；(c) 含水层厚度；(d) 含水层富水性

Fig. 6 Three dimensional voxel model of each evaluation factor in the ancient city of Suzhou: (a) soil engineering properties; (b) lithologic assemblage; (c) aquifer thickness; (d) aquifer water-rich characteristics

主,由于农业与水紧密相关,因此多种地下资源的需求排序就变为“地下水资源>浅层地热能资源>地下空间资源”(表 6)。

4.6 地质资料信息数据库与平台建设

地质资料作为自然资源管理部门一项重要的数据源,在城市发展和建设过程中发挥着重要的基础性支撑作用。然而,地质数据也存在保存分散、格式不统一、标准不统一等诸多问题,导致数据的价值得不到充分发挥。城市地质调查构建的城市地质信息系统包括城市地质数据中心、城市地质信息服务平台和信息共享平台(黄敬军等,2021),实现了对收集的过往地质资料及城市地质调查形成的资料的综合集成,但是由于城市地质调查工作未纳入城市管理主流程,多数城市地质信息系统建设伴随着城市地质调查项目的结束而终止,无法实现地质资料的动态更新与管理。

地下空间资源地质资料信息数据库与平台建设是在城市地质信息系统的基础上系统集成城市历史时期各行各业形成的地质信息和成果,开展多要素数据成果的坐标转换,构建支撑政府部门管理、城市建设规划的地质数据标准体系。平台建设应与国土空间基础信息平台、CIM 平台、一体化政务服务系统

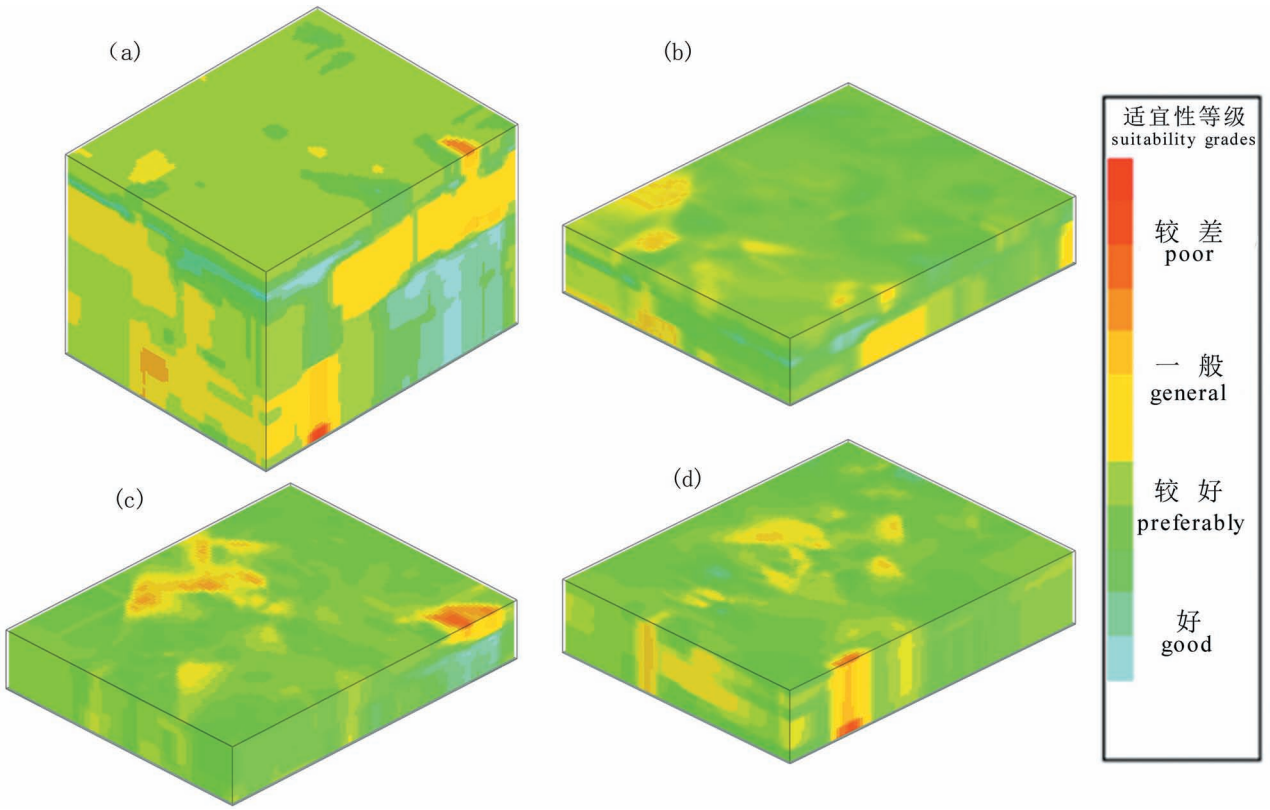


图 7 苏州古城区地下空间资源三维评价结果:(a) 整体评价模型;(b) 浅层(0~15m)评价模型;(c) 次浅层(15~30m)评价模型;(d) 次深层(30~50m)评价模型

Fig. 7 Three dimensional evaluation of underground space resources in the ancient city of Suzhou: (a) overall evaluation model; (b) shallow layer (0~15m) evaluation model; (c) sub-shallow layer (15~30m) evaluation model; (d) sub-deep layer (30~50m) evaluation model

表 6 不同主体功能区对地下资源需求程度

Table 6 Demand degree of underground resources in different main functional areas

功能分区		资源需求		
		地下空间	浅层地热能	浅层地下水
城镇化地区	优化开发区域	高	高	一般
	重点开发区域	较高	较高	较高
农产品主产区		一般	较高	高

等政府管理部门主流平台充分融合,保障地质资料与规划管理有效衔接。地质调查成果还需形成地质资料汇交、共享和服务机制,使新的工程勘察资料和动态监测数据能够标准化的存储到数据库和平台中,实现地质信息的动态更新和管理。

5　结论

(1)苏南都市圈无论是在城市地下空间资源开发还是城市地质调查开展方面都处在全国领先地位。地下空间资源开发可分为三个梯队,南京、苏州处在第一梯队,无锡、常州处在第二梯队,镇江处在第三梯队。城市地质结构方面差异较大,宁镇—宜溧低山丘陵岗地工程地质区基岩埋深浅,第四纪松散层以黏性土为主,呈单一结构,滑坡崩塌、岩溶塌陷、膨胀土的涨缩性是最主要的工程地质问题;太湖冲湖积平原工程地质区第四纪松散层厚,土体类型丰富,黏性土和砂性土交织沉积,呈多元结构,软土沉陷、砂层涌水涌砂、地面沉降和地裂缝是最主要的工程地质问题;长江三角洲冲积平原工程地质区则以砂性土和软土为主,呈二元结构,涌水涌砂是最大的工程地质问题。

(2)依据地下空间资源开发现状和地质结构"软硬"两个方面条件对苏南都市圈城市地下空间资源进行分类,划分为宁镇丘陵岗地型、苏锡常平原型和长江中下游冲积平原型三种类型。不同类型城市地下空间资源开发的地质背景和城市需求不尽相

同,需根据实际情况定制不同的地下空间调查、规划、建设、管理体系。

(3)城市地下空间资源调查是一个全系统全周期工程,涵盖地质调查、资源开发现状调查、数据库建设、三维可视化建模、潜力与资源管控评价、宏观微观管控体系构建、信息共享服务平台建设等多个环节。城市地下空间资源地质调查是首要环节,较城市地质调查相比提出了更高的要求。自然资源管理下需要在地质调查精度和深度、多参数多尺度一体化建模、地下空间资源地质环境三维评价、多种地下资源协同利用等方面进行拓展,探索地下空间资源地质调查新路径,并纳入自然资源管理主流程,为国土空间规划管控提供支撑。

注 释 / Note

❶ 自然资源部. 2020. 自然资源调查监测体系构建总体方案. 自然资发〔2020〕15 号.

❶ Ministry of Natural Resources. 2020#. Overall Scheme for the Construction of Natural Resources Investigation and Monitoring System.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈志龙, 伏海艳. 2005. 城市地下空间布局与形态探讨. 地下空间与工程学报, 1(1): 25~29.

程光华, 翟刚毅, 庄育勋等. 2013. 中国城市地质调查技术方法. 北京: 科学出版社:1~277.

程光华, 翟刚毅, 庄育勋等. 2014. 中国城市地质调查成果与应用: 北京、上海、天津、杭州、南京、广州试点调查. 北京:科学出版:1~476.

程光华, 杨洋, 赵牧华, 苏晶文, 李云峰. 2018. 新时代城市地质工作战略思考. 地质论评, 64(6):1438~1446.

程光华, 苏晶文, 李采, 杨洋, 赵牧华, 王睿. 2019. 城市地下空间探测与安全利用战略构想. 华东地质, 40(3): 226~233.

董延涛. 2018. 关于新时代城市地质工作的几点思考. 中国国土资源经济, 31(8):16~20.

郭培国, 戴志强, 聂道忠, 李海龙. 2014. 城市地质的研究内容和发展现状. 资源环境与工程, 28(3):304~307.

黄莉, 王直民, 鲍海君, 薛继兵. 2018. 城市地下空间的资源属性与开发特性分析. 上海国土资源, 2(9): 37~40.

黄敬军, 赵增玉, 姜素, 杨磊, 高立,许书刚. 2020. 自然资源管理视角下江苏城市地质调查工作新思考. 地质论评, 66(6):1609~1618.

黄敬军, 陈建华, 周贤金, 魏永耀, 安守林, 花修权, 姜素, 徐士银, 武鑫, 陆华. 2020. 徐州城市地质调查工作模式及展望. 地质学刊, 44(1~2):177~184.

郝英红, 李晓晖, 陈忠良. 2021. 城市地下空间开发地质环境质量三维评价方法研究—以合肥市滨湖新区为例. 地理与地理信息科学, (37)1:11~16.

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. 中国地质, 44(6): 1086~1101.

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. 地学前缘, 26(3):9~21.

钱七虎. 2006. 中国城市地下空间开发利用的现状评价和前景展望. 民防苑, S1(036):1~5.

邵继中. 2015. 人类开发利用地下空间的历史发展概要. 城市规划, (8):35~41.

韦人山. 2008. 广州地铁沥滘至厦滘过江隧道地质分析及其工程意义. 导师:丘元禧, 张珂. 中山:中山大学硕士学位论文:1~62.

汪侠, 黄贤金, 汤晋. 2010. 城市地下空间资源开发潜力的模糊综合评价. 北京工业大学学报, 2010(2):213~218.

卫万顺, 郑桂森, 于春林, 徐吉祥. 2016. 未来五年我国城市地质工作战略思考. 城市地质, 11(2):1~5.

夏友,马传明. 2014. 郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价. 地下空间与工程学报, 10(3): 493~497.

杨洋, 程光华, 苏晶文. 2019. 地下空间开发对城市地质调查的新要求. 地下空间与工程学报, 15(2):319~325.

周丹坤, 李晓昭, 马岩, 葛伟亚. 2020. 城市地下多种地质资源开发的相互影响模式研究. 高校地质学报, 26(2):231~240.

Chen Zhilong, Fu Haiyan. 2005&. Probing at urban underground space layout and form. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 1(1): 25~29.

Cheng Guanghua, Zhai Gangyi, Zhuang Yuxun, et al. 2013&. Technical methods of urban geological survey in China. Beijing: Science Press:1~277.

Cheng Guanghua, Zhai Gangyi, Zhuang Yuxun, et al. 2014&. Achievements and application of urban geological survey in China: Pilot project in Beijing, Shanghai, Tianjin, Hangzhou, Nanjing, Guangzhou. Beijing: SciencePress:1~476.

Cheng Guanghua, Yang Yang, Zhao Muhua, Su Jingwen, Li Yunfeng. 2018&. Strategic thinking of urban geological work in the New Era. Geological Review, 64(6): 1438~1446.

Cheng Guanghua, Su Jingwen, Li Cai, Yang Yang, Zhao Muhua, Wang Rui. 2019&. Strategic thinking of urban underground space exploration and safe utilization. East China Geology, 40(3):226~233.

Dong Yantao. 2018&. Reflections on the urban geological work in the new era. Natural Resource Economics of China, 31(8):16~20.

Guo Peiguo, Dai Zhiqiang, Nie Daozhong, Li Hailong. 2014&. The research content and development status of urban geology. Resources Environment & Engineering, 28(3):304~307.

Huang Li, Wang ZhiMin, Bao HaiJun, Xue JiBing. 2018&. Analysis of resource attributes and development characteristics of urban undergroundspaces. Shanghai Land & Resources, 2(9): 37~40.

Huang Jingjun, Zhao Zengyu, Jang Su, Yang Lei, Gao Li, Xu Shugang. 2020&. New thoughts on urban geological survey concerning natural resource management in Jiangsu Province. Geological Review, 66(6):1609~1618.

Huang Jingjun, Chen Jianhua, Zhou Xianjin, Wei Yongyao, An Shoulin, Hua Xiuquan, Jiang Su, Xu Shiyin, Wu Xin, Lu Hua. 2020&. Model and prospect of urban geological survey in Xuzhou. Journal of Geology, 44(1~2):177~184.

Hao Yinghong, Li Xiaohui, Chen Zhongliang. 2021&. Study on 3D evaluation method of geological environment quality for urban underground space development: A case study of Binhu New District, Hefei City. Geography and Geographic Information Science. (37)1:11~16.

Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun,

Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017&. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques. Geology in China, 44(6) : 1086~1101.

Peng Jianbing, Huang Weiliang, Wang Feiyong, et al. 2019&. Geological structural classicfication of and geological survey method for urban underground space in China. Earth Science Frontiers, 26 (3):009~021.

Qian Qihu. 2006&. Currentsituation and prospect of urban underground space development and utilization in China. Proceedingsof Shanghai Comprehensive Management of Underground Space. Life & Disaster, S1(036):1~5.

Shao Jizhong. 2015&. Historical development summary of human development and utilization of underground space. City Planning, (8):35~41.

Wei Renshan. 2008&. Geological analysis of Lijiao Xiajiao river crossing tunnel of Guangzhou Metro and its engineering significance. Tutor : Qiu Yuanxi, Zhang Ke. Zhong Shan: Master´s thesis of Sun Yat-sen University:1~62.

Wang Xia. 2010&. Huang Xianjin, Tang Jing. Fuzzy comprehensive evaluation of development potential of urban underground space resources. Journal of Beijing University of Technology, 2010(2): 213~218.

Wei Wanshun, Zheng Guisen, Yu Chunlin, Xu Jixiang. 2016&. Strategic thinking on China urban geological work in the next five years. Urban Geology, 11(2) :1~5.

Xia You, Ma Chuanming. 2014&. Ge-environmental suitability assessment of underground space resources exploitation and utilization in Zhengzhou City. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(3): 493~497.

Yang Yang, Cheng Guanghua, Su Jingwen. 2019&. New Requirements for the development of underground space in urban geological survey. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 15 (2):319~325.

ZhouDankun, Li Xiaozhao, Ma Yan, Ge Weiya. 2020&. Study on the impact patterns of multiple geological resourcesduring urban underground development. Geological Journal of China Universities, 26(2):231~240.

Development and utilization of urban underground space resources and geological survey countermeasures in southern Jiangsu metropolitan area

TANG Xin[1,2), GONG Xulong [1,2), XU Shugang [1,2), ZhANG Qiqi [1,2), GUO Hui[1,2), DENG Fengli[1,2)

1) *Geological Survey of Jiangsu Province*, *Nanjing*, 210049;

2) *Key Laboratory of Earth Fissure Geological Disaster*, *Ministry of Natural Resources*, *Nanjing*, 210049

Abstract: underground space is a valuable natural resource. As a part of urban organism, it plays an important role in urban construction in the future. The development of urban underground space resources in southern Jiangsu metropolitan area is in a leading position in the country. A relatively perfect system has been formed in underground space planning and management, and urban geological survey has taken the lead in realizing full coverage in the country. According to the geological structure and socio-economic "soft and hard" conditions, the urban underground space resources in southern Jiangsu metropolitan area classified into three types: Ningzhen hilly land type, Suxi Changping prototype and alluvial flat prototype in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The geological background and urban demand of underground space development in different types of cities are different. Different underground space investigation, planning, construction and management systems need to be customized according to the actual situation. As an extension of urban geological survey, the geological survey of urban underground space resources needs to put forward higher requirements. This paper puts forward corresponding countermeasures from the aspects of urban underground space resources geological survey accuracy and depth, multi parameter and multi-scale integrated modeling, underground space resources evaluation, collaborative utilization of multiple underground resources, construction of geological data information database and platform, which can be used to guide the engineering practice of urban underground space resources geological survey in the future, and provide reference significance for the geological survey results to support the whole life cycle development of urban underground space.

Key words: Southern Jiangsu metropolitan area; Underground space resources; Various underground resources; Collaborative utilization; Geological data information

Acknowledgements: This paper is a result of cooperative project between Changzhou Municipal People´s government and Jiangsu Provincial Department of natural resources, "Changzhou urban geological survey" and "Jintan District of Changzhou Urban Geological Survey"; Jiangsu geological survey fund project "environmental

geological survey of the west of Suzhou Wuxi Changzhou metropolitan area (Su Cai Jian [2017] No. 160)" and "comprehensive geological survey of Southern Jiangsu modernization demonstration area (Su Cai Jian [2016] No. 140)"; The results of the pilot project of mining land integration in Jiangsu Province "evaluation of comprehensive development and utilization of urban underground space resources in Nanjing".

First author: TANG Xin, male, born in 1991, master, major in geological engineering, engineer, mainly engaged in underground space geological survey and research; Email:465206216@qq.com

Manuscript received on: 2021-08-24; Accepted on: 2021-12-13; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.125 **Edited by**: ZHANG Yuxu