

河南郑州市岩土地层结构特征 及地下空间开发利用建议



张建羽^{1,2)}, 吕敦玉^{1,2)}, 刘长礼^{1,2)}, 王翠玲^{1,2)}, 孟舒然^{1,2)}, 刘松波^{1,2)}, 张云^{1,2)}

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061;

2) 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 石家庄, 050061

内容提要: 岩土地层构成了地下空间的基本物质环境, 对地下空间开发利用影响巨大, 深入认识、分析岩土地层结构特征可以为地下空间的开发打下坚实基础。郑州市区主要分布粉土、粉质黏土、黏土、粉细砂、中粗砂等松散地层, 局部存在软弱土、湿陷性黄土等特殊土。依据岩土地层在垂向上的组合关系, 划分为单层结构、双层结构、三层结构和多层结构。首次按照浅层(0~15 m)、次浅层(-15~-30 m)和次深层(-30~-50 m)对郑州市区地下空间的地层结构分别进行了论述, 为地下空间开发利用提供了准确的地质资料。提出了西部新城区重点开发建设地下仓储、地下能源生产设施; 主城区建设地下储水管廊和排水深邃; 东部新城区连霍高速公路以北作为地下空间开发避让区; 航空城区重点建设地下仓储、现代物流通道等设施的地下空间开发利用建议, 并探讨了地层结构对郑州市海绵城市建设、路面塌陷的影响。

关键词: 郑州市; 地层结构特征; 地下空间; 开发利用

地下空间已被视为人类所拥有的, 迄今尚未被充分开发的一种宝贵自然资源(张茂省等, 2019), 在世界上许多发达国家得到了广泛开发应用。随着我国城镇化水平不断提高, 城市建设用地紧缺、交通拥堵、生态环境恶化等问题日趋严重, 开发利用地下空间成为各个城市解决这些问题的有效途径和必然趋势(王初生等, 2005; 程光华等, 2019; 邢怀学等, 2022)。地下空间作为一种自然资源同样具有稀缺性、不可再生性和开发利用的不可逆性(蔡向民等, 2010; 郭朝斌等, 2019)。地下空间以岩土体为介质和环境, 与以空气为介质的地面、上部空间存在根本差别(廖建三等, 2006), 岩土地层的性质、结构等地质条件对地下空间开发的安全和经济起重要作用(夏伟强等, 2019; 杨晓刚等, 2019; 韩博等, 2020), 不同地层结构其地下空间开发涉及岩土工程问题不同, 可能发生地质灾害类型、开发成本、防治措施等均不同。因此深入认识、分析研究区域的岩土地层结构特征可以为地下空间的开发打下坚实基础(王建秀等, 2017; 朱合华等, 2019)。

郑州是中原城市群核心城市、建设中的国家中

心城市、发展定位为国际综合交通枢纽和物流贸易中心。随着经济飞速发展和城市建设步伐的加快, 同其他大城市一样, 郑州也出现了建设用地紧缺、交通拥堵等“城市综合症”, 向地下发展, 向地下要空间, 进行地下空间资源的充分开发与利用, 已是当前郑州市最适宜的选择。

郑州地下空间开发利用主要位于主城区、航空城区和东部新城区、西部新城区、南部新城区(以下简称郑州市区)。笔者等按照“平面分区、垂向分层”的原则对郑州市区浅层、次浅层、次深层地下空间的地层结构进行了分层论述评价, 试图为郑州市地下空间开发利用提供地学依据, 也对其它黄泛平原城市划分地下空间地层结构具有一定参考意义。

1 研究区地质背景概况

1.1 地形地貌及地质构造概况

郑州市位于河南省中北部, 黄河下游, 处于我国第二级地貌台阶与第三级地貌台阶的交接过渡地带, 总的地势西南高、东北低, 相对高差悬殊, 呈阶梯状下降, 地貌类型由西部、西南部侵蚀剥蚀丘陵、黄

注: 本文为中国地质调查局“黄河流域核心示范区(郑州)综合地质调查”项目(编号: DD20211309)的成果。

收稿日期: 2022-03-03; 改回日期: 2022-05-18; 网络首发: 2022-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.071

作者简介: 张建羽, 男, 1977年生, 本科, 工程师, 主要从事工程地质、城市地质调查研究工作; Email: 948965331@qq.com。通讯作者: 吕敦玉, 男, 1984年生, 博士, 副研究员, 主要从事城镇化进程中的地质环境效应研究; Email: lvduny@foxmail.com。

土丘陵逐渐下降过渡为冲洪积平原和黄河冲积平原,北部黄河横贯全区。

郑州市地层属华北地层区,分属华北平原分区的豫东地层小区和豫西分区的嵩箕地层小区。前第四系地层主要出露于西南部侵蚀剥蚀丘陵,第四系地层分布广泛。研究区大地构造横跨嵩箕台隆和华北台坳两个二级构造单元,西南部属于嵩箕台隆,其它属于华北台坳的中南部,包括开封坳陷、通许隆起两个三级大地构造单元。研究区内断裂构造以北西向、近东西向为主,主要涉及尖岗断层、中牟断层、中牟北断层、上街断层、须水断层、老鸦陈断层、花园口断层、古荥断层等,均为前第四纪隐伏断层,区域地壳稳定性为基本稳定^{②②}。

1.2 水文地质概况

全区地下水埋深发育规律与地形、人类活动强度等因素密切相关,大致为由东北到西南,从埋深 2 m 增加到数十米。黄河冲积平原,地势平坦,含水层由 1~2 层中粗砂、细砂夹砾石组成,结构松散,为富水区,其中强富水区位于郑州市东北部岗李至黄庄一带。中等富水区主要位于古荥至沟赵,孙庄至薛岗以及西部的须水、常庄等地区。弱富水区主要分布于西南部的刘胡垌、侯寨、三李地区、三十里铺地区以及西北部冲沟发育的邙山地区(夏友等,2014)。

1.3 岩土体工程地质特征

研究区分布地层主要为第四系和新近系松散层,基岩出露很少,面积很小,按照成岩作用程度和岩、土颗粒被胶结程度,岩土介质可以划分为岩体和土体两大类。

1.3.1 岩体类型及工程性质

岩体小面积分布于研究区西南部,根据建造类型、结构类型和工程性质划分为 3 个建造类型、5 个岩组^③,即:

(1) 碎屑岩建造:包括①以较坚硬层状碎屑岩为主岩组:由古近系、二叠系—三叠系砾岩、砂岩夹黏土岩组成。岩体较完整,呈厚层状,岩石致密坚硬;②以软弱层状碎屑岩为主岩组:由新近系、二叠系泥岩、页岩夹砂岩组成。岩体呈薄层状,岩石较软,工程性质呈各向异性;③碎屑岩夹碳酸盐岩岩组:由二叠系、石炭系砾岩、砂岩、黏土岩及灰岩、大理岩等组成,但碳酸盐岩含量 30% 以下,岩体以厚层状为主,岩石软硬相间。

(2) 碳酸盐岩建造:以坚硬层状碳酸盐岩为主岩组,由奥陶系、寒武系灰岩、白云质灰岩、白云岩、

大理岩为主,夹少量砾岩、砂岩、黏土岩等。岩体完整,呈厚层状,岩石致密坚硬,易受溶蚀。

(3) 变质岩建造:坚硬—软弱相间的片状、板状变质岩为主岩组,由元古界片岩、板岩、千枚岩等组成。岩体多呈碎块状、层状,工程性质具各向异性。

1.3.2 土体类型及工程性质

土体主要为第四系和新近系冲积、冲洪积、冲湖积、湖积、风积松散地层,根据土体是否具有特殊的工程性质,将土体分为一般土和特殊土两大类(彭建兵等,2019)。

(1) 一般土类型及工程性质。一般土主要工程地质类型包括粉土、粉质黏土、黏土、粉细砂、中粗砂、卵砾石。粉土、粉质黏土、黏土一般具中等—高压缩性,主要物理力学指标见表 1。

表 1 郑州市粉土、粉质黏土、黏土物理力学指标统计表
Table 1 Statistical table of physical and mechanical indexes of silt, silty clay and clay in Zhengzhou city

主要物理力学指标	粉土	粉质黏土、黏土
含水率 ω (%)	7.3~29.5	12.8~37.9
质量密度 ρ	1.63~2.11	1.79~2.1
天然孔隙比 e	0.44~1.09	0.48~1.10
液性指数 I_L	0~0.99	-0.62~0.99
压缩系数 α_{1-2} (1/MPa)	0.06~0.46	0.06~0.53
压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	3.7~25.9	3.4~42.7
黏聚力 C_q (kPa)	6.3~45.9	10.0~97.9
内摩擦角 φ_q	5.6~33.1	6.4~32.2
黏粒含量 (%)	5.4~18.8	--

粉细砂松散—密实,中粗砂中密—密实,卵砾石一般为密实,承载力高。

另外,郑州市存在钙质胶结层和钙质结核层特殊地质现象。其中,黏性土钙质胶结层,中等—强胶结,饱和单轴抗压强度平均值 10.5 MPa, fak = 30~500 kPa;砂土钙质胶结层,强胶结为主,饱和单轴抗压强度平均值 20.2 MPa,其工程性质相当于软岩—较软岩, fak = 400~700 kPa;钙质结核层主要分布在郑州市西南丘陵边缘地带,钙质结核粒径一般 1~10 cm,最大粒径约 25 cm,结核致密坚硬,充填粉质黏土或黏土,但该层一般厚度小于 1 m,钙质结核层的工程力学性质因所含钙核的最大粒径、颗粒分布的级配特征以及结核的含量变化而差异较大。

上述土体类型按粒度成份和连结特征可概括为黏性土(粉质黏土、黏土)、粉土、砂土(粉砂、细砂、中砂、粗砂)、卵砾石和钙质胶结层(黏性土钙质胶结层、砂土钙质胶结层)、钙质结核层。

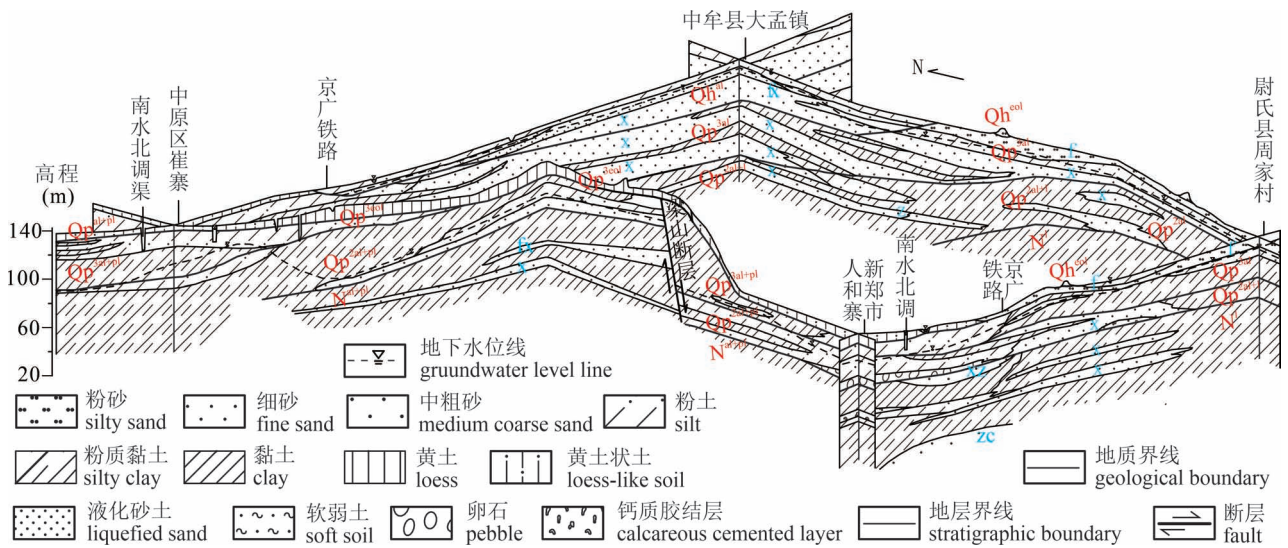


图 1 郑州市工程地质剖面结构图

Fig. 1 Engineering geological profile structure diagram in Zhengzhou city

(2)特殊土类型及工程性质。郑州市特殊土主要包括填土、湿陷性黄土和软弱土。

填土:以人工填土为主,分为素填土和杂填土,填土堆积时间不一,多为旧城改造及新区扩展的产物,工程性质极差,且分布极不均匀、厚度不大,不宜做天然地基,工程建设中建议挖除。

湿陷性黄土:包括湿陷性黄土和湿陷性黄土状土,主要分布于京广铁路以西的大部分地区,褐黄、浅黄色,稍湿,稍密为主,含钙质结核,质地较疏松,垂直节理发育,见大孔隙(物理力学指标见表 2)。湿陷性土体的厚度一般均小于 10 m,湿陷系数为 0.015~0.067,具轻微—中等湿陷性,属 I 级(轻微)—II 级(中等)非自重湿陷性黄土。

软弱土:主要分布于京广铁路以东、陇海铁路以

北的黄河冲积平原区,主要由全新世湖沼相沉积的软塑粉质黏土、淤泥质粉质黏土组成,黑灰色、褐灰色,软塑—流塑,垂向分布 1~2 层,其沉积厚度一般为 1.8~4.5 m,局部可达 12.8 m,有机质含量一般小于 5%(物理力学指标见表 2),具有高压缩性、低强度、低透水性、不均匀性等特征,工程性质差。

2 郑州市区地下空间地层结构划分方法

2.1 地层结构划分依据

2.1.1 郑州市地下空间总体地层结构特征

郑州市区地层结构类型具有明显的区块特征。京广铁路一线是构成不同地层结构类型分区的明显标志(图 1),这和地质地貌分区特征具有高度的一致性,说明区域构造和地貌对地层岩性沉积的控制作用非常明显。

京广铁路以西,主要为山前冲洪积区域,地层沉积粒度相对单一,地层结构也相对简单,上部地层以黄土及黄土状土为主,下部以冲洪积黏性土为主。京广铁路以东,主要为黄河冲积平原,地层沉积粒度在空间和时间上变化较大,地层结构相对复杂,主要为黏性土、粉土、粉细砂互层的多层结构。其中东部新城,地层结构总体上是以砂层为主的砂土、黏性土、粉土互层的多层结构,单层砂层厚度最大可达 65 m,局部夹软弱土;航空城区,地层结构总体上是以黏性土为主的黏性土、粉土、粉细砂互层的多层结构,单层黏性土厚度最大可达 68 m。土层由北向

表 2 郑州湿陷性黄土、软弱土物理力学指标统计表		
Table 2 Statistical table of physical and mechanical indexes of collapsible loess and soft soil in Zhengzhou		
物理力学指标	湿陷性黄土、黄土状土	软弱土
含水率 ω (%)	5.5~26.3	26.2~51.7
质量密度 ρ	1.38~2.01	1.61~1.96
天然孔隙比 e	0.55~1.26	0.82~1.49
液性指数 I_L	0.02~0.83	0.8~1.28
压缩系数 α_{1-2} (1/MPa)	0.05~0.86	0.14~0.89
压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	2.4~26.8	2.5~8.6
黏聚力 C_q (kPa)	7.7~42.0	6.3~21.4
内摩擦角 φ_q	12.4~28.9	7.3~40.4
黏粒含量 (%)	6.8~18.5	--

南、由上至下逐渐变厚,砂层逐渐减少,这与黄河在该地区冲积、泛滥展布相一致。郑州市地下空间总体地层结构特征见图 1。

2.1.2 郑州市地下空间竖向分层

城市地下空间分层是保障地下空间有序开发与合理利用的基础,其不仅与功能定位和使用性质有关,还与所处地质条件密切相关(陈大平,2014;雷升祥等,2019),并应参照有关规范要求进行适宜性开发(张弘怀等,2013)。目前,国内外城市地下空间竖向分层的一般原则是“该深则深,能浅则浅;人货分离,区别功能”(胡瑜韬等,2012)。不同城市大多将地下空间竖向划分为 4 层(张茂省等,2019;辛韞潇等,2019;唐鑫等,2022)。根据郑州市地下空间总体地层结构特征及开发利用现状,参照《城市地下空间规划标准》,郑州市区地下空间竖向上可划分为浅层(0~-15 m)、次浅层(-15~-30 m)、次深层(-30~-50 m)和深层(-50~-100 m)四个层次。目前为止,郑州市地下空间开发利用主要集中在浅层,少数工程(如城市地铁交通及城市地下综合管廊等)开发深度达到了次浅层,次深层和深层地下空间开发难度大,目前基本上还处于空白状态。

本着划分简便,结果实用、好用的原则,更好的服务于地下空间开发利用,依据郑州市地下空间分层,本文进行浅层、次浅层、次深层地下空间地层结构的划分。

2.2 地层结构划分方法及类型

不同类型的土层表现出不同的工程性质,不同的土层在空间上的展布与叠加,组成了不同的地层结构。地层结构划分过程中,填土为人为堆积,分布极不均匀,工程建设中一般挖除,在地层结构划分时予以舍去。当薄层与厚层的厚度比大于 1/3 时,定义为互层;厚度比在 1/10~1/3,定义为夹层;对于厚度比小于 1/10 的土层进行了舍去、合并,简化了地层结构类型。

郑州市地下空间每一深度层次的地层结构根据岩土体空间分布特征以及垂向上的组合关系,划分为 4 种结构类型,分别为单层结构、双层结构、三层结构和多层结构。

(1)单层结构:是指由一种岩土体类型组成,主要包括坚硬层状碳酸盐岩单层结构、黏性土单层结构、粉土单层结构、砂土单层结构等。

(2)双层结构:是指由上、下两种不同的岩土体类型组成,主要包括黄土状土+粉土双层结构,粉土、黏性土双层结构,粉土、砂土双层结构,砂土、黏

性土双层结构等。

(3)三层结构:是指由上、中、下 3 种不同的岩土体类型组成,主要包括黄土状土+粉土、黏性土三层结构,黏性土、粉土、砂土三层结构,黏性土夹砂土三层结构等。

(4)多层结构:是指由 3 种以上岩土体类型组成,主要包括粉土、黏性土、砂土互层多层结构,黏性土、粉土互层多层结构,黏性土、砂土互层多层结构,黏性土夹粉土、砂土多层结构等。

3 郑州市区地下空间地层结构特征

3.1 郑州市区浅层(0~-15 m)地下空间地层结构特征

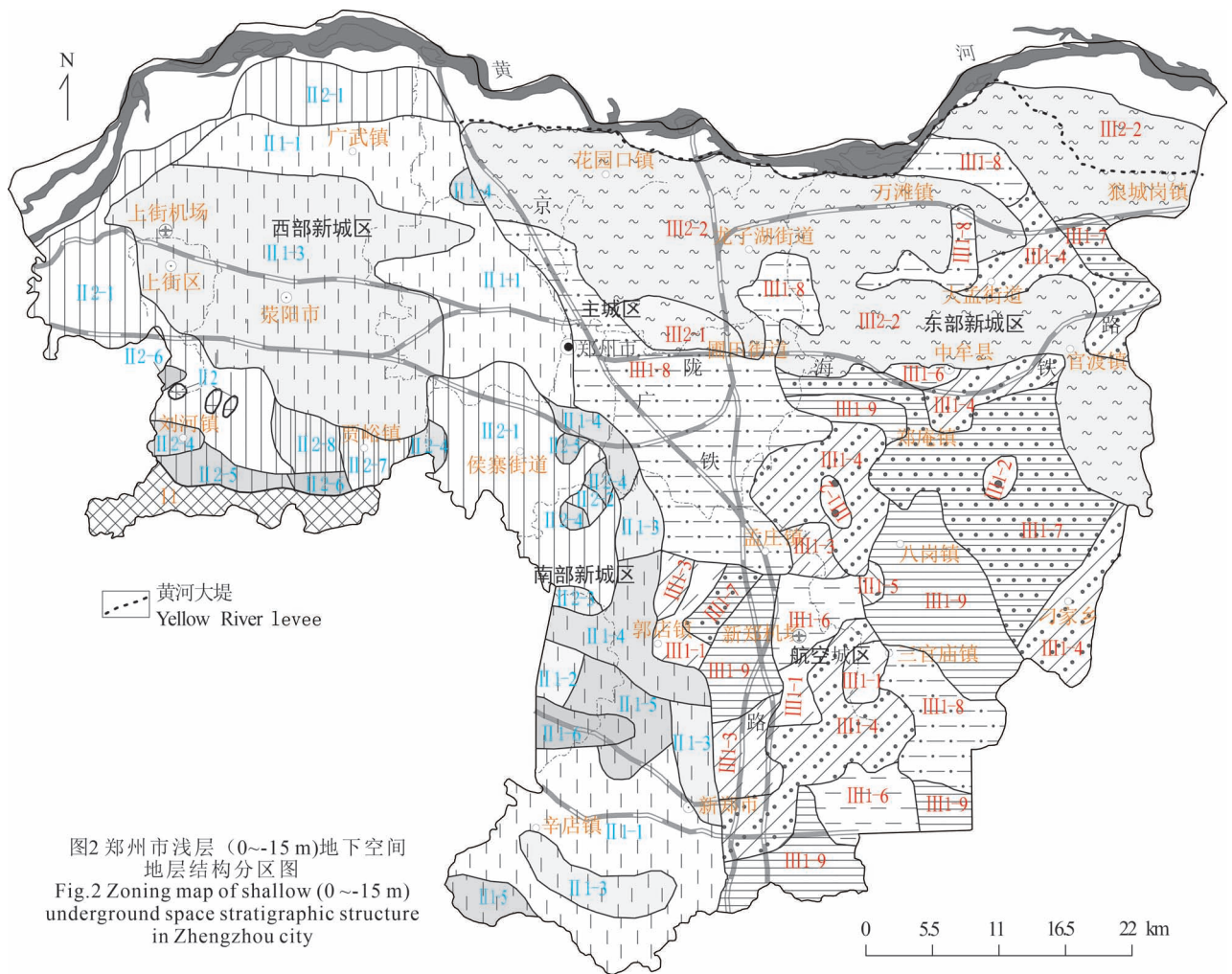
首先根据基岩出露、存在湿陷性黄土、分布一般土情况分为基岩出露区(I区)、分布湿陷性黄土区(II区)和无湿陷性黄土分布区(III区)。其中 I 区根据出露基岩的类型划分为坚硬层状碳酸盐岩单层结构亚区(I1)和较坚硬层状碎屑岩单层结构亚区(I2);II区再根据湿陷性黄土的类型分为黄土状土亚区(II1)和黄土亚区(II2);III区再根据是否存在软弱土分为一般土亚区(III1)和分布软弱土亚区(III2)。亚区再依据垂向上岩土体地层结构分布特征进一步划分地层结构段(图 2)。

其中,基岩出露区岩体较破碎—较完整,承载力高,工程性质良好,但施工困难;分布湿陷性黄土区地下空间开发容易引起黄土崩塌、湿陷等工程问题;分布软弱土亚区,软弱土地基上的建筑物易产生大沉降量、侧向滑动或基础下土体挤出现象;砂土单层、砂土夹粉土三层结构段分布面积大,局部存在饱和砂土液化问题,地下空间开发利用时容易导致流砂、潜蚀、甚至喷砂涌水、地面沉降问题,不利于地下空间开发利用。而其它亚区、段工程性质较好,有利于地下空间开发利用。

3.2 郑州市区次浅层(-15~-30 m)、次深层(-30~-50 m)地下空间地层结构特征

由于不存在特殊土,且受不同的地貌单元控制,郑州不同区域地层结构类型的发育种类及特征不尽相同。为了清晰描述郑州市的地层结构类型分区及特征,首先根据地貌分为山地丘陵及冲洪积平原区(I区)和黄河冲积平原区(II区),再依据垂向上岩土体地层结构分布特征进行亚区划分,各区、亚区分布情况见图 3、图 4。

郑州市西部冲洪积平原次浅层、次深层地下空间地层结构以粉土、黏性土双层结构及黏性土单层



I—基岩出露区; I 1—坚硬层状碳酸盐岩单层结构亚区; I 2—较坚硬层状碎屑岩单层结构亚区; II—分布湿陷性黄土区; II 1—黄土状土亚区; II 1-1—黄土状土+粉土双层结构段; II 1-2—黄土状土+黏性土双层结构段; II 1-3—黄土状土+粉土、黏性土三层结构段; II 1-4—黄土状土+粉土夹砂土三层结构段; II 1-5—黄土状土+黏性土、碎石三层结构段; II 1-6—黄土状土+黏性土、钙质胶结层三层结构段; II 2—黄土亚区; II 2-1—黄土+粉土双层结构段; II 2-2—黄土+黏性土双层结构段; II 2-3—黄土+砂土双层结构段; II 2-4—黄土+碎石双层结构段; II 2-5—黄土+坚硬碳酸盐岩双层结构段; II 2-6—黄土+较坚硬层状碎屑岩双层结构段; II 2-7—黄土+黏性土、粉土三层结构段; II 2-8—黄土+砂土、粉土、黏性土多层结构段; III—无湿陷性黄土区; III 1—一般土亚区; III 1-1—粉土单层结构段; III 1-2—砂土单层结构段; III 1-3—粉土、黏性土双层结构段; III 1-4—粉土、砂土双层结构段; III 1-5—砂土、黏性土双层结构段; III 1-6—粉土夹砂土三层结构段; III 1-7—砂土夹粉土三层结构段; III 1-8—粉土、黏性土、砂土三层结构段; III 1-9—粉土、黏性土与砂土互层多层结构段; III 2—分布软弱土亚区; III 2-1—粉土、黏性土、软弱土三层结构段; III 2-2—粉土、黏性土、软弱土、砂土多层结构段

I—bedrock exposed region; I 1—single-layer structure subregion of hard layered carbonate rock; I 2—single-layer structure subregion of harder layered clastic rock; II—distribution of collapsible loess region; II 1—loess-like soil subregion; II 1-1—loess-like soil + silt double-layer structure section; II 1-2—loess-like soil + cohesive soil double-layer structure section; II 1-3—loess-like soil + silt, cohesive soil triple -layer structure section; II 1-4—loess-like soil + silt sandwiched sand triple -layer structure section; II 1-5—loess-like soil + cohesive soil, gravel triple -layer structure section; II 1-6—loess like soil + cohesive soil, calcareous cemented layer triple -layer structural section; II 2—loess subregion; II 2-1—loess + silt double-layer structure section; II 2-2—loess + cohesive soil double-layer structure section; II 2-3—loess + sand double-layer structure section; II 2-4—loess + gravel double-layer structure section; II 2-5—loess + hard carbonate rock double layer structure section; II 2-6—loess + harder layered clastic rock double-layer structure section; II 2-7—loess + cohesive soil, silt triple -layer structure section; II 2-8—loess + sand, silt, cohesive soil multiple-layer structure section; III—no collapsible loess region; III 1—general soil subregion; III 1-1—silt single-layer structure section; III 1-2—sandy soil single-layer structure section; III 1-3—silt, cohesive soil double-layer structure section; III 1-4—silt, sand double-layer structure section; III 1-5—sand, cohesive soil double-layer structure section; III 1-6—silt sandwiched sand triple -layer structure section; III 1-7—sand sandwiched silt triple -layer structure section; III 1-8—silt, cohesive soil, sand triple -layer structure section; III 1-9—silt, cohesive soil and sand interlayer multiple-layer structural section; III 2—distribution of soft soil sub-region; III 2-1—silt, cohesive soil, soft soil triple -layer structure section; III 2-2—silt, cohesive soil, soft soil, sand multiple-layer structure section

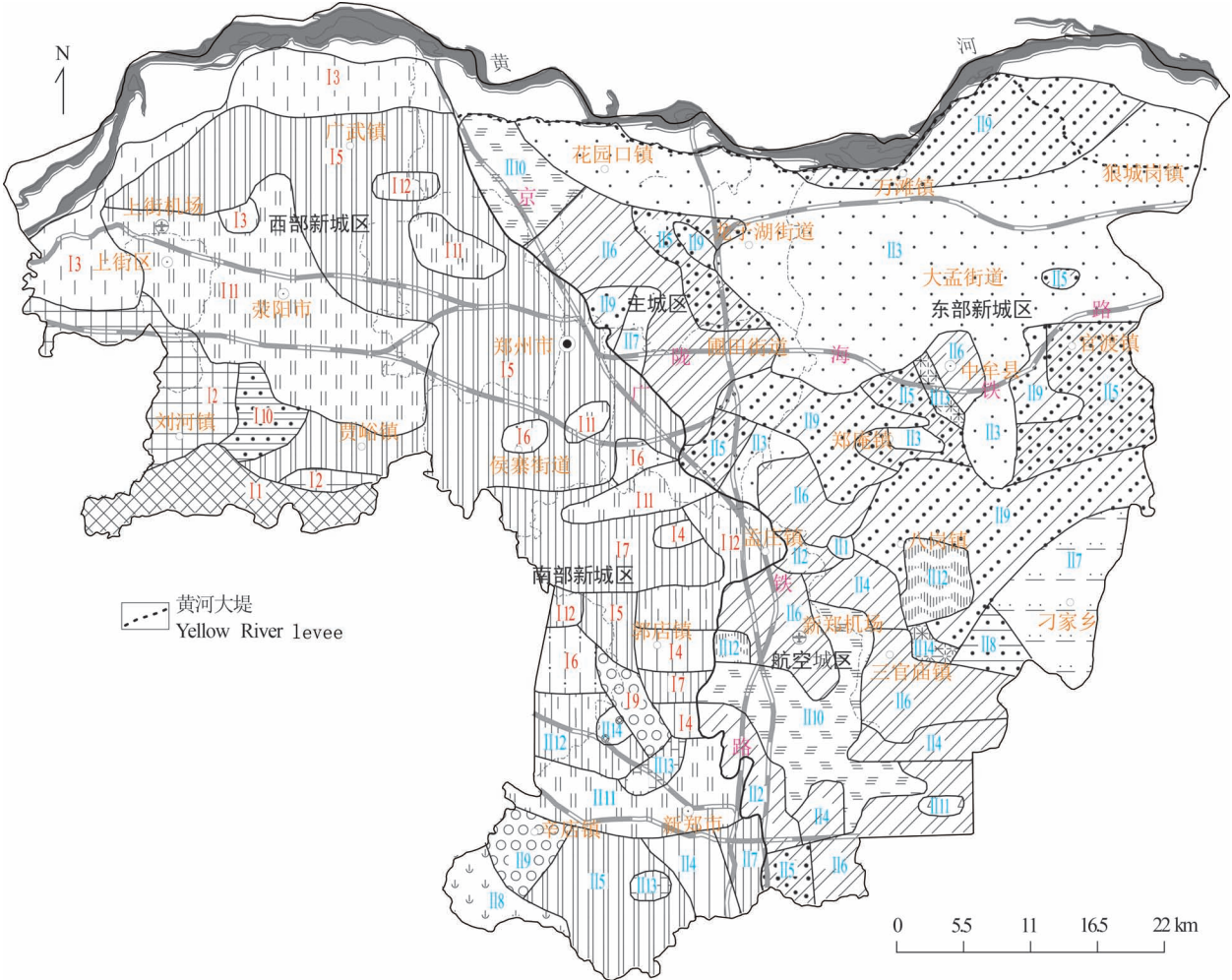


图 3 郑州市次浅层(-15~-30 m)地下空间地层结构分区图

Fig. 3 Zoning map of sub-shallow (-15 ~-30 m) underground space stratigraphic structure in Zhengzhou city

I—山地丘陵及冲洪积平原区; I 1—坚硬层状碳酸盐岩单层结构亚区; I 2—较坚硬层状碎屑岩单层结构亚区; I 3—粉土单层结构亚区; I 4—黏性土单层结构亚区; I 5—粉土、黏性土双层结构亚区; I 6—粉土、砂土双层结构亚区; I 7—黏性土、砂土双层结构亚区; I 8—黏性土、卵石双层结构亚区; I 9—卵石、砂土双层结构亚区; I 10—砂土+较坚硬层状碎屑岩双层结构亚区; I 11—黏性土、粉土、黏性土三层结构亚区; I 12—粉土、砂土、黏性土三层结构亚区; I 13—粉土、黏性土、卵石三层结构亚区; I 14—卵石砾石夹钙质胶结层三层结构亚区; II—黄河冲积平原区; II 1—粉土单层结构亚区; II 2—黏性土单层结构亚区; II 3—砂土单层结构亚区; II 4—粉土、黏性土双层结构亚区; II 5—粉土、砂土双层结构亚区; II 6—黏性土、砂土双层结构亚区; II 7—粉土夹砂土三层结构亚区; II 8—黏性土夹砂土三层结构亚区; II 9—砂土夹粉土或黏性土三层结构亚区; II 10—粉土、砂土、黏性土三层结构亚区; II 11—粉土、砂土互层多层结构亚区; II 12—黏性土、砂土互层多层结构亚区; II 13—粉土、黏性土、砂土互层多层结构亚区; II 14—粉土、黏性土互层夹砂土多层结构亚区

I—mountainous hills and alluvial-proluvial plain region; I 1—single-layer structure subregion of hard layered carbonate rock; I 2—single-layer structure subregion of harder layered clastic rock; I 3—silt single-layer structure sub-region; I 4—cohesive soil single-layer structure sub-region; I 5—silt, cohesive soil double-layer structure sub-region; I 6—silt, sand double-layer structure sub-region; I 7—cohesive soil, sand double-layer structure sub-region; I 8—cohesive soil, pebble double-layer structure sub-region; I 9—pebble, sand double-layer structure sub-region; I 10—sand + harder layered clastic rock double-layer structure sub-region; I 11—cohesive soil, silt, cohesive soil triple -layer structure sub-region; I 12—silt, sand, cohesive soil triple -layer structure sub-region; I 13—silt, cohesive soil, pebble triple -layer structure sub-region; I 14—pebble gravel sandwiched calcareous cement layer triple -layer structure sub-region; II—Yellow River alluvial plain; II 1—silt single-layer structure sub-region; II 2—cohesive soil single-layer structure sub-region; II 3—sand single-layer structure sub-region; II 4—silt, cohesive soil double-layer structure sub-region; II 5—sil, sand double-layer structure sub-region; II 6—cohesive soil, sand double-layer structure sub-region; II 7—silt sandwiched sand triple -layer structure section; II 8—cohesive soil sandwiched sand triple -layer structure section; II 9—sand sandwiched silt or cohesive soil triple -layer structure sub-region; II 10—silt, sand, cohesive soil triple -layer structure sub-region; II 11—silt, sand interlayer multiple-layer structure sub-region; II 12—cohesive soil, sand interlayer multiple-layer structure sub-region; II 13—silt, cohesive soil, sand interlayer multiple-layer structure sub-region; II 14—silt, cohesive soil interlayer sandwiched sand multiple-layer structure sub-region

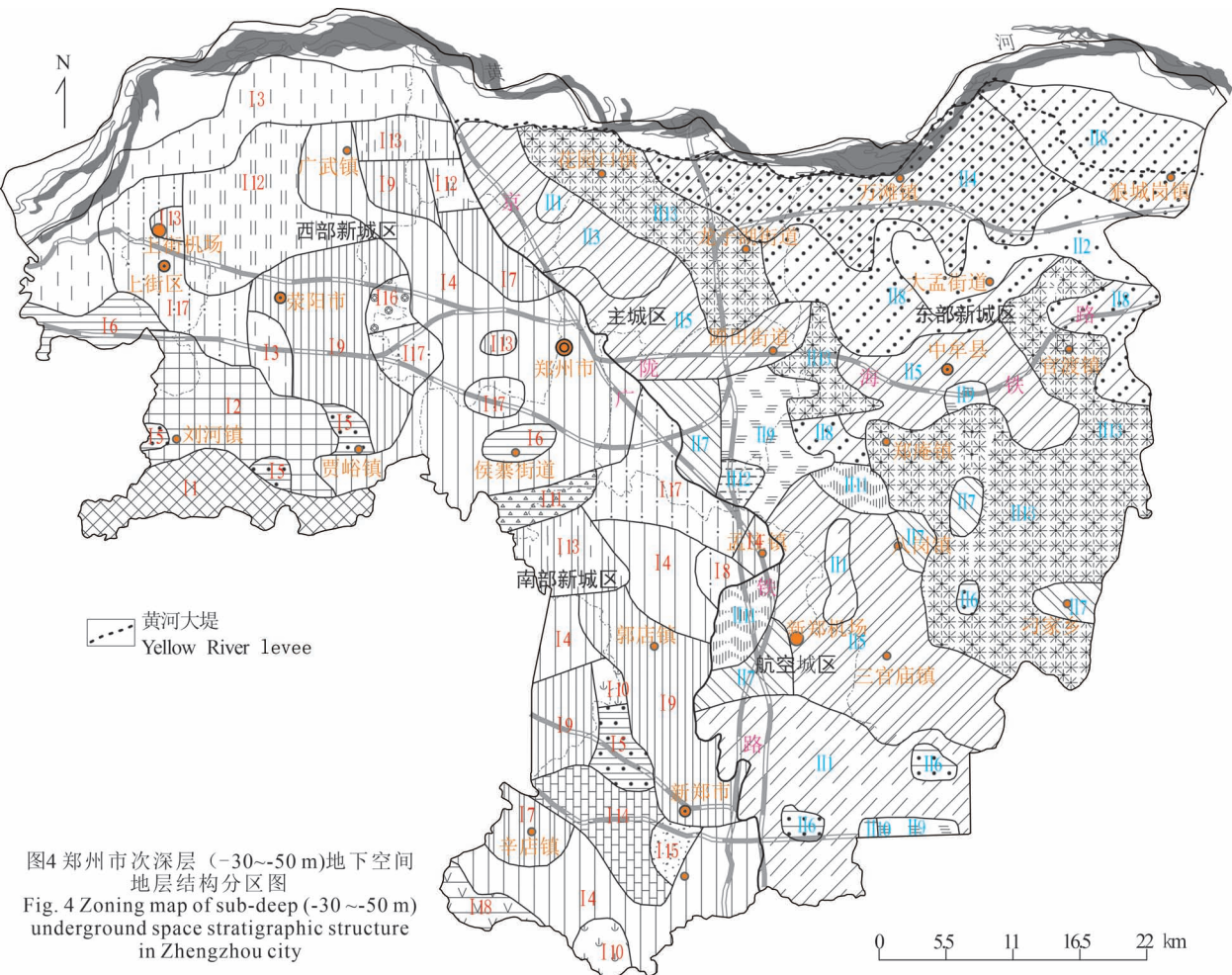


图4 郑州市次深层 (-30~50 m)地下空间
地层结构分区图
Fig. 4 Zoning map of sub-deep (-30 ~50 m)
underground space stratigraphic structure
in Zhengzhou city

I—山地丘陵及冲洪积平原区; I 1—坚硬层状碳酸盐岩单层结构亚区; I 2—较坚硬层状碎屑岩单层结构亚区; I 3—粉土单层结构亚区; I 4—黏性土单层结构亚区; I 5—黏性土+较坚硬层状碎屑岩双层结构亚区; I 6—粉土+软弱层状碎屑岩双层结构亚区; I 7—粉土、黏性土双层结构亚区; I 8—粉土、砂土双层结构亚区; I 9—黏性土、砂土双层结构亚区; I 10—黏性土、卵石双层结构亚区; I 11—黏性土、钙质胶结层双层结构亚区; I 12—黏性土、粉土、黏性土三层结构亚区; I 13—粉土、砂土、黏性土三层结构亚区; I 14—黏性土、卵石、黏性土三层结构亚区; I 15—粉土、砂土、卵石三层结构亚区; I 16—砂土、卵石、钙质胶结层三层结构亚区; I 17—粉土、黏性土互层多层结构亚区; I 18—坚硬-软弱相间变质岩多层结构亚区; II—黄河冲积平原区; II 1—黏性土单层结构亚区; II 2—砂土单层结构亚区; II 3—粉土、黏性土双层结构亚区; II 4—砂土、粉土双层结构亚区; II 5—砂土、黏性土双层结构亚区; II 6—黏性土夹砂土三层结构亚区; II 7—黏性土、粉土、黏性土三层结构亚区; II 8—砂土夹粉土或黏性土三层结构亚区; II 9—黏性土、砂土、粉土三层结构亚区; II 10—砂土夹钙质胶结层三层结构亚区; II 11—黏性土、砂土互层多层结构亚区; II 12—粉土、黏性土互层多层结构亚区; II 13—粉土、黏性土、砂土互层多层结构亚区

I—mountainous hills and alluvial-proluvial plain region; I 1—single-layer structure subregion of hard layered carbonate rock; I 2—single-layer structure subregion of harder layered clastic rock; I 3—silt single-layer structure sub-region; I 4—cohesive soil single-layer structure sub-region; I 5—cohesive soil + harder layered clastic rock double-layer structure sub-region; I 6—silt + soft layered clastic rock double-layer structure sub-region; I 7—silt, cohesive soil double-layer structure sub-region; I 8—silt, sand double-layer structure sub-region; I 9—cohesive soil, sand double-layer structure sub-region; I 10—cohesive soil, pebble double-layer structure sub-region; I 11—cohesive soil, calcareous cement layer double-layer structure sub-region; I 12—cohesive soil, silt, cohesive soil triple -layer structure sub-region; I 13—silt, sand, cohesive soil triple -layer structure sub-region; I 14—cohesive soil, pebble, cohesive soil triple -layer structure sub-region; I 15—silt, sand, pebble triple -layer structure sub-region; I 16—sand, pebble, calcareous cement layer triple -layer structure sub-region; I 17—silt, cohesive soil interlayer multiple-layer structure sub-region; I 18—hard—soft interphase metamorphic rock multiplelayer structure subregion; II—Yellow River alluvial plain; II 1—cohesive soil single-layer structure sub-region; II 2—sand single-layer structure sub-region; II 3—silt, cohesive soil double-layer structure sub-region; II 4—sand, silt double-layer structure sub-region; II 5—sand, cohesive soil double-layer structure sub-region; II 6—cohesive soil sandwiched sand triple -layer structure section; II 7—cohesive soil, silt, cohesive soil triple -layer structure sub-region; II 8—sand sandwiched silt or cohesive soil triple -layer structure sub-region; II 9—cohesive soil, sand, silt triple -layer structure sub-region; II 10—sand sandwiched with calcareous cement layer triple -layer structure sub-region; II 11—cohesive soil, sand interlayer multiple-layer structure sub-region; II 12—silt, cohesive soil interlayer multiple-layer structure sub-region; II 13—silt, cohesive soil, sand interlayer multiple-layer structure sub-region

结构分布面积最大,施工方法简单,成本低,有利于地下空间开发利用。

郑州市东部黄河冲积平原次浅层地下空间地层结构以砂土单层结构分布面积最大,地下空间施工时,容易引起坍塌、流沙、涌水事故,应加强支护工作;次深层地下空间地层结构以粉土、黏性土、砂土互层分布面积最大,较有利于地下空间开发利用。另外,卵砾石、钙质胶结层强度高,当采用盾构施工时,易产生刀具偏磨、偏离隧道轴线等问题。

4 讨论

(1) 笔者等将郑州市区地下空间统一划分为浅层(0~15 m)、次浅层(-15~-30 m)、次深层(-30~-50 m)和深层(-50~-100 m) 4 个层次,郑州市各城区在进行地下空间开发利用规划时,宜根据地层结构、地下水、地质问题和地下空间开发现状,因地制宜进行地下空间层次划分。

(2) 郑州“7·20”特大暴雨后,城市内涝灾害如何防范,海绵城市如何发挥减灾作用,广受关注。目前,海绵城市建设较注重雨洪管理和河湖湿地生态建设,对地质环境条件关注较少。而海绵城市建设采用的“渗、滞、蓄、净、用、排”等六位一体措施中“渗、滞、蓄、净”措施与地质环境条件响应显著(黄敬军等,2018)。砂土单层结构雨水“渗”透能力强;黏性土单层结构可“净”化雨水;地下含水层的含水空间决定“蓄”存雨水的多少。因此,海绵城市规划建设应充分考虑包气带地层结构因素的影响。从地层结构角度分析,郑州市东部、东南部地区浅层、次浅层地层结构有较强的渗水能力、净水能力和较充足的地下蓄水空间,海绵城市建设适宜性良好。建议充分利用地层结构的有利条件进行海绵城市建设,促使更多的雨洪就地消纳,提高城市防洪排涝减灾能力。

(3) “7·20”特大暴雨后,郑州市路面出现多处塌陷,结合历史数据分析,京广铁路与西三环之间塌陷分布密度最大,除去降雨和人类活动因素外,塌陷和地层结构密切相关,该区域浅层地下空间地层结构以黄土状土+粉土双层结构为主,黄土状土垂直节理裂隙发育,具大孔隙,遇水产生湿陷,粉土结构松散,粘聚力低,雨水下渗潜蚀掏空地下土体进而形成塌陷。因此,应查清地层结构这个孕灾因子,结合气象等致灾因子,圈出地质风险区,建立监测预警机制,提升城市防灾减灾、抵御风险的地质韧性。

5 结论、建议

(1) 郑州市区主要位于山前冲洪积平原和黄河冲积平原上,地层以黏性土、粉土、砂土为主,无制约地下空间开发利用的重大地质问题,地层结构总体较简单,地下空间开发的成本和工程风险较低,具备较大开发利用潜力。

(2) 整体来看,京广铁路以西山前冲洪积平原区,地层沉积粒度相对单一,地层结构也相对简单,相比较京广铁路以东更适宜城市地下空间开发利用。

(3) 由于不同深度的地下空间地层结构不同,郑州市城市规划建设部门可以根据地层结构合理选择地铁路线以及地下建筑的布局,不仅能节省投资,另一方面可以降低对地质环境的破坏。

(4) 郑州市西部新城区,次浅层、次深层地下空间地层以粉土、黏性土为主,可重点开发建设地下仓储、地下能源生产设施、特种工程等。同时可利用自然地形建设地下粮仓,实现绿色、环保储粮。

(5) 郑州市主城区浅层和次浅层地下空间利用程度高,次深层地下空间地质条件良好,建议加强地下空间资源评价,建设城市地下储水管廊和排水深邃解决城市内涝问题。

(6) 郑州市东部新城区连霍高速公路以北濒临黄河,地层结构以砂层为主,存在饱和砂土严重液化和软弱土,建议作为地下空间开发避让区,除水利、生态工程以外,不进行地下空间开发利用。

(7) 郑州市航空城区次浅层和次深层地下空间地层结构较简单,以黏性土、砂土双层结构;黏性土单层结构和粉土、砂土、黏性土三层结构为主。结合其立体综合交通枢纽有利条件,建议重点开发次浅层、次深层地下空间,建设轨道交通、地下仓储、现代物流通道等设施。

注 释 / Notes

- ① 程新涛, 闫震鹏, 唐辉, 寇亚飞. 2015. 郑州—开封城市地质调查报告. 郑州: 河南省地质调查院.
- ② 闫震鹏, 焦红军, 陈光宇, 寇亚飞. 2009. 河南省主要城市环境地质调查评价报告(郑州市). 郑州: 河南省地质调查院.
- ③ 邱金波, 王春晖, 左正金. 2016. 河南省工程地质图说明书. 郑州: 河南省地质矿产勘查开发局第五地质勘查院.

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)

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. 地学前缘, 26(3): 39~47.

蔡向民, 何静, 白凌燕, 刘鸿. 2010. 北京市地下空间资源开发利用规划的地质问题. 地下空间与工程学报, 6(6): 1105~1111.

陈大平. 2014. 上海深部地下空间开发关键地质问题分析. 上海国土资源, 35(3): 73~77.

郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 李采. 2019. 特殊地下空间应用与研究现状. 中国地质, 46(3): 482~492.

韩博, 夏玉波, 裴艳东, 马震, 郭旭. 2020. 雄安新区地下空间工程地质特征及环境地质效应. 工程勘察, 48(3): 1~8.

胡瑜韬, 田敬, 彭芳乐. 2012. 上海工程地质特征与大深度地下空间开发模式探讨. 地下空间与工程学报, 8(S1): 1333~1338.

黄敬军, 武鑫, 姜素, 崔龙玉, 魏永耀, 张丽, 陆华. 2018. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价—以徐州为例. 地质论评, 64(6): 1472~1480.

廖建三, 彭卫平, 林本海. 2006. 影响广州市浅层地下空间开发利用的地质因素分析及分区评价. 岩石力学与工程学报, 25(S2): 3357~3362.

雷升祥, 申艳军, 肖清华, 奚家米, 顾霖骏. 2019. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念. 地下空间与工程学报, 15(4): 965~979.

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, 6(23): 9~21.

唐鑫, 龚绪龙, 许书刚, 张其琪, 郭慧, 邓峰丽. 2022. 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. 地质论评, 68(2): 593~605.

王初生, 叶为民, 杜灏洁. 2005. 上海城市地下工程环境地质效应研究. 地下空间与工程学报, 1(2): 283~286.

王建秀, 刘月圆, 刘笑天, 史玉金, 杨天亮, 陈勇, 陈大平. 2017. 上海市地下空间地质结构及其开发适应性. 上海国土资源, 38(2): 39~53.

邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 华健, 常晓军, 蔡小虎. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究—以杭州为例. 地质论评, 68(2): 607~614.

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): 494~497.

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. 地质学报, 93(S1): 233~240.

辛轲潇, 李晓昭, 戴佳铃, 王睿. 2019. 城市地下空间开发分层体系的研究. 地学前缘, 26(3): 104~112.

杨晓刚, 王睿, 黄伟亮. 2019. 基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析. 地学前缘, 26(3): 69~75.

张茂省, 李同录, 陈秀娟, 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—延安为例. 山地学报, 37(3): 303~315.

朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 王昕, 韩传峰, 张冬梅, 李晓军. 2019. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战. 地学前缘, 26(3): 22~31.

张弘怀, 郑铤鑫. 2013. 城市地下空间开发利用及其地质环境效应研究. 工程勘察, 41(7): 46~49.

Cheng Guanghua, Wang Rui, Zhao Muhua, Su Jingwen, Yang Yang, Zhang Xiaobo. 2019&. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China. Earth Science Frontiers, 26(3): 39~47.

Cai Xiangmin, He Jing, Bai Lingyan, Liu Hong. 2010&. The geology problem in development and utilization programming of underground space resource in Beijing. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 6(6): 1105~1111.

Chen Daping 2014&. Key geological problems of deep underground space development in Shanghai. Shanghai Land & Resources, 35(3): 73~77.

Guo Chaobin, Wang Zhihui, Liu Kai, Li Cai. 2019&. The application and research progress of special underground space. Geology in China, 46(3): 482~492.

Han Bo, Xia Yubo, Pei Yandong, Ma Zhen, Guo Xu. 2020&. Engineering geology characteristic and environmental geological effect of underground space in Xiongan New Area. Geotechnical Investigation & Surveying, 48(3): 1~8.

Hu Yutao, Tian Jing, Peng Fangle. 2012&. Engineering geological characteristics and development model of deep-underground space in Shanghai. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 8(S1): 1333~1338.

Huang Jingjun, Wu Xin, Jiang Su, Cui Longyu, Wei Yongyao, Zhang Li, Lu Hua. 2018&. Geological influence and suitability evaluation of the construction of sponge city—a case of Xuzhou. Geological Review, 64(6): 1472~1480.

Liao Jiansan, Peng Weiping, Lin Benhai. 2006&. Analysis and partition evaluation of geological factors affecting space development and utilization of shallow underground in Guangzhou City. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(S2): 3357~3362.

Lei Shengxiang, Shen Yanjun, Xiao Qinghua, Xi Jiami, Gu Linjun. 2019&. Present situations of development and utilization for underground space in cities and new viewpoints for future development. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 15(3): 965~979.

Peng Jianbing, Huang Weiliang, Wang Feiyong, Liu Yang. 2019&. Geological structural classification fo and geological survey method for urban underground space in China. Earth Science Frontiers, 6(23): 9~21.

Tang Xin, Gong Xulong, Xu Shugang, Zhang Qiqi, Guo Hui, Deng Fengli. 2022&. Development and utilization of urban underground space resources and geological survey countermeasures in southern Jiangsu metropolitan area. Geological Review, 68(2): 593~605.

Wang Chusheng Ye Weimin, Du Haojie. 2019&. The urban geo-environmental effect of underground engineering in Shanghai City. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 1(2): 283~286.

Wang Jianxiu, Liu Yuyuan, Liu Xiaotian, Shi Yujin, Yang Tianliang, Chen Yong, Chen Daping. 2017&. Geological structure of the Shanghai underground space and a preliminary analysis of the development of adaption. Shanghai Land & Resources, 38(2): 39~53.

Xing Huaixue, Dou Fanfan, Ge Weiya, Hua Jian, Chang Xiaojun, Cai Xiaohu. 2022&. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development andutilization. Geological Review, 68(2): 607~614.

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

Xia Weiqiang, Dong Jie, He Peng, Xie Yongjian. 2019&. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao. Acta Geologica Sinica, 93(S1): 233~240.

Xin Yunxiao, Li Xiaozhao, Dai Jialing, Wang Rui. 2019&. Study on

the stratified system in urban underground space development. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 104~112.

Yang Xiaogang, Wang Rui, Huang Weiliang. 2019&. Status and challenges of underground space development and utilization in China based on comparative analysis of typical Chinese cities. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 69~75.

Zhang Maosheng, Li Tonglu, Cheng Xiujian, Sun Pingping, Li Qiang, Qiao Zhitian, Zhao Quanli. 2019&. Evaluation of underground space resources in mountain cities and their development

models——Taking Yan'an City as an Example. *Mountain Research*, 37(3): 303~315.

Zhu Hehua, Ding Wenqi, Qiao Yafei, Wang Xin, Han Chuanfeng, Zhang Dongmei, Li Xiaojun. 2019&. Issues and challenges in urban underground space utilization in China. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 22~31.

Zhang Honghuai, Zheng Xianxin. 2013&. Study on development and utilization of urban underground space and its geological environment effect. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 41(7): 46~49.

Characteristics of rock—soil stratigraphic structure in Zhengzhou City and suggestions for development and utilization of underground space

ZHANG Jianyu^{1,2)}, LÜ Dunyu^{1,2)}, LIU Changli^{1,2)}, WANG Cuiling^{1,2)},
MENG Shuran^{1,2)}, LIU Songbo^{1,2)}, ZHANG Yun^{1,2)}

1) *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061;*

2) *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang, 050061*

Objectives: The rock—soil strata constitute the basic material environment of the underground space and have a huge impact on the development and utilization of the underground space. Therefore, in-depth understanding and analysis of the structural characteristics of the rock—soil strata can lay a solid foundation for the development of the underground space.

Methods: The urban area of Zhengzhou mainly distributes loose strata such as silt, silty clay, clay, silty sand, medium—coarse sand, and some special soils such as soft soil and collapsible loess. According to the vertical combination of rock and soil strata, it is divided into single-layer structure, double-layer structure, triple-layer structure and multiple-layer structure. Then, the stratigraphic structure of the underground space in Zhengzhou urban area is discussed separately according to the shallow layer (0~–15 m), the sub-shallow layer (–15~–30 m) and the sub-deep layer (–30~–50 m).

Results: The shallow (0~–15 m) underground space stratigraphic structure in Zhengzhou City is divided into 3 regions, 6 sub-regions and 25 structural sections; the sub-shallow (–15~–30 m) underground space stratigraphic structure is divided into 2 regions and 28 sub-regions; the sub-deep (–15~–30 m) underground space stratigraphic structure is divided into 2 regions and 31 sub-regions. It provides accurate geological data and technical support for the development and utilization of underground space in Zhengzhou city.

Conclusions: The overall structure of the underground space in Zhengzhou is relatively simple, the cost and risk of development are low, and it has great potential for development and utilization. Overall, the western piedmont alluvial and diluvial plain area is more suitable for underground space development and utilization than the eastern Yellow River alluvial plain area.

Based on the stratigraphic structure characteristics of different urban areas, the following suggestions for the development and utilization of underground space are put forward: focus on the development and construction of underground storage and underground energy production facilities in the western new urban area; build underground water storage pipe gallery and deep drainage in the main urban area; north of the Lianhuo Expressway in the eastern new urban area as an avoidance area for underground space development; the Aviation city focuses on the construction of underground storage, modern logistics channels and other facilities. And the influence of stratigraphic structure on the construction of sponge city and road collapse in Zhengzhou is discussed.

Keywords: Zhengzhou; stratigraphic structural characteristics; underground space; development and utilization

Acknowledgements: This article was supported by the Project of the China Geological Survey (No.

DD20211309)

First author: ZHANG Jianyu, male, born in 1977, engineer, mainly engaged in engineering geology, urban geology survey and research work; Email: 948965331@qq.com

Corresponding author: LÜ Dunny, male, born in 1984, associate professor, mainly engaged in the study of geological environmental effects in the process; Email: lvdunny@foxmail.com

Manuscript received on: 2022-03-03; Accepted on: 2022-05-18; Network published on: 2022-06-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 06. 071 **Edited by:** LIU Zhiqiang

