

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.11.010

河谷平原跨区域工程地质层序厘定与平面分区方法 ——以安徽沿江地区为例

杨洋^{1,2}, 苏晶文^{1,2}, 李云峰^{1,2}, 王睿^{1,2}, 张庆^{1,2}

YANG Yang^{1,2}, SU Jingwen^{1,2}, LI Yunfeng^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, ZHANG Qing^{1,2}

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 自然资源部城市地下空间探测评价工程技术创新中心, 江苏 南京 210016

1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, MNR, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:随着中国城市群建设的不断深入,城市群一体化开发已上升为国家战略,但跨区域工程建设面临着工程地质层划分标准不统一、工程地质分区不系统等问题,制约了工程地质资料的区域共享与重大工程的一体化开发。提出了以第四系土体的沉积环境演化为基础,综合土体结构特征、物理力学状态及空间分布特征的工程地质层序厘定方法。在此基础上,基于区域沉积环境演化规律提出工程地质分区方法,对重点地区识别影响工程建设的关键地质层,划分工程地质段。以安徽沿江地区为例,结合 33 个 1:50000 标准图幅工程地质调查工作,系统梳理了安徽沿江地区地貌特征和第四纪地层特征,建立了标准工程地质层,共 5 个主层,17 个亚层;建立了河谷平原跨区域工程地质分区,共 2 个大区,6 个亚区,为皖江城市群沿江地区工程规划建设提供了工程地质基础框架。研究成果可为河谷平原型城市群的工程地质层序厘定与平面分区提供新思路。

关键词:河谷平原;沉积环境;工程地质层序;平面分区

中图分类号:P642.4 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)11-2019-07

Yang Y, Su J W, Li Y F, Wang R, Zhang Q. Stratigraphic ordering and regionalization of engineering geology in large area of valley plain: a case study along the Yangtze River in Anhui Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(11): 2019-2025

Abstract: With the development of urban agglomeration in China, the integrated development of urban agglomeration has become a national strategy. However, cross-regional engineering construction is faced with the problems of disunity of engineering geological stratum division standards and unsystematic engineering geological zoning. The regional sharing of engineering geological data and the integrated development of major projects are restricted. Based on the evolution of sedimentary environment of Quaternary soils, an engineering geological sequence determination method is present in this paper, which integrates the structural characteristics, physical-mechanical conditions and spatial distribution characteristics of soils. On this basis, the key geological strata affecting the engineering construction are identified, and the engineering geological zoning method based on the distribution of key engineering geological strata is proposed. Finally, taking the area along the Yangtze River in Anhui Province as an example, the geomorphic characteristics and Quaternary stratigraphic characteristics are systematically analyzed through engineering geological survey of thirtythree 1:50000 standard maps. Standard engineering geological strata have been established, including 5 main layers and 17 sub-layers. Besides, engineering geological zoning has been established, including 2 first-level zones and 6 sub-zones. The results provide an engineering geological

收稿日期:2020-08-21;修订日期:2020-11-06

资助项目:中国地质调查局项目《皖江城市群综合地质调查》(编号:DD20190261)和江苏省地质矿产勘查局科研项目《基于地质环境要素的城市地下空间资源三维质量评价研究》(编号:2019KY01)

作者简介:杨洋(1991-),男,硕士,助理研究员,从事城市工程地质调查与研究。E-mail:yyoung1991@126.com

foundation framework for engineering planning and construction of along the Yangtze River in Anhui Province. The research results can provide new ideas for stratigraphic ordering and regionalization of engineering geology of urban agglomeration in river valley plain.

Key words: valley plain; sedimentary environment; engineering geological sequence; regionalization

区域工程地质层序厘定与平面分区对指导区域重大工程建设、城市发展具有重要意义。Lozińska等^[1]于1975年提出绘制城市群工程地质图,通过工程地质环境要素汇编,指导区域合理发展和环境保护。杨洋等^[2]提出,查明城市地下地质条件是实现城市地下空间开发利用的重要基础。国内针对城市尺度建立了较成熟的层序厘定与平面分区方法,例如韩博等^[3]建立了雄安新区0~100 m的工程地质结构,并划分了18个标准工程地质层组;李晓昭等^[4]以南京地铁南北线一期工程为例,探讨了土体工程地质岩组的划分问题;严学新等^[5]在上海第四纪地层划分的基础上,划分工程地质(亚)层,构建了上海市工程地质分区原则并进行分区评价;史玉金等^[6]介绍了上海工程地质层厘定的新认识,统一了全市工程地质层序,揭示了工程地质层序空间分布规律和工程地质问题。部分学者认识到,跨越城市行政尺度的工程地质层序厘定与分区同样对跨区工程建设具有重要意义,例如吴振等^[7]对莱州湾海岸带划分了9个工程地质层,但其仍以海岸带范围为研究重点,未能构建更大尺度跨单元的层组划分;苟富刚等^[8]以长江三角洲北岸100 m以浅的土体为工程地质层组划分对象,考虑沉积时代、沉积环境、土体结构特征、物理力学参数,建立了研究区基本地层结构层序和编码,但其划分范围也仅局限于南通市,未能突破长江三角洲城市群尺度。亦有学者开展了大流域和省级行政区工程地质分区研究,但受限于研究尺度,其工作精度较小,一般为1:50万—1:100万比例尺^[9-11],针对城市群尺度的工程地质层序厘定与平面分区方法研究尚不充分。

随着中国城镇化建设的不断深入,城市群一体化开发已上升为国家战略,但跨区域工程建设面临着工程地质层划分标准不统一、工程地质分区不系统等问题,严重制约了工程地质资料的区域共享。中国东部城市群建设大多位于平原地带,包括沿海平原、长江三角洲平原、沿江河谷平原等,相较于沿海平原和三角洲平原地层,河谷平原的地层差异性大,给跨区域工程地质层序厘定和分区带来困难。

本文针对地质环境较复杂的河谷平原提出跨区域工程地质层序厘定与平面分区方法,有利于统一跨区域的工程地质基础格架和区划,为城市群一体化工程规划建设提供基础。

1 层序厘定与平面分区方法

1.1 层序厘定方法

不同沉积时代、沉积环境的土体,工程性质存在明显差异。因此,在工程层序厘定过程中,首先要考虑土体沉积时代、成因类型与沉积环境,即以第四纪地质层序为一级分层,构建工程地质组。在此基础上,根据土体性质(粘性土、粉土、砂土、卵砾石)和状态(粘性土的软硬、粉土和砂土的密实度)划分工程地质层,城市尺度研究主要根据岩性和状态划分层序。与城市尺度层序厘定不同的是,城市群研究尺度在工程地质层序的厘定过程中,需要重点考虑沉积环境演化过程,系统分析同一地貌单元工程地质层分布的连续性、普遍性。基于地层上下沉积环境及区域展布情况,依据钻孔揭露标志性地层的空间位置关系,对2个标志地层之间的薄层或透镜体进行归并,不单独建立层序,使层序厘定满足沉积环境连续的要求,有利于城市群区域整合对接。

在上述工程地质层序厘定原则的基础上,构建工程地质层序编码:工程地质组(圈码数字)-工程地质层(阿拉伯数字)。此外,为反映区域沉积环境差异,以字母a代表河流相沉积环境、字母b代表山麓相沉积环境(图1-A)。通过此编码,可以直观地表达工程地质层的沉积时代和成因类型。

1.2 平面分区方法

城市尺度工程地质分区主要考虑对工程地质条件起主导作用的因素,按照地貌及地质成因类型进行一级分区,二级分区主要依据松散层分布特征及对工程建设有影响的工程地质问题。与城市尺度工程地质分区不同的是,城市群研究尺度在工程地质分区过程中需要重点考虑同一分区内沉积环境的统一,土体亚区划分主要依据成因类型、沉积

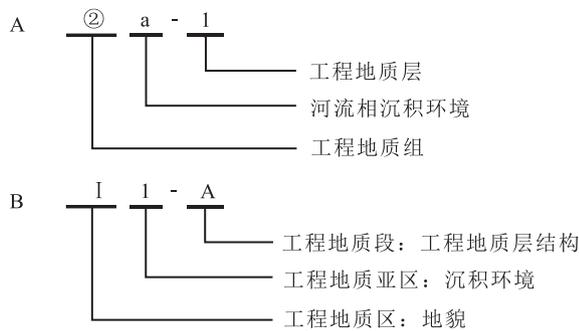


图 1 工程地质层和分区编码示例

Fig. 1 Engineering geological layer and zone coding example
A—层序厘定方法;B—平面分区方法

环境及岩土体结构。针对分布广泛、工程建设密集的河谷平原区,基于上述层序厘定方法确定工程地质层,重点考虑影响工程建设的关键工程地质层,包括负面影响地层(软土、易液化砂土)和有利地层(硬土),根据其空间分布规律划分工程地质地段。

在上述分区原则的基础上,构建工程地质分区编码:工程地质区(罗马数字)-工程地质亚区(阿拉伯数字)-工程地质段(英文字母)(图 1-B)。通过此编码,可以直观地表达工程地质分区的地貌类型、沉积环境与地层结构。

2 皖江城市群沿江地区工程地质层序与平面分区

2.1 皖江城市群沿江地质环境概况

城市群尺度的层序厘定和平面分区往往面临着区域地貌类型多样、沉积环境复杂等问题。本次研究对象的选取主要考虑地质环境相对复杂区域,同时兼顾城市群发展阶段及规划建设情况。长江三角洲城市群作为世界主要城市群之一,区域内长江江苏段—上海段地形起伏较小,沉积环境相对简单,研究程度较高^[12-14]。但上游安徽段地貌类型多

样,主要包括堆积平原、堆积剥蚀岗地及侵蚀剥蚀丘陵山地地貌,沉积环境复杂多变,第四纪地层接触关系复杂。此外,近年随着皖江经济带承接产业转移的推进,沿江地区开展了大量的工程建设,但缺乏统一的工程地质层序和工程地质分区,不利于重大跨区域线性工程的规划建设。因此,本次选取皖江城市群沿江河谷平原作为研究对象,开展复杂地质环境背景下城市群尺度跨区域层序厘定与平面分区研究。

皖江城市群沿江地区第四纪地层广泛分布,于振江等^[15-16]根据新构造运动、地貌和第四纪地层特征,对第四纪地层进行了统一划分和定义。平原区第四系覆盖物以更新世—全新世冲积成因的芜湖组粉质粘土、粉细砂、中砂,以及大桥镇组—青弋江组粉质粘土、细砂、中粗砂、砂卵石和泥砾石为主,岗地区第四系覆盖物以更新世下蜀组—戚家矶组粉质粘土和泥砾石为主。在地貌和第四纪地层的基础上,苏晶文等^[17]将皖江沿江地区进一步划分为冲积—湖积平原地质单元、洪积—坡积岗地地质单元、残积—剥蚀丘陵地质单元(表 1)。

2.2 工程地质层序特征

本文基于皖江城市群沿江地区 33 个图幅范围内第四纪地质钻孔、工程地质钻孔、水文地质钻孔的分布情况,根据前述工程地质层序的厘定原则,以地表填土(①)、全新世芜湖组(②a)、更新世河流相大桥镇组—青弋江组(③a)、山麓相下蜀组(③b)、戚家矶组(④b)为划分标准,建立了 5 个工程地质组。在各工程地质组内,根据土体性质、状态、分布情况进一步细分为 17 个工程地质层(表 2)。

在上述工程地质层序中,②a-2 层是区内主要软土层,②a-3、②a-4 层是区内主要液化砂层,③b-1、④b-1 层是区内主要膨胀土层,②a-4、②a-5、③a-5 层是区内主要含水层。

表 1 皖江城市群沿江地区地质单元划分^[17]

Table 1 Division table of geological units along the Yangtze River in Anhui

地质单元名称	地貌	沉积相	分布范围
冲积—湖积平原地质单元	河谷平原	河流相、湖相	长江两岸(北岸宽阔,南岸狭窄),青弋江—水阳江—石臼湖、皖河、秋浦河、滁河、巢湖—裕溪河等支流流域
洪积—坡积岗地地质单元	垄状平原	山麓相	岗地、山前洪积扇
残积—剥蚀丘陵地质单元	低山、丘岗	—	基岩山区

表2 工程地质层组特征
Table 2 Characteristics of engineering geological layer

岩性 地层	工程地 质组	工程地 质层	土层名称	状态/密 实度	工程力学性质描述	压缩模量 E_s /MPa	承载力特征 值 f_{ak} /kPa
芜湖组	①	①-1	填土	松散	灰黄色—灰色,成分以粉质粘土、粉土为主,含较多植物根系,局部含建筑碎石堆积	—	—
		② _a -1	粉质粘土	可塑	灰黄色,湿,可塑状,中等压缩性,是良好的天然地基持力层	2.85~10.21	100~120
	② _a	② _a -2	粉质粘土 夹粉细砂	软塑	灰褐色—灰黑色,局部夹松散粉细砂,含腐殖物,属高压缩性土,是区内主要不良土体	2.63~8.50	60~70
		② _a -3	粉土与粉 细砂互层	可塑	灰褐色,刀切面粗糙规则,呈千层饼状,属中-高压缩性土	2.23~10.72	80~100
		② _a -4	粉细砂	松散-稍密	灰褐色—灰黄色,成分以石英,长石为主,含少量云母,硅质岩,中等压缩性	8.90~11.80	160~180
② _a -5	中粗砂	中密	灰黄色,饱和,夹少量石英细砾,砾径约0.2~2 cm,是良好的桩基持力层	—	180~200		
大桥镇 组-青弋 江组	③ _a	③ _a -1'	粉质粘土	可塑-硬塑	灰黄色,切面光滑,含铁锰质结核,干强度高,属超固结、中低压缩性土,是良好的桩基持力层	4.50~7.00	160~240
		③ _a -1	粉质粘土	可塑-硬塑	灰黑色—青灰色,切面光滑,干强度高,属超固结、中低压缩性土,是良好的桩基持力层	1.85~7.74	160~240
		③ _a -2	粉细砂	中密-密实	灰褐色—青灰色,局部夹薄层粉土、含粘土团块,属低压缩性土,是良好的桩基持力层	11.40~13.20	180~200
	③ _a	③ _a -3	中粗砂	中密	灰黄色,饱和,含砾石,磨圆度较好,是良好的桩基持力层	—	200~220
		③ _a -4	粉质粘土	硬塑	灰黑色—青灰色,刀切面规则,局部含少量砾石,属超固结、低压缩性土,是良好的桩基持力层	5.60~9.90	180~200
		③ _a -5	砂砾石	密实	杂色,饱和,砾石成分以石英、硅质为主,砾径0.5~5 cm为主,大者达8 cm,呈次圆状,分选性差,多砂质充填,是良好的桩基持力层	—	300~400
下蜀组	③ _b	③ _b -1	粉质粘土	硬塑-坚硬	灰黄色—褐黄色,含大量铁锰结核,属低压缩性土,是良好的天然地基持力层和桩基持力层	3.67~17.02	300~490
		③ _b -2	泥砾	密实	褐黄色,泥质充填,砾石呈次棱角状,砾径多为2~8 cm,是良好的桩基持力层	—	300~400
戚家矶组	④ _b	④ _b -1	粉质粘土	硬塑-坚硬	棕红色,含铁锰质结核及浸染,夹灰白色条带,干剪强度高,是良好的天然地基持力层	4.00~15.00	300~490
		④ _b -2	泥砾	密实	棕红色,泥质充填,砾径多为2~8 cm,呈次棱角状,分选性较差,是良好的桩基持力层	—	400~500

2.3 工程地质分区特征

皖江沿江地区以河谷平原和岗地为主,丘陵山地主要分布在沿江河谷平原两侧。基于前述河谷平原跨区域工程地质平面分区方法,将研究区划分为堆积平原工程地质区(Ⅰ)、堆积剥蚀岗地工程地质区(Ⅱ)2个一级分区。根据各一级分区内沉积环境和地层结构差异,进一步划分为6个工程地质亚区(图2)。

堆积平原工程地质区依据水动力条件、沉积物源等沉积环境差异,进一步划分为长江冲积粘土-砂-砾石双层-多层结构亚区、小流域冲积粘土-砂-砾石单层-多层结构亚区、小流域湖积粘土-砂-砾石双层结构亚区,前2个亚区虽为河流相沉积环境,但在沉积物源和水动力条件方面存在明显差异^[18],其中长江冲积平原物源来自长江上游及周边支流

的混合物源,而小流域物源多为近源沉积,如青弋江冲积平原物源多来自宣城、黄山地区。堆积剥蚀岗地工程地质区依据下蜀组黄土和戚家矾组网纹红土的沉积环境差异和地层结构组合,划分为山麓相下蜀组硬土出露单层-双层结构亚区、山麓相下蜀组硬土埋藏双层结构亚区、山麓相戚家矾组硬土出露双层结构亚区。

在上述亚区划分的基础上,针对安徽沿江地区密集产业集聚区与交通规划,对长江冲积粘土-砂-砾石双层-多层结构亚区进行了工程地质段划分。该亚区地层较全,具有典型的河流相多层结构特征,典型跨江剖面如图3所示。根据亚区内②a-2层易触变软土、②a-4层易液化砂土、③b-1层低压缩硬土等关键层的埋藏与分布情况,进一步划分了工程地质段(表3)。

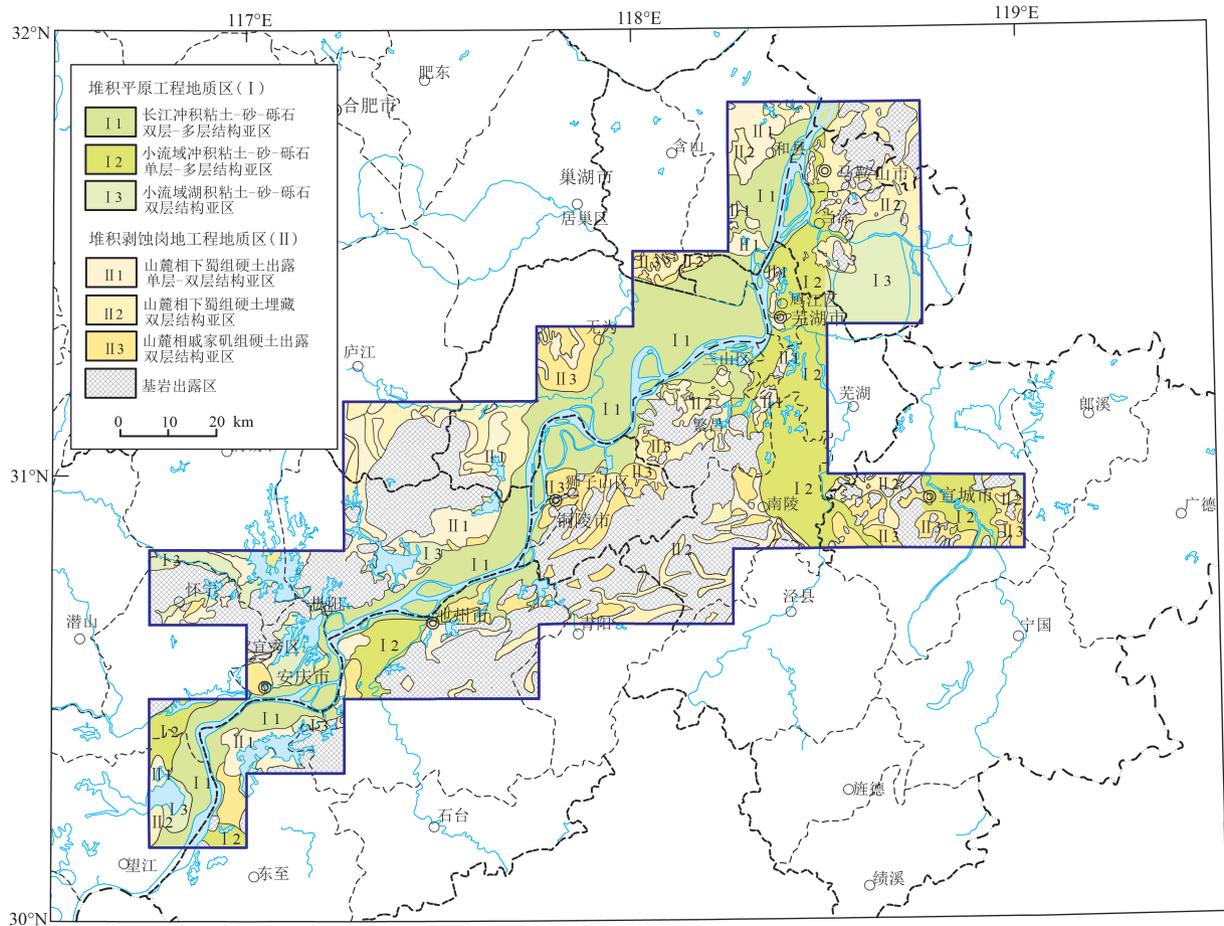


图2 皖江城市群沿江地区工程地质分区

Fig. 2 Engineering geology zoning along the Yangtze River in Anhui Province

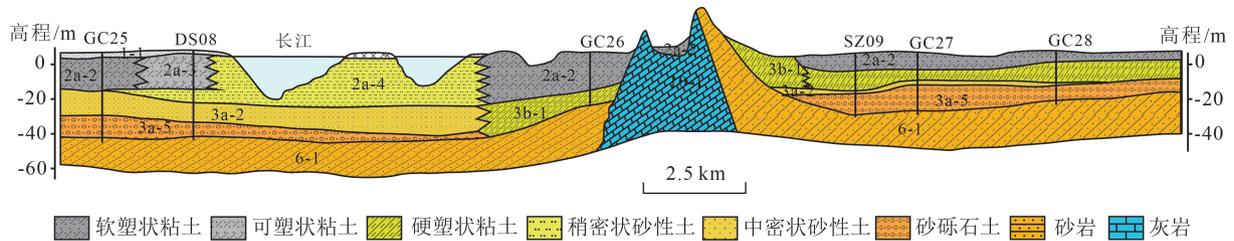


图3 长江冲积粘土-砂-砾石双层-多层结构亚区剖面(芜湖段)

Fig. 3 Engineering geological section of dual-multi layered alluvial clay-sand-gravel of the Yangtze River

表3 长江冲积粘土-砂-砾石双层-多层结构亚区工程地质段

Table 3 Engineering geological area of dual-multi layered alluvial clay-sand-gravel of the Yangtze River

工程地质段	主要工程地质特征
②a-2 易触变软土埋藏多层结构段(I ₁ -A)	主要分布于长江冲积平原漫滩区,呈条带状展布,主要工程地质层组包括②a-1、②a-2、②a-3、②a-4、②a-5、③a-2、③a-5。其中,②a-2为易触变软土层,区内普遍分布,该段工程建设需重点关注②a-2层不均匀分布造成的场地不均匀沉降问题
②a-2 易触变软土缺失多层结构段(I ₁ -B)	主要分布于长江沿岸,呈条带状或面状展布,主要工程地质层组包括②a-1、②a-3、②a-4、②a-5、③a-2、③a-5。其中,②a-3与②a-4层为易液化砂层,在抗震设防烈度Ⅶ度及以上地区,需重点关注场地液化等级
②a-4 易液化粉细砂层埋藏多层结构段(I ₁ -C)	主要分布于长江冲积平原沿江地区,呈狭长条带状展布。主要工程地质层组为②a-1、②a-3、②a-4、③a-1、③a-2、③a-3、③a-5和③a-6组成。其中,②a-3与②a-4层为易液化砂层,在抗震设防烈度Ⅶ度及以上地区,需重点关注场地液化等级
②a-4 易液化粉细砂缺失多层结构段(I ₁ -D)	主要分布于长江冲积平原沿江靠近岗地地区,主要工程地质层组为②a-1、②a-3、③a-1、③a-2、③a-3、③a-5、③a-6组成。其中③a-1层粉质粘土天然强度较高,是区内主要的地基持力层
③b-1 硬土埋藏双层结构段(I ₁ -E)	主要分布于长江北岸漫滩与岗地过度地带,主要工程地质层组为②a-1、②a-2、②a-3、③b-1、③a-1。其中③b-1层粉质粘土天然强度较高,是区内主要的地基持力层

3 结论

(1) 本文提出的工程地质层序厘定方法以沉积环境演化、地层结构为基础,根据地层上下沉积环境及区域分布情况,兼顾同一地貌单元工程地质层分布的连续性、普遍性,构建规范的工程地质层序编码,直观反映工程地质层的沉积时代、成因类型。以安徽沿江河谷平原为例,建立了5个工程地质组,17个工程地质层,识别区内主要软土层②a-2层,主要易液化砂层②a-3、②a-4层,主要膨胀土层③b-1、④b-1层。

(2) 本文提出的工程地质分区方法以地貌单元为基础,综合分析沉积环境、工程地质层结构及影响工程建设的关键工程地质层,构建区域统一的工程地质分区编码,可直观表达工程地质分区的地貌类型、沉积环境与工程地质层结构。以安徽沿江河谷平原为例,建立了2个工程地质区,6个亚区,对

沿江重点规划建设的亚区,根据区内关键工程地质层的埋藏与分布情况,进一步划分了工程地质段。

(3) 本文提出的工程地质层序厘定和平面分区方法均以区域沉积环境演化为基础,综合跨区域地层连续与沉积环境相统一,较好地反映了跨区域工程地质层序厘定和平面分区结果,对以地质环境相对复杂的广阔平原地貌为主要特征的城市群具有较强适用性。

致谢:感谢中国地质调查局南京地质调查中心程光华教授级高级工程师的指导,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Łozińska-Stępien H, Stochlak J. Principles of production of engineering geological maps for urban agglomerations [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 1975, 12(1): 57-64.
- [2] 杨洋,王睿,赵牧华,等.城市地下空间资源探测评价技术体系研究[J].

- 华东地质,2022,43(2): 245-254.
- [3] 韩博,夏雨波,裴艳东,等.雄安新区地下空间工程地质特征及环境地质效应[J].工程勘察,2020,48(3): 1-8.
- [4] 李晓昭,罗国焜,龚洪祥,等.土体工程地质层组的划分[J].岩土力学,2004,25(5): 759-763.
- [5] 严学新,史玉金.上海市工程地质结构特征[J].上海地质,2006,(4): 19-24.
- [6] 史玉金,陈洪胜,杨天亮,等.上海市工程地质层序厘定及工程地质条件分析[J].上海地质,2009,(1): 28-33.
- [7] 吴振,王松涛,祝子惠.莱州湾海岸带工程地质特征及特殊问题分析[J].海洋地质前沿,2018,34(9): 1-9.
- [8] 苟富刚,龚绪龙,梅芹芹.长江三角洲北岸土体工程地质层组划分及其应用[J].地质论评,2018,64(1): 237-245.
- [9] 谷德振,张勇,李绍武.长江流域工程地质分区图的商讨[J].水文地质工程地质,1957,(4): 1-9.
- [10] 张可迁,阮明方.安徽省工程地质分区[J].水文地质工程地质,1959,(7): 43-44.
- [11] 张鑫,崔可锐,查甫生,等.长江安徽段沿岸工程地质分区研究[J].工程与建设,2015,29(2): 145-148,172.
- [12] 于俊杰,劳金秀,蒋仁,等.基于多重地层对比研究还原长江三角洲北翼晚第四纪古环境演变[J].地质通报,2016,35(10): 1692-1704.
- [13] 于俊杰,胡飞,杨祝良,等.江苏南通市四甲镇全新世以来有孔虫动物群的发现及其地质意义[J].地质通报,2014,33(10): 1609-1620.
- [14] 苗巧银,朱志国,陈火根,等.镇江地区长江南北两岸第四纪地层结构划分与沉积特征对比[J].华东地质,2017,38(3): 175-183.
- [15] 于振江,黄多成.安徽省沿江地区网纹红土和下蜀土的形成环境及其年龄[J].安徽地质,1996,6(3): 48-55.
- [16] 于振江,彭玉怀.安徽省第四纪岩石地层序列[J].地质学报,2008,82(2): 254-261.
- [17] 苏晶文,龚建师,李运怀,等.基于地层结构组合的第四纪地质单元划分研究——以皖江经济带沿江丘陵平原区为例[J].中国地质调查,2019,6(5): 28-35.
- [18] 杨洋,苏晶文,李云峰,等.河流相沉积环境对软土力学性能影响研究[J].工程地质学报,2018,26(s1): 607-611.