

doi: 10.12029/gc20210305004

韩博,夏雨波,马震,王小丹,郭旭,林良俊,裴艳东. 2023. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用[J]. 中国地质, 50(6): 1903–1918.

Han Bo, Xia Yubo, Ma Zhen, Wang Xiaodan, Guo Xu, Lin Liangjun, Pei Yandong. 2023. Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 50(6): 1903–1918(in Chinese with English abstract).

# 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用

韩博<sup>1,2</sup>, 夏雨波<sup>1,2</sup>, 马震<sup>1,2</sup>, 王小丹<sup>1,2</sup>, 郭旭<sup>1,2</sup>, 林良俊<sup>1,2</sup>, 裴艳东<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 中国地质调查局雄安城市地质研究中心, 天津 300170)

**提要:**【研究目的】为了规范雄安新区工程地质层组划分, 构建三维工程地质结构模型, 更好地进行工程地质与岩土工程资料交流与利用。【研究方法】本文以雄安新区工程地质调查资料为基础, 阐述了雄安新区第四纪地层特征, 进行了工程地质分区, 划分了 100 m 以浅地层工程地质层组, 分析了各层组的空间分布规律及其工程特性; 构建了三维工程地质结构模型, 探讨了其在城市规划建设中的应用。【研究结果】雄安新区全新世地层底板埋深一般 7~16 m, 晚更新世地层底板埋深一般 50~60 m, 中更新世地层底板埋深一般 70~80 m, 早更新世地层底板埋深约 140~190 m; 可将雄安新区工程地质区划分为冲积—洪积平原工程地质亚区、冲积—湖积平原工程地质亚区和冲积平原工程地质亚区; 100 m 深度范围内地层可划分 18 个工程地质层组, 其中①~④层为全新统(Q<sub>n</sub>), ⑤~⑩层为上更新统(Q<sub>p</sub><sup>3</sup>), ⑪~⑮层为中更新统(Q<sub>p</sub><sup>2</sup>), ⑯~⑳层为下更新统(Q<sub>p</sub><sup>1</sup>), 构建了研究区三维工程地质结构模型, 能够直观地展示雄安新区地下 100 m 范围内各层组的空间分布规律与结构特征。【结论】通过划分工程地质层组, 建立三维工程地质结构模型, 可服务于雄安新区顶层规划设计、场地稳定性和工程建设适宜性评价、天然地基和桩基持力层选择、城市地铁隧道选线施工等, 为高标准高质量建设雄安新区提供了重要的地学依据。

**关键词:**工程地质分区; 工程地质层组; 三维地质结构; 城市规划建设; 城市地质调查工程; 雄安新区

**创新点:**(1) 确定了雄安新区第四系地层底板埋深; (2) 首次系统划分了 100 m 深度工程地质层组, 构建了三维工程地质结构模型, 并在城市规划建设中得到了应用。

中图分类号: X53; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)06-1903-16

## Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiong'an New Area

HAN Bo<sup>1,2</sup>, XIA Yubo<sup>1,2</sup>, MA Zhen<sup>1,2</sup>, WANG Xiaodan<sup>1,2</sup>,  
GUO Xu<sup>1,2</sup>, LIN Liangjun<sup>1,2</sup>, PEI Yandong<sup>1,2</sup>

收稿日期: 2021-03-05; 改回日期: 2023-06-23

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189122、DD20211292、DD20221727)资助。

作者简介: 韩博, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质及城市地质调查与研究工作; E-mail: hanbo1984@126.com。

通讯作者: 夏雨波, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质及城市地质调查与研究工作; E-mail: sosodragon@163.com。

- (1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China;
2. Xiongan Urban Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** This paper is the result of urban geological survey engineering.

**[Objective]** In order to standardize the division of engineering geological strata and build the three-dimensional engineering geological structure model of Xiongan New Area, it is better to exchange and utilization of engineering geological and geotechnical engineering data. **[Methods]** In this paper, based on the data of engineering geological survey, the characteristics of Quaternary strata is expounded in Xiongan New Area, and engineering geological zoning is carried out. The engineering geological strata of soil in 100 meters depth and their substrata are divided, and the spatial distribution and engineering characteristics of each stratum are analyzed. The three-dimensional engineering geological structure of Xiongan New Area is builded, and its application in urban construction is discussed. **[Results]** The results show that the Holocene floor depth is generally 7–16 m, the Late Pleistocene floor depth is generally 50–60 m, the Middle Pleistocene floor depth is generally 70–80 m, and the Early Pleistocene floor depth is about 140–190 m in Xiongan New Area. The Quaternary strata can be divided into the alluvial and proluvial plain engineering geological subarea, the alluvial and lacustrine plain engineering geological subarea and alluvial plain engineering geological subarea. The stratum of 100 m depth can be divided into 18 engineering geological strata, of which ①–④ strata are Holocene ( $Q_h$ ), ⑤–⑨ strata are Upper Pleistocene ( $Q_p^3$ ), ⑩–⑮ strata are Middle Pleistocene ( $Q_p^2$ ), and ⑯–⑳ strata are Lower Pleistocene ( $Q_p^1$ ). The three dimensional engineering geological structure model of the study area is constructed, which can intuitively show the stratigraphic distribution and structural characteristics within the depth range of 100 meters underground in Xiongan New Area. **[Conclusions]** Through the division of engineering geological layer groups and the establishment of three-dimensional engineering geological structure model, it can serve the top planning and design of Xiongan New Area, the evaluation of site stability and suitability, the selection of natural foundation and pile foundation bearing layer, subway tunnel line selection and site construction, etc., providing an important geological basis for high standard and high-quality construction of Xiongan New Area.

**Key words:** engineering geological zoning; engineering geological strata; three-dimensional geological structure; urban planning and construction; urban geological survey engineering; Xiongan New Area

**Highlights:** 1) The floor depths of the Quaternary strata are determined in Xiongan New Area; 2) The engineering geological layer groups of 100 m depth are divided, the 3D engineering geological structure model is constructed at the first time, which has been applied in urban planning and construction.

**About the first author:** HAN Bo, male, born in 1984, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in hydrogeology, engineering geology, environmental geology and urban geology survey and research; E-mail: hanbo1984@126.com.

**About the corresponding author:** XIA Yubo, male, born in 1982, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in the survey and research of hydraulic engineering, environmental geology and urban geology; E-mail: sosodragon@163.com.

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20189122, No. DD20211292, No. DD20221727).

## 1 引 言

雄安新区作为疏解北京非首都功能、探索人口经济密集地优化开发新模式的国家级新区,是千年大计、国家大事。为支撑服务雄安新区规划建设,中国地质调查局采用地质、钻探、物探、化探、遥感、测试、计算机信息等多种技术方法,开展了雄安新区综合地质调查工作,调查内容包括土地质量(郭志娟等,2020)、工程地质(郝爱兵等,2018;马震等,2019;刘森和董志良,2019;韩博等,2020)、水文地质(凤蔚等,2017;王凯霖等,2018;赵本龙等,2018;

李海涛等,2021)、环境地质(张永红等,2018)、生态地质(尹德超等,2022)、地热(庞忠和等,2017;王贵玲等,2018;李燕燕等,2023)、深部三维结构(于长春等,2017;何登发等,2018)等,为雄安新区前期规划提供了重要的基础地质资料。

未来数十年,雄安新区将开展大规模的工程建设与地下空间开发,必然会进行商业地质勘察与岩土设计工作。但雄安新区第四系覆盖层厚度大、层序复杂、空间分布变化大,目前鲜有报道雄安新区统一的工程地质标准层组以及高精度的城市三维地质结构模型,不利于今后工程勘察设计与建设中

工程地质资料的交流与社会化利用。地下空间地质结构与城市建设密切相关(明镜等,2009;房万领等,2016;刘顺昌等,2016;习羽等,2018;何静等,2019),工程地质层组的划分是地质模型概化、岩土体质量评价和场地工程地质评价的基础和首要环节(李晓昭等,2004;苟富刚等,2018),地下三维地质结构信息的完备和准确对于城市规划、设计及施工(Lemon and Jones, 2003;陈忠大等,2009;张像源等,2013;李峰等,2019),以及地下空间资源的开发与利用等至关重要(杨建梅等,2006;Kaufmann and Martin, 2008;屈红刚等,2015;李敏等,2018;He et al., 2020)。

为了实现雄安城市科学合理规划以及可持续发展,提高雄安新区工程地质资料的通用性,直观展示雄安地下地质结构,本次研究以雄安新区工程地质调查496个标准钻孔岩心资料为基础,阐述了雄安新区第四纪地层的沉积规律及其年代界限,进行了工程地质分区;对100 m以浅地层的时序关系进行横向联系,划分了土体工程地质层组和层序,并对其进行了统一编码;分析了各工程地质层组的空间分布规律及其工程特性,构建了雄安新区及重点地区三维工程地质结构,并对其在城市规划建设中的应用进行了探讨。

## 2 研究区概况

### 2.1 研究区范围

研究区位于河北省保定市境内,地处北京、天津、保定腹地,北距北京城区约120 km,东距天津市中心约110 km,西距保定约70 km,东南距离沧州约100 km,面积约1770 km<sup>2</sup>(见图1)。雄安新区总体规划范围主要包括雄县、安新县、容城县三县以及任丘市七间房乡、郑州镇、苟各庄镇和高阳县龙化乡等乡镇。

### 2.2 地形地貌

雄安新区位于太行山以东平原区,地势由西北向东南逐渐降低,地面高程多在5~26 m,地面坡降小于2‰(图2)。容城县贾光乡一带地势最高,地面高程可达26 m;容城县一瞭马台乡以北地区地面高程多大于15 m;三台镇—八于乡—赵北口镇—米家务乡—一线以北地区以及高阳县龙化乡局部地区,地势较高,地面高程多在10~15 m;其他绝大多数地区

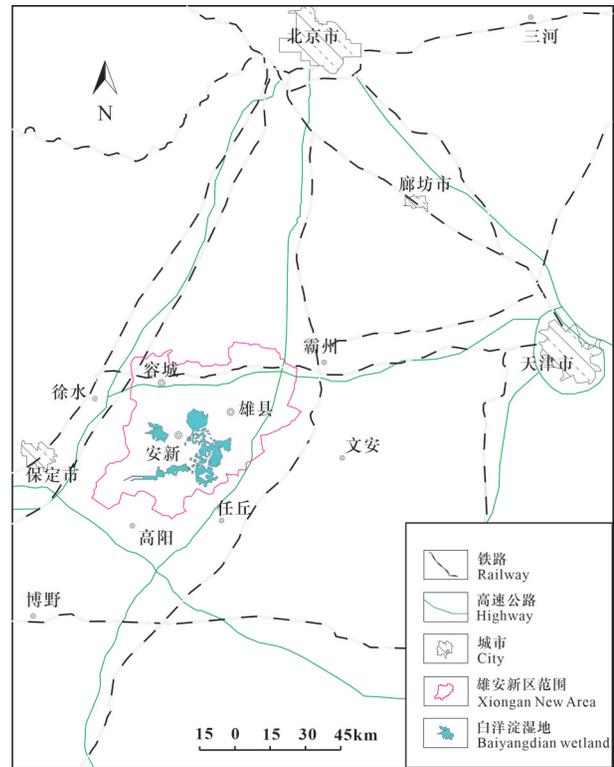


图1 雄安新区地理位置示意图(马震等,2021)

Fig.1 Geographical location of Xiong'an New Area (Ma Zhen et al., 2021)

地面高程6~10 m;仅同口镇—七间房乡—赵北口镇—南头乡等白洋淀及邻近地区地面高程低于5 m。地貌上,雄安新区位于太行山东麓冲洪积平原前缘地带,属于堆积平原地貌(图3)。根据成因类型及地表形态,可进一步划分为冲积—洪积平原亚区、冲积—湖积平原亚区、冲积平原亚区,其中,冲积平原亚区仅分布于南部边界局部地区。

## 3 第四纪地层特征及工程地质分区

要对雄安新区100 m以浅地层进行工程地质层组划分,首先要研究雄安新区范围内第四纪地层的沉积演化过程。

### 3.1 第四纪地层界限

根据地层沉积年代,将雄安新区100 m深度范围内的地层年代自上而下可划分为全新世(Q<sub>h</sub>)、晚更新世(Q<sub>p</sub><sup>3</sup>)、中更新世(Q<sub>p</sub><sup>2</sup>)、早更新世(Q<sub>p</sub><sup>1</sup>)。

#### 3.1.1 Q<sub>h</sub>与Q<sub>p</sub><sup>3</sup>地层界限和标志

全新世与晚更新世的地层年代界限确定为1.2万年(裴艳东和王国明,2016)。气候特征为末次盛

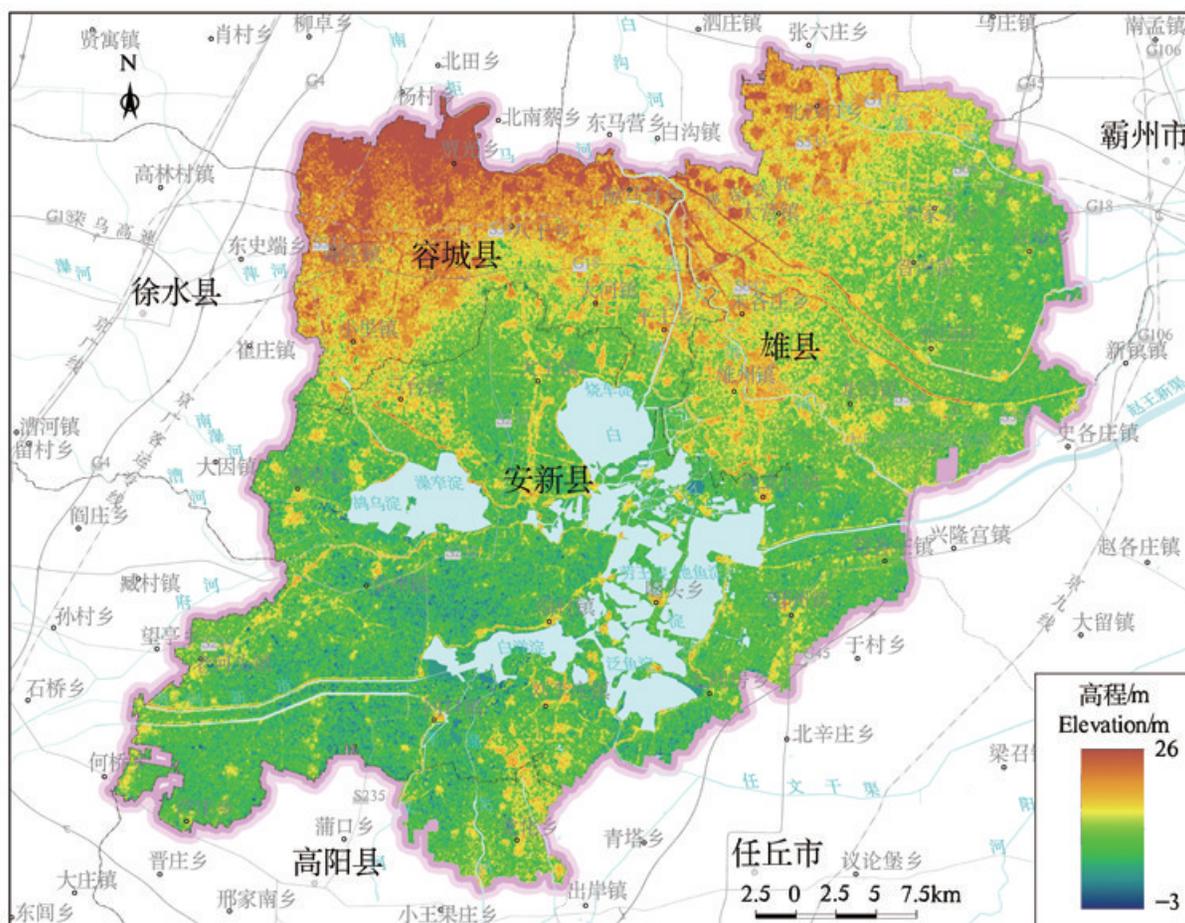


图2 雄安新区地面高程分布图

Fig.2 Ground elevation distribution map of Xiong'an New Area

冰期,雄安新区在末次盛冰期受到全球气候的影响,形成硬黏土,将发育的一层钙质硬黏土作为标志层,确定末次盛冰期的时代。

### 3.1.2 $Q_p^3$ 与 $Q_p^2$ 地层界限和标志

晚更新世与中更新世的地层年代界限确定为12.6万年(李峰等,2019)。第四纪气候以冰期和间冰期的旋回为主要特征,雄安新区晚更新世地层,虽不受到全球海平面变化的影响,但却受到气候变化的影响,尤其是冷期,多形成钙质淀积结核或钙质胶结层,将雄安新区内第五层钙质淀积或结核层作为划分 $Q_p^3$ 与 $Q_p^2$ 地层界限的标志。

### 3.1.3 $Q_p^2$ 与 $Q_p^1$ 地层界限和标志

中更新世与早更新世的地层年代界限确定为78万年(李峰等,2019)。雄安新区中更新世与早更新世地层以棕红色粉质黏土、黏土为划分 $Q_p^2$ 与 $Q_p^1$

地层界限的标志层。

## 3.2 第四纪地层特征

雄安新区地表出露地层为第四纪松散层。根据36个200 m标准钻孔已有成果分析以及相关文献(刘开明等,2020),确定雄安新区第四纪沉积物厚度一般为150~170 m,成因类型以冲积洪积和冲积湖积为主。本次研究深度100 m范围内的第四纪全新世( $Q_h$ )、晚更新世( $Q_p^3$ )、中更新世( $Q_p^2$ )和早更新世( $Q_p^1$ )地层特征如下。

### 3.2.1 全新世( $Q_h$ )

全新世地层底板埋深一般7~16 m,向东逐渐加大,主要为冲积、冲积—洪积和冲积—湖积的堆积物。西北部地区,下部岩性为灰黄色粉土和粉质黏土,上部岩性多为黄棕色粉土,为冲积扇前缘和冲积扇前相;东北部下部岩性为灰黄色黏土、粉质

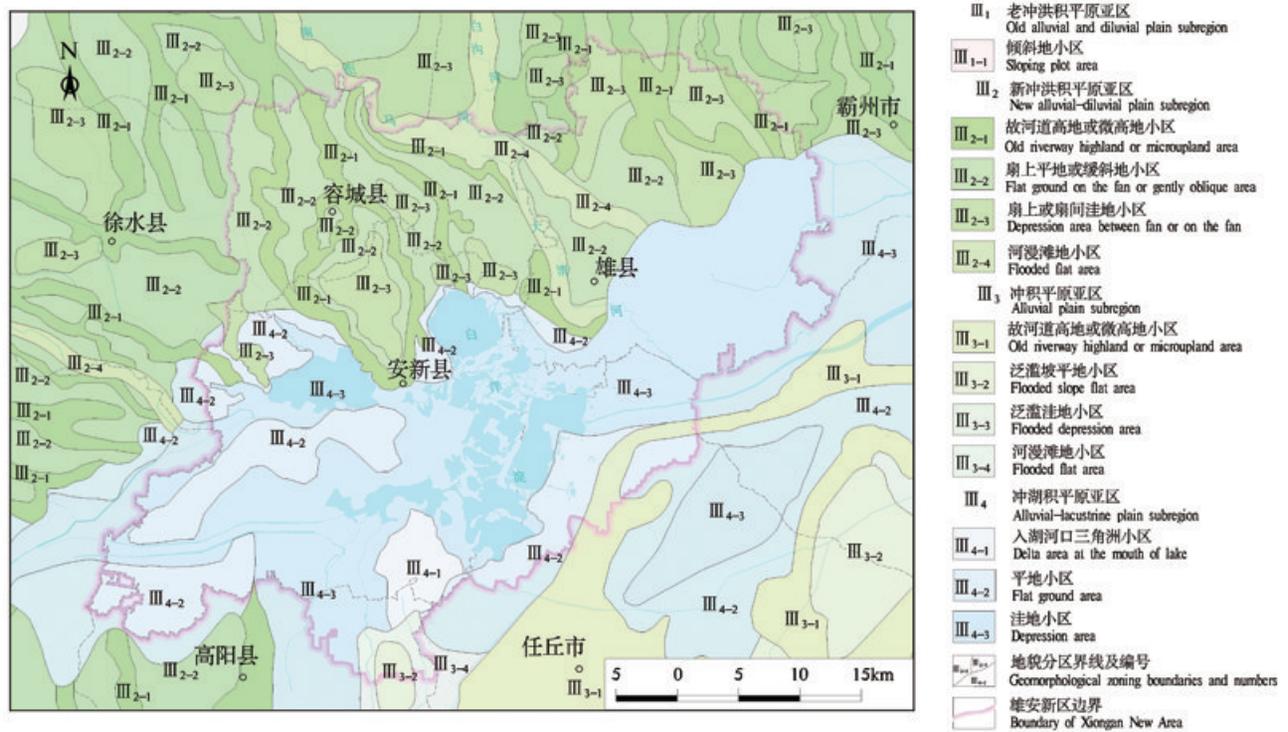


图3 雄安新区地貌类型

Fig.3 Geomorphologic type map of Xiong'an New Area

黏土、粉土夹粉质黏土,上部岩性为粉土夹粉质黏土、粉土,为冲积扇前缘—湖沼—冲积扇前缘—冲积扇前相;南部下部岩性为灰黄色、灰色粉质黏土,中部为黄棕色粉土,上部为灰色粉质黏土,为冲积扇前缘—湖沼—冲积扇前缘—冲积扇前—湖沼相。

3.2.2 晚更新世(Q<sub>p</sub><sup>3</sup>)

晚更新世地层底板埋深一般50~60 m,厚度由西向东增大,主要为冲积—洪积堆积物,岩性主要为粉质黏土、粉土和不同粒级的砂土,黏性土、粉土多呈灰黄—棕黄色,掺杂锈黄色及灰绿色,多包含钙质结核,砂土以粉细砂为主。

3.2.3 中更新世(Q<sub>p</sub><sup>2</sup>)

中更新世地层底板埋深一般70~80 m,厚度约20 m,向南埋深逐渐加大,主要为冲积—洪积堆积物,岩性主要为粉质黏土、黏土及砂土。黏性土多呈棕黄、黄棕—棕红、棕褐色,局部有锈黄色,多包含钙质结核,砂土以粉细砂、中砂为主。

3.2.4 早更新世(Q<sub>p</sub><sup>1</sup>)

早更新世地层覆盖于新近系之上,底板埋深

140~200 m,主要为冲积、洪积堆积物,岩性为黏土、粉质黏土及砂土。黏性土多以棕色为主,掺杂锈黄色及灰绿色,多含钙板,砂土以中砂、细砂为主。

3.3 工程地质分区

按照地貌类型、工程地质层组发育环境、特征包含物、工程特性,可将雄安新区工程地质区划分为3个主要工程地质亚区(图4)。

冲积—洪积平原工程地质亚区(I),主要位于容城县全县,安新县北部的大王镇、三台镇及寨里乡大部,安州镇、端村、芦庄乡等部分地区,雄县雄州镇、朱各庄乡、大营镇、北沙口乡部分地区。主要受拒马河冲洪积控制,含水层以河道形式存在,不存在中全新世的淤泥质层,工程持力层条件好,现状条件下不发生或发育程度较轻的砂土液化,软弱土不发育。

冲积—湖积平原工程地质亚区(II),主要分布于白洋淀及周边地区,雄县的昝岗镇、双堂乡、张岗乡、龙湾镇、赵北口镇,同口镇、刘李庄镇、圈头乡、七间房乡,安新县城、端村镇、老河头镇部分地区。主要受到白洋淀沉积控制,地势较低,含水层较不

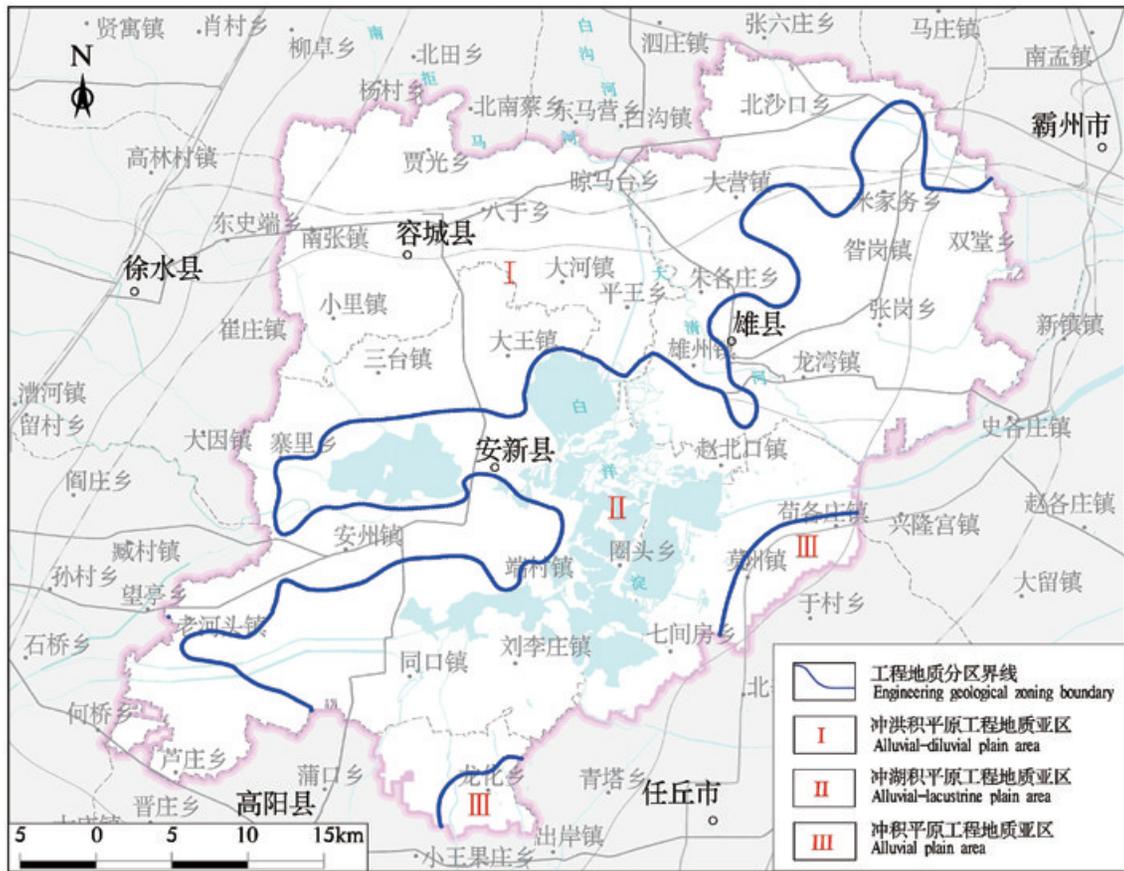


图4 雄安新区工程地质分区  
Fig.4 Engineering geological zoning map of Xiong'an New Area

发育,中全新世发育有淤泥质层,工程持力层条件相对较差,现状条件下发生或发育程度较重的砂土液化,部分地区发育有软弱土。

冲积平原工程地质亚区(III),主要位于任丘市,雄安新区东南侧部分地区属于该亚区,主要位于郑州市、苟各庄镇和龙化乡。主要受到子牙河子流域控制,含水层以河道形式存在,不存在中全新世的淤泥质层,工程持力层条件好,现状条件下不发生或发育程度较轻的砂土液化,软弱土不发育。

## 4 土体工程地质层组划分

### 4.1 划分原则

雄安新区工程地质层组以冲积、洪积、湖积地层为主,沉积的规模一般不大,古河道密布,第四纪地质层数较多、空间变异性大,为了更好地进行工程地质模型概化,更清晰地反映工程地质结构的变化规律,需要对地层进行概化,科学地、系统地概括

土体工程地质特征规律,以便更好地开展土体质量和工程地质问题的评价。

工程地质层组划分一般遵循以下原则:

(1)依据调查精度确定工程地质层组划分方案。雄安新区地质工程地质调查涵盖了1:5万~1:1万的调查精度,比例尺越大,调查精度越高,对同一层组岩性特征的均一性要求越高。

(2)在年代地层、岩相地层划分的基础上划分工程地质层组。地层的岩性、力学性质等宏观变化规律都与第四纪地层成因、年代、沉积环境、古地理、古气候变化等密切相关,不同年代和成因类型的土体,即使部分物理指标相近,工程地质性质也可能相差悬殊。因此,工程地质分层应在第四纪地质研究基础上进行,一般情况下工程地质层组划分不宜跨越第四纪地质分层界线。

(3)工程地质层组划分应满足均一性原则。同一工程地质层应具有相近的工程地质性质,不宜将

工程地质性质差异较大的地层划分在同一个工程地质层或亚层内。

#### 4.2 工程地质层组划分方案

工程地质层组划分是以雄安新区地质调查施工的工程地质钻孔资料为基础,结合最新研究成果,同时考虑岩土工程勘察单位的工程地质层划分习惯,按照详略得当、便于应用的原则进行划分。工程地质层组划分主要考虑:(1)土体沉积年代、(2)土体成因类型和沉积环境、(3)土体物质成分与结构特征、(4)土体物理力学特性。物理力学指标主要包括:粒度、含水量 $w$ 、天然孔隙比 $e_0$ 、液限 $w_l$ 、塑限 $w_p$ 、液性指数 $I_L$ 、塑性指数 $I_p$ 、压缩系数 $a_{v1-2}$ 、压缩模量 $E_{v1-2}$ 、抗剪强度指标( $c$ 、 $\varphi$ )、标贯击数 $N_{60}$ 等。

雄安新区松散土为一套砂性土、黏性土互层堆积,包括新近纪、第四纪沉积,随着埋藏深度的增加,黏性土状态一般呈软塑—可塑—硬塑—坚硬的变化规律,砂性土状态一般呈松散—稍密—中密—密实的变化规律,密实度逐渐增大(表1)。

#### 4.3 划分方法

(1)岩土命名。岩土体命名标准执行《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001,2009版)。

(2)划分范围。①平面范围:本次工作研究范围,即雄安新区行政区范围,包括容城、雄县、安新三县及任丘市的七间房乡、鄭州镇、苟各庄镇和高阳县的龙化乡,总面积约1770 km<sup>2</sup>。②剖面范围:对100 m以浅地下空间土体进行详细分层。

(3)钻孔选择。选择中国地质调查局工程地质调查项目实施的496个工程地质钻孔为标准钻孔,建立雄安新区工程地质标准地层,根据岩土体工程特性划分工程地质层序。

(4)剖面确定。以雄安新区起步区为重点区域,以1/25万地形图作为地形底图,将所有工程地

质钻孔投放到地形底图上,按纵横2个方向确定工程地质剖面线44条,结合剖面线附近代表性钻孔绘制剖面。其中纵剖面12条,横剖面32条,覆盖了整个研究区范围,具体位置如图5所示,典型工程地质剖面如图6所示。

(5)划分方法。首先根据土层的沉积时代,将100 m深度范围内沉积土层划分为全新统(Q<sub>4</sub>)、上更新统(Q<sub>3</sub>)、中更新统(Q<sub>2</sub>)和下更新统(Q<sub>1</sub>)。然后根据沉积环境和沉积顺序确定工程地质主层及编号,划分为①、②、……、⑱共18个主层,其中,①~④层为全新统(Q<sub>4</sub>),⑤~⑪层为上更新统(Q<sub>3</sub>),⑫~⑮层为中更新统(Q<sub>2</sub>),⑯~⑱层为下更新统(Q<sub>1</sub>)。

各成因层、主层应具备自上而下的顺序关系,各主层内的亚层按沉积主次进行分层并编号。

在标准地层划分中,层号格式采用“主层号+岩性层号(亚层号、次亚层)”的形式(即:②<sub>1</sub>代表粉土,②<sub>2</sub>代表粉质黏土,②<sub>3</sub>代表黏土,②<sub>4</sub>代表粉细砂,②<sub>5</sub>代表中砂,②<sub>6</sub>代表粗砂)。

#### 4.4 划分结果

根据前面的划分方法,可将研究区100 m以浅地层划分为18个工程地质层组,88个层序,分别对应于第四纪地层中的各个岩性段,各工程地质层序如表2所示。

各工程地质层组的工程特性与其上覆和下伏层组的工程特性明显不同,土体工程地质层序建立后,有助于查明地下空间工程地质结构的组合关系,准确定位工程地质关键层,为今后工程建设提供基础地质保障,特别是为城市规划和建设项目选址论证提供了科学依据,也利于研究区内工程地质资料的交流和资料的社会化利用,也可以在宏观上指导各类工程的勘察工作。

## 5 三维工程地质结构

以雄安新区工程地质钻孔为基础,利用496个钻孔,绘制了大剖面2条,辅助剖面44条,以工程地质层组为建模单位,完成了研究区100 m深度范围内地层的三维工程地质地质结构模型,覆盖面积1770 km<sup>2</sup>。

### 5.1 工程地质结构空间分布及工程特征

雄安新区100 m以浅各工程地质层以冲积洪积、冲积湖积粉土、粉质黏土、砂土为主,具有一定

表1 松散土工程地质层组状态特征

Table 1 Characteristics of loose soil engineering geological strata

层组代码	冲积洪积工程地质区		冲积湖积工程地质区	
	砂性土	黏性土	砂性土	黏性土
②~④	稍密—中密	可塑	稍密—中密	软塑—可塑
⑤~⑪	中密	可塑	中密	可塑
⑫~⑮	中密	可塑—硬塑	中密	可塑—硬塑
⑯~⑱	密实	硬塑	密实	硬塑

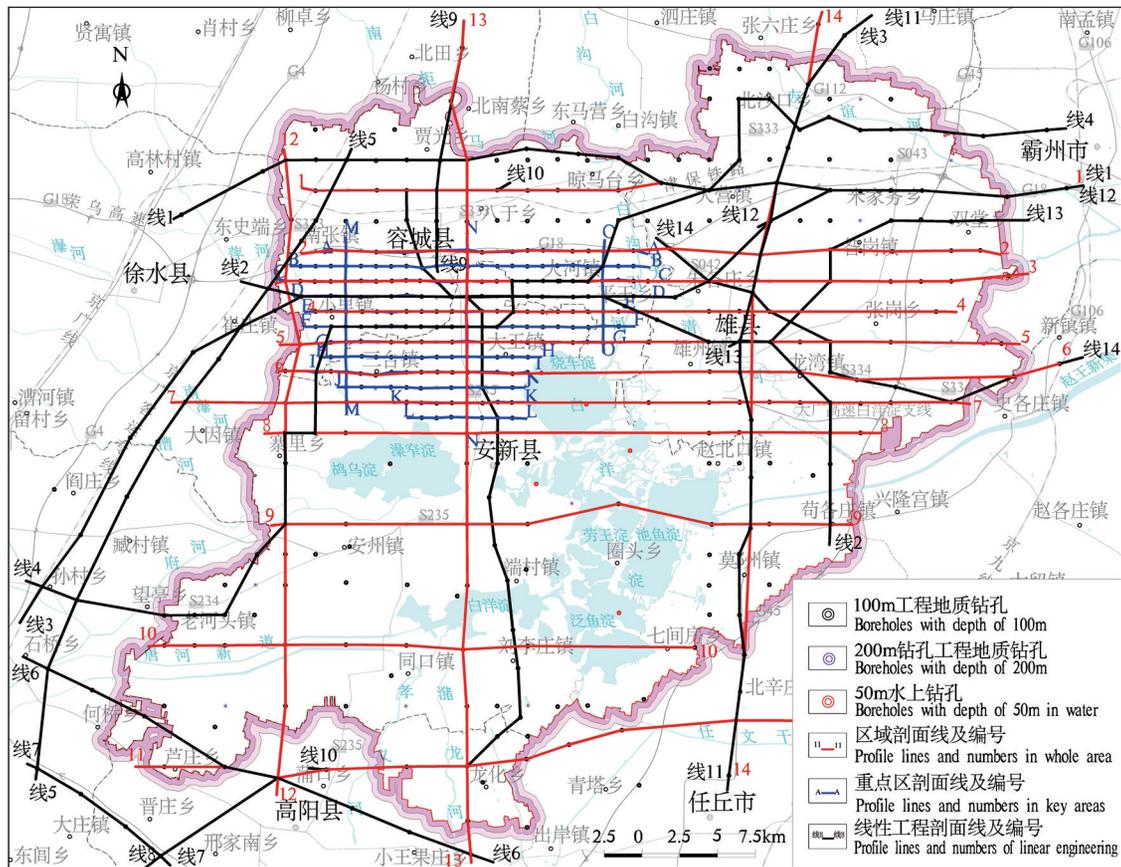


图5 工程地质钻孔及标准剖面位置图

Fig.5 The location map of engineering geology boreholes and standard profilelines

的时空性。从时间上说,下部地层沉积时间越长,其强度越大。但有时也会随着后期沉积环境的演化而有所改变,如③层组土中有淤泥质黏性土,②层组土中则有可塑土。从空间上说,⑥、⑧、⑩、⑬、⑮、⑰为砂土,主要分布在河漫滩、河床及分支河道等地,其余层组则主要分布在冲洪积扇上平地或扇间洼地、冲湖积平地或洼地。第四纪全新世、晚更新世、中更新世以及早更新世各工程地质层组特征可见参考文献(韩博等,2020)。

### 5.2 三维工程地质模型构建

基于CreatorXModeling软件,采用自动建模的方法,利用在新区实施的496个工程地质钻孔,通过数据准备与处理、数据导入、钻孔模型构建、地层模型构建、模型整饰等步骤,最终成功建立了雄安新区以及“一主五辅”重点片区100 m以浅三维工程地质结构模型(图7)。

构建的三维工程地质模型共包括18个地层,与

工程地质标准层一一对应,可清晰显示每个工程地质地层的分布范围、厚度变化,揭示了地层的空间展布规律,反映了工程建设持力层及地下空间开发层在三维空间的相互关系。另外,可对三维模型进行剖切、地下空间开挖等分析处理,从而对城市建设中的隧道开挖、地基开挖等工程建设过程进行三维动态模拟,可为研究区规划建设提供参考。

## 6 在城市规划建设中的应用

### 6.1 服务雄安新区顶层规划设计

根据各工程地质层组的分布状况和工程特性建立的雄安新区三维工程地质结构(图7),地表叠加了遥感影像数据,可清晰展示不同岩土类型在雄安新区地下空间的分布情况,可用于指导雄安城市的顶层规划设计。在本次雄安新区多参数城市地质调查工作中,同样构建了“一主五辅”即起步区、容城组团、雄县组团、安新组团、昝岗组团、寨里组

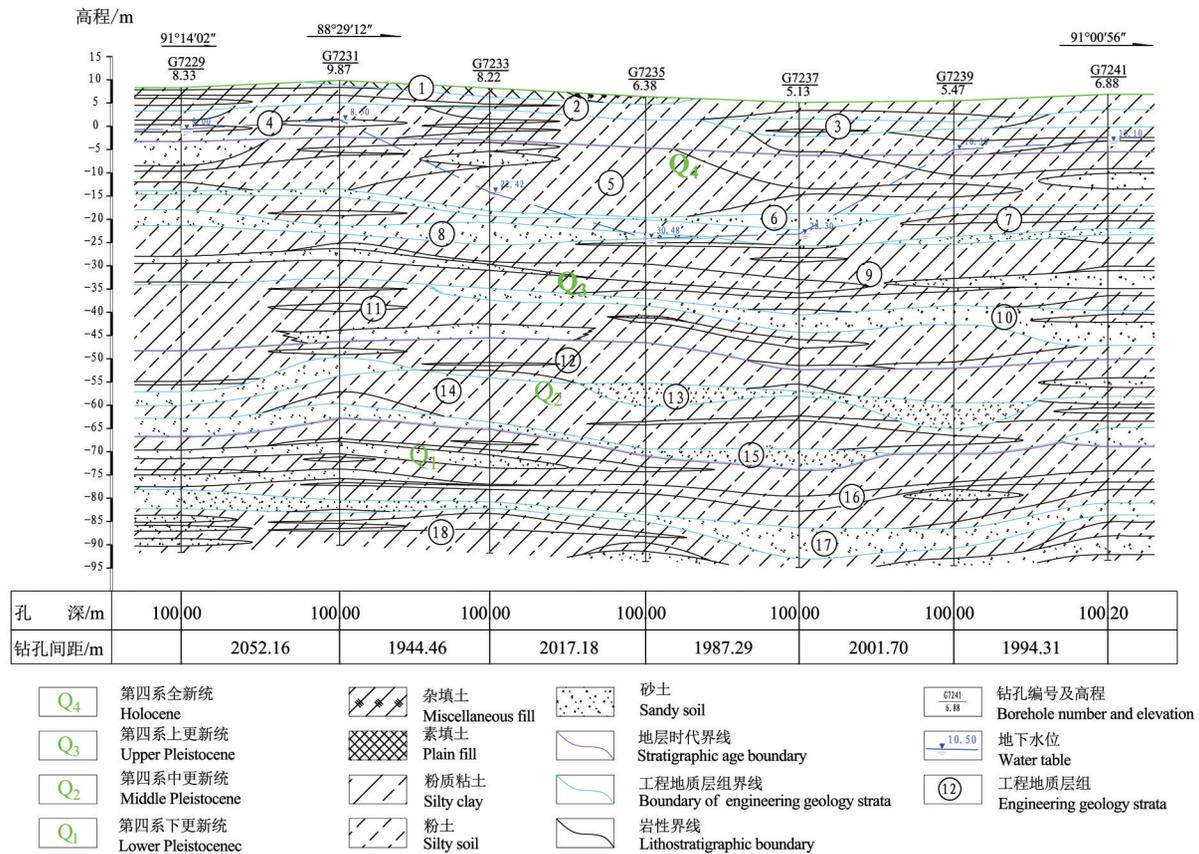


图6 雄安新区标准工程地质剖面图

Fig.6 Standard engineering geological profile of Xiong'an New Area

团三维工程地质结构,能够清晰地反映该地区不同区域、不同深度的岩性变化情况,可以支撑服务重点地区规划建设。

### 6.2 服务场地稳定性和工程建设适宜性评价

本区地貌类型属太行山东麓冲洪积—冲湖积平原区,浅部土层除白洋淀附近的第③工程地质层组淤泥质土层外,主要以粉土为主;场地地势开阔、平坦、稳定,不存在滑波、泥石流等不良地质作用,属地质灾害危险性小的区域,新构造运动不明显,地震活动微弱,无全新活动断裂,区域稳定性较好。

根据工程地质层组划分结果,场地存在淤泥质土和液化土,淤泥质土主要分布于第③工程地质层组,液化土主要分布于第②、④、⑤工程地质层组的砂土、粉土中。根据淤泥质土和液化土的分布状况,可评价雄安新区场地稳定性和工程建设适宜性(杜东等,2019;柳富田等,2019)。

#### 6.2.1 砂土液化对工程建设的影响

雄安新区埋深20 m以浅的粉土、砂土主要分布

在②<sub>3</sub>、②<sub>4</sub>、④<sub>3</sub>、④<sub>4</sub>、⑤<sub>3</sub>、⑤<sub>4</sub>层中,根据现有规范判定,仅在白洋淀周边地下水水位埋深较浅的地区存在液化区,其余地区为不液化区。但当地下水水位埋深上升时,也会产生震动液化问题。因此,在工程建设中,特别是地下水水位上升时,应高度重视震动液化问题。必要时,应采取有效的防治措施。

#### 6.2.2 渗流对工程建设的影响

雄安新区100 m以浅分布着砂土层和粉土层,很有可能产生流砂(渗流液化)、水土突涌等工程问题。100 m以浅范围内可能产生流砂、水土突涌的工程地质层分布于②、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑩、⑪、⑬、⑮、⑰层的砂土、粉土中。其中⑤<sub>4</sub>、⑥<sub>1</sub>层为雄安新区的潜水层,⑧<sub>1</sub>层、⑩<sub>1</sub>、⑪<sub>4</sub>、⑬<sub>1</sub>、⑮<sub>1</sub>、⑰<sub>1</sub>层为承压含水层,水头较高,在基坑开挖或隧道施工时易产生较强的水压,易诱发流砂、水土突涌等灾害。另外,也应重视②层和④层中砂层透镜体的流砂、水土突涌问题。因此,在进行地下空间建设时,应特别关注上述土层。

表 2 雄安新区工程地质标准层序

Table 2 Standard sequence table of engineering geology in Xiong'an New Area

地质年代	层组序号	成因(主层岩性)	层序	岩土名称	一般层底埋深/m		一般层厚/m	
					I	II	I	II
全新世 (Q <sub>h</sub> )	①	人工填土	① <sub>1</sub>	杂填土	/	/	/	/
			① <sub>2</sub>	素填土				
	②	冲积洪积洪泛平原相(粉土+黏性土)	② <sub>1</sub>	粉土				
			② <sub>2</sub>	粉质黏土	4.9~6.5	4.5~7.2	4.4~5.1	3.9~4.7
			② <sub>3</sub>	黏土				
			② <sub>4</sub>	粉细砂				
			② <sub>5</sub>	中砂				
	③ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土						
	③	冲积湖积湖沼相(黏性土+粉土)	③ <sub>2</sub>	淤泥质粉土	/	7.6~8.9	/	2.9~4.0
			③ <sub>3</sub>	粉质黏土				
			③ <sub>4</sub>	粉土				
④ <sub>1</sub>			粉土					
④	冲积洪积河漫滩—贫营养湖(粉土+黏性土)	④ <sub>2</sub>	粉质黏土	9.1~12.9	12.1~13.3	6.2~9.3	3.9~7.1	
		④ <sub>3</sub>	黏土					
		④ <sub>4</sub>	粉细砂					
		④ <sub>5</sub>	中砂					
		⑤ <sub>1</sub>	粉土					
⑤	冲积洪积河漫滩—贫营养湖(粉土+黏性土)	⑤ <sub>2</sub>	粉质黏土	13.7~19.2	14.2~18.7	5.9~8.5	4.7~9.6	
		⑤ <sub>3</sub>	黏土					
		⑤ <sub>4</sub>	粉细砂					
		⑤ <sub>5</sub>	中砂					
		⑥ <sub>1</sub>	粉细砂					
⑥	冲积洪积河床—分支河道(砂土)	⑥ <sub>2</sub>	中砂	18.4~23.4	20.3~24.5	2.4~8.6	2.8~6.8	
		⑥ <sub>3</sub>	粗砂					
		⑥ <sub>4</sub>	粉质黏土					
		⑥ <sub>5</sub>	粉土					
		⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土					
⑦	冲积洪积河漫滩—贫营养湖(黏性土)	⑦ <sub>2</sub>	粉土	26.6~29.5	28.1~32.0	5.0~9.3	6.2~7.9	
		⑦ <sub>3</sub>	黏土					
		⑦ <sub>4</sub>	粉细砂					
		⑦ <sub>5</sub>	中砂					
		⑧ <sub>1</sub>	粉细砂					
⑧	冲积洪积河床—分支河道(砂土)	⑧ <sub>2</sub>	中砂	32.8~35.6	32.2~37.8	3.1~7.8	2.8~8.7	
		⑧ <sub>3</sub>	粗砂					
		⑧ <sub>4</sub>	粉质黏土					
		⑧ <sub>5</sub>	粉土					
		⑨ <sub>1</sub>	粉质黏土					
⑨	冲积洪积河漫滩—贫营养湖(黏性土)	⑨ <sub>2</sub>	粉土	38.5~46.9	36.4~47.4	6.4~11.6	6.8~11.3	
		⑨ <sub>3</sub>	黏土					
		⑨ <sub>4</sub>	粉细砂					
		⑨ <sub>5</sub>	中砂					
		⑩ <sub>1</sub>	粉细砂					
⑩	冲积洪积河床—分支河道(砂土)	⑩ <sub>2</sub>	中砂	47.1~51.4	47.6~49.0	3.8~7.9	3.2~8.7	
		⑩ <sub>3</sub>	粗砂					
		⑩ <sub>4</sub>	粉质黏土					
		⑩ <sub>5</sub>	粉土					
		⑪ <sub>1</sub>	粉质黏土					
⑪	冲积洪积河漫滩—贫营养湖(黏性土)	⑪ <sub>2</sub>	粉土	51.9~56.5	53.2~55.0	4.5~9.2	5.0~7.1	
		⑪ <sub>3</sub>	黏土					
		⑪ <sub>4</sub>	粉细砂					
		⑪ <sub>5</sub>	中砂					
		⑪ <sub>6</sub>	粗砂					

续表2

地质年代	层组序号	成因(主层岩性)	层序	岩土名称	一般层底埋深/m		一般层厚/m	
					I	II	I	II
工程地质分区								
中更新世 (Q <sub>p</sub> <sup>2</sup> )	⑫	冲积洪积河漫滩— 贫营养湖(黏性土)	⑫ <sub>1</sub>	粉质黏土	63.8~65.5	64.5~66.1	7.7~9.4	8.3~10.1
			⑫ <sub>2</sub>	粉土				
			⑫ <sub>3</sub>	黏土				
			⑫ <sub>4</sub>	粉细砂				
			⑫ <sub>5</sub>	中砂				
	⑬	冲积洪积河床一分 支河道(砂土)	⑬ <sub>1</sub>	粉细砂	67.1~68.9	67.4~69.2	3.2~4.6	2.8~4.0
			⑬ <sub>2</sub>	中砂				
			⑬ <sub>3</sub>	粗砂				
			⑬ <sub>4</sub>	粉质黏土				
			⑬ <sub>5</sub>	粉土				
	⑭	冲积洪积河漫滩— 贫营养湖(黏性土)	⑭ <sub>1</sub>	粉质黏土	74.3~76.1	74.4~76.1	7.1~8.9	6.7~8.6
			⑭ <sub>2</sub>	粉土				
			⑭ <sub>3</sub>	黏土				
			⑭ <sub>4</sub>	粉细砂				
			⑭ <sub>5</sub>	中砂				
	⑮	冲积洪积河床一分 支河道(砂土)	⑮ <sub>1</sub>	粉细砂	76.9~78.8	77.0~78.7	2.6~3.8	2.7~4.0
			⑮ <sub>2</sub>	中砂				
			⑮ <sub>3</sub>	粗砂				
⑮ <sub>4</sub>			粉质黏土					
⑮ <sub>5</sub>			粉土					
⑯	冲积洪积河漫滩— 贫营养湖(黏性土)	⑯ <sub>1</sub>	粉质黏土	86.4~88.2	87.5~88.9	8.8~11.0	9.8~11.7	
		⑯ <sub>2</sub>	粉土					
		⑯ <sub>3</sub>	粉细砂					
		⑯ <sub>4</sub>	中砂					
		⑯ <sub>5</sub>	粗砂					
早更新世 (Q <sub>p</sub> <sup>1</sup> )	⑰	冲积洪积河床一分 支河道(砂土)	⑰ <sub>1</sub>	粉细砂	90.4~92.1	90.5~92.1	3.5~5.2	3.1~4.4
			⑰ <sub>2</sub>	中砂				
			⑰ <sub>3</sub>	粗砂				
			⑰ <sub>4</sub>	粉质黏土				
			⑰ <sub>5</sub>	粉土				
⑱	冲积洪积河漫滩— 贫营养湖(黏性土)	⑱ <sub>1</sub>	粉质黏土	/	/	8.8~10.7	9.2~10.8	
		⑱ <sub>2</sub>	粉土					
		⑱ <sub>3</sub>	粉细砂					
		⑱ <sub>4</sub>	中砂					
		⑱ <sub>5</sub>	粗砂					

注:100 m深度范围内未揭穿第四纪地层。

### 6.2.3 淤泥质土对工程建设的影响

在雄安新区咎岗—雄县—寨里一线以南发育一层软弱层(第③工程地质层淤泥质土),层顶标高一般在-8.6~7.9 m,该层土体具有不良的工程地质特性,如含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高、渗透性低等,在该层土体中施工时,将会对地面建

(构)筑物、地下空间开发等工程活动产生不同程度的影响。具体表现在:(1)对地面建(构)筑物的影响。作用在该土层上的天然地基建(构)筑物,在外荷载作用下,该土层压缩变形量增大,易产生地基沉降和不均匀沉降。(2)对基坑开挖的影响。由于该层土体抗剪强度低、流变性明显,在基坑开

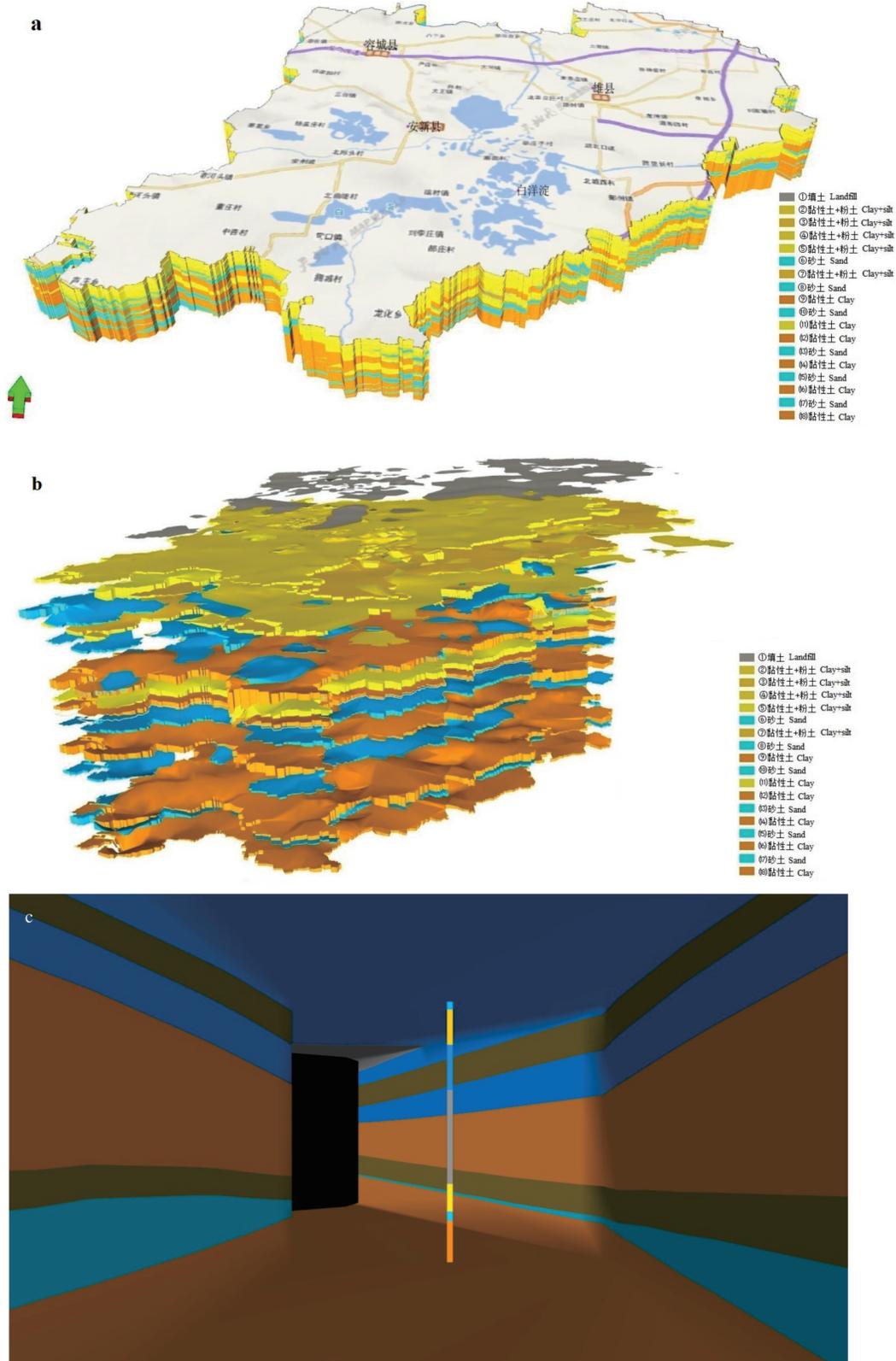


图7 雄安新区三维工程地质结构模型  
a—地质体;b—地层爆炸;c—隧道漫游

Fig.7 3D engineering geological structure model of Xiong'an New Area  
a—Geologic body; b—Stratigraphic explosion; c—Tunnel roaming

挖时易产生侧向变形和剪切破坏,引起支护结构变形或边坡失稳问题。因此,对发育有软弱层的区域,在进行规划建设时,应重视该层土的大变形、低强度特性以及与地下水的作用和影响问题;在进行工程建设时,应采取有效措施,防止产生工程失稳问题。

### 6.3 服务天然地基和桩基持力层选择

研究区昝岗—雄县—寨里一线以北为冲洪积工程地质亚层,10 m以浅主要为第①、②、④工程地质层组的人工填土、粉土。填土工程性质较差,在选择浅基础施工时,需进行地基处理;粉土层工程性质较好,一般仅满足轻型建筑物(低层建筑物、厂房等)的承载力要求,不宜作为荷载较大的建筑物或对变形要求较高的建筑物的天然地基持力层。昝岗—雄县—寨里一线以南为冲积—湖积工程地质亚层,10 m以浅存在第③工程地质层组,以淤泥质土为主,进行浅基础选择时,一定要避开第③工程地质层组的淤泥质土,必要时进行换填处理。

根据各工程地质层组的分布规律以及工程性质分析,50 m以浅砂性土分布在第⑤、⑥、⑧、⑩工程地质层组中,第⑤、⑥工程地质层组中的砂层可作为多层或小高层建筑物的短桩持力层,但不能满足超高层建筑物的承载力和变形要求;第⑧、⑩工程地质层组的砂层承载力较高,为高层建筑物较理想的桩端持力层。因此,可根据工程地质层组的分布情况和工程特性,选择天然地基和桩基持力层。

### 6.4 服务城市地铁隧道选线施工

通过划分工程地质层组,建立研究区三维工程地质结构模型,可任意切割并生成地铁隧道沿线的地质剖面,开挖地铁线路经过的地质体,动态模拟地铁施工的三维可视化过程,可用于指导地铁隧道的选线与施工,并对地铁隧道工程施工成本以及地铁安全运营产生非常重要的影响。

## 7 结 论

(1)雄安新区工程地质层组岩性主要为粉质黏土、粉土、砂土、黏土及淤泥质土,按沉积时代由老到新划分为早更新世( $Q_p^1$ )、中更新世( $Q_p^2$ )、晚更新世( $Q_p^3$ )和全新世( $Q_h$ )。全新世地层底板埋深一般7~16 m,晚更新世地层底板埋深一般50~60 m,中更新世地层底板埋深一般70~80 m,早更新世地层底

板埋深约140~200 m。

(2)雄安新区按一级地貌单元及地层结构特征可划分为冲洪积平原工程地质亚区(I)、冲湖积平原工程地质亚区(II)、冲积平原工程地质亚区(III)3类工程地质分区,雄安新区第四纪地层主要分布在I区及II区。根据第四纪土体特征将研究区标准地层划分为18个工程地质层组、71个层序,并明确了各工程地质层组及其层序的沉积环境及鉴别特征。其中:第①—④工程地质层组为全新统,第⑤—⑩工程地质层组为上更新统,第⑪—⑮工程地质层组为中更新统,第⑯—⑳工程地质层组为下更新统,100 m以浅地层未揭穿第四系。

(3)构建了研究区三维工程地质结构模型,能够直观地展示雄安新区地下100 m深度范围内的地层分布特征与结构特征。服务于雄安新区顶层规划设计、场地稳定性和工程建设适宜性评价、天然地基和桩基持力层选择、城市地铁隧道选线施工等,为其提供了重要的地质依据。

## References

- Chen Zhongda, Hu Genxing, Mao Hanchuan, Peng Zhenyu. 2009. Characteristics and analyses of three-dimensional geologic framework in Xianghu region of Hangzhou city, eastern China[J]. *Shanghai Geology*, (1): 16–21(in Chinese with English abstract).
- Du Dong, Liu Futian, Liu Hongwei. 2019. Evaluation research of engineering geological environment stability in Caofeidian island area of Hebei province[J]. *Geological Survey and Research*, 42(4): 299–304(in Chinese with English abstract).
- Fang Wanling, Li Xueyun, Tian Depei, Wang Linhai. 2016. Comprehensive evaluation and analysis on the engineering geological stability of Tianjin urban construction[J]. *Geological Survey and Research*, 39(1): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- Feng Wei, Qi Xiaofan, Li Haitao, Li Wenpeng, Yin Xiulan. 2017. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 44(6): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Gou Fugang, Gong Xulong, Mei Qinqin. 2018. The division and application of engineering geological strata groups of soil mass in north shore of the Yangtze Delta[J]. *Geological Review*, 64(1): 237–245(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhijuan, Zhou Yalong, Yang Zheng, Zhao Chuandong, Cheng Hangxin, Kong Mu, Peng Min. 2020. Discussion on key issues of

- geochemical monitoring of soil heavy metal in Xiong'an New Distract [J]. *Environmental Science*, 41(9): 4169–4179(in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Wu Aimin, Ma Zhen, Liu Futian, Xia Yubo, Xie Hailan, Lin Liangjun, Wang Tao, Bai Yaonan, Zhang Jing, Meng Qinghua. 2018. A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface–underground space in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 513–522 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 48(3): 1–8(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renhuai, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3– D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 1207–1222(in Chinese).
- He H H, He J, Xiao J Z, Zhou Y X, Liu Y, Li C. 2020. 3D geological modeling and engineering properties of shallow superficial deposits: A case study in Beijing, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 100(6): 1–17.
- He Jing, He Hanhan, Zheng Guisen, Liu Yu, Zhou Yuanxin, Xiao Jingze, Wang Chunjun. 2019. 3D geological modelling of superficial deposits in Beijing City[J]. *Geology in China*, 46(2): 244–254(in Chinese with English abstract).
- Kaufmann O, Martin T. 2008. 3D Geological modeling from boreholes, cross– sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. *Computers and Geosciences*, 34(3): 278–290.
- Lemon A M, Jones N L. 2003. Building solid models from boreholes and user– defined cross– sections[J]. *Computers and Geosciences*, 29(5): 547–555.
- Li Feng, Xu Kun, Ding Yuntao, Sun Huadong, Li Zhongyun. 2019. Study on division of Quaternary standard strata in Xuzhou City[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 41(12): 75–83, 87(in Chinese with English abstract).
- Li Haitao, Feng Wei, Wang Kailin, Zhao Kai, Li Gang, Zhang Yuan, Li Muzi, Sun Lu, Chen Yichao, You Bing. 2021. Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1112–1126(in Chinese with English abstract).
- Li Min, Liu Zhao, Han Zheng, Zhang Hailong, Zhang Xue. 2018. Construction and integration method of 3D geological structure model in urban area[J]. *Urban Geology*, 13(2): 93–97 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaozhao, Luo Guoyu, Gong Hongxiang, Yan Sanbao, Zhang Di. 2004. The division of engineering geological strata groups of soilmass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 25(5): 759–763(in Chinese with English abstract).
- Li Yanyan, Zhang Baojian, Xing Yifei, Wang Guiling. 2023. Fragmentation law of carbonate rocks under different confining pressure in Gaoyuzhuang Formation, Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 50(4): 1138–1148(in Chinese with English abstract).
- Liu Futian, Fang Cheng, Du Dong, Qin Yafei, Meng Lishan. 2019. Study on distribution characteristics of sand liquefaction in the Caofeidian coastal zone[J]. *Geological Survey and Research*, 42 (1): 45–48(in Chinese with English abstract).
- Liu Kaiming, Xu Qinmian, Duan Lianfeng, Niu Wenchao, Teng Fei, Wang Xiaodan, Zhang Wei, Dong Jie. 2020. Quaternary stratigraphic architecture and sedimentary evolution from borehole GB014 in the western Xiong'an New Area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65: 2145–2160 (in Chinese with English abstract).
- Liu Sen, Dong Zhiliang. 2019. Suitability evaluation of urban underground space resources development in Xiong'an New Area[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 42(6): 57–62(in Chinese with English abstract).
- Liu Shunchang, Xu Dexin, Zhang Chunmei. 2016. Build and application of the 3D geological model in Wuhan urban development zone[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 4: 160–163 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Wang Xiaodan, Han Bo, Gao Yihang. 2019. Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 46(S2): 169–177 (in Chinese and in English).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco– geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696(in Chinese with English abstract).
- Ming Jing, Pan Mao, Qu Honggang, Liu Xueqing, Guo Gaoxuan, Wu Zixing. 2009. Constructing three– dimensional geological structure model of Cenozoic Erathem in Beijing[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(1): 111–119(in Chinese with English abstract).
- Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Pang Jumei, Hu shengbiao, Wang Jiyang. 2017. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area [J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 32 (11): 1224 – 1230(in Chinese with English abstract).
- Pei Yandong, Wang Guoming. 2016. Engineering geological characteristics of Late Quaternary sediments in the southern coastal

- area of Tianjin Binhai New Area[J]. Geological Survey and Research, 39(3): 215–220 (in Chinese with English abstract).
- Qu Honggang, Pan Mao, Liu Xueqing, Yu Chunlin. 2015. Urban 3-D geological modeling and its application to urbanization[J]. Geological Bulletin of China, 34(7): 1350–1358 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Li Jun, Wu Aimin, Zhang Wei, Hu Qiuyun. 2018. A study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang Formation, a new layer system of thermal reservoir in Rongcheng uplift area, Hebei Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 39(5): 533–541 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kailin, Li Haitao, Wu Aimin, Li Muzi, Zhou Yi, Li Wenpeng. 2018. An analysis of the evolution of Baiyangdian wetlands in Hebei Province with artificial recharge[J]. Acta Geoscientia Sinica, 39(5): 549–558(in Chinese with English abstract).
- Xi Yu, Li Tonglu, Jiang Ruijun, Lin Xiaoyan. 2018. Engineering geological stratigraphy and physical properties of the loess in eastern Gansu[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 45(4): 60–67(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianmei, Luo Yida, Gu Mingguang, Qin Zhaosong. 2006. Analysis of the correlation method of inter-borehole strata for the construction of a Quaternary 3D geological configuration model of Hangzhou City[J]. Geology in China, 33(1): 104–108(in Chinese with English abstract).
- Yin Dechao, Qi Xiaofan, Wang Yushan, Xu Rongzhen, An Yonghui, Wang Xuqing, Geng Hongjie. 2022. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 49(3): 979–992(in Chinese with English abstract).
- Yu Changchun, QiaoRixin, Zhang Dishuo. 2017. The basement tectonic characteristics from interpretation of aeromagnetic data in Xiong'an region[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 41(3): 385–391(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangyuan, Wang Xinchun, Meng Lishan. 2013. The establishment of a 3D engineering geological model for central Tianjin city based on the DSI algorithm and multi-source data coupling[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 5: 6–80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yonghong, Liu Bing, Wu Hongan, Cheng Xia, Kang Yonghui. 2018. Ground subsidence in Xiong'an New Area from 2012 to 2016 monitored by InSAR technique[J]. Journal of Earth Science and Environment, 40(5): 652–662(in Chinese with English abstract).
- Zhao Benlong, Ma Zhanhui, Zhao Jianyong. 2018. Analysis of the characteristics of hydrological factors in Xiong'an New Area[J]. Water Science and Engineering Technology, (3): 47–49(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈忠大, 胡根兴, 毛汉川, 彭振宇. 2009. 杭州湘湖地区三维工程地质结构特征与分析[J]. 上海地质, (1): 16–21.
- 杜东, 柳富田, 刘宏伟. 2019. 河北曹妃甸岛区工程地质环境稳定性评价研究[J]. 地质调查与研究, 42(4): 299–304.
- 房万领, 李学云, 田德培, 王林海. 2016. 天津城市建设工程地质稳定性综合分析[J]. 地质调查与研究, 39(1): 64–70.
- 凤蔚, 祁晓凡, 李海涛, 李文鹏, 殷秀兰. 2017. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. 水文地质工程地质, 44(6): 1–8.
- 苟富刚, 龚绪龙, 梅芹芹. 2018. 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, 64(1): 237–245.
- 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 赵传冬, 成杭新, 孔牧, 彭敏. 2020. 雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨[J]. 环境科学, 41(9): 4169–4179.
- 韩博, 夏雨波, 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[J]. 工程勘察, 48(3): 1–8.
- 郝爱兵, 吴爱民, 马震, 柳富田, 夏雨波, 谢海澜, 林良俊, 王涛, 白耀楠, 张竞, 孟庆华. 2018. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 39(5): 513–522.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 48: 1207–1222.
- 何静, 何晗晗, 郑桂森, 刘予, 周圆心, 肖景泽, 王纯君. 2019. 北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建模[J]. 中国地质, 46(2): 244–254.
- 李锋, 徐坤, 丁运涛, 孙华东, 李忠运. 2019. 徐州市第四纪标准地层划分研究[J]. 能源与环保, 41(12): 75–83, 87.
- 李海涛, 凤蔚, 王凯霖, 赵凯, 李刚, 张源, 李木子, 孙璐, 陈一超, 尤冰. 2021. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1112–1126.
- 李敏, 刘钊, 韩征, 张海龙, 张雪. 2018. 城市区域三维地质结构模型建设与集成方法[J]. 城市地质, 13(2): 93–97.
- 李晓昭, 罗国煜, 龚洪祥, 严三保, 张迪. 2004. 土体工程地质层组的划分[J]. 岩土力学, 25(5): 759–763.
- 李燕燕, 张保建, 邢一飞, 王贵玲. 2023. 雄安新区高阳地热田热储高于庄组碳酸盐岩不同围压下破碎规律研究[J]. 中国地质, 50(4): 1138–1148.
- 柳富田, 方成, 杜东, 秦雅飞, 孟利山. 2019. 曹妃甸滨岸带砂土液化分布特征研究[J]. 地质调查与研究, 42(1): 45–48.
- 刘开明, 胥勤勉, 段连峰, 牛文超, 滕飞, 王小丹, 张伟, 董杰. 2020. 雄安新区西部GB014孔第四纪地层结构与演化过程[J]. 科学通报, 65: 2145–2160.
- 刘森, 董志良. 2019. 雄安新区城市地下空间资源开发适宜性评

- 价[J].河北地质大学学报, 42(6): 57-62.
- 刘顺昌, 徐德馨, 张春梅. 2016. 武汉都市发展区工程地质三维模型建设及应用[J]. 城市勘测, (4): 160-163.
- 马震, 夏雨波, 王小丹, 韩博, 高伊航. 2019. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建[J]. 中国地质, 46(S2): 123-129.
- 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.
- 明镜, 潘懋, 屈红刚, 刘学清, 郭高轩, 吴自兴. 2009. 北京市新生界三维地质结构模型构建[J]. 北京大学学报(自然科学版), 45(1): 111-119.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 胡圣标, 汪集暘. 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 32(11): 1224-1230.
- 裴艳东, 王国明. 2016. 天津滨海新区南部海岸带晚第四纪沉积物工程地质特性研究[J]. 地质调查与研究, 39(3): 215-220.
- 屈红刚, 潘懋, 刘学清, 于春林. 2015. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用[J]. 地质通报, 34(7): 1350-1358.
- 王贵玲, 李郡, 吴爱民, 张薇, 胡秋韵. 2018. 河北容城凸起区热储层新层系—高于庄组热储特征研究[J]. 地球学报, 39(5): 533-541.
- 王凯霖, 李海涛, 吴爱民, 李木子, 周艺, 李文鹏. 2018. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J]. 地球学报, 39(5): 549-558.
- 习羽, 李同录, 江睿君, 蔺晓燕. 2018. 陇东黄土工程地质分层及其物理特性[J]. 水文地质工程地质, 45(4): 60-67.
- 杨建梅, 罗以达, 顾明光, 覃兆松. 2006. 杭州城市第四系三维地质结构模型建立中的孔间地层对比方法分析[J]. 中国地质, 33(1): 104-108.
- 尹德超, 祁晓凡, 王雨山, 徐蓉桢, 安永会, 王旭清, 耿红杰. 2022. 雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评估[J]. 中国地质, 49(3): 979-992.
- 于长春, 乔日新, 张迪硕. 2017. 雄安新区航磁推断的三维基底构造特征[J]. 物探与化探, 41(3): 385-391.
- 张像源, 王新春, 孟利山. 2013. 基于DSI算法和多源数据耦合的天津市中心城区工程地质三维模型的建立[J]. 工程勘察, (5): 76-80.
- 张永红, 刘冰, 吴宏安, 程霞, 康永辉. 2018. 雄安新区2012~2016年地面沉降InSAR监测[J]. 地球科学与环境学报, 40(5): 652-662.
- 赵本龙, 马占辉, 赵建永. 2018. 雄安新区水文要素特性分析[J]. 水科学与工程技术, (3): 47-49.