

doi: 10.12029/gc20190203

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.
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).

北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建模

何静¹, 何晗晗¹, 郑桂森², 刘予¹, 周圆心¹, 肖景泽¹, 王纯君¹

(1. 北京市地质调查研究院, 北京 100195; 2. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195)

摘要:随着城市地下空间的开发利用,对三维地质结构的掌握成为科学合理开发利用地下空间的基本前提,三维地质模型的创建也得以迅速发展。三维地质结构模型可以直观展示地层空间分布形态,为地下空间资源的科学规划提供基础数据。本次工作首次完成了北京五环城区(750 km²)的三维地质结构模型创建。建模工作基于研究区广泛分布的数千工程钻孔,通过筛选、标准化钻孔数据,绘制相应标准化地层剖面(107条),创建了钻孔模型,以及北京五环城区地下 50 m 以浅三维地质结构模型,并完成精度验证。本次建模过程整理了大量工程钻孔数据,综合考虑了冲洪积扇发育区地层互层、相交、尖灭、透镜体等复杂的地质现象,具有代表性,可为类似地质建模工作提供借鉴。此外,北京城区三维地质结构模型直观展示了研究区浅部的地层分布与地层结构,为后续三维属性模型的创建提供了实体框架,亦为区内地下空间资源地质评价提供了数据支撑。

关键词:三维地质建模;松散沉积层;工程钻孔;交叉剖面;透镜体

中图分类号:P642.5 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)02-0244-11

3D geological modelling of superficial deposits in Beijing City

HE Jing¹, HE Hanhan¹, ZHENG Guisen², LIU Yu¹, ZHOU YuanXin¹,
XIAO JingZe¹, WANG Chunjun¹

(1. Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China; 2. Beijing Geological Prospecting and Developing Bureau, Beijing 100195, China)

Abstract: The three-dimensional (3D) geological structure model has been the basic preconditions for the analysis of urban underground space, because it can directly display the spatial distribution and geological properties of superficial deposits and provide basic data for the scientific planning of the underground space resources. In this paper, the authors constructed for the very first time a 3D geological structure model (up to the depth of 50m from the surface) in Beijing City, based on almost a thousand boreholes, investigation reports, as well as 107 intersecting cross-sections arranged over Beijing City within the 5th Ring Road. The authors investigated the 3D modeling procedures in the study area, where an extremely complicated sedimentary environment is developed with various geological phenomena including intersecting stratigraphic interfaces, missing strata as well as discontinuous layers. The resulting 3D model could provide a basic framework and data support for further geological evaluation of underground space resources.

收稿日期:2018-11-15; 改回日期:2019-02-26

基金项目:北京市地质矿产勘查开发局“北京市地下空间资源调查评价及关键技术研究”项目(PXM2017_158203_000006)资助。

作者简介:何静,女,1981生,硕士,高级工程师,主要从事城市地质及地下空间研究工作;E-mail:48406199@qq.com。

通讯作者:郑桂森,男,1959生,教授级高级工程师,长期从事城市地质研究;E-mail:zhenggs@bjdkj.gov.cn。

Key words: 3D geological modelling; superficial deposits; boreholes; cross-sections; lens

About the first author: HE Jing, female, born in 1981, senior engineer, majors in geological engineering, engages in research on urban geology and underground space; E-mail: 48406199@qq.com.

About the corresponding author: ZHENG Guisen, male, born in 1959, senior engineer, engages in the study of urban geology; E-mail: zhenggs@bjdkj.gov.cn.

Fund support: Supported by Investigation and Evaluation of Urban Underground Space in Beijing City (750km²) and Related Key Technologies Project from Beijing Geology Prospecting and Developing Bureau (No. PXM2017_158203_000006).

1 引言

大多数城市工程建设都位于沉积物覆盖地区,沉积物与城市建设密切相关,是城市建设尤其是地下空间资源的直接载体。为实现城市的科学合理规划以及可持续发展,有必要研究城市地下沉积层的地质特征,对于特定区域,查明一定深度内的地质结构特征是解决地质问题的有效途径。三维地质建模为实现这一研究目标提供了可行的技术支撑。

三维地质建模概念由 Housling (1993)提出,是地质理论与计算机三维可视化技术的有机融合。在三维环境下,通过计算机技术将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来,用于地质研究,并对其进行地质解释和分析。近十几年来,三维地质建模技术日趋成熟,前人也开展了针对城市地质研究的浅部松散层三维地质模型创建,取得了众多有意义的成果(Akpokodje, 1987; Dassargues et al.,1991;Tonini et al.,2008; Katherine et al., 2010; Zhu et al.,2012)。相关三维建模软件,国外代表性的商业软件包括 Pardigm Skua /GoCAD、Surpac、ArcGIS、Petrel等(李青元等,2016);国内平台有3DMine、QuantyMine、GeoView、MapGIS、Creatar以及MinExplore等(朱良峰等,2004;潘懋等,2007;陈国旭等,2010;孙莉等,2011;明镜等,2015;余璨等,2016)。

通过建立三维地质模型,可以将地层的分布、空间形态、岩性、厚度以及各地层的物理力学参数性质整合于一体,以三维形式予以储存或展现。这种直观展示的地下三维地质结构,对于分析地质环境、合理利用地下空间资源以及保障地下空间地质安全具有重要意义。

本文依托“北京地下空间资源调查评价及关键

技术”项目,首次建立了北京城区浅部三维地质结构模型,为地下空间资源评价提供了基础数据。

2 地质背景

北京平原区位于华北大平原的西北缘,西、北及东北面三面环山。大体由上下两层岩石组成,上层为第四纪松散沉积物,下层是基岩(图1)。上层的第四纪松散沉积物,在山麓地带分布有残积、坡积、洪积物,平原区主要以洪积、冲积物为主伴有零星分布的湖沼堆积物和风积物。平原区冲洪积扇主要由砂砾石、砂、黏土、黏土性构成,其分布总体来说垂向上交互出现,横向变化较大。以永定河冲积扇为例,总体结构从扇顶石景山一直到扇缘通州,粒度由砂砾石逐渐变为黏土或黏性土,其厚度从几十米增加至几百米。扇中多条河流互相交叠,到了扇缘地带河流的坡度降低,散流和漫流严重,许多地区形成牛轭湖,构成湖相堆积。研究区五环城区位于北京平原区冲洪积扇的上、中部位置,地下50 m以浅地层以松散沉积物为主,局部地区基岩埋深约地下30 m(鲍亦冈等,2001;北京市地质矿产勘查开发局和北京市地质调查研究院,2008;蔡向民等,2010,2016;张磊等,2016;马震等,2017;熊盛青等,2018)。

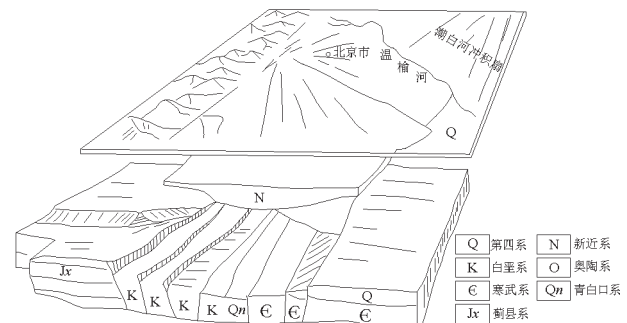


图1 北京基岩构造地质略图

Fig.1 Distribution of bedrock in Beijing plain area

3 研究方法

3.1 三维地质建模方法

三维地质建模方法主要有3种:基于钻孔数据的建模方法、基于剖面数据的建模方法、基于多源数据交互建模方法(张洋洋等,2013)。各建模方法需要的地质数据和侧重的地质特点不尽相同。

(1) 钻孔建模方法

在众多的三维地质建模技术中,较为广泛利用的仍然是基于钻孔的建模技术,这是由于钻孔数据简单,直观,准确,各类地层数据、属性数据等各种重要信息数据可以很容易地从规范的钻孔数据库中获得(贺怀建等,2002;Turner et al., 2006)。在利用钻孔建模技术方面,可用不同方法进行空间插值方法表达较为复杂的地层结构(Wellmann et al., 2010)。

(2) 剖面建模方法

基于剖面数据的建模方法,利用地质勘探资料,根据地质人员的认识划分大量的二维地质剖面,在此基础上进而表达三维地质模型(明镜等,2008)。一般剖面数据有两种,一种是平面剖面数据,要求相邻剖面之间展示的地质信息具有较高相似性,如果相差较大,则需要人机交互来指定地层界线划分;另一种是交叉剖面,该方法可以处理较为复杂的地层情况,但是需要保障交叉剖面交叉钻孔的岩性分层以及高程位置完全一致。

(3) 多源交互建模方法

多源交互复杂地质体建模方法,基于地质、物探、化探、遥感、钻探等多源数据的三维地质建模(Wu et al.,2005;Kaufmann et al., 2008; 李晓军等,2014)所构建的模型准确性高,能够更真实地反映地质体的三维空间特征,但是数据之间的融合难度大。

3.2 本次建模方法

研究区位于北京冲洪积扇平原,地层垂向和纵向分布复杂多变,自西向东地层岩性变化较大,同时受古河道变动影响,沉积相变情况极其复杂,地层缺失或相交而形成的尖灭、透镜体等现象十分普遍。复杂的地层结构需选择适宜的建模方法,以便高效准确建立三维结构模型。

前述3种方法,如仅依靠钻孔构建三维地层模型,普遍发育地层的尖灭与透镜体,可能会导致与

实际地层的不吻合;仅靠剖面法也并不现实,因为北京城区地层相变复杂,交叉剖面和平行剖面的对比复杂,工作量巨大;另外未涉及各类数据融合,加之区内不涉及大量褶皱和基岩断层,并未选择多源交互建模。

本次建模采用适合研究区的传统型“钻孔+交叉剖面”法。即在综合考虑研究区地质条件基础上,对广泛分布的各类钻孔资料进行精度与可靠性分析,原则性地筛选适宜钻孔,利用钻孔数据,制定地层剖面线,引入交叉剖面,结合地质认识圈定地层尖灭与透镜体,绘制标准化地层剖面,理清地层在垂向与纵向的不同分布特征。依托北京超维创想公司的Creatar3.0软件平台,依次实现钻孔解译、地层解译、透镜体创建、精度验证以及三维结构模型的搭建。

4 建模步骤

建模步骤包括钻孔数据的收集整理、钻孔筛选、钻孔标准化、交叉剖面线制定、标准地层剖面编制、数据电子化、钻孔解译、地层解译、透镜体及地层尖灭等地质现象的调整。详细过程参见图2。

4.1 收集资料

准备各类地质资料,包括满足建模精度需求的钻孔数据、地质图、地形地貌图、古河道分布图等。大量的钻孔资料是建模的重要依据,本次工作充分收集了北京城区五环内各类钻孔,包含工程勘察资料、地质灾害报告以及其他基础地质资料能获取的钻孔信息。从众多资料中筛选1000个钻孔,这些钻孔基本分布均匀,钻孔深度集中在地下30~50 m,能够满足建模需求。

4.2 标准化岩性命名

原始地质数据的准确性和全面性直接决定了模型的精确度和实用性,因此原始地质数据的分析工作至关重要。钻孔资料作为本次研究的基础数据,需要对其数据(基本信息、分层信息、物理力学参数等)做出详细归并、整理。

统一岩性命名。由于钻孔来源各异,地层岩性命名未得到统一,因此首先需要实现地层命名的统一性与标准化。参考蔡向民等(2009)提出的北京山前平原第四系沉积物分类命名标准,结合五环城区地质认识,将收集钻孔的地层数据划分为6大类:人

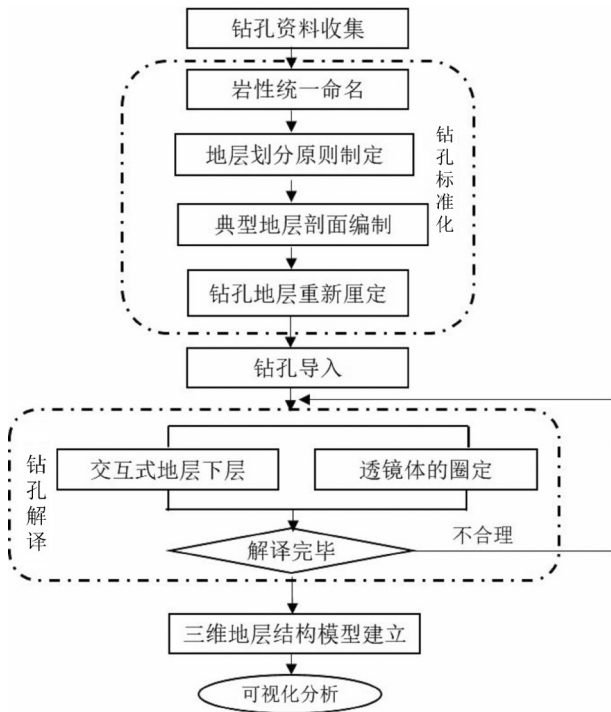


图2 建模流程示意图
Fig.2 Modelling procedures

工填土层、粉质黏土层、黏土层、粉细砂层、中粗砂层、卵石层,局部偶见黏土岩、风化千枚岩等(为便于建模,统一为基岩)。简化版柱状图参见图3。

4.3 布设地层剖面线

结合区内各类地质资料,根据所筛选工程孔的具体分布情况,布置南北-东西向交叉剖面线(107条),其中东西向剖面线70条,南北向37条(图4)。

4.4 绘制剖面

4.4.1 绘制原则

本次工作,重点考虑地层岩性特征,剖面主要反映地层岩性变化规律和结构特征,划分时考虑如下几点原则:

- ①注意地貌单元分界线,在平面图上对照钻孔,在剖面图上标出分界线的位置。
- ②从研究区冲积扇分布特征分析,先连接对应较好的地层,对于因为河道变迁或是其他因素而冲断的地层做尖灭处理。
- ③考虑相变,以反映沉积物相变为原则连接岩性分界线,考虑该区位于冲积扇同时叠加古河道,地层的划分主要以砂砾石层为标志层进行。
- ④以沉积物颗粒大小划分沉积韵律。

成因年代	编号	岩性符号	大致对应深度/m	地层岩性	岩性描述
人工堆积层	①			人工填土	人工堆积的粘质粉土、房渣土、含大量混凝土块、砖灰渣等
第四纪沉积	②			粉质黏土	含云母、姜石等,局部发育氧化铁条带,可见少量有机质
	③	fx		粉细砂	主要成分长石、石英、含云母。局部含有片状云母
	④		10	卵石	一般粒径2~20mm,极少量可达100mm。亚圆状,级配好,充填物为粘质粉土/中粗砂/基岩等
	⑤			粉质黏土	粉质黏土上层。含云母、氧化铁,局部含有粉性土块和粉土等
	⑥	fx		粉细砂	成分主要为云母,层内含氧化铁并发育粉粘夹层,局部含少量卵石
	⑦		30	卵石	含量50%~60%,直径约1~4cm,亚圆形,含砂约30%
	⑧			粉质黏土	可塑-硬塑,含氧化铁,夹砂质粉土薄层
	⑨	fx		粉细砂	粉细砂上层,局部砂质不纯,含有较多卵石,成分主要为石英、长石,云母
	⑩		50	卵石	上层,卵石直径一般2~8cm,亚圆状,级配较好,含中砂30%左右
	⑪			粉质黏土	上层,含有姜石/云母/氧化铁等,局部混有细砂
	⑫	zc		中粗砂	含云母及圆砾,圆砾含量占10%左右
	⑬			粉质黏土	50m深度内仅局布可见。稠度可塑,含有云母与氧化铁

图3 工作区0~50m基准孔柱状图
Fig.3 A typical vertical profile in the study area

⑤充分保证主要地层、较厚地层和标志性地层的连续性,以展现地质变化规律。

4.4.2 绘制方法

研究区位于北京平原永定河冲洪积扇,该区历史上有多次古河道变迁,古河道又受到冲洪积物填埋,其沉积微相分布十分复杂,横向变化大。由于这种再沉积和再搬运的地质作用,使得对于该地区的主辫状河道、次辫状河道、心滩、辫状河道间等微相来说破坏作用极大(赖锦等,2018),实际上无法完全确定其具体位置(北京市地质矿产局,1991)。在该种情况下,为了实现对地层的合理划分,采用统计方法,选取砾石层作为标志层进行统计。具体做法如下:

- ①以卵石层作为标志层。以人工填土层、粉细砂层、中粗砂层、卵石层作为主层进行连接。
- ②主层连接的同时,完成层内透镜体、黏土或局部基岩的单独编号,并保证同一透镜体编号的一致性与唯一性。
- ③如果在地层连接时,相邻钻孔上下属性相同,则按照坡度小的进行连接。对于坡度过大的一般不考虑进行连接。
- ④参考物理参数属性在不同岩性内的分布特征,保证结构与属性一致。
- ⑤进行透镜体的划分时,如果没有钻孔控制边界,透镜体

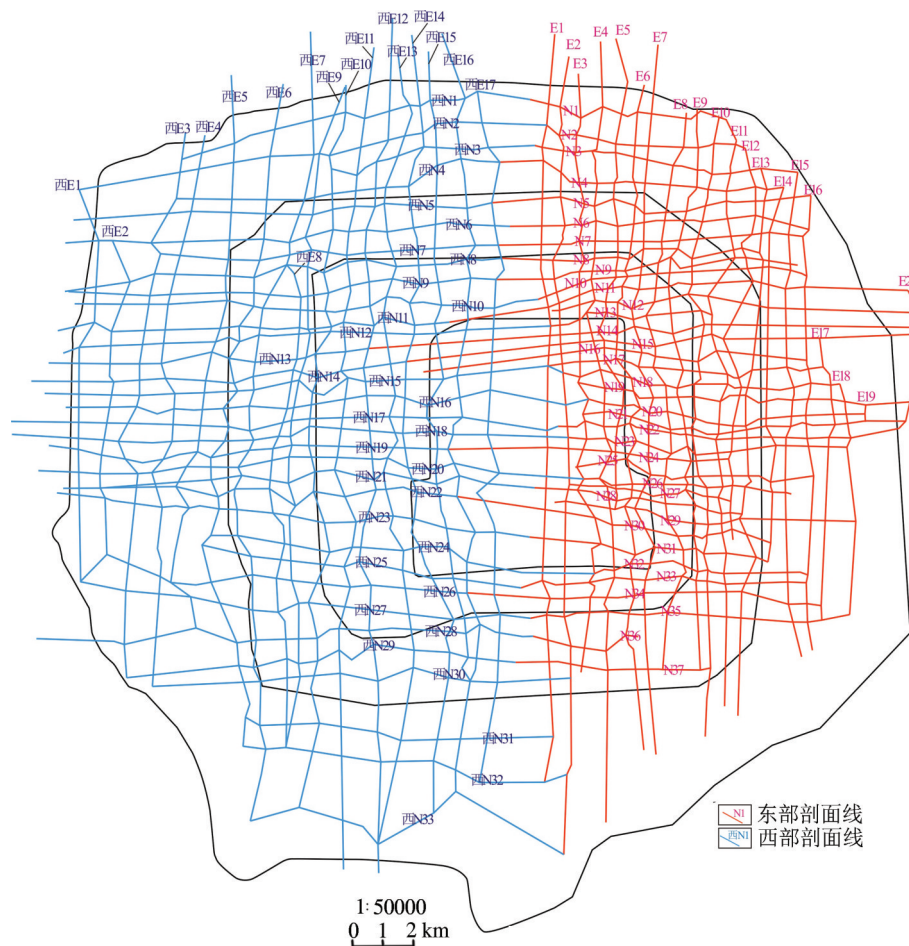


图4 地质剖面图的布设

Fig.4 Distribution of intersecting cross - sections in the study area

厚度超过0.5 m, 钻孔左右两端尖灭, 如果小于这个厚度一般采取在二分之一处尖灭。⑥本次建模精度, 纵向比例为1:200, 在进行划分时, 理论上合并小于50 cm的地层, 但实际工作中, 对于具有标志意义的薄层如黏土层, 根据地层变化实际情况予以保留, 此外还要考虑不同方向的连续性。例如, 东西向的某剖面某深度存在一处厚小于0.2 m的透镜体, 但在南北向剖面同一层位存在连续的小透镜体, 那么东西向的透镜体不能删除, 应将其命名与南北向透镜体统一, 以保证该透镜体连续性。

4.4.3 剖面绘制

南北向剖面跨多个地貌单元, 东西向剖面相对跨单元较少, 因此选择先绘制东西向地层剖面。解读平面地质图、古河道图, 依据整理后的钻孔地层信息及其他地质资料, 结合专业地质认识, 绘制各剖面。

以西N29-N37剖面(图5)为例, 该剖面位于晓月苑五里一东至老君堂公园一带, 据绘制原则考虑冲积扇地层结构特征, 首先连接卵砾石层, 该层在东西方向并未连续, 在相应钻孔处(未出现该层信息)做尖灭处理, 其余不连续地层类似; 连续展布地层, 如第一层粉质黏土根据实际钻孔数据依次连接。该图在一定程度上显示了东、西部地层的分布差异: 西部多为单一卵砾石层, 向东逐渐演变连续黏性土或砂质夹层, 至东部则发育互层的黏性土与砂层。

完成东西方向的剖面编制后, 依次绘制南北向剖面。需要注意的是, 除以上原则与方法, 还要着重关注交叉钻孔信息, 保证交叉钻孔与不同方向地层信息能够吻合。若出现矛盾之处, 以透镜体处理之。

5 三维地质结构模型

将整理后的标准钻孔数据导入建模平台(图

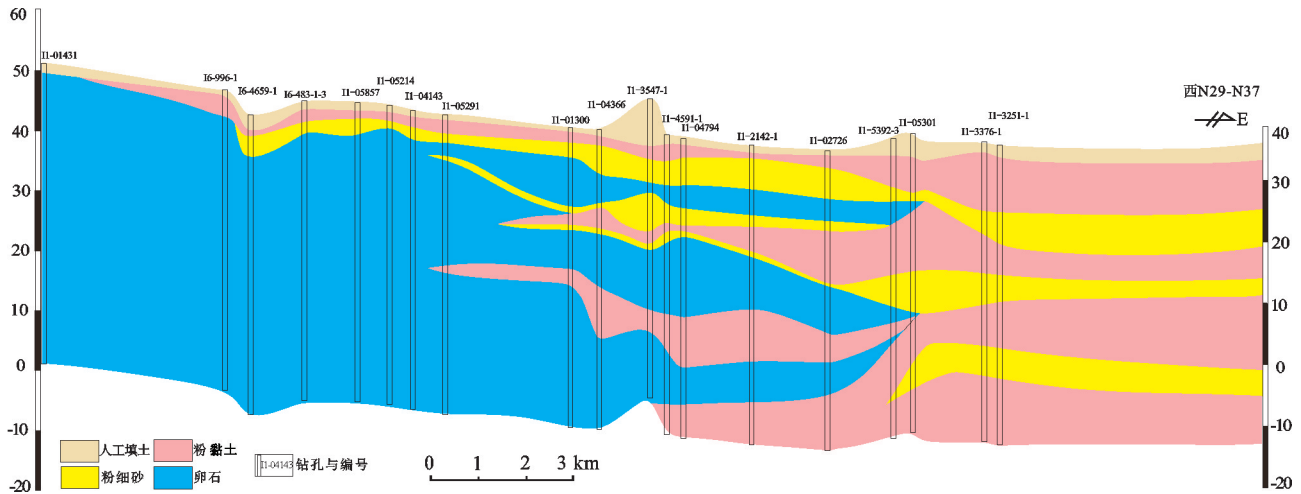


图5 平原区东西向典型地质剖面图(地下50 m以浅深度)

Fig.5 A typical cross-section generated from boreholes (W-E) in Beijing City (within the depth of 50 m)

6),经钻孔解译与地层解译(图7)后搭建模型基本框架。对于局部透镜体,尤其是复杂沉积背景下的多重透镜体,钻孔解译易出现矛盾,本次工作选择手动创建,即根据标准化地层剖面,由地质专业人员对照已搭建的主要地层,结合钻孔中透镜体的分层信息(层顶与层顶数据等),利用软件平台提供的人机交互工具,创建单独透镜体模型(图8)。最终将透镜体合并到相应主层内,形成完整的三维地质结构模型(图9)。

5.1 模型验证

本次工作,模型验证主要考虑模型地层是否与实际地层吻合。根据实际建模过程,选择两种验证

方法:钻孔验证法与地层剖面验证法。前者通过对比模型地层与预留验证孔地层;后者则通过对比切割模型剖面与实际地层剖面。需要注意的是,不同地区建模过程存在差异,可供验证精度的方法亦多种多样,本次研究认为传统的预留钻孔验证法具有代表性。

5.1.1 钻孔验证

钻孔验证是将在建模准备过程中预留的180个钻孔与模型中相同位置处的虚拟钻孔进行对比。为了获得模型中虚拟钻孔位置处的信息,利用软件平台虚拟钻孔的功能对地质模型进行钻探,导出各层高程及地层信息,将其与实际钻孔地层及高程信息进行对比。表1列举了一处钻孔验证实例(预留验证孔 II-02293 与同一位置模型虚拟孔 II-

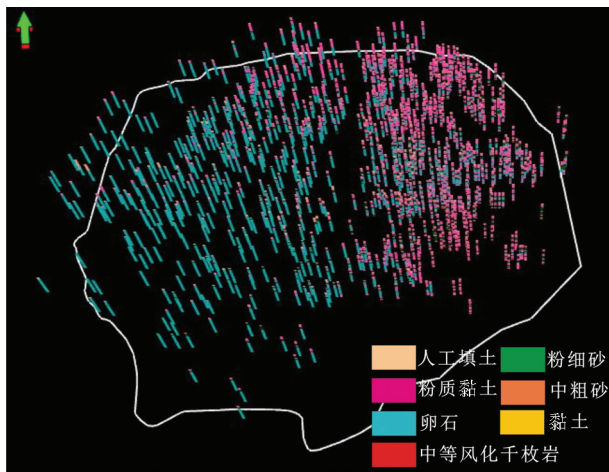


图6 钻孔导入建模平台

Fig.6 Boreholes used in modelling

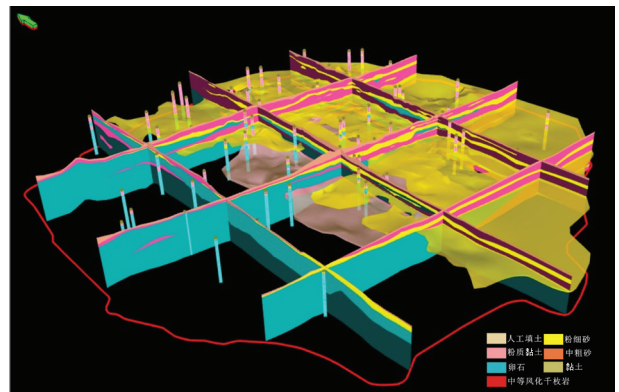


图7 依据钻孔及剖面搭建主要地层结构

Fig.7 Multiple cross-sections in oblique view

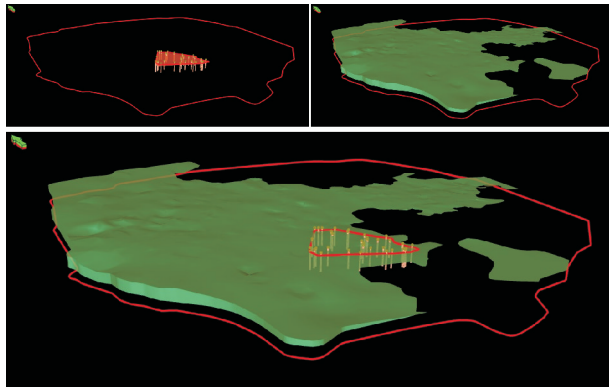


图8 地层中透镜体的构建示意图

Fig.8 Construction of a Small lens developed in a widely distributed layer

02293-X的地层对比分析)。

5.1.2 剖面验证

剖面验证,即对比原始地质剖面与模型切割剖面。验证要点包括:① ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

图 10 选取了其中一条地质剖面与模型切片地质剖面进行了对比,依据验证的要点,①自上而下

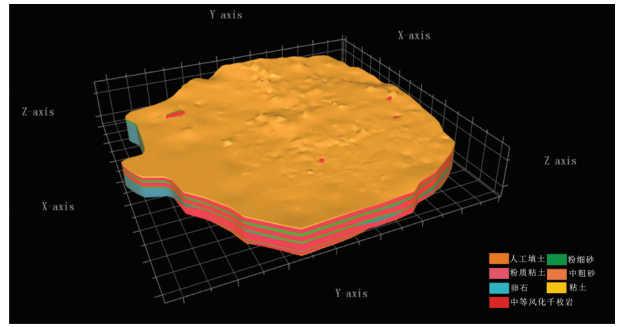


图9 三维地质结构模型图

Fig.9 3D geological structure model of shallow surface in Beijing City

地层都按照粉黏→粉细砂→(中粗砂)→卵石的规律变化。各大层内包含透镜体,局部偶见薄层。② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

通过以上两种验证方法,所建三维结构模型符合地质规律,与实际地质情况基本吻合,能够直观展示北京五环城区地下 50 m 深度范围内的地层分布与结构特征。但在局部地层的高程、透镜体位置方面仍与实际存有差异,后期可进一步完善。对于

表 1 钻孔验证实例
Table 1 Borehole verification

验证孔			模型虚拟孔			误差	误差分析
孔号	深度至/m	岩性	孔号	深度至/m	岩性		
I1-02293	1.8	填土	I1-02293-X	1.097	填土	0.70	地层对应较好
I1-02293	3.5	粉质黏土	I1-02293-X	2.995	粉质黏土	0.51	
I1-02293	6.3	粉细砂	I1-02293-X	8.255	粉细砂	1.96	
I1-02293	11.8	卵石	I1-02293-X	11.157	卵石	0.64	
I1-02293	12.7	粉细砂	I1-02293-X	12.311	粉细砂	0.39	
I1-02293	13.8	卵石	I1-02293-X	12.903	卵石	0.90	
I1-02293	14.6	粉质黏土	I1-02293-X	15.281	粉质黏土	0.68	
I1-02293	15.5	粉细砂					
I1-02293	22	卵石					
I1-02293	22.6	粉细砂					
I1-02293	26.5	卵石	I1-02293-X	26.800	卵石	0.30	
I1-02293	28	粉质黏土	I1-02293-X	30.370	粉质黏土	2.37	
I1-02293	29.2	卵石					
I1-02293	29.5	粉细砂					
I1-02293	30	卵石	I1-02293-X	49.883	卵石		

验证孔显示卵石层内夹粉细砂薄层,实际模型中受周边钻孔分布影响

粉细砂层厚仅 0.3 m,未能在模型中体现

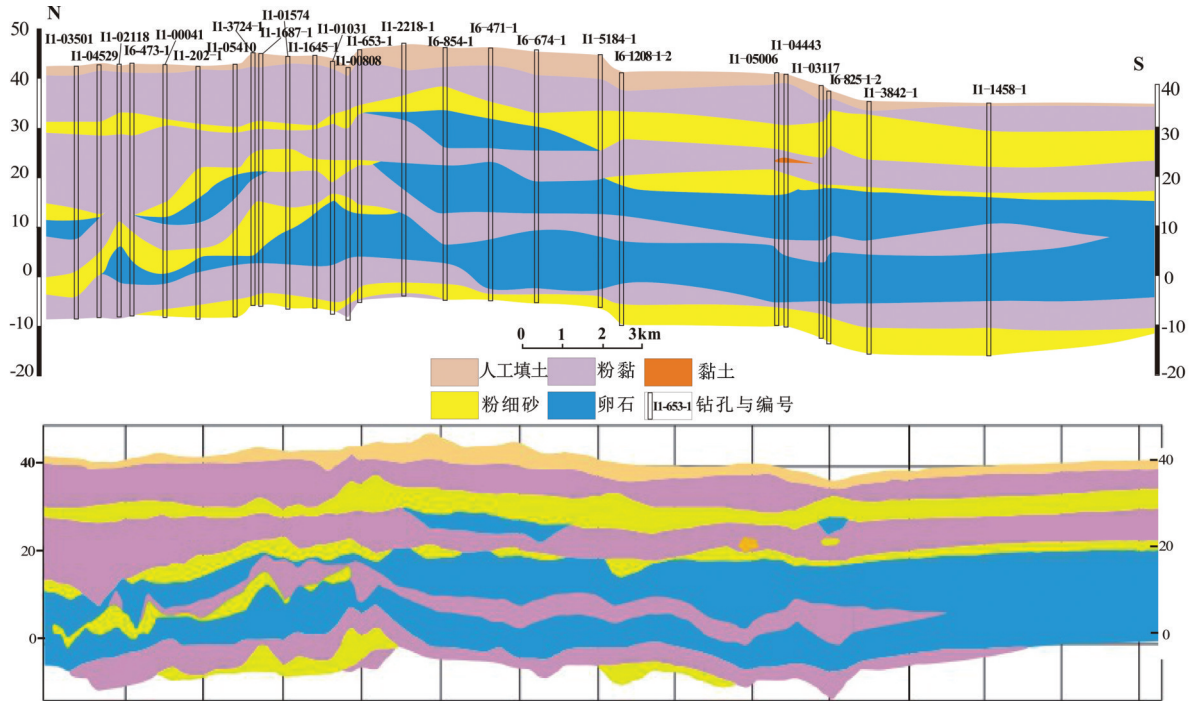


图10东E2模型剖面与实际剖面对比图

(上图:实际钻孔剖面;下图:模型剖面,垂向放大100倍,局部出现尖棱)

Fig. 10 A comparison between the cross – section based on boreholes(E2) and generated from 3D model with vertical exaggerated coefficient equal to 100

出现误差的原因,概括为3个方面:(1)钻孔分布并非完全均匀,某些地区资料有限,钻孔数量较少;(2)沉积环境复杂,松散层尤其是浅部地层变化较大,即使相邻钻孔,也极有可能存在较大差异;(3)实际地质剖面编制时考虑两点定一线,而三维结构中地层划分采用离散光滑插值方法,造成地层的部分差异。

5.2 讨论

本次研究主要是为“北京城市地下空间资源调查评价及关键技术”项目提供服务,建立的三维地质结构模型主要为地下空间资源的评价提供基础数据支撑,具体功能可概括为以下3点:

(1)提供实体框架。三维地质结构模型为后续

表2 实际地质剖面与模型切片对比

Table 2 A comparison of detailed layers of borehole – based geological profiles and 3D model

剖面编号	大层(自上而下)			透镜体		
	实际	模型	比对结果	实际	模型	比对结果
东 E2	填土层	填土层	大层完全一致,显示三个“粉黏→粉细砂→卵石”韵律;局部层厚与尖灭位置略有差异;最后一层粉细砂南北向延伸较实际剖面略短	黏土	黏土	模型中第二层粉质黏土内出现2处黏土透镜体,实际剖面发育1处
	粉质黏土层	粉质黏土层				
	粉细砂	粉细砂				
	卵石(局部)	卵石层(局部)				
	粉质黏土层	粉质黏土层				
	粉细砂	粉细砂				
	卵石	卵石				
	粉质黏土层	粉质黏土层				
	粉细砂(北部)	粉细砂(北部)				
	卵石	卵石				
	粉质黏土层	粉质黏土层				
	粉细砂(局部)	粉细砂				
	粉质黏土(局部)	粉质黏土(局部)				
	粉质黏土层	粉质黏土层				
粉细砂	粉细砂					
卵石	卵石	粉质黏土	粉质黏土			

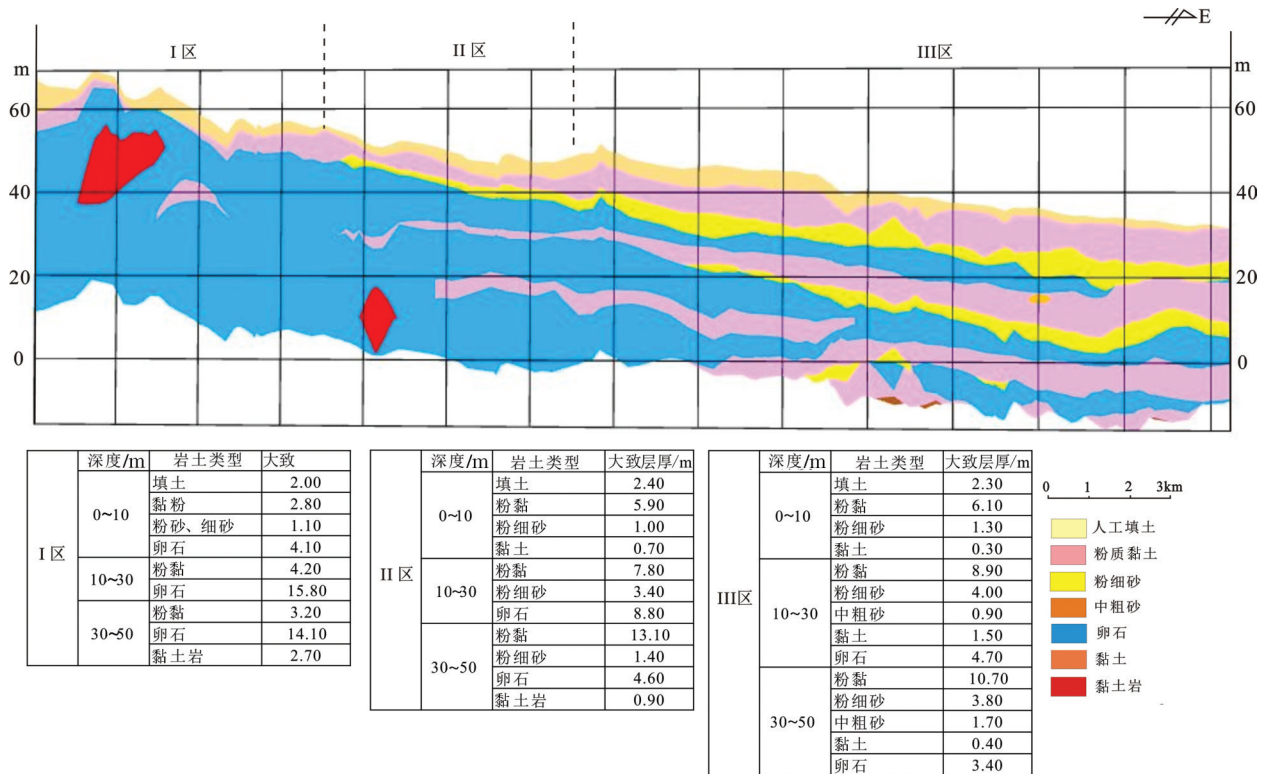


图 11 三维地质模型地质剖面切片

Fig. 11 A typical cross-section from 3D geological solid model

属性模型的创建提供实体框架。基于已整理的土体物理力学参数数据,采用克里格法完成对结构模型的插值,实现结构与属性模型的整合。

(2)为地下空间资源评价提供基础地质数据。岩土体的结构特征及其对应的各项参数,是城市地下空间资源开发利用最直接最基础的影响因素,三维地质结构模型刻画了这种岩土体三维结构特征,并且以最为直观的形式展示了各地层分布特征(图 11)。就研究区五环城区而言,根据三维结构模型,区内东西部地层存在明显差异:西部发育厚层卵石,地层结构较为单一;东部地区较为复杂,显示一定韵律性,自上而下岩性呈粉质黏土—粉细砂—中粗砂—卵砾石的变化规律。

(3)基本演示功能。三维结构模型可以在建模平台中以不同颜色、不同标记等直观展示地层分布,包括栅栏图、地质剖面切片、地质体切割等,或选择性展示特定地层,估算可开发利用的地下空间地质体量,以及可视化分析。

6 结论

本次研究基于北京五环城区的大量工程钻孔

数据,通过数据筛选、整理、分析,制定 107 条东西南北向交叉展布的剖面线,绘制标准化地层剖面,依托于超维 Creatar-Xmodeling 建模平台,创建了区内地下 50 m 浅部的三维地质结构模型。研究区复杂的沉积环境使得建模过程存在诸多困难,本文系统整理了模型创建过程,提出了一套可供参考的松散沉积层三维建模方法,得出如下几点结论:

(1)基于钻孔结合剖面建立三维地质模型的方法,适合冲积扇背景下的沉积层建模。该背景下沉积层在横向与纵向,普遍存在较大差异。

(2)结合沉积背景与钻孔分布制定交叉剖面线。前期数据处理是建模最为重要的阶段,完成钻孔数据的筛选后,根据钻孔分布制定交叉剖面线,绘制地层剖面,为模型创建提供直接数据。

(3)结构模型的验证可通过预留钻孔法与剖面法实现。不同地区创建模型思路存在差异,但最为传统的钻孔验证法具有一定代表性。

(4)三维结构模型直观展示研究区的地层分布特征。根据结构模型,北京五环城区内东西部地层存在较大差异,西部地层结构单一,发育厚层卵石;东部地层复杂,自上而下显示粉质黏土—粉细砂—

中粗砂—卵砾石的变化规律。

References

- Akpokodje E G. 1987. The engineering-geological characteristics and classification of the major superficial soils of the Niger Delta[J]. *Engineering Geology*, 23:193-211.
- Bao Yigang, Liu Zhenfeng, Wang Shifa. 2001. A Centennial Study of Geology in Beijing:History and Latest Achievements of Basic Geological Research in Beijing Area [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Beijing Geology Prospecting & Development Bureau, Beijing Institute of Geological Survey. 2008. Urban Geology of Beijing [M]. Beijing: China Land Press (in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing Municipality. 1991. Regional Geology of Beijing Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1- 598 (in Chinese with English abstract).
- Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yingbo, Liang Yanan. 2009. Quaternary geological features of Beijing piedmont plain using 3-D structural method[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7):1047- 1057 (in Chinese with English abstract).
- Cai Xiangmin, He Jing, Bai Lingyan, Liu Hong. 2010. The geology problem in development and utilization programming of underground space resources in Beijing[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 6(6):1105- 1111 (in Chinese with English abstract).
- Cai Xiangmin, Zhang Lei, Guo Gaoxuan, You Shina, Fang Tongming, LV Jinbo, Liang Yanan. 2016. New Progress in the study of Quaternary geology in Beijing Plain[J]. *Geology in China*, 43, (3): 1055-1066(in Chinese with English abstract).
- Chen Guoxu, Wu Chonglong, Zhang Xialin, Tian Yiping, Liu Gang. 2010. Study on integration of 3D geological modeling and mineral resource exploration mapping[J]. *Geology and Exploration*, 46(3): 542-456 (in Chinese with English abstract).
- Dassargues A, Biver P, Monjoie A.1991. Geotechnical properties of the Quaternary sediments in Shanghai[J]. *Engineering Geology*, 31:71- 90.
- Katherine R Royse. 2010. Combining numerical and cognitive 3D modelling approaches in order to determine the structure of the Chalk in the London Basin[J]. *Computers & Geosciences*, 36:500- 511.
- He Huaijian, Bai Shiwei, Zhao Xinhua, Chen Jian. 2002. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 23 (5):637-639 (in Chinese with English abstract).
- Houlding S W. 1993. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. London: Springer- Verlag: 1-2.
- 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 & Geosciences*, 34 (3): 278-290.
- Lai Jin, Han Nengrun, Jia Yunwu, Ji Yushan, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, He Zhibo, Wang Song. 2018. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. *Geology in China*, 45(2): 304- 318(in Chinese with English abstract).
- Li Qingyuan, Zhang Luoyi, Cao Daiyong, Dong Qianlin, Cui Yang, Chen Chunmei. 2016. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 759-767(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaojun, Li Peinan, Zhu Hehua, Liu Jun. 2014. Geomodeling with integration of multi- source data by Bayesian Kriging in underground space[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 42(3):406- 412 (in Chinese with English abstract).
- Liangfeng Zhu, Chengjuan Zhang, Mingjiang Li. 2012. Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from borehole data: An automatic method and case studies[J]. *Engineering Geology*, 127:1-13.
- Ma Zhen, Xie Hailan, Lin Liangjun, Hu Qiuyun, Qian Yong, Zhang Surong, Wang Guiling, Li Jianguo, Tan Chengxuan, Guo Haipeng, Zhang Fucun, Zhao Changrong, Liu Hongwei. 2017. The environmental geological conditions of Land resources in the Beijing- Tianjin- Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(5): 857- 873(in Chinese with English abstract).
- Ming Jing, Pan Mao, Qu Honggang, Wu Zixing. 2008. Three- dimensional geological multi- body modeling from netlike cross- sections with topology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(9): 1376-1382 (in Chinese with English abstract).
- Ming Jing, Xiang Zejun. 2015. Research and application on the integrated management platform of geological information for mountainous city[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, (5): 147-153 (in Chinese with English abstract).
- Pan Mao, Fang Yu, Qu Honggang. 2007. Discussion on several foundational issues in three- dimensional geological modeling[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 23(3): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Sun Li, Xiao Keyan, Tang Juxing, Zou Wei, Li Nan, Sun Yan. 2011. 3- D geologic modeling of the Jiama Cu deposit based on Minexplorer System[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(3) : 291-297(in Chinese with English abstract).
- Tonini A, Guastaldi E, Massa G, Conti P. 2008. 3D geo-mapping based on surface data for preliminary study of underground works: A case study in Val Topina (Central Italy) [J]. *Engineering Geology*, 99: 61-69.
- Turner A K. 2006. Challenges and trends for geological modelling and visualization[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65 (2):109-127.

- Wellmann J F, Horowitz F G, Schill E, Regenauer-Lieb K. 2010. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion[J]. *Tectonophysics*, 490 (3/4):141-151.
- Wu Qiang, Xu Hua, Zhou Xukai. 2005. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. *Computers & Geosciences*, 31(1):35-43.
- Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2018. Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data[J]. *Geology in China*, 45(4): 658-680(in Chinese with English abstract).
- Yu Can, Li Feng, Zeng Qingtian, Xiao Shuan, Zhang Dabing. 2016. A study on Cu-grade distribution of the Tongchang copper deposit in Yimen based on DIMINE Software[J]. *Geology and Exploration*, 52 (2): 376-384 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, He Jing, Bai Lingyan, Cai Xiang-min, Wang Ji-min, Yang Tian-shui. 2016. The response relationship between the variation characteristics of deposition rate of Quaternary depression basin on the northern margin of Beijing depression and the activity of Shunyi fault[J]. *Geology in China*, 43, (2): 511-519(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yangyang, Zhou Wanpeng, Wu Zhichun, Guo Fusheng, Zheng Xiang. 2013. The development status of 3D geological modeling technology and modeling instances[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Social Science)*, 32(3): 403-409 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuan, Liu Yin, Xu Miaojuan, Sun Ying, Zheng Feifei, Song Guoxi. 2015. Research and practice of Beijing 3D geological modeling[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 43(6):60-65 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L, Zhang C J, Li M J. 2012. Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from borehole data: An automatic method and case studies[J]. *Engineering Geology*, 127: 1-13.
- Zhu Liangfeng, Wu Xincai, Liu Xiuguo, Shang Jianga. 2004. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data[J]. *Geography and Geo-information Science*, 20(3) : 26-30 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 鲍亦冈, 刘振锋, 王世发, 等. 2001. 北京地质百年研究: 北京地区基础地质研究的历史与最新成果[M]. 北京: 地质出版社.
- 北京市地质矿产局. 1991. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1-598.
- 北京市地质矿产勘查开发局, 北京市地质调查研究院. 2008. 北京市地质[M]. 北京: 中国大地出版社.
- 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 梁亚楠. 2009. 北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究及实践[J]. *地质学报*, 83(7): 1047-1057.
- 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[J]. *地下空间与工程学报*, 6(6):1105-1111.
- 蔡向民, 张磊, 郭高轩, 尤世娜, 方同明, 吕金波, 梁亚楠. 2016. 北京平原地区第四纪地质研究新进展[J]. *中国地质*, 43(3):1055-1066
- 陈国旭, 吴冲龙, 张夏林, 田宜平, 刘刚. 2010. 三维地质建模与地矿勘查图件编制一体化方法研究[J]. *地质与勘探*, 46 (3) :542-456.
- 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 陈健. 2002. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. *岩土力学*, 23(5):637-639.
- 赖锦, 韩能润, 贾云武, 季玉山, 王贵文, 庞小娇, 贺智博, 王松. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J]. *中国地质*, 45(2): 304-318.
- 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 董前林, 崔扬, 陈春梅. 2016. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. *地质与勘探*, 52(4):759-767.
- 李晓军, 李培楠, 朱合华, 等. 2014. 基于贝叶斯克里金的地下空间多源数据建模[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 42(3):406-412.
- 马震, 谢海澜, 林良俊, 胡秋韵, 钱永, 张素荣, 王贵玲, 李建国, 谭成轩, 郭海朋, 张福存, 赵长荣, 刘宏伟. 2017. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. *中国地质*, 44(5): 857-873.
- 明镜, 潘懋, 屈红刚, 吴自兴. 2008. 基于网状含拓扑剖面的三维地质多体建模[J]. *岩土工程学报*, 30(9): 1376-1382.
- 明镜, 向泽君. 2015. 山地城市地质信息集成管理平台研究与应[J]. *城市勘测*, (5) : 147-153.
- 潘懋, 方裕, 屈红刚. 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 23(3) : 1-5.
- 孙莉, 肖克炎, 唐菊兴, 伟, 李楠, 孙艳. 2011. 基于Minexplorer探矿者软件的甲玛铜矿三维地质体建模[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 38(3) : 291-297.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2018. 中国航磁大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 45(4): 658-680.
- 余臻, 李峰, 曾庆田, 肖术安, 张达兵. 2016. 基于DIMINE软件的易门铜厂矿床Cu品位分布规律研究[J]. *地质与勘探*, 52(2) : 376-384.
- 张磊, 何静, 白凌燕, 蔡向民, 王继明, 杨天水. 2016. 北京凹陷北缘第四纪凹陷盆地沉积速率变化特征与顺义断裂活动性的响应关系[J]. *中国地质*, 43, (2): 511-519.
- 张洋洋, 周万蓬, 吴志春. 2013. 三维地质建模技术发展现状及建模实例[J]. *东华理工大学学报(社会科学版)*, 32(3):403-409.
- 张院, 刘殷, 许苗娟, 孙颖, 郑菲菲, 宋国玺. 2015. 北京三维地质建模研究与实践[J]. *工程勘察*, 43(6) : 60-65.
- 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 尚建嘎. 2004. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J]. *地理与地理信息科学*, 20(3) : 26-30.