doi: 10.11720/wtyht.2022.1319
龙慧,谢兴隆,李凤哲,等.二维地震和高密度电阻率测深揭示雄安新区浅部三维地质结构特征[J].物探与化探,2022,46(4):808-815.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1319
Long H,Xie X L,Li F Z,et al.2D seismic and high-density resistivity sounding reveal the shallow three-dimensional geological structure characteristics of Xiong'an New Area[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(4):808-815.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1319

二维地震和高密度电阻率测深揭示雄安新区浅部三维地质结构特征

龙慧,谢兴隆,李凤哲,任政委,王春辉,郭淑君
(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051)

摘 要: 雄安新区位于冀中平原中部,地下结构具有新生界地层厚度大、成层性好、构造活动相对稳定的显著特点。为精细刻画浅层地质结构,查明断裂构造特征,提高浅部探测精度,本次研究采用二维地震和高密度电阻率测深结合的方法,取得了重要进展,主要包括:①精细刻画了工作区 200 m 以浅深度范围内地层结构和断裂构造空间展布特征;②构建了三维可视化地质结构模型,直观展示了调查区新生界地层起伏形态和主要断裂构造空间分布;③分析总结了城镇化高干扰背景环境下地球物理方法的探测深度、横纵向分辨率、目标体响应特征和适用性等。本次研究有效支撑和服务了雄安新区的规划、建设以及地下空间开发利用,对大厚度沉积盆地城市地下空间的地球物理探测具有借鉴意义。

关键词: 雄安新区;二维地震;高密度电阻率测深;三维地质结构;断裂构造
中图分类号: P631.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2022)04-0808-08

0 引言

雄安新区是千年大计、国家大事,建设地上、地下两个雄安是新区规划建设的重要目标,地下雄安建设必须建立在对地下地质结构具有充分认识的基础上。雄安新区位于冀中平原中部,石油与国土部门在此开展过大量的油气勘探、地热勘探与构造解释研究[1-6],积累了丰富的基础地质与地球物理资料。但是,目前的研究主要集中在地表和深部,针对工程建设层(200 m 以浅)研究相对较少。自雄安新区设立以来,为满足城市地下空间规划、资源利用开发、地质灾害评价和可持续发展等方面的需求,雄安新区起步区浅层地质结构和隐伏断裂特征的探测和研究这项工作亟待解决。

地球物理探测技术在地下结构探测方面具有不破坏地表、探测效率高、成本低廉等明显优势,槽探、地震勘探、电磁法和探地雷达等技术在浅层地质结构探测中发挥了重要作用,从应用效果来看,这些方法的探测深度、分辨率、适用性以及解决地质问题的能力各有差异。槽探可称为最经典的浅层结构探测方法,但受制于观测区域小、经济成本昂贵、对地表环境破坏性大等,难以实现重复性探测[7-8]。对于电磁法探测技术,由于城市建筑和电场环境的影响,方法局限性较强[9-10];相对而言,高密度电阻率测深受带电输电线路、杆塔等影响较小,在工程勘察中的应用越来越广泛。浅层地震无疑是划分地层结构最好的方法之一,能够对第四系底界面及内部结构进行地球物理意义上的精细划分,识别隐伏活动断裂及其空间展布特征[11-12],但城市噪声污染严重,对地表环境影响和后期数据处理要求较高,在城市浅层地下空间精细探测上,还需要配合其他方法进行综合分析。探地雷达是采用脉冲电磁波发射和接收,数据采集和处理类似于地震零偏移距自激自收方式,具备分辨率

收稿日期: 2021-06-11; **修回日期**: 2022-03-24
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20189630、DD20190127);国家重点研发计划项目(2018YFC0604305)
第一作者: 龙慧(1987-),女,2012 年毕业于西安石油大学,硕士,主要从事水工环地质领域内地球物理勘探技术方法应用与研究工作。Email:longlong19870402@163.com
通讯作者: 李凤哲(1979-),女,高级工程师,硕士,从事地球物理勘查技术应用与研究工作。Email:li_fz@163.com

和效率“双高”的特征,但由于脉冲电磁波在地下介质中的强衰减特征,其探测深度极其有限[12]。综上所述,在雄安新区大规模建设阶段开展地球物理勘查工作,面临城市强干扰背景、探测精度、地表环境等因素的影响,无损、高效、抗干扰能力强的探测技术在提供城市地区地下地质信息方面可以发挥关键作用。

本文以浅层地震勘查为主,高密度电阻率测深为辅在雄安新区起步区开展综合地球物理探测,综合钻孔、录井和测井资料,对研究区浅层地质结构进行精细探测和描述,同时构建 200 m 以浅三维地质结构模型,支撑和服务“透明雄安”。

1　地质背景

雄安新区辖区河北雄县、容城、安新 3 县及周边部分区域,构造位置属于渤海湾盆地冀中坳陷中部[13],横跨徐水凹陷、容城凸起、牛背斜坡、牛驼镇凸起、霸州凹陷和文安斜坡等次级构造单元,南为保定凹陷、高阳低凸起、饶阳凹陷,北为廊固凹陷。冀中坳陷在中生代燕山运动挤压和新生代太平洋板块俯冲弧后拉张伸展的构造作用下形成的一系列正断层[14],研究区内规模较大、对区域构造起控制作用的隐伏基岩断裂主要为保定—石家庄断裂、容西断裂、容东断裂、牛东断裂和徐水断裂[15-17]。新生代断裂活动主要集中在古近系沙河街组四段(Es^4)和新近系馆陶组(N_2g)、明化镇组(N_2m)沉积时期,地表未见构造活动迹象。

沉积地层序列由下而上依次为太古宇变质岩,以角闪岩和片麻岩为主;元古宇青白口系(Qb)、蓟县系(Jx)和长城系(Ch),青白口系以灰岩为主,蓟县系和长城系以白云岩为主,还包括玄武岩和页岩;下古生界寒武系(∈)由泥岩、灰岩和白云岩组成;下古生界奥陶系(O),上古生界石炭系(C)、二叠系(P),中生界侏罗系(J)、白垩系(K)分布零星,在起步区缺失;新生界古近系(E)和新近系(N)分别以湖相和河流相沉积为主,岩性为砂岩和泥岩,第四系(Q)以来以冲洪积、冲积和冲湖积物为主,岩性包括砾石、粗砂、中砂、细砂、粉砂、粉土、粉质黏土、黏土[18-20]。

2　多源地球物理探测

前人研究表明,雄安新区浅层沉积物整体上呈现低密度、中低磁化率、低电阻率、低波速的物性响应特征,第四系内部地层物性特征差异较小[18,20]。本文通过浅层地震勘查和高密度电阻率测深两种地球物理方法探测雄安新区起步区工程建设层地质结构。

2.1　浅层地震勘查

浅层纵波反射地震是城市地下空间探测常用的勘探技术,对于浅地表 50~300 m 深度范围内的砂泥岩互层的变化特征和断层结构特征揭示效果较好,通过测井约束和振幅分析可获取高分辨率的砂泥岩的地层岩性界面[21],还可获取 S 波速度和弹性模量等参数信息[12]。但是反射波地震数据采集和处理通常会存在“盲区”,使浅表(0~50 m)不能获得可靠的成像信息。

为获取高质量反射波信号,数据采集前开展了大量现场野外试验,在了解了研究区低速带情况,掌握了波场特征的基础上,确定了观测系统。此次采用美国 Geometrics 公司 Strata Visor Nzxp24 型地震仪及其扩展模块 Geode,M18-612 型可控震源(扫描频率 5~250 Hz,最大出力 18 t)及其配套电控系统,L40 检波器,扫描方式线性升频、扫描频率 20~160 Hz、扫描长度 8 s、驱动幅度 70%、叠加 1~3 次的激发参数,120 道、道间距 5 m、炮检距 20 m、采样间隔 0.5 ms,记录长度 2 s、覆盖次数最高达 40 次的接收参数。数据处理采用自主开发模块、GeoEast V3.2、CGG、vista 处理系统等软件,主要处理过程包括折射静校正、地表一致性处理、频谱分析、弯线共中心点道集编排、动校正、速度分析等。同时,为了获得更准确的地震速度资料,提高解释精度,结合了剖面上钻孔的录井,电阻率和声波时差测井,叠加速度谱等资料进行综合分析,获取研究区的速度模型用于地震资料的时深转换。

图 1 为雄安新区起步区 R2-1 测线地震时间剖面成果,200 m 以浅第四系地层共有 2 个明显的地震反射波组(图 2)。T_0 反射面双程反射时间为 82~132 ms,地层推断解释为全新统—中更新统底界,埋深约 20~80 m;T_Q 反射面双程反射时间为 250~292 ms,地层推断解释为第四系下更新统(Qp_1)底界(即新近系明化镇组(N_2m)顶界),埋深约 100~220 m。该剖面分别在距离 505 m 和 5 135 m 处 200 ms 以下下更新统和明化镇组地层中发生扰动,两侧波组特征发生明显变化,解释为 F_1 和 F_7 断层。F_1 断层倾向 NW,倾角 19.50°,上断点埋深 168 m,断层上下盘地层变化较大,从断层的特征和规模来看,推测为容南断裂,F_{1-1}、F_{1-3}为其分支断层。F_7 断层倾向 NE,倾角 10.90°,上断点埋深 349 m,断距随着地层深度增加逐渐增大。

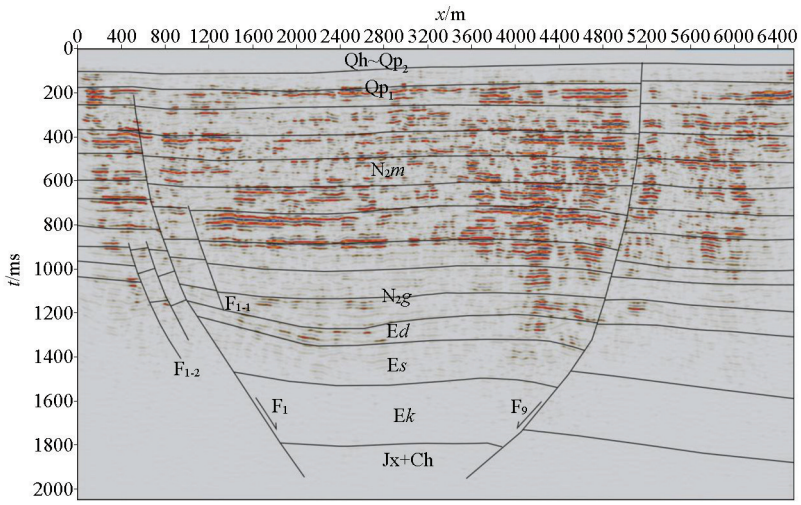

图 1　研究区 R2-1 测线地震时间剖面

Fig.1　The seismic time profile of R2-1 in the study area

二维地震探测结果揭示雄安新区起步区地层序列自上而下包括新生界第四系全新统—中更新统(Qh ~ Qp_2)、下更新统(Qp_1)、新近系明化镇组(N_2m)、馆陶组(N_2g)、古近系东营组(Ed)、沙河街组(Es)、孔店组(Ek)、古生界寒武系(∈)、中—新元古界青白口系(Qb)顶底板等 15 套地层(图 2),其中,明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组地层在容城凸起区域均有不同程度的缺失,孔店组和古生界地层仅在容城凸起西侧,即南张镇—小李镇—三台镇西北一带发育。

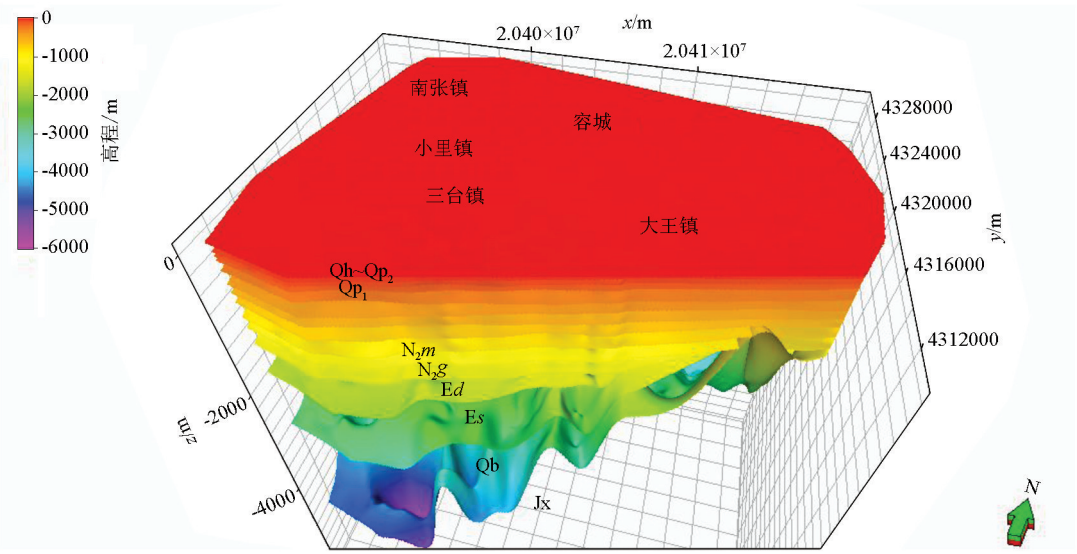

图 2　研究区主要地层序列分布

Fig.2　Distribution map of main stratigraphic sequences in the study area

依据同相轴发生错段,上下盘同相轴连续性差异明显等特征,推断存在 F_1 ~ F_9 等断裂(图 3)。区域性断裂主要有容南断裂(F_1),控制着容城凸起和保定凹陷的发育;容东断裂(F_2),为容城凸起和牛北斜坡的构造分界线;徐水断裂(F_8),是分割徐水凹陷和保定凹陷的边界断裂。F_1、F_2、F_4、F_5、F_8、F_9 分别存在分支断层,F_1、F_4、F_5、F_8、F_9 与其分支断层均呈“Y”字形组合。断裂构造隐伏于地表之下,走向以 NE 向为主,控制了第四系、新近系、古近系、中生界和中—新元古界的空间分布;除 F_1 及其次级断裂 $F_{1\text{-}3}$ 对第四系下更新统地层有控制作用外,其他断裂早更新世以来活动不明显。

2.2　高密度电阻率测深

高密度电阻率测深主要用于探查浅部岩土层电性结构和隐伏断裂发育特征,被广泛应用于 100 m 以浅水文地质和工程地质领域,具有自动化程度高、

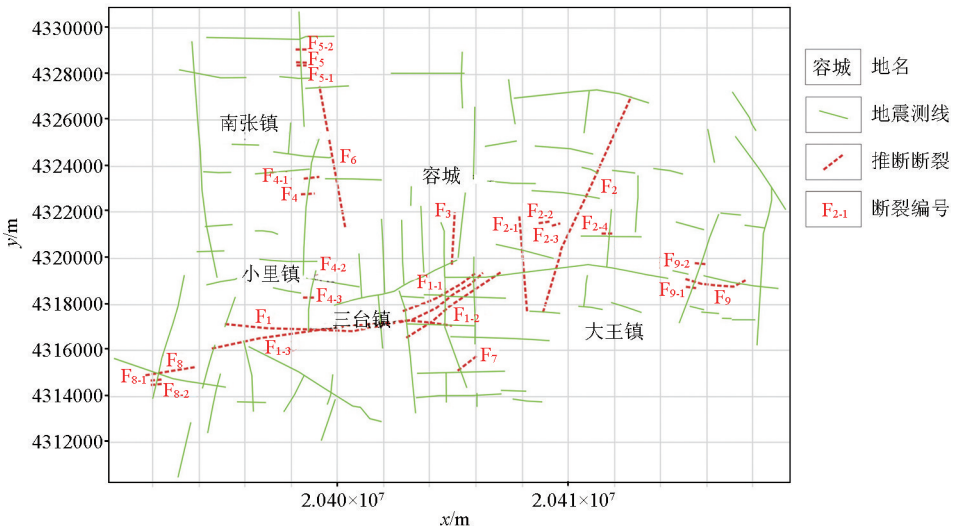

图 3　研究区断裂构造分布

Fig.3　Distribution map of fault structure in the study area

数据信息采集量大、反映地下电性结构直观等优势，是一种现代化勘查技术方法[22-23]，最重要的是补充了地震勘查的浅部盲区。为获取高质量电阻率数据，同时满足一定探测深度，此次使用稳定性较好的骄鹏 E60DN 高密度电阻率测深仪，5～10 m 采样点距，温纳 α 装置模式测量，参数设置为最大电压 100～300 V、最大电流 2 A、单点供电 1 s、重复观测 2 次。数据处理采用 RES2DINV 软件进行反演，反演方法为最小二乘法。

从高密度电阻率测深结果来看，雄安新区起步区 200 m 以浅地层视电阻率分层特征明显，纵向上表现为“低—高—低”3 个明显电性结构特征（图 4）。结合钻孔信息可解释为：0～15 m，视电阻率值较低，范围在 5～15 Ω · m 之间，主要以回填土、粉土、黏土为主；15～100 m，视电阻率值 15～70 Ω · m，整体表现为高阻特征，岩性以粉土、粉质黏土、中砂、

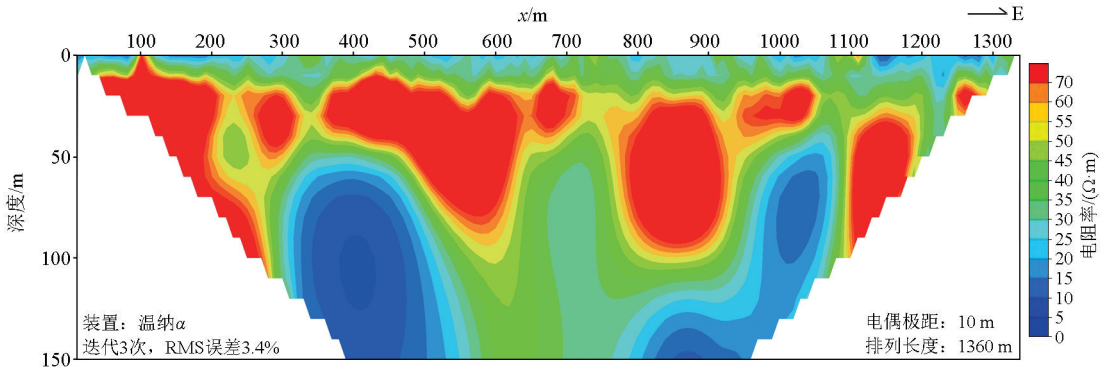

图 4　雄安新区高密度电阻率测深反演结果

Fig.4　Inversion profile of high-density resistivity sounding of Xiongan New Area

细砂为主，局部成团状分布，形成砂层透镜体；100～200 m，视电阻率值 10～50 Ω · m，为粉质黏土与中砂、细砂互层。

高密度电阻率测深不仅提供了起步区浅层地—电结构特征，结合工程地质孔和地下水矿化度资料，划分了含水层有利区段为 15～30 m 和 40～80 m，还定量表示了地下水矿化度（TDS）与视电阻率之间的关系（图 5），为调查区咸淡水分界面的划分提供现实依据。

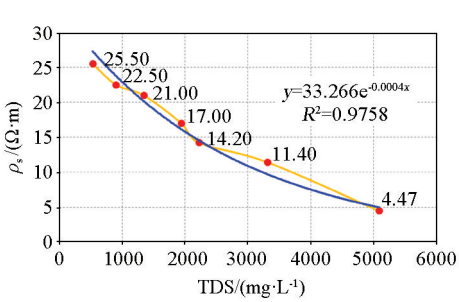

图 5　地下水矿化度（TDS）与视电阻率关系

Fig.5　Graph of groundwater salinity and apparent resistivity

3　三维地质模型构建

本次选用 Schlumberger 开发出品的 Petrel 三维可视化地质建模软件构建雄安新区起步区 200 m 以浅三维地质结构模型。该软件能够综合利用地震数据、钻孔数据、测井资料和地质信息等多源数据，实时对断层的平面组合与空间展布规律进行研究，实现地质资料与地震数据的有机结合，从而构建三维构造模型，进而更加直观准确地分析雄安新区浅地表各种复杂的地质现象[24]。此次建模数据包括 21 236 物理点二维地震数据、26 眼地热钻孔分层数据和 17 眼工程地质钻孔测井数据。

3.1　建模方法

平原地区工程建设层地质结构多为第四系层状地层沉积，可采用自动建模的方法[20,25]。模型构建的过程大致归纳为以下三步：首先，收集、整理和筛选钻孔编录，测井，地形，二维地震解释层位和断层等数据，按照软件格式要求将标准化后的数据导入，通过插值和拟合算法由上至下生成层状地质界面，并用地热钻孔分层数据作为约束；其次，利用边界和层面数据确定矢量化的建模范围，选择不同的插值方法剖分三维可视化网格，同时采用 Structural Modeling 模块进行整个系统的构造建模；最后，经过多次拟合调整，最终选用多重网格逼近法进行插值计算，剖分网格 243 360 个，逐层构建地质实体图。

3.2　三维地质结构模型

雄安新区重点调查区 0～200 m 三维可视化地质模型如图 6，发育新生界第四系全新统—中更新统、下更新统、新近系明化镇组地层，其中明化镇组地层仅在工作区东北部地区发育。地表高程模型采用 13 689 个 RTK 实测数据获得，RTK 控制网采用Ⅱ级网，数据来源于国家测绘局资料与千寻网络位置。测量的投影方式采用 UTM 投影，投影的中央子午线为 117°E。从图 6 可以看出，雄安新区重点调查区地表高程范围 2.00～17.01 m，平均海拔 15.01 m，高差较小，总体呈现北高南低、东高西低的趋势，小李镇—三台镇以西一带高程较两侧低。

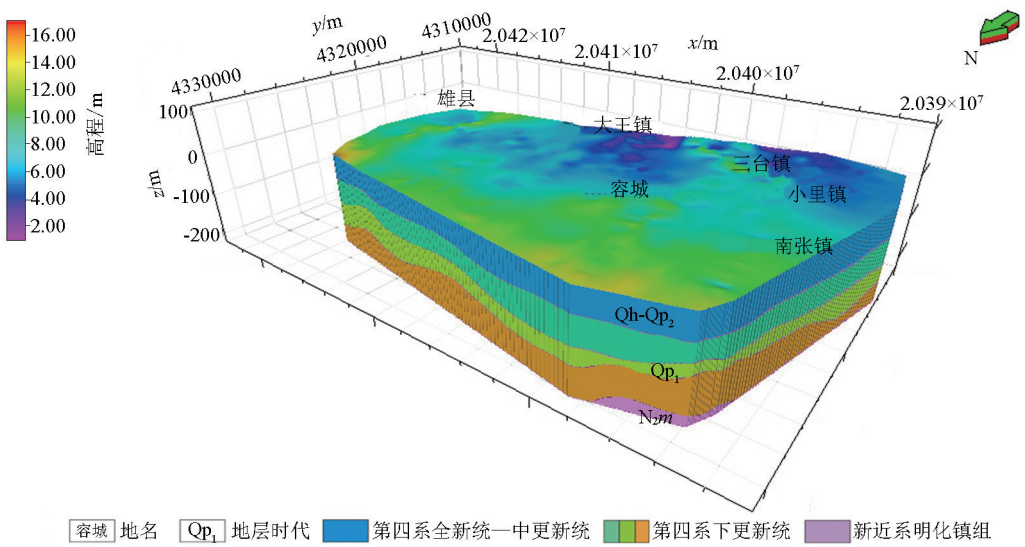

图 6　研究区 0～200 m 三维可视化地质模型

Fig.6　The 0～200 m 3D visual geological model of the study area

重点调查区新生界第四系松散层底界埋深 100.60～211.24 m，平均 110.64 m，厚度 114.64～218.40 m，平均厚度 103.76 m（图 7），总体变化趋势为北高南低，小李镇和安新县城北存在局部凸起，三台镇西南和大王镇西北存在局部凹槽。第四系全新统—中更新统底界埋深 20.70～76.56 m，平均 55.86 m，厚度 26.94～84.46 m，平均厚度 57.52 m。下更新统地层厚度 59.30～147.77 m，平均厚度 88.47 m，发育 F_1、$F_{1\text{-}3}$断层。F_1 及其次级断裂位于三台镇地区，呈“Y”字形发育。F_1 为走向由 NW92.92 至 NE55.97，倾向由 NE 至 NW，倾角由 92.17°～94.26°的正断层，上断点最小埋深 103.44 m；$F_{1\text{-}3}$ 为走向 NE81.46，倾向 SE，倾角 7.08°的正断层，上断点埋深 119.75 m。

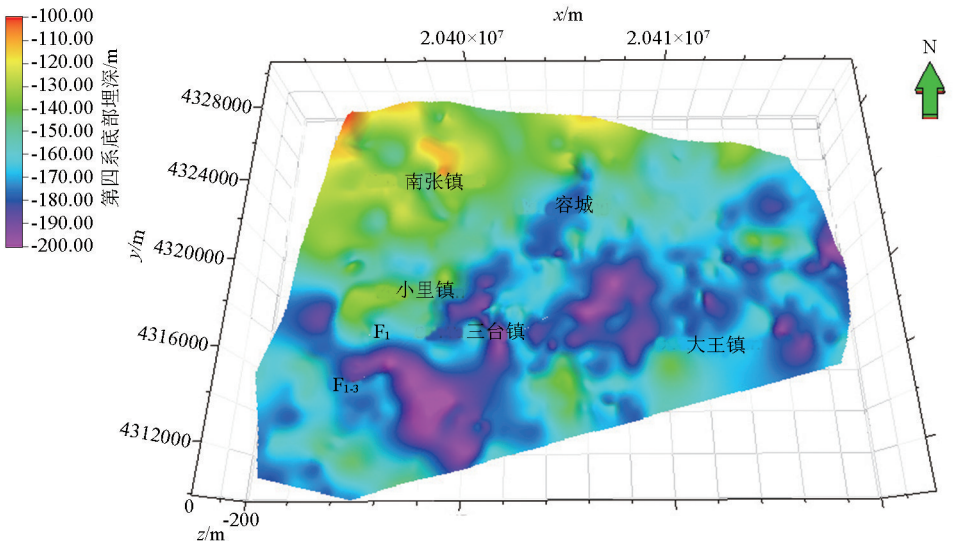

图 7　研究区第四系底界埋深

Fig.7　Buried depth map of the Quaternary bottom in the study area

4　适用性分析

根据雄安新区起步区实际探测效果,对比分析此次二维地震勘查和高密度电阻率测深解决地质问题的能力(表 1),总结物探技术在沉积盆地的综合探测效果。结合在雄安新区开展的其他地球物理方法,建立不同深度地下地质结构探测模式和城市地下空间探测方法技术体系。

表 1　雄安新区地球物理方法适用性分析

Table1　Applicability analysis of geophysical methods in Xiong´an New Area

物探方法	探测深度	探测精度	解决地质问题
二维地震	30~2500 m	横向分辨率:取决于道间距,1、2.5、5 m。 纵向分辨率:深度不同垂向分辨率不同: ①30~200 m:分辨率 3~5 m,可识别测井视电阻率大于 35 Ω · m 的厚度不小于 4 m 的中细—中粗砂层; ②200~600 m:分辨率 5~10 m; ③600~2 500 m,分辨率 10~30 m。	①划分砂层和粉质黏土层,刻画地层结构,识别“隆—凹”格局; ②查明断裂构造分布规律及空间展布特征; ③确定 2500 m 以浅地热储层埋藏深度、厚度和其他地质信息; ④为工程地质孔连孔提供空间层位信息和约束。
高密度电阻率测深	0~150 m	横向分辨率取决于点距,一般认为是点距的二分之一:2.5、5 m。 纵向分辨率:深度不同垂向分辨率不同: ①0~50 m:分辨率 5~8 m; ②50~120 m:分辨率 8~15 m; ③120~150 m:分辨率 15~22 m。	①识别浅部地层岩性,建立岩—电关系结构,刻画地层特征; ②了解地下水分布特征; ③为工程钻孔间地层连接和古河道砂体分布提供依据。

5　结论

1)通过在雄安新区核心区开展二维地震和高密度电阻率测深联合探测,将雄安新区 200 m 以浅工程建设层刻画为 4 套地层,地层序列自上而下包括新生界第四系全新统—中更新统、下更新统和新近系明化镇组,下更新统及以下地层发育容南断裂和其次级断裂。

2)以地球物理勘查数据为主要建模数据、钻孔和测井为约束条件的多源数据构建雄安新区 200 m 以浅三维地质模型,能够更加真实地反映地质体的三维空间结构特征。建模过程中,不同地球物理方法之间的数据融合难度较大,仍需开展进一步研究。

3)结合实际探测效果,对地球物理探测方法解决地质问题的能力进行分析和研究,能够指导沉积盆地城市地下空间地球物理探测。

参考文献(References):

[1]　孙冬胜,刘池阳,杨明慧,等.渤海湾盆地冀中坳陷中区中新生

代复合伸展构造[J].地质论评,2004,50(5):484-491.
Sun D S,Liu C Y,Yang M H,et al.Study on complex extensional structures in the middle Jizhong depression in the Bohai bay basin [J].Geological Review,2004,50(5):484-491.

[2] 于长春,乔日新,张迪硕.雄安新区航磁推断的三维基底构造特征[J].物探与化探,2017,41(3):385-391.
Yu C C,Qiao R X,Zhang D S.The basement tectonic characteristics from interpretation of aeromagnetic data in Xiong´an region [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(3):385-391.

[3] 杨百存,秦四清,薛雷,等.雄安新区地震危险性评估[J].地球物理学报,2017,60(12):4644-4654.
Yang B C,Qin S Q,Xue L,et al.Seismic hazard assessment in the Xiongan New Area [J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(12):4644-4654.

[4] 何登发,单帅强,张煜颖,等.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,2018,48(9):1207-1222.
He D F,Shan S Q,Zhang Y Y,et al.3-D geologic architecture of Xiongan New Area: Constraints from seismic reflection data [J].Science China,2018,48(9):1207-1222.

[5] 佘雅文,付广裕,高原,等.华北地区中东部岩石圈挠曲与均衡特性以及地震活动性分析[J].地球物理学报,2018,61(11):4448-4458.
She Y W,Fu G Y,Gao Y,et al.Flexure of the lithosphere,isostatic characteristic and seismicity in middle east area of North China [J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(11):4448-4458.

[6] 商世杰,丰成君,谭成轩,等.雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J].地球学报,2019,40(6):836-846.
Shang S J,Feng C J,Tan C X,et al.Quaternary activity study of major buried faults near Xiongan New Area [J].Acta Geoscientica Sinica,2019,40(6):836-846.

[7] 邓起东.城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J].地震地质,2002,24(4):601-605.
Deng Q D.Exploration and seismic hazard assessment of active faults in urban areas [J].Seismology and Geology,2002,24(4):601-605.

[8] 张迪,吴中海,李家存,等.综合多频率地质雷达天线探测活断层浅层结构——以玉树活动断裂为例[J].地质力学学报,2019,25(6):1138-1149.
Zhang D,Wu Z H,Li J C,et al.The application of multi-frequency GPR antenna for imaging the shallow subsurface features in the Yushu active fault [J].Journal of Geomechanics,2019,25(6):1138-1149.

[9] 赵镨,姜杰,王秀荣.城市地下空间探测关键技术及发展趋势[J].中国煤炭地质,2017,29(9):61-66.
Zhao P,Jiang J,Wang X R.Urban underground space exploration key technologies and development trend [J].Coal Geology of China,2017,29(9):61-66.

[10] 刘永生,龙桃城,刘仁义.瞬变电磁法在城市地质调查应用中有关问题的探讨[J].岩土工程技术,2019,33(3):173-177.
Liu Y S,Long T C,Liu R Y.Discussion on relevant problems in application of TEM in urban geological survey [J].Geotechnical Engineering Technique,2019,33(3):173-177.

[11] 张保卫,张凯,岳航羽,等.江苏滩涂区浅层地震探测方法技术应用[J].物探与化探,2018,42(1):144-153.
Zhang B W,Zhang K,Yue H Y,et al.Application of shallow seismic exploration method in Tidal-flat region of Jiangsu Province[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(1):144-153.

[12] 张晓波,王成善,王志辉,等.广东省潼湖生态智慧区浅层地球物理探测与地层物性分析[J].地质学报,2019,93(11):2935-2946.
Zhang X B,Wang C S,Wang Z H,et al.Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis of the Tonghu ecological smart zone,Guangdong Province [J].Acta Geologica Sinica,2019,93(11):2935-2946.

[13] 王朱亭,张超,姜光政,等.雄安新区现今地温场特征及成因机制[J].地球物理学报,2019,62(11):4313-4322.
Wang Z T,Zhang C,Jiang G Z,et al.Present-day geothermal field of Xiongan New Area and its heat source mechanism[J].Chinese Journal of Geophysics,2019,62(11):4313-4322.

[14] 万天丰.中国大地构造学[M].北京:地质出版社,2011.
Wan T F.The tectonics of China[M].Beijing:Geological Publishing,2011.

[15] 徐杰,高战武,宋长青,等.太行山山前断裂带的构造特征[J].地震地质,2000,22(2):111-122.
Xu J,Gao Z W,Song C Q,et al.The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang Mountain[J].Seismology and Geology,2000,22(2):111-122.

[16] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊,等.冀中坳陷古近纪的伸展构造[J].地质论评,2002,48(1):58-67.
Yang M H,Liu C Y,Yang B Y,et al.Extensional structures of the Paleogene in the central Hebei Basin[J].China Geological Review,2002,48(1):58-67.

[17] 范玉璐,谭成轩,张鹏,等.雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J].地球学报,2020,41(4):482-491.
Fan Y L,Tan C X,Zhang P,et al.A study of current in-situ stress state and its influence on tectonic stability in the Xiongan New Area[J].Acta Geoscientica Sinica,2020,41(4):482-491.

[18] 郝爱兵,吴爱民,马震,等.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,2018,39(5):513-522.
Hao A B,Wu A M,Ma Z,et al.A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface-underground space in Xiongan New Area[J].Acta Geoscientica Sinica,2018,39(5):513-522.

[19] 张竞,马震,吴爱民,等.基于岩性光谱特征的雄安新区地面古河道识别研究[J].地球学报,2018,39(5):542-548.
Zhang J,Ma Z,Wu A M,et al.A study of paleochannels interpretation by the spectrum of lithology in Xiongan New Area[J].Acta Geoscientica Sinica,2018,39(5):542-548.

[20] 马震,夏雨波,王小丹,等.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,2019,46(S2):123-129.
Ma Z,Xia Y B,Wang X D,et al.Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiongan New Area[J].Geology in China,2019,46

(S2):123 - 129.

[21] 酆少英,龙长兴,高锐,等.高分辨折射和浅层反射地震方法在活断层探测中的联合应用[J].地震学报,2010,32(6):718 - 724,767.
Feng S Y,Long C X,Gao R,et al.Joint application of high-resolution refraction and shallow reflection exploration approach to active fault survey[J]. Acta Seismologica Sinica,2010,32(6):718 - 724,767.

[22] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电阻率测深的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576 - 584.
Yan J Y,Meng G X,Lyu Q T,et al.The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2012,36(4):576 - 584.

[23] 马岩,李洪强,张杰,等.雄安新区城市地下空间探测技术研究[J].地球学报,2020,41(4):535 - 542.
Ma Y,Li H Q,Zhang J,et al.Geophysical technology for underground space exploration in Xiongan New Area[J].Acta Geoscientica Sinica,2020,41(4):535 - 542.

[24] 邓小娟,酆少英,朱学申,等.利用二维活断层探测资料构建焦作地区浅层三维构造模型[J].大地测量与地球动力学,2020,40(7):682 - 687.
Deng X J,Feng S Y,Zhu X S,et al.Using the 2D active fault seismic data to construct the shallow 3D structural model of Jiaozuo area[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2020,40(7):682 - 687.

[25] 刘顺昌,徐德馨,张春梅.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,2016(4):160 - 163.
Liu S C,Xu D X,Zhang C M.Build and application of the 3D geological model in WuHan urban development Zone [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying,2016(4):160 - 163.

2D seismic and high-density resistivity sounding reveal the shallow three-dimensional geological structure characteristics of Xiong´an New Area

LONG Hui,XIE Xing-Long,LI Feng-Zhe,REN Zheng-Wei,WANG Chun-Hui,GUO Shu-Jun

(*Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey,China Geology Survey,Baoding 071051,China*)

Abstract: The Xiong´an New Area is located in the middle part of the Jizhong Plain.The Cenozoic strata in the underground structure of the area have a large thickness,good stratification,and relatively stable tectonic activities.To finely determine the shallow geological structures,ascertain the fault structure characteristics,and improve the shallow exploration accuracy,this study combined two-dimensional seismic surveys and high-density resistivity sounding and made the following important progress.①This study finely determined the geological structure and the spatial distribution characteristics of fault structures at a depth of less than 200 m in the Xiong´an New Area;②This study constructed a three-dimensional visualized geological structure model,which intuitively displays the stratigraphic fluctuation pattern of Cenozoic strata and the spatial distribution of main fault structures;③This study analyzed and summarized the application of geophysical methods under the background of urbanization-induced high disturbance,including their exploration depths,horizontal and vertical resolution,response characteristics of geological bodies,and applicability.This study effectively supports and serves the planning,construction,and underground-space development and utilization in the Xiong´an New Area and serves as a reference for the geophysical exploration of urban underground space in hugely thick sedimentary basins.

Key words: Xiong´an New Area;2D seismic;high-density resistivity sounding;3D geological structure;fracture structure

(本文编辑:叶佩)