

雄安新区东北部地面沉降成因探讨

闫星光, 卢泽昌, 张进才, 赵伟玲, 陈 勇, 雒寒梦, 褚立峰

A discussion of the cause of land subsidence in the northeast of the Xiongan New Area

YAN Xingguang, LU Zechang, ZHANG Jincai, ZHAO Weiling, CHEN Yong, LUO Hanmeng, and CHU Lifeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析

Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China

董燕, 孙璐, 李海涛, 张作辰, 张源, 李刚, 郭小彪 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 172-181

雄安多要素城市地质标准体系研究

A study of the multi-factor urban geology standard system in Xiongan New Area

林良俊, 韩博, 马震, 张曦, 李红英, 夏雨波, 郭旭, 裴艳东, 李海涛, 李洪强, 王雨山 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 152-156

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198-206

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146-153

江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律

Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jianghan Plain

蔡玲, 胡成, 陈植华, 王清, 王宁涛, 常威, 黄琨 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 18-25

集束式监测井成井工艺研究

A study of the well-forming technology of a cluster monitoring well

张建良, 李文鹏, 孙梓航, 李长青, 王进卫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 44-48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207019

闫星光, 卢泽昌, 张进才, 等. 雄安新区东北部地面沉降成因探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 173-184.

YAN Xingguang, LU Zechang, ZHANG Jincai, *et al.* A discussion of the cause of land subsidence in the northeast of the Xiongan New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 173-184.

雄安新区东北部地面沉降成因探讨

闫星光^{1,2,3}, 卢泽昌^{1,2,3}, 张进才^{1,2,3}, 赵伟玲^{1,2,3}, 陈 勇^{1,2,3}, 雒寒梦^{2,3}, 褚立峰^{1,2,3}

- (1. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 沧州 061000;
2. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021;
3. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北 石家庄 050021)

摘要: 为深入研究雄安新区东北部地面沉降主控因素, 以大营镇分层标组为研究对象, 利用常规土工试验、高压固结试验与分层沉降观测数据, 结合前人研究成果对地面沉降成因进行探讨。结果表明: 大营镇分层标组 G1 孔内第四系松散层总厚度 412 m, 其中浅部地层(第 I、II 含水组)厚度约 170 m, 黏性土占比 66.4% ~ 80.2%, 结构松散, 砂黏互层交替频繁, 释水条件较好。浅部黏性土颗粒较细、分选性好、孔隙度大, 液性指数多大于 0.25, 呈软塑、可塑态, 自重压缩系数为 0.03 ~ 0.43, 均值 0.08, 与深部相比压缩性较强。浅部黏性土层以欠固结、正常固结夹欠固结状态为主, 0 ~ 90 m 超固结比均值为 0.55, 90 ~ 280 m 超固结比均值为 0.89, 易于发生塑性变形, 形成永久性沉降。雄安新区主要开采浅层地下水, 地面沉降与地下水关系密切。2020 年 12 月—2021 年 12 月, 大营镇分层标组监测结果显示, 第四系松散层总沉降量为 61 mm。其中, 5 ~ 160 m 第四系松散层沉降贡献量最大, 为 42 mm, 表现为塑性形变特征; 160 ~ 415 m 第四系地层沉降贡献量小, 为 19 mm, 表现为黏弹塑性形变特征。过量开采浅层地下水引起浅部固结程度低、压缩性高的黏性土层发生塑性变形是发生严重沉降的主要原因。

关键词: 雄安新区; 土体物理指标; 固结状态; 分层监测; 成因讨论

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0173-12

A discussion of the cause of land subsidence in the northeast of the Xiongan New Area

YAN Xingguang^{1,2,3}, LU Zechang^{1,2,3}, ZHANG Jincai^{1,2,3}, ZHAO Weiling^{1,2,3}, CHEN Yong^{1,2,3},
LUO Hanmeng^{2,3}, CHU Lifeng^{1,2,3}

- (1. Hebei Cangzhou Groundwater and Land Subsidence National Observation and Research Station, Cangzhou, Hebei 061000, China; 2. Hebei Geo-Environment Monitoring, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;
3. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: In order to deeply study the main controlling factors of land subsidence in the northeast of the Xiongan New Area, the layered monitoring points of Daying Town are taken as the research object, and the causes of land subsidence are discussed based on the conventional soil test, high pressure consolidation test and layered

收稿日期: 2022-07-12; 修订日期: 2022-12-04

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20189142); 河北省地质勘查项目(13000021ERSLSM726QL5K)

第一作者: 闫星光(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地面沉降、地裂缝监测与防治。E-mail: yanxg1989@126.com

通讯作者: 卢泽昌(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事地面沉降、地裂缝监测与防治。E-mail: luzechang521@163.com

settlement observation data combined with previous research results. The results show that the total thickness of the Quaternary loose layer in the layered monitoring points of G1 hole in Daying Town is 412 m, and the thickness of the shallow layer is 170 m. The viscous soil accounts for 66.4%–80.2%. The structure is loose and the sand-clay interlayer alternates frequently, and the water release condition is good. The shallow viscous soil has finer particles, good sortability, large porosity, and more than 0.25 liquid index, showing a soft plastic and plasticable state. The dead weight compression coefficient ranges from 0.03 to 0.43, with an average value of 0.07. Compared with the deep soil, the shallow viscous soil is of stronger compressibility. The shallow cohesive soil layer is dominated by underconsolidation, normal consolidation and underconsolidation. The average OCR of a depth of 0–90 m is 0.55, and that of 90–280 m is 0.89. Plastic deformation and permanent settlement are easy to occur. Xiongan New Area mainly exploits shallow groundwater, which is closely related to land subsidence. From December 2020 to December 2021, the monitoring results of the layered monitoring points of Daying Town show that the total settlement of the Quaternary loose layer is 61 mm. Among them, the subsidence contribution of the shallow Quaternary unconsolidated layer at a depth of 5–160 m is the largest, which is 42 mm, showing the characteristics of plastic deformation. The subsidence contribution of the deep Quaternary strata at 160–415 m is 19 mm, which shows the characteristics of viscoelastic-plastic deformation. The plastic deformation of cohesive soil layer with low consolidation and high compressibility caused by the excessive exploitation of shallow groundwater is the main cause of serious settlement.

Keywords: Xiongan New Area; material index of soil mass; consolidation state; layered monitoring; cause of land subsidence discussion

地面沉降是一种多因素综合作用引起的缓变性地质灾害,具有区域性、不可逆性、垂向累加性等特点,对城市规划、工程建设、工程运营的影响显著。地面沉降已经演变成一个全球性问题,通常是由人类工程活动引起的,主要原因为过量开采地下水^[1-2],同时地下油气开采、地热资源开采、地质构造活动、地表荷载等也会对地面沉降产生影响^[3-7]。开展地面沉降机理研究是进行地面沉降预测、制定治理措施和进行有效防御的依据^[8]。地层岩性及结构特征是产生地面沉降的重要地质背景,地下水位变化是土体经历重复机械加载-卸载的循环动力,在长期开采地下水条件下,含水层和弱透水层的变形包括弹性、塑性、黏弹性和黏塑性变形等^[9-10]。诸多学者通过室内土工试验、固结试验等方法,模拟研究不同地区不同条件下土体的变化规律^[11-14],利用分层标监测识别沉降区的土体压缩层位、贡献程度及变化特征^[2,15-18],对于分析地面沉降原因,防控地面沉降提供了很好的借鉴作用。

地面沉降是雄安新区的主要地质灾害类型^[19],社会关注度高,防治任务迫切。雄安新区地面沉降广泛发育,大部分地区发育程度一般,严重区主要集中在东北部和南部^[20-23]。雄安新区东北部沉降严重区分布于雄县大营镇—北沙口一带,呈北东向展布,区内

地面沉降连续多年快速发展,2012—2016年最大沉降速率为75 mm/a^[20],2017—2019年最大沉降速率超过80 mm/a^[21-22]。以雄安新区东北部大营镇分层标组为研究对象,一方面利用建设中取得的地层资料、岩芯样品,开展土工试验、高压固结试验,对深部地下松散土体自重条件下可压缩性、固结状态等方面进行研究。另一方面,通过开展持续性地面沉降分层监测,明确了第四系沉降主要发生层位,提高了研究区地面沉降垂向分布特征、变化规律方面的认识,为地面沉降精准防控提供了依据。

1 研究区概况

雄安新区位于河北平原中部冲湖积平原内,地势平坦开阔,西北高、东南低。研究区位于雄安新区东北部,区域平均沉降速率多大于30 mm/a,局部超过70 mm/a^[24](图1)。大地构造位置上处于中朝准地台(I级)华北断坳(II级)冀中台陷(III级)牛驼镇断凸(IV级)内,区域周边发育多条隐伏断裂,包括牛东断裂、容东断裂、徐水南断裂等,新近纪后除牛东断裂外均已停止活动,牛东断裂构造活动性也明显减弱^[25]。研究区内地表出露地层为第四系松散层,下伏新近系明化镇组和蓟县系雾迷山组,新近系馆陶组、古近系地层在牛驼镇断凸内缺失,表现为明化镇组直

接覆盖于蓟县系之上^[25]。区域内第 I、II 含水层组为第四系浅层地下水, 农业灌溉、工业用水主要开采浅层地下水, 第 III、IV 含水层组为第四系深层地下水, 生活用水主要开采深层地下水^[26]; 第 V 含水层组为明化镇组热储层, 为新区禁止开采的热储层^[24]; 第 VI 含水层组为蓟县系雾迷山组基岩热储层, 开采井主要分布在雄县县城, 研究区内少量分布^[27]。

2 研究方法

2.1 研究对象

大营镇分层标组位于雄县大营镇文家营村东, 地处雄安新区东北部沉降区内, 包括 5 个分层标孔和 2 个地下水位观测孔。其中, 分层标孔控制深度分别为: 5, 48, 160, 225, 415 m, 水位观测层位分别为: 71.55~150 m、334.88~401.25 m。工程地质孔(G1)终孔深度 552.08 m, 钻孔直径 130 mm, 全孔取心, 取心工具为直径 108 mm、壁厚 6 mm 的岩心管, 揭穿研究区

整个第四系地层, 具有研究区域地面沉降的典型性和代表性。

2.2 采样与测试方法

试验样品取自大营镇分层标组工程地质孔 G1, 为最大限度减少土样扰动, 防止土样氧化及水分蒸发, 采样与钻探同步进行, 样品用铝皮封装并蜡封, 测试前 4~6℃ 低温保存。取样深度范围为 0~547 m, 其中 0~100 m 地层每隔 2~3 m 取一个样, 100~547 m 地层每隔 4~5 m 取一个样。样品规格: 直径 102 mm×长度 300 mm。除砂性土层采取扰动土样外, 其余均为原状土样, 共取原状土样 113 个。原状土样进行常规物理力学性质测试, 包括天然密度、孔隙度、比重、含水率、液塑限、液塑指数、颗粒组成等, 测试方法参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[28] 等规范。按照垂向均匀布置原则, 选取对应原状土样 89 个, 开展高压固结试验, 对不同深度土样按照终级加压荷载超过自重压力数十倍标准, 采用分级倍增加

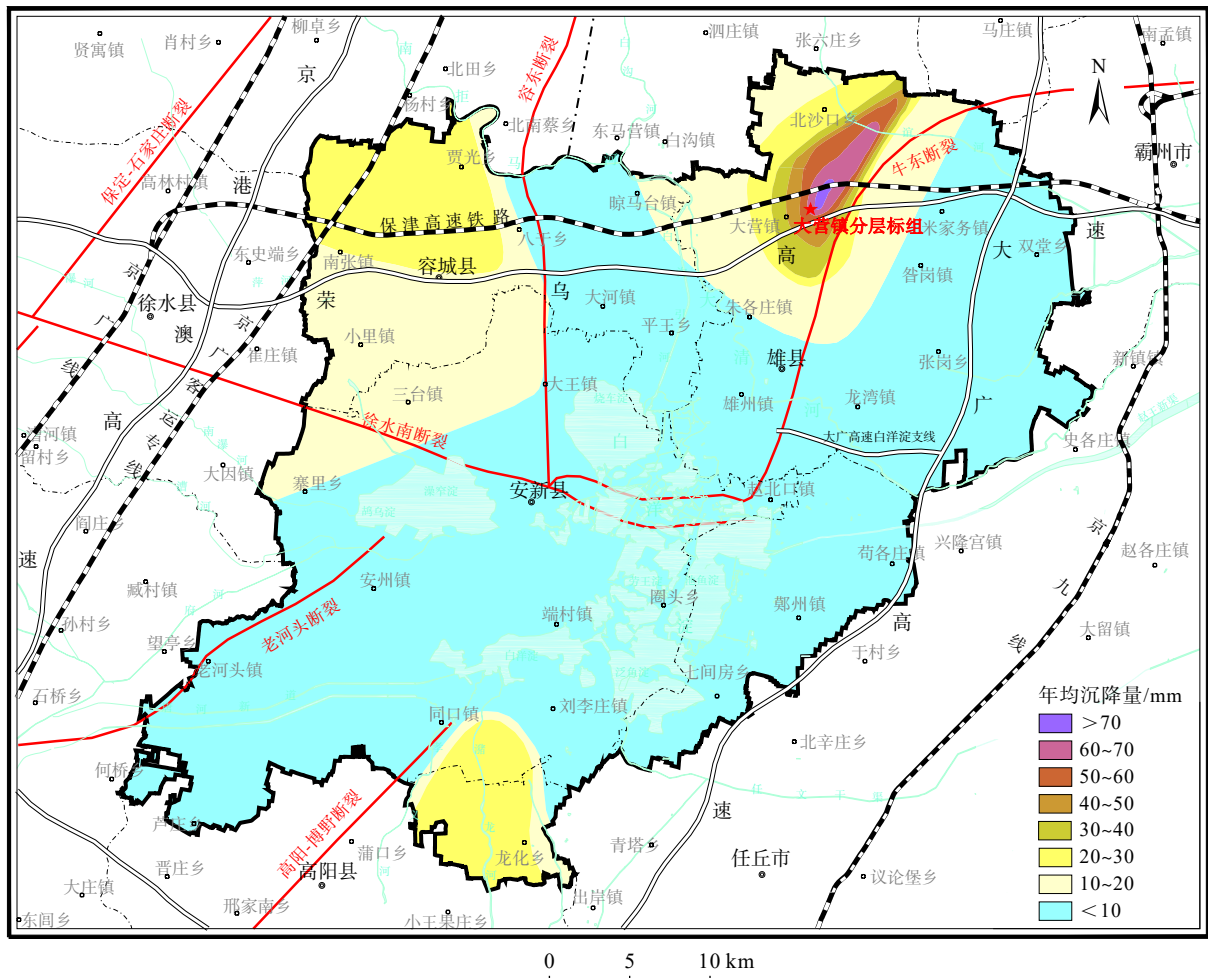


图1 雄安新区地面沉降平均速率图(据文献[24]改编)

Fig.1 Average land subsidence rate in the Xiongan New Area (modified after Ref.[24])

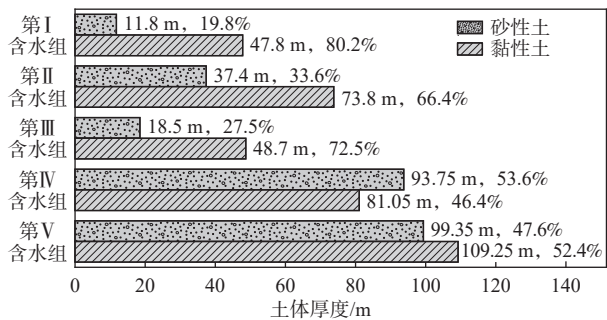


图 3 含水组厚度及砂黏比例图

Fig. 3 Diagram showing aquifer thickness and clay-sandy soil scale

重要因素^[12]。大营镇分层标组 G1 孔黏土样主要包括黏土、粉质黏土、砂质黏土及少量粉土。其中 0~100 m 地层主要为粉质黏土,上部含少量粉土;100~410 m 地层为粉质黏土、砂质黏土与黏土交替互层出现;410~552.08 m 地层为砂质黏土与黏土交替出现。黏性土颗粒主要包括砂粒组(粒径>0.075 mm)、粉粒组(0.075 mm≥粒径>0.005 mm)和黏粒组(粒径≤0.005 mm),粉粒组在垂向上平均占比最大,为 61.29%,黏粒组次之,为 26.36%,砂粒组最小为 12.35%。垂向由上到下,粉粒逐渐减少,黏粒逐渐增多,砂粒呈波动性变化增大趋势(图 4)。说明随着深度的增加,土粒构成逐渐不均匀,大颗粒间的孔隙有足够的细颗粒充填。另外,从各含水组黏性土颗粒配级曲线(图 5)也可以看出,

第 I、II 含水组黏性土样颗粒组成较为均匀,曲线较陡,分选性好。第 III、IV、V 含水组黏性土样颗粒配级曲线较平缓,分选性差。总体而言,浅部黏性土颗粒较细,分选性好,孔隙度大,易于压实沉降,随着深度增加,分选性变差,孔隙度变小,压缩性减弱。

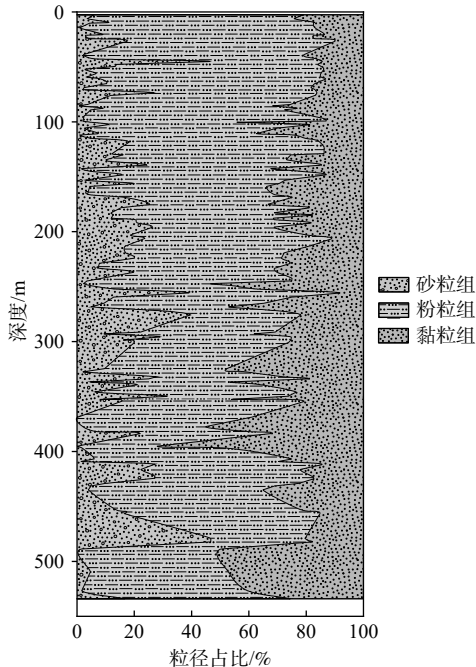


图 4 黏性土各粒径占比随深度变化曲线图

Fig. 4 Curves of each particle size of clay soil with depth

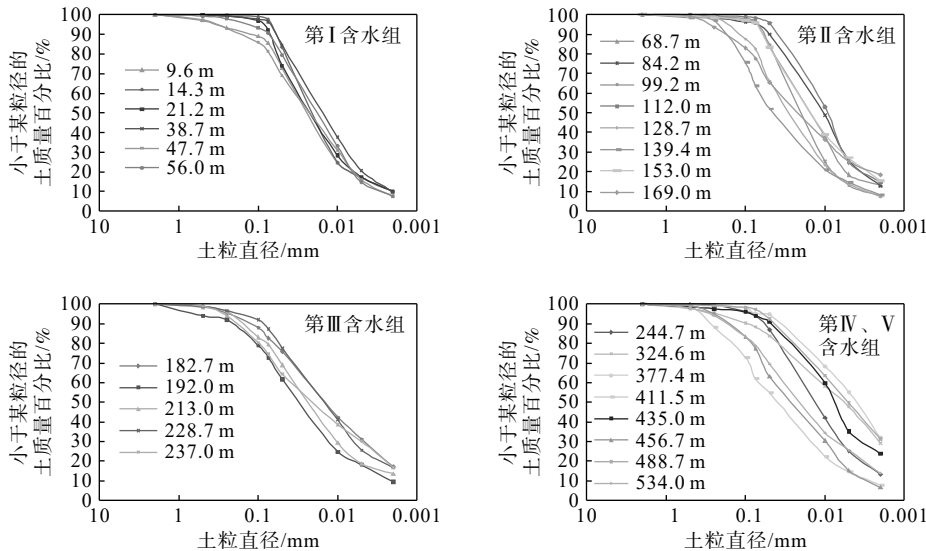


图 5 不同含水组黏性土颗粒配级曲线图

Fig. 5 Particle size distribution curve of clayey soil in different aquifer groups

黏性土的孔隙比、比重、含水率等物理指标是影响黏性土固结的重要因素^[13],分析土体各项物理指标,对研究地面沉降及土体压缩性十分重要。测试结

果表明(图 6),土体的物理指标之间是存在相关性的,其中孔隙比与天然含水率、液性指数呈正相关性,与干密度呈负相关性,相关系数值分别为 0.926, 0.501,

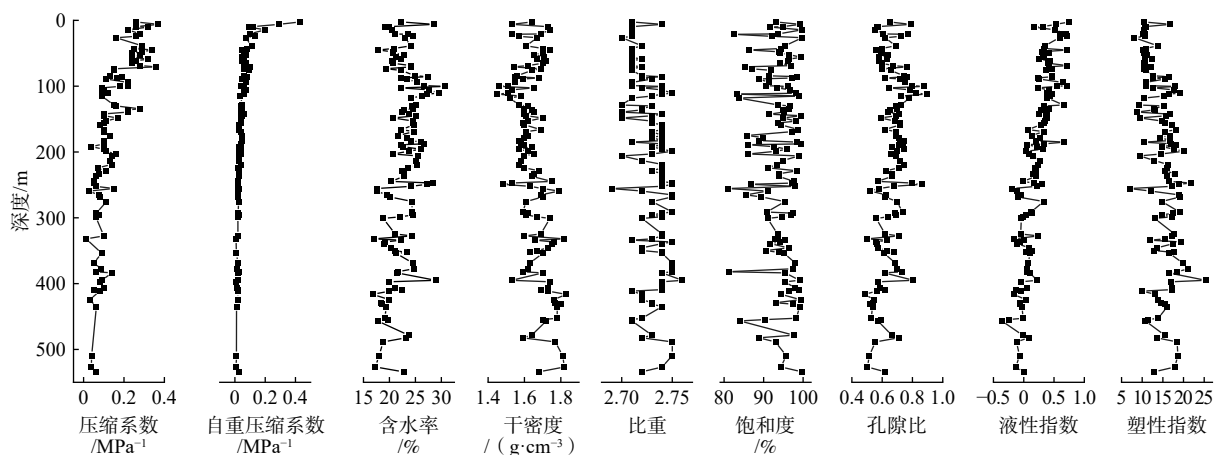


图 6 黏性土物理性质参数随深度变化曲线图

Fig. 6 Curves of physical property parameters of clay with depth

注: 压缩系数 150 m 以浅为实测数据, 150 m 以深为高压固结试验 e - $\lg P$ 曲线截取。

-0.990; 塑性指数与比重呈正相关性, 相关系数值为 0.979。

大营镇分层标组 G1 孔土体天然含水率位于 16.8% ~ 30.7%, 孔隙比位于 0.485 ~ 0.894, 两者随深度变化趋势几乎一致, 呈先增大后减小趋势, 饱和度变化趋势不明显, 平均饱和度 94.39%, 处于较高水平。说明浅部地层地下水开采程度较高, 深部地层地下水开采程度相对较弱。随着深度增加, 深层土体固结程度逐渐增大, 含水量逐渐减少, 孔隙减小, 结构越来越密实, 饱和度相对稳定。土的比重 (G_s) 是评价土体类型的指标之一, 大营镇分层标组 G1 钻孔土体比重值多处于 2.72 ~ 2.74 之间, 以粒度较细的粉质黏土和黏土为主, 易于产生永久性压实形变。土体密度反映土体松密程度, 孔内干密度随着深度增大呈先减少后增大趋势, 与天然含水率、孔隙比趋势相反, 孔隙体积小, 结构较为密实, 相对不易压缩。

液性指数 (I_L) 反映黏性土软硬程度, 液性指数越大, 土质越软, 反之越硬。大营镇分层标组 G1 孔土体液性指数由浅及深逐渐变小, 呈现出由软塑态向硬塑态、半固态发展趋势。0 ~ 50 m 黏性土接近软塑态, 50 ~ 180 m 黏性土整体为可塑态, 液性指数多大于 0.25, 土体受力后易于发生变形。180 ~ 400 m 黏性土主要处于硬塑态, 地下水开采量不大的情况下, 受力发生变形的程度较低。400 ~ 552.08 m 黏性土基本属于半固态, 质地坚硬, 受力不易变形。塑性指数 (I_p) 反映黏性土可塑性的大小, 土颗粒越细, 比表面积越大, 其亲水性能越高, 处在可塑状态的含水量变化范围就越大。大营镇分层标组 G1 孔塑性指数变化范围较大,

在 6.95 ~ 25.36 之间, 均值 14.56, 垂向上随深度变化不明显, 大部分土为中塑状态, 以粉质黏土、黏土为主, 少量粉土。说明土体的可塑性整体较强, 一旦发生形变, 难以恢复, 容易形成较高程度永久性地面沉降。

压缩系数 (a) 是综合土体各项物理性质反映土体压缩性的指标。工程压缩系数 (a_{1-2}) 是指压力 100 ~ 200 kPa 条件下土体的压缩系数, 常用于工程上评价土体压缩性。自重压缩系数 a_c 是指土体在自重压力下的压缩系数, 先计算出土层的自重压力 (P_0), 然后在土体压缩曲线 e - $\lg P$ 上, 截取自重压力下的应力和孔隙比变化, 计算自重压缩系数^[12], 反映土体在地层中的真实压缩性。为了判断和比较土的压缩性, 分别采用工程压缩系数和自重压缩系数分析土体压缩性在不同深度上的表现规律, 并进行比较。

工程压缩系数随深度呈逐渐变小趋势, 0 ~ 100 m 黏性土主要为中等压缩性, $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 100 ~ 552.08 m 黏性土主要为低压缩性, $a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 。100 ~ 552.08 m 黏性土的压缩系数与含水率、孔隙比、液限指数在垂向变化上具有一定程度的相关性, 0 ~ 100 m 相关性较差, 说明土体压缩性除了跟物理性质指标有关以外, 还与土体的固结状态、土体的受力历史以及在地层中的应力状况等因素有关。

自重压缩系数与工程压缩系数相比 (图 6), 整个深度范围内数值和波动性均偏小, 说明土样在钻孔取出后解除了其在天然条件下所受上覆自重压力, 具有明显的回弹性且回弹程度存在差异。自重压缩系数在地层垂向上具有明显分段性, 0 ~ 150 m 土体真实压缩性较强, 随深度逐渐减小, 变化较明显, 压缩系数

0.03~0.43,均值为0.08;150~250 m土体真实压缩性随深度缓慢减小,变化趋势减弱,压缩系数0.02~0.05,均值为0.03;250~552.08 m土体真实压缩性趋稳,处于较低水平,压缩系数0.01~0.02,均值为0.018,深度对自重压缩系数的影响很小。

3.3 黏性土固结状态

地面沉降主要是由于黏性土发生塑性形变导致。黏性土层变形包括弹性变形和塑性变形两部分,超固结土层弹性变形量大于塑性变形量,正常固结土层弹性与塑性形变量相当,欠固结土层塑性变形量大于弹性形变量,土体弹性形变量在水位反复升降过程中保持相对稳定^[14]。土的固结程度是影响地层压缩的重要指标^[31]。确定黏性土的固结状态,对于分析地面沉降成因尤为关键。

通过高压固结试验,采用卡萨格兰德法作图确定 P_c 。通过土体的天然密度、比重、含水率、重度(非饱和带为天然重度,饱和带为有效重度)等物理性质参

数,计算土层自重压力。如图7所示,0~90 m黏性土层以欠固结状态为主,超固结比(OCR)为0.19~0.91,均值0.55,在未释水的状态下也会产生自然压缩;90~280 m黏性土层多为正常固结夹欠固结状态, OCR 值存在较大波动性,为0.4~1.2,均值为0.89,反映不同深度黏性土释水条件具有差异,距离含水层较近的黏性土层容易排水压缩,固结程度比远端的黏性土层要高;280~552.08 m黏性土层基本都处于正常固结状态,局部含欠固结程度较高的松散夹层, OCR 值为0.35~1.08,均值0.93,表明基本没有受到地下水开采影响,地层应力处于平衡状态,土体保持相对稳定。整体上看,黏性土层以欠固结、正常固结状态为主,具备了发生永久性地面沉降的条件。另外,在深度84 m($OCR=1.16$)、深度260 m($OCR=1.20$)处存在两处超固结黏性土层,从钻孔柱状图上可以看到这两处附近存在粗砂层,并处在区域地下水主要开采层段,说明这主要是由于大量开采地下水所致。

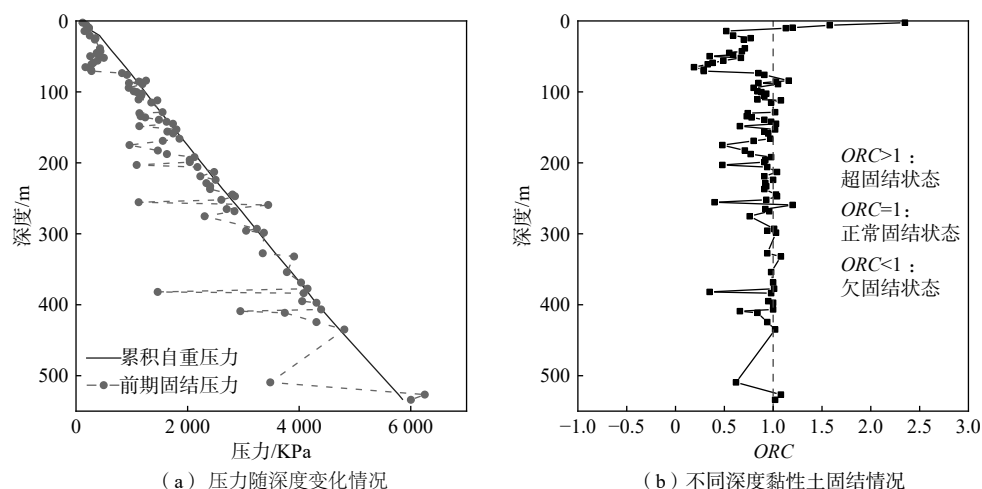


图7 G1孔黏性土固结状态随深度变化曲线图

Fig. 7 Curves of consolidation state of cohesive soil with depth in G1

3.4 地面沉降垂向发育特征

根据大营镇分层标组监测数据(图8),2020年12月—2021年12月,5~415 m第四系地层总体表现为持续压缩形变,压缩量为61 mm,其中5~48 m地层压缩形变量13 mm,占比21.31%;48~160 m地层压缩形变量29 mm,占比47.54%;160~225 m地层压缩形变量6 mm,占比9.84%;225~415 m地层压缩形变量13 mm,占比21.31%。5~160 m地层压缩形变量为42 mm,占比68.85%,是第四系地层发生地面沉降的主要贡献层段(图9)。通过观察各层形变曲线变化规律,5~160 m地层形变随时间逐渐压缩,其中48~

160 m层段地层形变随水位升降持续压缩,如图10(a)所示,水位快速下降,地层快速压缩,水位回升,形变速率明显变缓,表现为塑性变形特征。160~415 m地层形变随时间呈波动性变化,其中225~415 m深部地层随水位波动发生压缩或回弹,如图10(b)所示,具有明显滞后性,形变滞后2~3个月,表现为黏弹塑性变形特征。总体而言,第四系浅部地层沉降贡献量大,主要发生塑性变形,而深部地层沉降贡献量相对较小,主要发生黏弹塑性变形。

为了进一步评价各层沉降贡献情况,根据地层厚度,计算了各层段地层单位厚度年均沉降量(年沉降

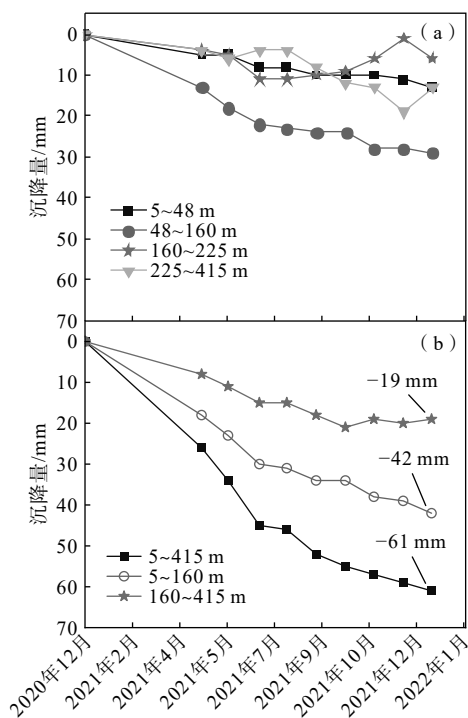


图 8 大营镇分层标组各层形变曲线图

Fig. 8 Deformation curve of the layered monitoring results in Daying Town

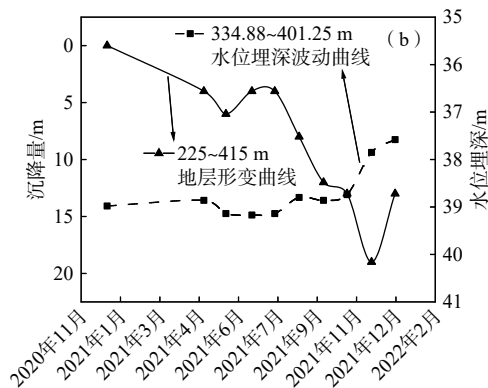
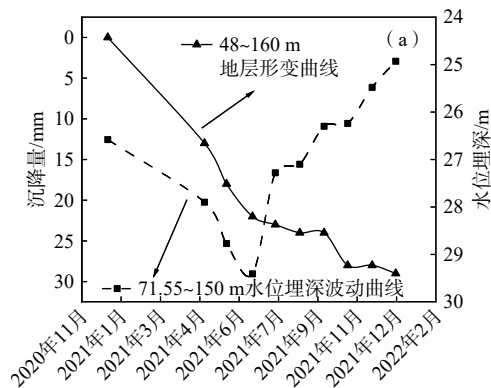


图 10 大营镇分层标组地层形变与水位关系图

Fig. 10 Relationship between formation deformation and groundwater levels in Daying Town

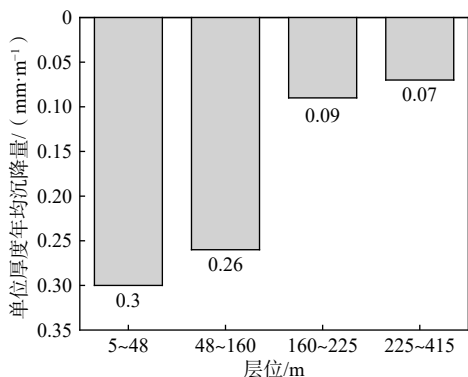


图 11 大营镇分层标组地层单位厚度年均沉降量图

Fig. 11 Average annual subsidence of unit layer in Daying Town

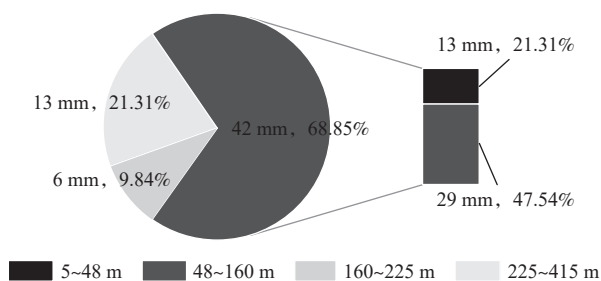


图 9 研究区各层段沉降贡献图

Fig. 9 Subsidence contribution of each layer in the study area

量除以地层厚度), 如图 11 所示, 5~48 m 地层单位厚度年均沉降量为 0.30 mm/m, 48~160 m 为 0.26 mm/m, 160~225 m 为 0.09 mm/m, 225~415 m 为 0.07 mm/m, 可以看出, 5~160 m 地层单位厚度年均沉降量是 160~415 m 的 3~4 倍。因此从地层单位厚度年均沉降量角度分析, 5~160 m 第四系地层依然是发生严重地面沉降的主要贡献层位。

4 地面沉降原因讨论

引起地面沉降的原因有人为因素和自然因素, 人

为因素主要包括过量开采地下水以及石油、天然气、地热开采等, 我国和世界上主要的地面沉降都是由过量开采地下水造成的^[32]。在区域地质构造背景条件下, 地面沉降主要与土体的变形特点和地下水水位变化模式有关。华北平原地下水长期超采, 形成多个地下水降落漏斗, 并引发了严重的地面沉降^[33]。Guo 等^[34]认为华北平原地面沉降主要是由深部含水层系统地下水过度抽取引起的。深部承压含水层和正常胶结、松散胶结的可压缩性黏土层构成的多层含水层体系是有利于沉降发展的关键地质和水文地质条件, 地下水抽采导致地层内有效应力分布增加, 含水

系统受到挤压引发地面沉降。构造作用和自然沉降不是引起地面沉降的主要原因。相关结论在华北平原北京、天津、沧州、德州等典型地区中也得到了佐证^[12-13, 15, 35]。另外,我国云林、昆明地区及印尼万隆盆地也表现出类似的沉降成因特点^[2, 36-37]。

雄安新区位于华北平原中北部,多位学者在时间、空间上就雄安新区产业类型、空间布局以及地下资源开采状况与地面沉降发育分布情况进行了相关性讨论。张永红等^[20]认为雄安新区累计沉降量与地热井的位置分布之间存在很强的空间相关性,同时塑料包装企业及纺织企业等消耗大量地下水加剧了地面沉降发展,推断地面沉降是由二者综合作用的结果。冉培廉等^[22]同样认为雄安新区地面沉降与地下水和地热资源的过度开采有关。此外,马峰等^[24]从多个角度分析了雄安新区地面沉降的影响因素,得出新区地面沉降的发生主要受第四系地层中地下水的超采和砂岩热储的采灌不平衡两个因素的影响,前者是主因。由此可见,研究区地面沉降发展与地下水资源开采密切相关。

大营镇分层标组 G1 孔内基岩以上沉积物厚度 620 m,第四系厚度 412 m,岩性多以粉质黏土、砂质黏土、黏土与中细砂、粉砂构成,砂黏互层结构,单层厚度较小,交替频繁,黏性土厚度普遍较大,地层结构易于黏性土释水固结,这是连续多年发生持续性地面沉降的前提条件。

大营镇分层标组 G1 孔内黏性土在地层自重压力下的压缩性随着深度增加不断减小,0~150 m 土体自

重压缩系数相对较大,250~552.08 m 土体自重压缩系数趋稳,处于较低水平。0~280 m 黏性土多呈欠固结、正常固结夹欠固结状态,深部黏性土以正常固结为主,一定程度的地下水开采会驱动或加剧欠固结、正常固结土体的固结压缩。

雄安新区以开采浅层地下水为主,开采深层地下水开采相对较少。浅层、深层地下水水位均表现为连续多年下降(图 12),水位降幅总体程度相当,为 15~20 m。浅层地下水主要为农业用水,补给条件好,农闲时期水位回升明显,水位表现为波动式下降;而深层地下水主要为生活用水,虽然开采量小,但补给条件差,地下水位表现为多年持续下降。含水层水位下降,黏性土层与含水层之间产生水头差,在水力梯度影响下黏性土层中的水向含水层释出,导致孔隙水压力减小,作用于岩土骨架的有效应力增加,土体颗粒产生旋转、位移、重新排列,颗粒之间排列更加紧密,孔隙被压缩变小,致使黏性土层发生变形产生沉降。主要地下水开采层段的历史水位降幅相当,引起的有效应力增量大致相同,当作用于不同压缩性与固结程度土体时,产生的形变程度会有差异。根据分层标监测结论,5~160 m 地层沉降贡献率为 68.85%,地层平均沉降量相对较大,对应层位黏性土压缩性相对较高、固结程度低;而 160~415 m 第四系地层沉降贡献率为 31.15%,地层总体厚度较大,地层单位厚度年均沉降量比浅层减小数倍。由此可见,研究区过量开采浅层地下水引起的浅部地层压缩是发生严重沉降的主要原因,同时叠加了开采深层地下水导致的部分沉降。

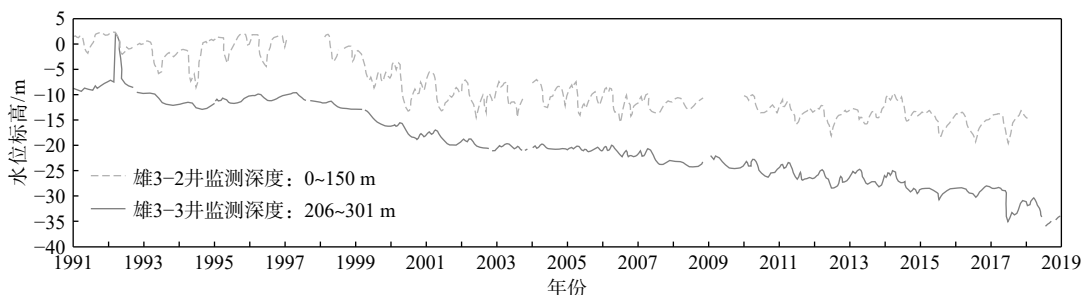


图 12 雄安新区浅层、深层地下水水位历时曲线(据文献[23]修改)

Fig. 12 Chanes of groundwater levels in the Xiongan New Area with time (modified after Ref.[23])

雄安新区新近纪以来处于相对稳定的构造位置,断裂活动性微弱,牛驼镇断凸内,新近系明化镇组直接覆盖于蓟县系地层之上,构造活动及区域地壳运动引起的地面沉降忽略不计。由于缺少同期绝对高程监测数据,未能对明化镇组沉降情况进行定量

分析,但明化镇组热储层为新区禁止开采的热储层,基岩热储在研究区内存在少量开采,通常情况下认为基岩热储层与上覆含水层不会发生水利联系^[24],推断研究区第四系以下地层对地面沉降的影响较为有限。

5 结论及建议

通过研究地层结构特征,土体物理力学性质,地面沉降贡献情况及与地下水位变化关系等内容,开展成因讨论,主要得出以下结论:

(1)雄安新区地面沉降分布广泛,大部分地区发育程度较轻,沉降严重区集中在雄安新区东北部和南部,近年发展速度较快。雄安新区东北部主要开采浅层地下水,沉降贡献层位主要为第四系浅部地层,地面沉降与地下水开采关系密切。

(2)研究区浅部地层黏性土厚度大,可塑性强,砂性土厚度大,结构松散,砂黏互层交替频繁,黏性土释水条件较好。浅部黏性土以粉质黏土为主,颗粒较细,分选性好,自重压力下土体的压缩性较强。浅部黏性土层以欠固结、正常固结夹欠固结为主,深部黏性土以正常固结为主。从岩性组构特征、黏性土压缩性及固结状态分析,浅部地层易于发生塑性变形,形成永久性沉降。

(3)研究区 5~160 m 第四系松散层贡献量最大,占比可达 68.85%,表现为塑性形变特征;160~415 m 第四系地层贡献占比 31.15%,表现为黏弹塑性形变特征。5~160 m 地层单位厚度年均沉降量是深部地层的 3~4 倍,第四系浅部地层,对应第 I、II 含水层组,是地面沉降发育的主要贡献层位。

(4)浅层地下水过量开采引起浅部固结程度低、压缩性高的黏性土层发生塑性变形是发生严重沉降的主要原因,深层地下水开采造成的沉降相对较小。

雄安新区东北部第四系地面沉降主要发生在浅部地下水开采层段,建议在现状基础上压减沉降严重区浅层地下水开采量,并对水位和沉降情况开展持续分层观测,及时分析总结控沉效果。雄安新区缺少地热分层标,难以支撑地热开采层的沉降研究工作,建议在现有第四系分层标组基础上,补建地热分层标。

参考文献 (References):

- [1] XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Land subsidence in China[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(6): 713 – 720.
- [2] HSU W C, CHANG H C, CHANG K C, et al. Observing Land Subsidence and Revealing the Factors That Influence It Using a Multi-Sensor Approach in Yunlin County, Taiwan[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 8202 – 8223.
- [3] 李红,肖国强,杨吉龙,等.天津滨海新区地面沉降层位的精准识别与沉降过程重建[J].地质通报,2016, 35(10): 1646 – 1652. [LI Hong, XIAO Guoqiang, YANG Jilong, et al. Precise identification of land-subsiding layers and reconstruction of subsidence process in Tianjin Binhai New Area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1646 – 1652. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 赵慧.地面沉降的人为主控因素研究[D].西安:长安大学,2005. [ZHAO Hui. The research of land subsidence's master-control factor created by men[D]. Xi'an: Changan University, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ABIDIN H Z, ANDREAS H, GUMILAR I, et al. Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): characteristics, impacts and causes[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2013, 4(3): 226 – 240.
- [6] 龚士良.上海城市建设对地面沉降的影响[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(2): 108 – 111. [GONG Shiliang. Effects of urban construction on the land subsidence in Shanghai[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(2): 108 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 胡彩萍,张景燕,郝梦圆,等.黄河三角洲生态区孔隙热储地热开发对地面沉降的影响分析[J].*山东国土资源*, 2017, 33(2): 39 – 42. [HU Caiping, ZHANG Jingyan, HAO Mengyuan, et al. Impact analysis of geothermal development on land subsidence in the Yellow River Delta[J]. *Shandong Land and Resources*, 2017, 33(2): 39 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 姚书灵,高金川,容姣.几种典型成因类型的地面沉降机理分析及其防治对策[J].台声 新视角,2006(1): 243 – 244. [YAO Shuling, GAO Jinchuan, RONG Jiao. Mechanism analysis and prevention measures of several typical causes of land subsidence[J]. *New Angle of View*, 2006(1): 243 – 244. (in Chinese with English abstract)]
- [9] AL-MAHBASHI A M, AL-SHAMRANI M A, ABBAS M F. Hydromechanical behavior of unsaturated expansive clay under repetitive loading[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1136 – 1146.
- [10] ZHANG Yun, WU Jichun, XUE Yuqun, et al. Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(8): 1851 – 1866.
- [11] SUDDEEPONG A, CHAI Jinchun, SHEN Shuilong, et al. Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading-reloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(8): 1035 – 1044.

- [12] 肖国强. 深部粘性土高压固结机理与地面沉降过程研究——以天津滨海新区G2孔为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. [XIAO Guoqiang. Study on mechanism of clayey soil by high pressure consolidation and process of land subsidence: A case study of the G2 geologic drill-hole in Tianjin Binhai New Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郭海朋, 丁国平, 朱菊艳, 等. 沧州地面沉降区粘土压缩变形和渗透特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 111 – 117. [GUO Haipeng, DING Guoping, ZHU Juyan, et al. Compression deformation and permeability characteristics of clay in land subsidence area of Cangzhou[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(5): 111 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨吉龙, 袁海帆, 胡云壮, 等. 天津滨海地区深部黏土层弹塑性变形特征与地面沉降关系研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3763 – 3772. [YANG Jilong, YUAN Haifan, HU Yunzhuang, et al. Relationship between elastoplastic deformation of deep clay and land subsidence in Tianjin coastal area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3763 – 3772. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 田芳, 郭萌, 罗勇, 等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 236 – 242. [TIAN Fang, GUO Meng, LUO Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 236 – 242. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 雷坤超, 马凤山, 罗勇, 等. 北京平原区现阶段主要沉降层位与土层变形特征[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 442 – 458. [LEI Kunchao, MA Fengshan, LUO Yong, et al. Main subsidence layers and deformation characteristics in Beijing plain at present[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 442 – 458. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 朱利民, 沙志华, 段晓飞, 等. 基于分层标监测的德州城区地面沉降分层沉降特征浅析[J]. 山东国土资源, 2020, 36(8): 32 – 39. [ZHU Limin, SHA Zhihua, DUAN Xiaofei, et al. Analysis on characteristics of layered settlement of land subsidence in urban area of Dezhou city based on layering marks monitoring[J]. Shandong Land and Resources, 2020, 36(8): 32 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 146 – 153. [HE Jianhui, ZHANG Jincai, CHEN Yong, et al. Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 146 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 林良俊, 韩博, 马震, 等. 雄安多要素城市地质标准体系研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 152 – 156. [LIN Liangjun, HAN Bo, MA Zhen, et al. A study of the multi-factor urban geology standard system in Xiongan New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 152 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张永红, 刘冰, 吴宏安, 等. 雄安新区2012—2016年地面沉降InSAR监测[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 652 – 662. [ZHANG Yonghong, LIU Bing, WU Hongan, et al. Ground subsidence in Xiong'an new area from 2012 to 2016 monitored by InSAR technique[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 652 – 662. (in Chinese with English abstract)]
- [21] DAI Keren, RAN Peilian, LI Zhenhong, et al. Land subsidence in Xiong'an New Area, China revealed by InSAR observations[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2021, 4(1): 70 – 76.
- [22] 冉培廉, 李少达, 戴可人, 等. 雄安新区2017—2019年地面沉降SBAS-InSAR监测与分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 66 – 73. [RAN Peilian, LI Shaoda, DAI Keren, et al. SBAS-InSAR monitoring and analysis of land subsidence in Xiongan New Area from 2017 to 2019[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(3): 66 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 马震, 夏雨波, 李海涛, 等. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 677 – 696. [MA Zhen, XIA Yubo, LI Haitao, et al. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 677 – 696. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 古潜山热储开发对地面沉降的影响机制研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 40 – 51. [MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Influence mechanism of ancient buried hill geothermal development on land subsidence[J]. Geology in China, 2021, 48(1): 40 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 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:地球科学,2018,48(9):1207-1222. [HE Dengfa, SHAN Shuaiqiang, ZHANG Yuying, et al. Geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1207-1222. (in Chinese)]
- [26] 李海涛, 凤蔚, 王凯霖, 等. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1112-1126. [LI Haitao, FENG Wei, WANG Kailin, et al. Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1112-1126. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 苏永强, 李郡. 雄安新区地热资源评价与开发应用潜力分析[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(4): 62-67. [SU Yongqiang, LI Jun. Evaluation of geothermal resources and their potential utilization in Xiongan New Area[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(4): 62-67. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [29] 中华人民共和国自然资源部. 地面沉降测量规范: DZ/T 0154—2020[S]. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Land subsidence measurement specification: DZ/T 0154—2020[S]. (in Chinese)]
- [30] 中华人民共和国国土资源部. 地面沉降调查与监测规范: DZ/T 0283—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification for survey and monitoring of land subsidence: DZ/T 0283—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)]
- [31] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1115-1127. [GUO Haipeng, BAI Jinbin, ZHANG Youquan, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1115-1127. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 薛禹群. 论地下水超采与地面沉降[J]. 地下水, 2012, 34(6): 1-5. [XUE Yuqun. Discussion on groundwater overexploitation and ground settlement[J]. Ground Water, 2012, 34(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162-171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 162-171. (in Chinese with English abstract)]
- [34] GUO Haipeng, ZHANG Zuochen, CHENG Guoming, et al. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1415-1427.
- [35] 张永伟. 华北平原德州地面沉降成生机理、监测预警与可控性研究[D]. 济南: 山东大学, 2014. [ZHANG Yongwei. Formation mechanism, monitoring and warning, controlling research of subsidence of Dezhou in North China plain[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [36] ABIDIN H Z, GUMILAR I, ANDREAS H, et al. On causes and impacts of land subsidence in Bandung Basin, Indonesia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6): 1545-1553.
- [37] 薛传东, 刘星, 李保珠, 等. 昆明市区地面沉降的机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 47-54. [XUE Chuandong, LIU Xing, LI Baozhu, et al. Mechanism analysis of land subsidence in Kunming City area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(3): 47-54. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农