

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.04.010

引用格式:裴江涛,杨璐,骆祖江.江苏海门地区地面沉降成因分析[J].华东地质,2023,44(4):467-475.(PEI J T, YANG L, LUO Z J. Cause analysis of land subsidence in Haimen area of Jiangsu Province[J]. East China Geology, 2023, 44(4): 467-475.)

江苏海门地区地面沉降成因分析

裴江涛¹, 杨璐², 骆祖江¹

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100;2.江苏省地质工程勘察院,江苏 南京 211102)

摘要:以江苏海门地区水文地质和工程地质资料为基础,文章通过野外实地调查,结合相关文献资料,对该区近年来地面沉降发展历程进行了系统整理,分析了地面沉降的发展特征和分布规律,进而探讨地面沉降形成的原因。研究结果表明:海门地区早期第Ⅲ承压含水层地下水过度开采,导致全区整体发生沉降;但随着地下水计划开采的实施(2013年以后),沉降区域由全区转为局部,主要发生在软土分布与建筑荷载密集地区,主压缩层是潜水含水层、第Ⅰ黏性土弱透水层以及第Ⅰ承压含水层。区内软土分布与地面沉降关系密切,建筑荷载密集地区与地面沉降频发地区呈高度相关性,即软土分布与建筑荷载是目前地面沉降的影响因素。

关键词:江苏海门地区;地面沉降;软土;地下水;建筑荷载

中图分类号:P694;P954

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2023)04-467-09

地面沉降,又称地面下沉或地陷,是由于自然或人类工程经济活动影响,导致地下松散地层固结压缩,继而引起地壳表面高程降低,造成局部下降运动的现象^[1-3]。地面沉降是地层垂向变形的宏观表现形式,土体结构产生垂向变形是深层孔隙水的大规模开采,使深层水位迅速下降,孔隙水压力减小,有效应力发生变化所致^[4]。砂层压密引起的地面沉降量小,且为弹性释水压密,孔隙水压力恢复时,地面回弹。黏性土层压密方式为塑性释水压密,即使后期地下水位逐渐恢复,黏性土也不能发生回弹,从而造成永久性的地面沉降^[5]。

地面沉降的形成因素具有多样性,区域性地面沉降的形成与地壳运动、海平面上升等有密切关系。城市局部地面沉降与人类工程活动和地下水的过度汲取有关^[6]。目前多数研究重点关注地下水开采造成的城市局部地面沉降^[7-10],如薛禹群等^[11]通过分析苏南地区地下水水位与地面沉降发展历程,得出该区地面沉降与地下水开采有关的结论;胡喜梅等^[12]认为地下水开采产生了以海门等地区为中心的区域沉降

漏斗。近年,海门地区严格控制地下水开采量,但地面沉降仍然持续,因此地下水开采可能并非近期地面沉降唯一影响因素。结合区内地层浅部分布有大面积高压缩性松软土层,且近几年城市建筑荷载趋于密集,松散软弱土层和区域建筑荷载对区内地面沉降的影响也不容忽视,需综合考虑相关因素对区内地面沉降产生的影响。本文在搜集海门地区相关地质资料基础上,分析地面沉降发生的原因,为地面沉降防控工作提供合理依据。

1 研究区地质条件

海门地区位于江苏省东部,地处长江中下游冲积平原,其东部与启东市接壤,南濒崇明岛,东北部抵临黄海,市境坐标:31°46′~32°09′N,121°04′~121°32′E,总面积约1 148 km²(图1)。区内河渠纵横,水网密布,地势平坦,地面海拔高程一般为3~5 m,最高海拔5.2 m,最低海拔2.5 m,总体上由西北向东南方向逐渐降低。

* 收稿日期:2023-02-27 修订日期:2023-05-10 责任编辑:叶海敏

基金项目:国家自然科学基金“耦合高精度 InSAR 监测的区域性地面沉降模拟研究(编号:41874014)”项目资助。

第一作者简介:裴江涛,1998年生,男,硕士研究生,主要从事水文地质研究。Email:1359051979@qq.com。

通信作者简介:骆祖江,1964年生,男,教授,博士,主要从事水文地质、工程地质等研究。Email:luozujiang@sina.com。



图1 海门地区地理位置图
Fig. 1 Geographical location of Haimen area

1.1 第四纪地层

研究区属于下扬子地层分区,第四系广泛覆盖。自新近纪以来,区内持续下降接受沉积,沉积物主要来自长江。第四纪地层发育齐全,垂向上具多韵律发育特征,中下部以陆相沉积为主,上部为海陆交互相沉积,该区域自新近纪以来发生多次差异升降运动。根据岩性、岩相特征,自下而上划分为海门组、启东组、昆山组、涪湖组及如东组(表1)。

1.2 工程地质条件

研究区第四系从上到下可划分为9个工程地质层^[13](图2),分别为:

1-1 填土:各地均有分布,在局部沟壑中有较厚的填土,可分为杂填土和素填土两种。

1-2 冲填土:以沿江分布为主,以长江砂为主要成分,局部夹有粉土、淤泥质粉质黏土薄层。

表1 研究区第四纪地层简表^[13]
Table 1 Brief table of Quaternary strata in the study area^[13]

地层			厚度/m	主要岩性	沉积相
统	组	段			
全新统	如东组 (Q _h r)	上	2~15	灰黄色粉质黏土、粉土,灰色粉砂,含铁锰锈斑	河口
		中	13~44	灰-灰黑色粉砂、细砂,含泥质条带,下部灰黑色粉质黏土与粉细砂互层	滨海-浅海
		下	4~19	灰-深灰色粉细砂,夹灰褐色粉质黏土,含淤泥质	河口
上更新统	涪湖组 (Q _p g)	上	7~28	灰-灰黄色-深灰色粉细砂、含砾中粗砂,含碳化植物茎叶	河流
		中	5~31	灰-灰黄色粉砂、细砂,灰褐色粉质黏土,灰色含砾中粗砂	河床-河口
		下	7~30	灰-灰黄-灰绿色粉细砂、含砾中粗砂,局部夹粉质黏土或粉土	河流
	昆山组 (Q _p k)		6~32	底部为灰色含中粗砂;中上部为灰-青灰色粉砂、细砂,灰褐色粉质黏土	河床-河口
中更新统	启东组 (Q _p q)	上	18~48	上部为灰黄-灰绿色黏土、粉质黏土,含铁锰质及钙质结核;下部为灰蓝-灰黄色粉质黏土灰色细砂	河湖-河口
		下	15~47	灰黄-灰绿色黏土、粉质黏土夹黄灰色粉细砂,含砾中粗砂;下部为灰黄色粉质黏土,粉细砂,局部含砾	河湖
下更新统	海门组 (Q _p h)	上	4~48	灰白-灰色含砾中粗砂、粉细砂,局部夹粉质黏土	河流
		中	8~47	灰绿-棕黄色黏土、粉质黏土、粉细砂	河湖
		下	5~30	灰白-深灰色、含砾中粗砂、中细砂	河流

2-1 粉质黏土夹粉土:浅部地层均有分布,灰黄-灰色,可塑-软塑,以粉质黏土为主,夹少量粉土。

2-2 淤泥质粉质黏土夹粉土:局部分布,灰色,流塑,有明显的层次感,为不良工程地质层。

3 粉砂夹粉土:分布较多,青灰色,局部夹粉土、粉质黏土,饱和,中密,工程地质条件一般。

4 粉砂夹粉质黏土:普遍分布,青灰色,粉质黏

土局部淤质状,局部地区互层状分布,饱和,稍密,工程地质条件较差。

5 粉质黏土夹粉土:普遍分布,灰褐色,软塑,局部粉质黏土呈流塑状,略有光泽,局部与稍密状粉土互层状分布,工程地质条件差。

6 粉砂夹粉土:普遍分布,局部地区与粉土互层状分布,青灰色,饱和,中密,工程地质条件一般。

7 粉质黏土夹粉土:局部分布,灰色,可塑-软塑,夹粉土、粉砂,工程地质条件一般。

8 粉砂:均有分布,青灰色、灰色,局部夹灰褐色

粉质黏土薄层,工程地质条件好。

9 粉细砂:均有分布,青灰色、灰色,局部夹砾石,具有良好的工程地质条件。

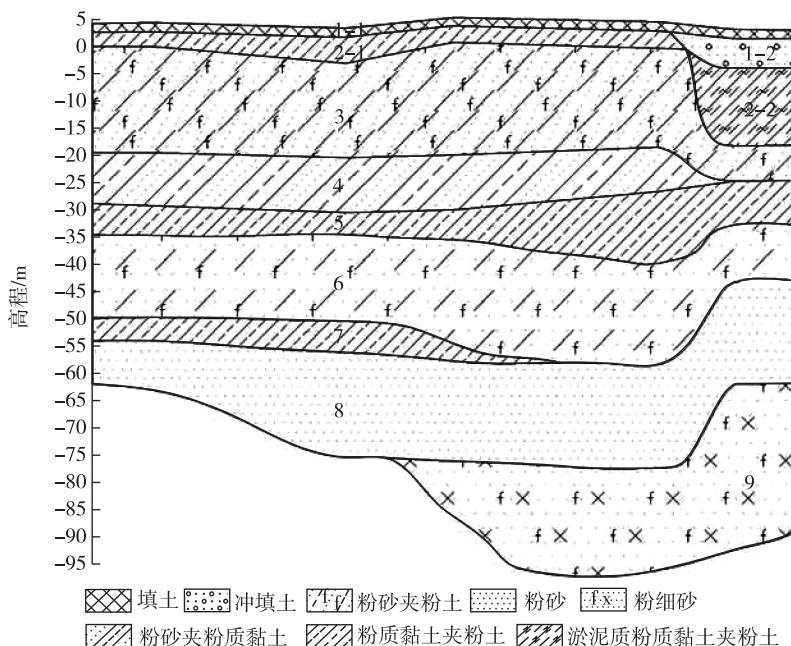


图2 研究区地工程地质剖面

Fig. 2 Engineering geology profile of the study area

1.3 水文地质条件

1.3.1 地下水类型与含水层组划分

根据赋存条件、含水层岩性、水理性质、水力特点等因素,可将研究区地下水分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水3类^[14]。其中,赋存松散岩类孔隙水的含水层由厚240~440 m的第四系松散沉积物和新近系松散沉积物构成,含水层位多,垂向上相互叠置,横向上延伸稳定,富水性较好,地下水资源储藏厚实。按含水层的时代成因、埋藏条件和水力联系等特点,该含水层从上到下依次划分为潜水含水层、I、II和III承压含水层4个含水层组^[14]。从区域上分析,各含水层组之间存在不同程度的水力联系,并构成复杂的地下水流系统。研究区典型水文地质剖面示意图见图3,松散岩类孔隙水含水层组特征如下:

(1)潜水含水层。为第四系全新统,潜水水位埋深为-0.8~3.69 m,单井涌水量一般在300 m³/d以下,地下水矿化度1.0~3.0 g/L,厚度为20~30 m,水质较差。目前区内无规模开采。

(2)第I承压含水层。为第四系上更新统,富水性较好,水质分布不均,单井涌水量3 000~

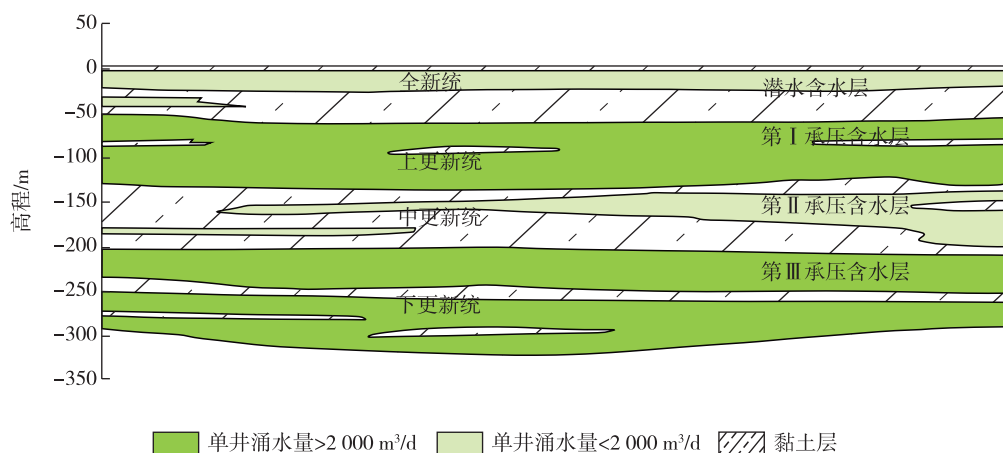
5 000 m³/d,水位埋深1.5~3.6 m,厚度40~70 m。

(3)第II承压含水层。为第四系中更新统,厚度为50~80 m,自西向东渐薄,单井涌水量1 000~2 000 m³/d,承压水头埋深3.0~5.0 m。水质复杂,三和镇以西矿化度不到1.0 g/L,为淡水,向东矿化度逐渐增高,向半咸水、咸水方向演变,至今仍未开采。

(4)第III承压含水层。为第四系下更新统,是海门地区的主要开采层之一,具有分布广泛、富水性强、水质优的特点。单井涌水量2 000~3 000 m³/d,局部地区超过3 000 m³/d,承压水头埋深15~25 m,厚度30~40 m,矿化度0.45~0.91 g/L,为淡水。

1.3.2 地下水水位动态特征

海门地区地下水开采始于20世纪70年代,迄今已有50余年历史,主要开采第III承压水。20世纪90年代末,由于工业的蓬勃发展,地下水开采量激增,至1999年,地下水年开采总量达到2 243万m³^[14]。2013年后,海门区政府加强了对地下水开采的管理,实行计划开采,使地下水开采量有所减少,地下水水

图3 研究区典型水文地质剖面示意图^[14]Fig. 3 Typical hydrogeological profile sketch of the study area^[14]

位逐年下降的趋势得到了有效的控制。压采初期地下水位迅速回升,随着时间推移,第Ⅲ承压含水层回升速率有所降低。表2为区内承压含水层历年开采井数及开采量^[14]。

表2 研究区承压含水层历年开采量统计^[14]Table 2 Statistics of exploitation of confined aquifer in the study area over the years^[14]

时间	第Ⅰ承压含水层		第Ⅲ承压含水层		第Ⅳ承压含水层	
	井数/ 个	开采量/ 万 m ³	井数/ 个	开采量/ 万 m ³	井数/ 个	开采量/ 万 m ³
2004	12	90	283	1 950	14	72
2007	13	33	283	1 210	21	117
2010	14	11.5	164	1 291	16	67.5
2014	17	21.5	232	854.6	13	69
2015	14	5.35	172	404.6	11	20
2016	14	4.7	172	279.8	11	27.7
2017	14	3.13	129	122.7	9	11.33
2018	14	0.97	129	77.41	9	1.36
2019	5	0	146	83.51	8	2.37

由2011—2020年第Ⅲ承压含水层水位等值线图^[14](图4)可知:2011—2012年海门地区地下水位下降3.3 m,地下水开采量大,且开采井分布均匀。第Ⅲ承压含水层水位在实施地下水压采政策后得到迅速恢复,由于上覆第Ⅲ黏性土弱透水层持续释水补给第Ⅲ承压含水层,加之黏性土层变形通常具有流变特性,因此在压采后较长的时间内,仍然呈

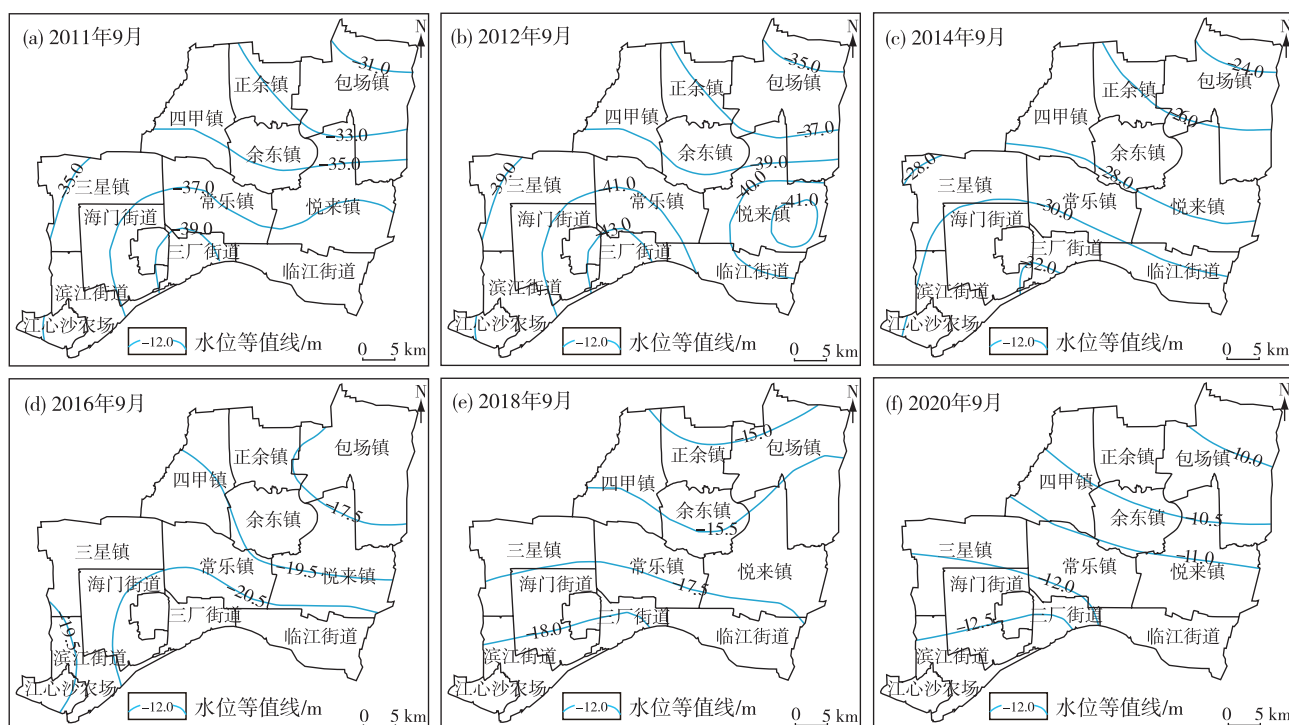
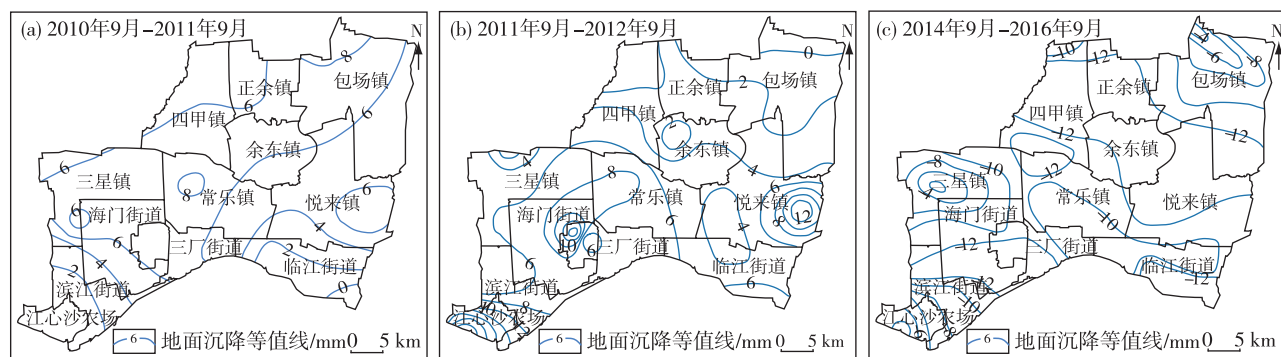
现出持续压缩的趋势;2014年9月—2016年9月地下水位总体回升值约8.2 m,第Ⅲ承压含水层发生较大回弹;2016年9月—2018年9月,第Ⅲ承压含水层水位回升约3.4 m;2018年9月—2020年9月,开采量进一步减小,第Ⅲ承压含水层水位总体回升约5.5 m。

2 研究区近年地面沉降特征

海门地区第Ⅲ承压含水层由于早期超采地下水,水位明显低于上覆含水层,因此在水力梯度的作用下,上覆含水层释水补给第Ⅲ承压含水层,产生一定沉降。建筑荷载引起的地面沉降主要发生于浅部地层,沉降漏斗以建筑荷载为中心,在研究区内通常呈点状分布。

由区内地面沉降监测资料(2010—2020年)^[15]可知,全区年平均沉降量<5 mm,下沉区累计变化值为-6~-33 mm,其中三厂街道东南角部分地区目前地面累计沉降已达119 mm。沉降量大的区域主要位于江心沙农场、海门经济技术开发区沿长江一带。

2010年9月—2011年9月,海门地区整体呈沉降趋势(图5(a)),沉降量由西南向东北方向逐渐增大,最大沉降量为常乐镇及包场镇北部区域,沉降量为8 mm。地面沉降现象在2011年9月—2012年9月持续发生(图5(b)),沉降主要集中在江心沙农场、海门街道和悦来镇东部地区,其中最大沉降量为18 mm。2014年9月—2016年9月,海门地区地下水位回弹量大于上覆土层释水压缩量

图4 研究区第Ⅲ承压含水层水位等值线图^[14]Fig. 4 Water level contour map of the III confined aquifer in the study area^[14]图5 2010年9月—2016年9月研究区地面沉降等值线图^[15]Fig. 5 Contour map of land subsidence from September 2010 to September 2016 in the study area^[15]

(图5(c)),呈现出整体回弹现象,其中三星镇、江心沙农场和包场镇北部地区回弹量较小,区内最大回弹量为12 mm。2016年9月—2018年9月,研究区内整体重回大范围沉降现象(图6(a)),这是由于上覆弱透水层的压缩量大于第Ⅲ承压含水层的回弹量,区内由南向北沉降现象渐为严重,其中江心沙农场沉降量最大时达到20 mm。2018年9月—2020年9月,研究区再次出现大范围回弹

现象(图6(b)),一方面是由于水位回升幅度大导致该层回弹量增加,另一方面随着第Ⅲ承压含水层水位回升,与上覆黏性土层间水力梯度减小,释水量也相应减少,且流变效应随时间递减,因此回弹量大于压缩量,总体上呈现出地面回弹趋势。其中中部及东南部地区回弹最为明显,最大回弹量为20 mm,全区仅江心沙农场北部出现地面沉降现象,沉降量为4 mm。

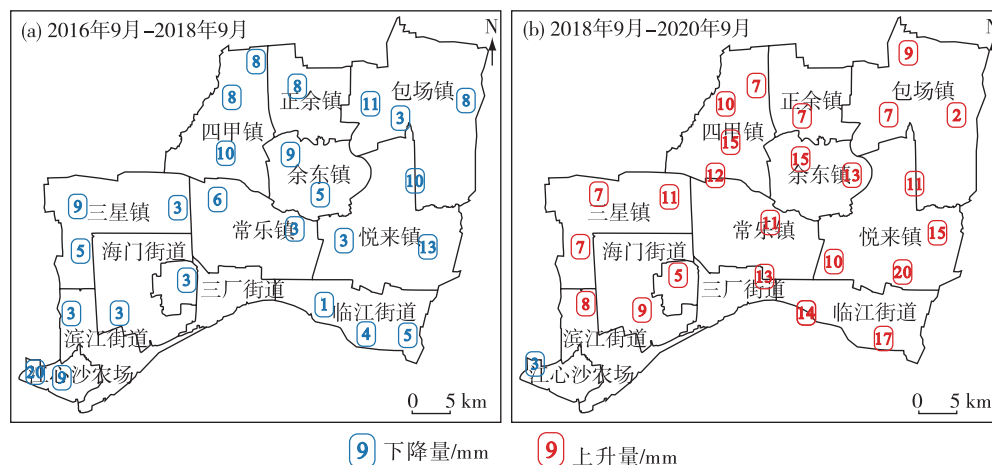


图6 2016年9月—2020年9月研究区各监测点地面沉降监测情况^[15]

Fig. 6 Land subsidence monitoring at each monitoring point from September 2016 to September 2020 in the study area^[15]

3 研究区地面沉降成因分析

3.1 软土

软土是呈软塑—流塑状态的一种土体的总称,以天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、透水性差等为主要特征^[16]。在工程建设中,软土由于受到上部建筑荷载的作用,易发生压密,压密作用的宏观外在表现形式为地面沉降,若不提前对软土地层进行预处理,会给工程带来极大的危害,如地基沉降、路面开裂和建筑物破裂等。

海门地区分布大面积的高压缩性松软土层,以淤泥质粉质黏土夹粉土为主,层顶埋深 17.9~29.7 m,层厚 2.0~21.1 m,含水率 31.6%~48.8%,孔隙比一般为 0.950~1.423,液性指数一般为 0.90~1.42,压缩模量一般为 2.53~5.37 MPa,有机质含量 1.12%~1.47%,为不良工程地质层^[13]。区内软土分布极不均匀(图 7),中部和北部分布较少,江心沙农场南部、三厂街道、包场镇和四甲镇均无软土分布,而三星镇、滨江街道和东南部等地区的软土厚度可达 15 m 以上,且埋深均>20 m^[13]。

根据收集到的海门地区软土分布情况,结合区内地面沉降资料,可知软土总体呈现为东北部厚度小于西南部,厚度由 20 m 到软土层缺失,这一分布特征与区内地面沉降特征大致相符,其中软土层最厚的三星镇、滨江街道及江心沙农场北部等地区,不同程度上产生了严重的地面沉降现象。

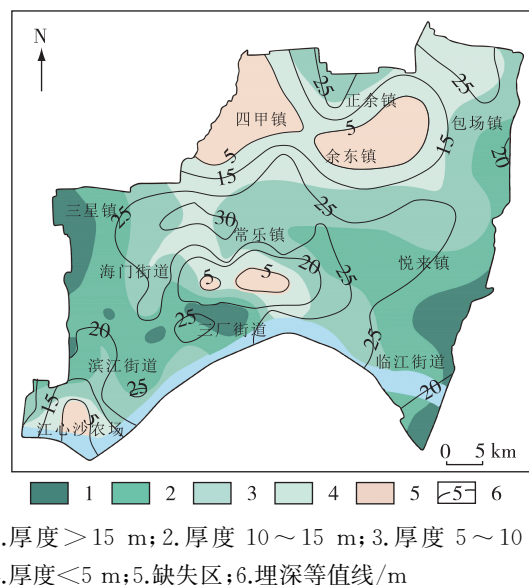


图7 研究区软土分布情况图^[13]

Fig. 7 The contour map of soft soil distribution in the study area^[13]

3.2 建筑荷载

为准确掌握海门地区建筑荷载分布情况,本次研究进行了建筑荷载调查,共调查得到荷载点 382 个(图 8)。建筑荷载主要分布在城镇地区,其中海门街道、滨江街道最为密集,紧随其后的为正余镇、包场镇、三星镇、江心沙农场、三厂街道以及临江街道(表 3)。新建的高层建筑物主要分布于正余镇、滨江街道、海门街道和江心沙农场西南部的造船厂。正余

镇荷载值大但建筑密度较小,因此引起局部的沉降。海门街道以及滨江街道荷载值大、密度大,引起大

面积的沉降;江心沙农场西南部的荷载值大,根据往年地面沉降监测资料,后续可能持续产生沉降。

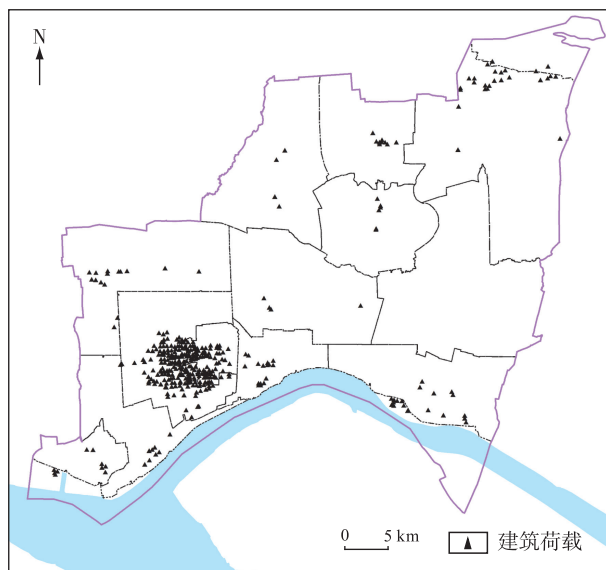


图 8 海门地区建筑荷载分布

Fig. 8 Building load distribution of Haimen area

表 3 海门地区建筑荷载主要分布区域

Table 3 The main distribution area of building load in Haimen area

位置	荷载点数量/个	平均等效荷载力/KN
海门街道	86	1 731 286
滨江街道	55	1 681 737
正余镇	27	429 240
包场镇	63	1 864 937
三星镇	22	684 776
江心沙农场	28	1 428 031
三厂街道	34	1 587 558
临江街道	32	1 528 065

根据监测资料与建筑荷载调查结果,海门地区局部地面沉降与区内建筑荷载分布相关性较大。如 2011 年 9 月—2012 年 9 月,海门街道沉降较为严重,部分区域沉降量达到 10 mm,而海门街道内的建筑荷载分布较为密集;2014—2016 年,全区域呈现出地面回弹的趋势,江心沙农场、三星镇、包场镇回弹量分别为 6 mm、4 mm、6 mm,其回弹量明显小于周边无建筑荷载的地区。其中江心沙农场西南部自 2011 年起由于建筑荷载大而持续产生沉降,仅在 2014—2016 年全区普遍发生大量回弹的情况下产生较小的回弹量(6 mm)。

3.3 讨论

海门地区的地面沉降发展与建筑荷载密切相关,也与地下水的动态有很大的关系,当水位下降或回升幅度小时产生沉降,而当水位回升幅度大时则产生回弹。

实行地下水压采前,海门地区主要开采的是地下水位变幅较大的第Ⅲ承压含水层,整体的地面沉降主要与第Ⅲ承压含水层水位动态有关。由于建筑荷载为局部分布,且附加应力在平面上影响范围有限,由此引发的地面沉降也较有限。

实行地下水压采后,地下水过度开采导致的地面沉降得到有效控制,但地面沉降仍在发生。对比区内沉降程度,建筑荷载分布密集的地区明显要严重于仅有软土分布的地区,如荷载值大的江心沙农场西南部的沉降值要比同时期软土分布地区的沉降值大,即使在区内出现大范围回弹的 2019 年,其回弹量(3 mm)也远小于悦来镇等软土广泛分布地区的回弹量(15 mm),这是由于其上覆建筑荷载持续施加垂向压力,使该地区第Ⅲ承压含水层的回弹量相对较小,总体呈现出轻微回弹^[15]。随着近期城市建设加快,区内建筑荷载趋于密集,加之软土层分布广泛、埋深浅、厚度大,使得建筑荷载成为当前引起海门地区地面沉降的首要原因。

4 结论

(1)软土分布与地面沉降关系密切。海门地区软土主要为淤泥质粉质黏土夹粉土,分布特征与地面沉降分布规律大致吻合,即软土较厚的地区,地面沉降量相对较大。

(2)地下水超采是海门地区早期地面沉降的主要因素。地下水过度开采导致区域整体地面沉降,主压缩层是第Ⅲ承压含水层及上覆弱透水层,上覆弱透水层的沉降发生具有明显的滞后性。后期(2013年以后)由于实行压采政策,由地下水超采引发的地面沉降得到有效治理。

(3)建筑荷载是造成当前海门地区地面沉降的主要原因之一。由建筑荷载引起的浅部土层压缩沉降,主压缩层是潜水含水层、第Ⅰ黏性土弱透水层以及第Ⅰ承压含水层,受建筑荷载影响较大的地区为正余镇、三星镇、江心沙农场、滨江街道和海门街道。

参考文献

- [1] 薛禹群,张云.长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J].华东地质,2016,37(1):1-9.
XUE Y Q, ZHANG Y. Land subsidence and land fissures in the southern Yangtze River Delta[J]. East China Geology, 2016, 37(1): 1-9.
- [2] 潘懋.灾害地质学[M].北京:北京大学出版社,2002:142.
PAN M. Disaster Geology[M]. Beijing: Peking University Press, 2002: 142.
- [3] 骆祖江,张鑫,田小伟.沧州市地面沉降灾害预测预警[J].工程地质学报,2018,26(2):365-373.
LUO Z J, ZHANG X, TIAN X W. Prediction and early warning of Cangzhou land subsidence disaster[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 365-373.
- [4] 李广信.关于有效应力原理的几个问题[J].岩土工程学报,2011,33(2):315-320.
LI G X. Some problems about principle of effective stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 315-320.
- [5] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004:290.
LI G X. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 290.
- [6] 赵文涛,李亮.苏锡常地区地面沉降机理及防治措施[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):88-93.
ZHAO W T, LI L. The mechanism of land subsidence and its prevention measures in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 88-93.
- [7] 周载阳.地下水开采引起地面沉降的机理研究[J].工程勘察,2012,40(3):22-26.
ZHOU Z Y. Mechanism research of land subsidence caused by groundwater extraction [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012, 40(3): 22-26.
- [8] 潘云,潘建刚,宫辉力,等.天津市区地下水开采与地面沉降关系研究[J].地球与环境,2004,32(2):36-39.
PAN Y, PAN J G, GONG H L, et al. Research on the relation between groundwater exploitation and subsidence in Tianjin Proper[J]. Earth and Environment, 2004, 32(2): 36-39.
- [9] 王明珠,万军伟,白通,等.德州市德城区砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响[J].华东地质,2021,42(2):202-209.
WANG M Z, WAN J W, BAI T, et al. The influence of geothermal resources exploitation of sandstone thermal reservoir on land subsidence in Decheng District, Dezhou City[J]. East China Geology, 2021, 42(2): 202-209.
- [10] ALFARO P, LIESCH T, GOLDSCHIEDER N. Modelling groundwater over-extraction in the southern Jordan Valley with scarce data [J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(5): 1319-1340.
- [11] 薛禹群,吴吉春,张云,等.长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(4):477-492.
XUE Y Q, WU J C, ZHANG Y, et al. Simulation study of land subsidence in the Yangtze River Delta (southern) region[J]. Science China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(4): 477-492.
- [12] 胡喜梅,马传明,邓波,等.江苏省沿海地区地面沉降风险评价[J].地质科技情报,2017,36(2):222-228.
HU X M, MA C M, DENG B, et al. Risk evaluation of land subsidence in Coastal Areas of Jiangsu Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(2): 222-228.
- [13] 江苏省地质环境勘查院.南通市海门工程地质调查报告[R].南京:江苏省地质环境勘查院,2021:28-33.
Geological Environment Exploration Institute of Jiangsu Province. Geological survey report of Haimen engineering in Nantong City[R]. Nanjing: Geological

- Environment Exploration Institute of Jiangsu Province, 2021: 28-33.
- [14] 骆祖江,张也,李兆,等.南通市海门区建筑荷载和地下水开采叠加作用对地面沉降影响耦合模型研究[R].南京:河海大学,2022:29-33.
- LUO Z J, ZHANG Y, LI Z, et al. Study on the coupling model of the influence of the superposition of building load and groundwater exploitation on land subsidence in Haimen District of Nantong City[R]. Nanjing: Hohai University, 2022: 29-33.
- [15] 张也.海门地区建筑荷载和地下水开采与地面沉降耦合研究[D].南京:河海大学,2022.
- ZHANG Y. Study on coupling of building load, groundwater exploitation and land subsidence in Haimen Area[D]. Nanjing: Hohai University, 2022.
- [16] 常福庆,石守亮,张一,等.广州南沙小虎岛围堤软土工程危害与处理对策[J].人民黄河,2010,32(2):132-133.
- CHANG F Q, SHI S L, ZHANG Y, et al. Hazards and treatment countermeasures of soft soil engineering of Xiaohu Island embankment in Nansha, Guangzhou[J]. Yellow River, 2010, 32(2): 132-133.

Cause analysis of land subsidence in Haimen area of Jiangsu Province

PEI Jiangtao¹, YANG Lu², LUO Zujiang¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

2. Geo-engineering Investigation Institute of Jiangsu Province, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the hydrogeological and engineering geological data of Haimen area in Jiangsu Province, through field investigation and relevant literature, the development process of land subsidence in this area in recent years has been systematically sorted out. The subsidence genesis were explored by analyzing the development characteristics and distribution law of land subsidence. The results show that the groundwater in the confined aquifer III in Haimen area was over-exploited in the early stage, leading to overall subsidence of the area. However, with the implementation of planned extraction of groundwater, the subsidence area has changed from the whole to part the local, focusing in the areas with soft soil distribution and dense building load. The main compression layers are the phreatic aquifer, the first cohesive soil aquitard and the first confined aquifer. The distribution of soft soil in the area is closely related to land subsidence, and the area with dense building load is highly correlated with the area of frequent land subsidence, that is, the distribution of soft soil and building load are the influencing factors of land subsidence.

Key words: Haimen area of Jiangsu Province; land subsidence; soft soil; groundwater; building load