

# 黄泛区山东平原 5.5 级地震液化特征初步研究

付海清<sup>1,2</sup>, 冯陆伟<sup>1</sup>, 袁晓铭<sup>3,4</sup>, 伊纪祥<sup>1</sup>, 陈龙伟<sup>3,4</sup>, 宋佳琪<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101;  
3. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
4. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**我国黄泛区面积达 25 万平方公里,处于人口稠密、经济发达且具有强震背景的华北地区。历史上,黄泛区虽然发生多次地震液化,但是均没有系统的调查和研究。迄今对黄泛区地震液化的认识几近空白。2023 年山东平原 5.5 级地震,位于黄泛区,并发生地震液化。文中以震害调查为主要手段,首次对黄泛区的真实地震液化实例进行调查和剖析,初步掌握了平原 5.5 级地震液化的特征,并获取了新认识。研究结果表明:平原 5.5 级地震中,主要是粉土和粉砂液化,占比 91%;液化土层的深度主要集中在 7~12 m,最大液化深度至少为 14 m,可能存在更大深度土层液化,超过国内以往地震液化的主要深度范围;液化点,主要集中在距离震中的 6~12 km 范围内,位于地震烈度图的 6 度区边缘及 5 度区,与已有认识不同。液化点范围分布异常,与黄泛区特有的“岗坡洼”起伏的微地貌密切相关,存在微地貌效应。在中震背景下,黄泛区的地震液化表现出一定的破坏性和特殊性,强震下黄泛区将会面临更严重的液化灾害风险。针对黄泛区的液化分析和判别方法,亟待开展。研究成果可丰富低震级下地震液化的认识,也为开展黄泛区的土壤液化研究提供原始资料和全新线索。

**关键词:**平原地震;土壤液化;黄泛区;微地貌效应

**中图分类号:** TU435; P315.9

**文献标志码:** A

## Preliminary study on liquefaction characteristics in Pingyuan $M_s5.5$ earthquake in Shandong of the Yellow River floodplain

FU Haiqing<sup>1,2</sup>, FENG Luwei<sup>1</sup>, YUAN Xiaoming<sup>3,4</sup>, YI Jixiang<sup>1</sup>, CHEN Longwei<sup>3,4</sup>, SONG Jiaqi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Key Lab of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering of the Ministry of Education, Jinan 250101, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The Yellow River floodplain, covering an area of 250 000 km<sup>2</sup> located in northern China, is a densely populated and economically developed region with a high level seismic background activity. In recent history, numerous earthquake-induced liquefactions occurred in this floodplain, however, relevant investigations and research are also lacking. So far, the knowledge of earthquake-induced liquefaction in the Yellow River floodplain is almost blank. In 2023, the Pingyuan  $M_s5.5$  earthquake occurred in Shandong Province and induced soil liquefaction in the Yellow River floodplain. Through post-earthquake investigations, it is the first time that a case of real earthquake-induced liquefaction in the Yellow River floodplain has been analyzed in this paper. The characteristics of liquefaction induced by this earthquake have been obtained. The main points are as follows: this earthquake mainly induced soil liquefaction in silt and silty soils for 91% of sites in the total. The depth range of liquefied soil deposits is mainly of 7~12 m. The largest depth of liquefied soil deposit was confirmed at least 14 m,

收稿日期:2024-07-17; 修回日期:2024-08-11

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020QE276);黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD2019E009)

作者简介:付海清(1985—),男,副教授,博士,主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail:haiqing85@163.com

and possibly at an even deeper one. The depth of liquefied soil is beyond the common range of that in previous earthquakes. Liquefaction sites are mainly observed in the epicentral range of 6~12 km and are located in the seismic intensity 5 region and the boundary of intensity 6 region, which is significantly different from previous investigations. The abnormal distribution of liquefaction sites is closely related to the effect which is induced by the exclusive "highland-slope-lowland" microtopography in the Yellow River floodplain. In a moderate earthquake, the liquefaction in the Yellow River floodplain has induced moderate damage and has an especially different characteristic. It can be concluded that more severe liquefaction hazards may occur in large earthquakes. Therefore, it is urgent to develop a specific analysis procedure and evaluation method for soil liquefaction in the Yellow River floodplain. The work in this paper can improve the understanding of soil liquefaction during small and moderate earthquakes and provide firsthand information and new clues for research on soil liquefaction in the Yellow River floodplain.

**Key words:** Pingyuan earthquake; soil liquefaction; Yellow River floodplain; microtopography effect

## 0 引言

土壤液化是具有普遍意义的典型震害现象,对各类工程具有破坏作用。震害调查是获取工程震害资料和经验最重要、最直接的手段,以往关于地震液化问题的深入调查和研究,对提高液化认识水平和发展液化分析方法均有重要作用<sup>[1-5]</sup>。

黄河下游因历史上千余次洪水泛滥和多次河道变迁,在我国山东、河南、安徽、江苏和河北等地形成了面积达25万平方公里的黄泛平原<sup>[6-8]</sup>,并成为华北平原的主要组成部分,目前也常称之为黄泛区。山东境内的黄泛平原,称为鲁西北黄泛平原,面积约5.8万平方公里,占山东省总面积的38%<sup>[9]</sup>。从地质条件上看,黄泛区因黄河的冲淤积导致第四系松散沉积层分布广、厚度大,有的沉积厚度达300 m以上,饱和砂土、粉土等可液化土分布广泛。从地震危险性上看,黄泛区所在的华北地区,具有强震的地质构造背景。我国东部的强震,主要发生在华北地区,特别是华北平原内部<sup>[10]</sup>。可以说,黄泛区一直具有巨大的地震液化风险。然而,从地理位置上看,黄泛区位于华北平原核心地带,其人口稠密、工农业发达、交通及大型工程密集,并有多个百万人以上规模的城市。因此,合理防范黄泛区的地震液化风险,对于我国经济建设和社会安全具有极为重要的意义。

历史上,黄泛区曾发生多次地震液化。仅20世纪以来,在山东省发生的1937年菏泽7.0级地震、1969年渤海7.4级地震、1983年菏泽5.9级地震中,均有“人畜有陷落者,涌黑水及流砂”、“地裂喷砂”等关于鲁西北黄泛平原地震液化的记载<sup>[11]</sup>。但是,迄今关于黄泛区的地震液化,仅限于“喷砂冒水”的简单文字描述,并没有系统调查和认识,相关研究几近空白。当前对黄泛区的液化认识,几乎都是基于理论和试验获得<sup>[12-13]</sup>,且研究成果较少。

2023年8月6日,山东省德州市平原县发生5.5级地震,位于鲁西北黄泛平原,为认识黄泛区地震液化提供了宝贵机会。不过,根据现有认知,作为一个5.5级的地震,不可能引起显著的液化。根据震级和液化的最大震中距的统计经验关系,5.5级的地震,引起液化的范围大致在距离震中2 km范围内<sup>[14]</sup>。为查清此次地震液化情况,在震后第3天专门开展了平原5.5级地震液化的科学考察,历时10余天,以“逐村排查”的方式,实地走访调查了161个自然村。根据调查结果:平原地震中,液化点(以村为单位)主要集中在距离震中6~12 km范围内,液化范围面积约30 km<sup>2</sup>,形成一定液化灾害,并表现出特殊性。

本文以震害调查为主要手段,首次对黄泛区的真实地震液化实例进行较为系统的调查和剖析,初步掌握山东平原5.5级地震液化的特征,发现与以往不同的液化新现象,丰富在低震级下(6级以下)的地震液化认识,为针对性地开展黄泛区地震液化研究提供一手资料和全新线索。

## 1 震区相关概况

### 1.1 山东平原5.5级地震

根据中国地震台网正式测定,2023年8月6日2时33分在山东省平原县发生5.5级地震,震源深度

10 km,震中位于平原县王打卦镇的王打卦村附近,距离震区最近的断裂是北东向的陵县-冠县断裂。但是,根据现有认识,陵县-冠县断裂属于第四纪早、中期断裂,晚更新世以来不活动。此次地震的发震断裂尚待进一步查清。根据现有调查结果,山东平原 5.5 级地震最高烈度为 7 度,等震线长轴呈北东走向,长轴 24 km,短轴 12 km。7 度区面积约 22 km<sup>2</sup>,6 度区面积约 202 km<sup>2</sup>。

根据实地考察,除去震中附近约 1 km 范围内无明显的方向特征外,震区的院墙或墙头破坏,以南北墙为主。偏房(东屋、西屋)的墙体破坏主要表现为拉裂、房梁错动,正房(北屋)的墙体破坏多集中在山墙、门窗角点处。由此推断,此次地震动的卓越方向应该大致为东西向。

## 1.2 平原县地貌与工程地质条件

根据已有认识,平原县地势平坦,地处黄河下游冲积平原,地势自西南向东北缓慢倾斜,海拔高程 18~27 m。由于黄河改道、决口泛滥,平原县境内形成河滩高地、缓平坡地、浅平洼地、背河槽状洼地、沙质河槽地和沙丘地等 6 种微地貌。平原县在中生代岩基上堆积形成了巨厚的新生界松散地层,加之黄河冲淤积形成的覆盖地层,第四系厚度大于 280 m。第四系地层按其颜色、沉积韵律、岩性成分等自下而上划为 4 个层组。其中全新统是最上部地层,以冲积形成为主,局部有风积物或湖沼沉积物,总厚度 90~110 m,大致可分为下、中、上三部分。下部,顶板埋深 45~60 m,厚 50~60 m,以粉土、粉砂、粉细砂层为主,夹有黏土、粉质黏土透镜体,成层较稳定。中部,顶板埋深 8~24 m,厚 35~40 m,为古河道砂层沉积和古河道间带的砂层及黏性土互层沉积,近东西向平行延伸,砂层厚达 10~30 m。上部,即近地表部分,主要为黏性土夹粉砂透镜体的冲积层,局部有风积砂丘和近代河床相沉积物。

## 2 液化调查方法与范围

喷砂冒水是地震液化最明确、清晰的证据。实际调查中,这些喷砂冒水点,最容易在视野开阔的农田或河漫滩发现,进而以此为线索开展液化调查。与以往地震液化调查不同的是,平原地震发生时间正值夏末,震区所有田地几乎全部被茂密的玉米(秆高约 2.5 m)遮盖,当地村民对农田是否喷砂冒水也难以知情。因此,当地农作物的客观情况导致在广阔农田上几乎无法发现喷砂冒水现象。仅田间地头的少量喷砂点能够根据当地村民提供的信息找到。这一线索的基本缺失,给此次地震液化调查工作带来很大困难。为了准确、可靠地获取地震液化范围,考虑到水井与地下水密切相关,而且含水层为饱和砂土或粉土层。因此,在直接寻找喷砂冒水点的同时,增加“水井反应”这一重要线索开展液化调查。水井主要包括农田机井和家用水井。尤其是家用水井,在当地普遍存在,具有数量大、井深信息准确等突出优点,能够保证液化调查结果的可靠和可信性。

当地普遍使用的家用水井,其井口实景如图 1(a)所示,其构造示意图如图 1(b)所示。这种水井,通过铁杆或专用钻机在地层直接成孔,深度可从几米到几十米不等,然后放置直径约 5 cm 的塑料井管,井管底部(即井的深度)位于当地认为具有稳定水位的含水层。根据调查过程中获取的大量信息,并经反复确认,当地家用水井所用的塑料井管为聚乙烯材质。这种井管是具有高强度的“柔性管”,能够抵御较大的地震荷载或土体变形,目前广泛用于给排水的埋地管道。与井管为拼接的农田机井使用的“刚性管”不同,这种塑料井管无法与其穿越的地层联通。因此,家用水井发生喷砂冒水,即表明至少该水井深度处的土层发生液化。需说明的是,如果个别塑料井管在地震中损坏(这会导致井深与液化深度不一致),村民可通过家用水井是否正常出水进行快速确认。实际调查中,未发现这种情况。根据调查结果,震后家用水井出现 3 种反应:①喷砂冒水;②井水明显变浑(含砂粒),但未喷砂冒水;③仅冒水,但未喷砂。对于后两者,尽管与液化密切相关,但是同样掺杂了其他因素影响。为慎重起见,仅把出现喷砂冒水作为确认液化场地的证据。

实际调查中,最初发现喷砂冒水点,位于地震烈度图的 5 度区,与以往认识明显不同。为摸清地震液化情况,调查范围,如图 2 所示,覆盖了地震烈度图 6 度区等震线以内的绝大部分村庄,并根据实际情况进行“无间断”外扩,逐一对村庄进行摸排调查,直至确认震后家用水井无明显“浑浊现象”的边界为止,总计走访调查 161 个自然村。为确保信息可靠,所走访调查的村庄,原则上不少于 10 人,住户位置尽量均匀分布。

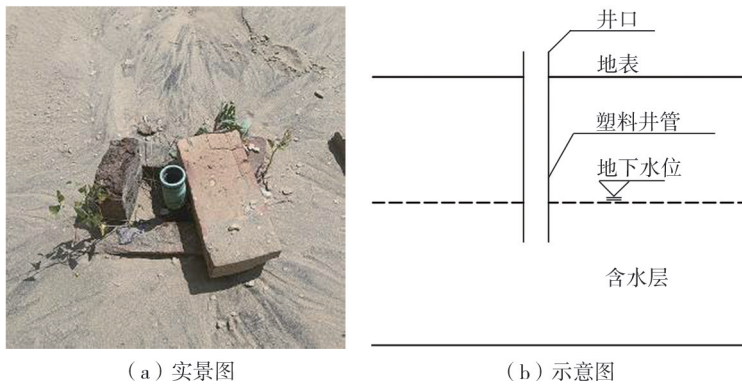


图1 家用水井实景及示意图

Fig. 1 Photo and sketch for the living-use well

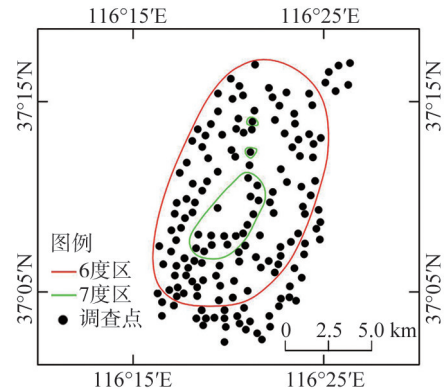


图2 地震液化调查点分布图

Fig. 2 Distribution map of earthquake liquefaction investigation points

### 3 地震液化宏观特征

#### 3.1 液化分布范围

除去马颊河、引黄干渠的河漫滩外,目前发现的液化点全部在农村。由于同一村庄有多处喷砂冒水点,甚至家用水井出现喷砂冒水现象较为普遍。因此,本文所指的液化点,以村为单位,村庄间隔一般不小于1 km。对于在村间农田、机井和沟渠等出现的喷砂冒水点,就近归并于某村庄,不重复统计。迄今,研究发现共计16个液化点,包括14个村庄,另外马颊河、引黄干渠各计为1个液化点。

根据目前调查结果,地震液化点的主要分布范围如图3所示。平原5.5级地震液化点主要位于仪器震中的南侧,距离震中6~12 km的范围,大致呈北东方向的长方形区域,面积约30 km<sup>2</sup>。该范围西以马颊河和小吴庄为界,东以坡刘庄为界,北至野庄,南至引黄干渠。另外,液化点主要分布区之外,除去马颊河和引黄干渠的河漫滩有大量的喷砂冒水点外,在大芝坊等村也发现家用水井喷砂冒水,但是数量较少,也未在其周边农田、道路发现喷砂冒水点。

结合山东平原5.5级地震烈度图,目前的液化范围主要位于地震烈度6度区的边缘及其外围5度区,如图3所示。这与过去地震液化认识有着显著不同。迄今,在5度区,在道路农田中发现的喷砂冒水点,最远距离仪器震中约11 km;在引黄干渠的河漫滩发现的喷砂冒水点,最远距离仪器震中约17 km。考虑地震的震级,此次平原5.5级地震液化的范围和广度边界明显偏大。

#### 3.2 喷出物特征

目前发现的液化喷出物,主要为两大类:一类是以黄色为主的沉积物,另一类是以灰黑色为主的沉积物。喷出物的颜色,实际反映了液化地层涉及不同地质时代的沉积物,同时对地震现场取回的喷出物进行颗粒筛分试验。根据喷出物颜色和颗粒级配特征,目前发现的喷出物可细分为4种,如表1所示。根据GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》<sup>[15]</sup>有关土的定名,喷出物是细砂、粉砂、粉土。这3种土的类别占比如图4所示,粉土和粉砂占比91%,细砂占比9%。而且喷出物中粒径为0.075 mm以下的细粒含量差别很大。若以喷出物推测,此次地震液化以粉土和粉砂液化为主。考虑表述方便,本文所述喷砂冒水,如不特殊说明,“砂”泛指喷出物。

此次地震液化喷砂的状态,主要以串珠状喷砂和单孔喷砂为主。其中单孔喷砂的直径从10~20 cm到1~2 m不等,串珠状喷砂的长度从1~2 m到10~30 m不等,个别农田中发现的串珠状喷砂长度可达10多

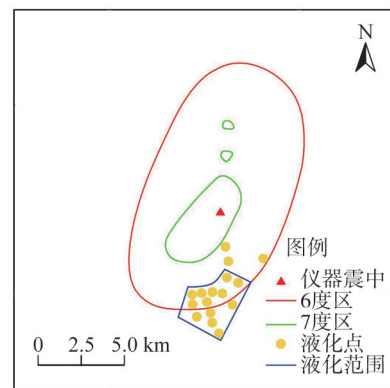


图3 平原5.5级地震液化分布范围

Fig. 3 Distribution range of the soil liquefaction induced by Pingyuan M5.5 earthquake

米。据当地村民描述,液化点主要分布范围内,井口的喷水高度从0.1~0.2 m到2~3 m不等,喷冒持续时间从震后1~2 min到4~5 h不等。地震发生后第 4 天下午(8 月 10 日),在引黄干渠河漫滩上发现的喷砂冒水孔,仍有少许喷冒现象,可知此时超静孔隙水压力仍未完全消散。

表 1 平原 5.5 级地震液化喷出物种类及特征

Table 1 Category and characteristics of the liquefaction ejecta induced by Pingyuan M5.5 earthquake

喷出物种类	特征描述	土类定名	主要喷出位置
1	淡黄及浅黄色	粉土	田地、路边、井口
2	深黄及褐黄色	粉土	房屋墙角、井口、田地
3	深灰及灰黑色	粉砂	田地、路边、井口
4	深黄色,夹黏性土块	细砂	井口喷出

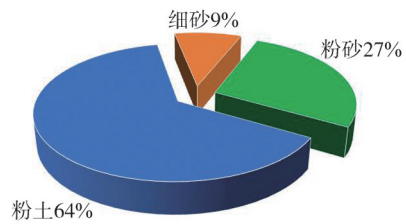


图 4 平原 5.5 级地震液化喷出物类别比例

Fig. 4 Percentage for the category of liquefaction ejecta induced by Pingyuan M5.5 earthquake

根据目前调查结果,研究发现的喷砂冒水点主要集中于 4 类(图 5):①河漫滩或沟渠;②家用或农用水井;③农田或路边;④房屋建筑周围。前两类的喷砂冒水点数量占了绝大多数,农田或路旁处的数量次之,房屋建筑周围的喷砂冒水点数量最少,目前仅发现 3 例。受限于当地农作物的遮盖影响,应有大量农田喷砂冒水点未能发现。尽管目前在田间地头发现多处喷砂量较为显著的喷冒点,但是相比于面积广阔的农田来讲,这种占比仍然很小。因而,可以肯定一个基本事实,此次地震液化,通过上覆土层直接喷出地表的情况不多。事实上,通过这些不同地点的喷砂冒水情况,可以大致获知此次地震液化的空间分布特征。一般来说,河滩或沟渠的地下水位高,可液化层埋深较浅,液化主要取决于地表地震动的大小,是地震液化的广度边界。水井最容易形成喷砂冒水的通道,而埋深较大的液化层,不一定能够通过上覆土层喷出地表,在宏观调查时,水井是估计和推测深层土液化的有效途径,大致反映地震液化的深度边界。房屋建筑场地作为非自由场地,相比于农田或路边这些自由场地,其上覆压力更大,近地表处土层更为密实,同等条件下房屋建筑场地的喷砂冒水更为困难。

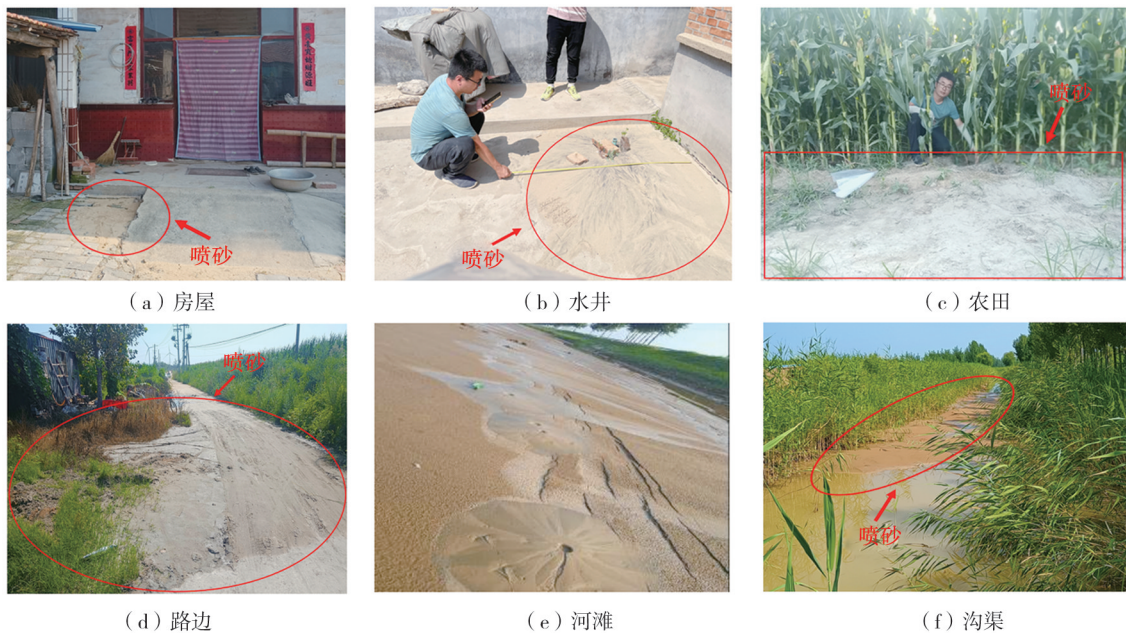


图 5 不同种类的喷砂冒水点

Fig. 5 Different categories of soil ejecta induced by liquefaction

喷砂冒水点的调查结果初步表明:此次地震,液化土层的深度较大。后文,将结合水井反应,就液化深度问题进行分析。

### 3.3 液化震害

平原地震的震级为 5.5,总体上震害不重,最高地震烈度为 7 度,但是地震液化导致的喷砂冒水、侧向扩

展及流滑均造成了一定灾害,并导致水井破坏、农田淹没、道路桥梁及干渠堤岸的损坏,个别村庄水井喷砂冒水较严重。据当地村民描述,震后家用水井出现“根本堵不住”、“喷出的水一直流到大道上”、“水喷到了房顶”等情况。当地村民不了解这种现象,一度恐慌,甚至有人以为“地要震塌了”,造成了一定的社会影响。

房屋建筑的破坏,是结构振动及地基变形的综合反应。截至目前,研究尚未发现清晰的证据能够直接表明地震液化引起的地基问题导致建筑破坏。值得注意的是,液化不仅会引起地基问题,也会对地震动产生影响,进而影响上部结构振动。就目前的宏观调查结果初步分析,研究认为液化对房屋建筑的“加震”和“减震”情况可能同时存在,与具体场地条件有关,还有待于进一步深入研究。本文仅介绍证据清晰的液化震害及其现象。

### 1) 水井破坏

在液化主要分布区,大量家用水井喷砂冒水,淤塞了管道,造成井水多天浑浊,甚至损坏水泵,对生活用水造成不便。在液化较为严重的村庄,屋内的水井(当地习惯)冒水,导致短时间房间积水严重,也造成了一定损失。

调查中,同样发现了地震液化导致的农用机井破坏,甚至包括2022年的新建机井,如图6(a)所示。一般情况下,农用机井的井壁是由滤砂管道拼接,底部有沉砂装置封闭。即使其穿越或(和)下部土层发生液化,井管不产生错位或下沉,也很难发生喷砂冒水。因此,机井发生喷砂冒水,就意味着机井损坏。在车王庄附近一口机井喷砂冒水严重,如图6(b)所示。该机井上方建造的面积约为 $2.7\text{ m}\times 2.7\text{ m}$ 的敞口小屋,全部被淤砂填满,厚度约20 cm,并淹没周围农田,造成田地压砂面积约 $70\text{ m}^2$ ,厚度5~15 cm不等。

### 2) 淹没农田

喷砂冒水淹没农田,是地震液化中常见的一种灾害。此次地震,即使农作物及植被遮盖,目前在田间地头仍发现多处喷砂冒水点,多数为串珠状喷砂,其中有几处喷砂量较大。目前在农田发现的最大喷砂冒水点,如图7(a)所示。地震液化时,喷砂不但覆盖了大约 $80\text{ m}^2$ 的农田,砂土厚度5~20 cm不等,并且喷砂一直蔓延到农田旁边的排水沟渠,覆盖了宽度约1.4 m,长度约16 m的沟渠,沟内砂土厚度约15~25 cm,估算该点的喷砂量在 $15\text{ m}^3$ 左右。

在张官店村附近,有一处沉砂造田,面积约百余亩,地势比周边玉米地高2 m左右,地震时该处发生大面积液化,如图7(b)所示,并导致了流滑。该处液化流滑,导致周边百余平方米的玉米农田出现淤砂,厚度5~20多厘米不等。

### 3) 干渠堤岸破坏

在目前已知的液化分布区内,水利工程主要有引黄干渠、相家河水库和尚仇干渠等。除去相家河水库未能调查外,在引黄干渠和周家寨南侧尚仇干渠的河漫滩上,均发现大量的喷砂冒水点,并伴有局部的护坡砌块坍塌,个别地方较为严重,如图8所示。调查发现,引黄干渠最长的护坡坍塌长度约为220 m。这些堤岸破坏和局部坍塌,应与液化引起的侧移或流滑有密切关系。

### 4) 道路桥梁破坏

目前在液化分布区发现的道路破坏,主要表现为乡村公路的路肩不同程度的破坏,如图9所示,不过混凝土路面未见明显破坏。有些地方的路肩破坏长度较大,甚至沿着公路绵延几公里,裂缝宽度在1~2 cm到10~20 cm不等,较严重的不但有水平位错,同时伴有垂直位错。这些破坏的公路路肩旁边多为沟渠,沟渠或

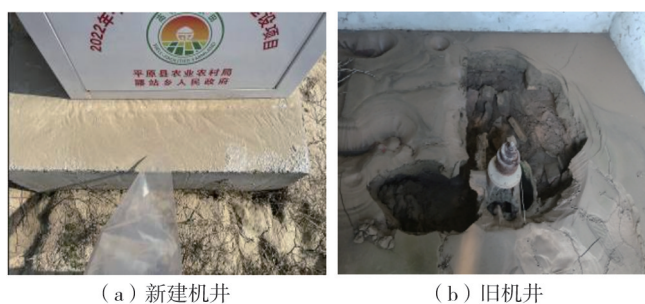


图6 液化造成的机井破坏

Fig. 6 Damage of water well induced by liquefaction

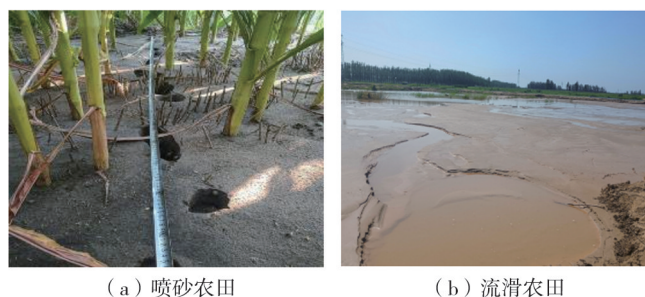


图7 液化造成的农田破坏

Fig. 7 Damage of farmland induced by liquefaction

附近均发现喷砂冒水点,这应该是液化导致的侧移,引起的路肩破坏。而没有发生液化的地方,沟渠旁的公路路肩和路面之间未见明显裂缝。同时,调查发现,发生路肩破坏的公路与其走向并无相关性,南北向与东西向道路均存在,因此与地震动卓越方向引发的局部道路边坡失稳关系不大。



图 8 液化造成干渠堤岸破坏

Fig. 8 Damage of trench slope induced by liquefaction



图 9 液化造成的公路路肩破坏

Fig. 9 Damage of road shoulder induced by liquefaction

此次地震,仅发现并确认一处因液化导致的砖砌的圯工桥破坏。桥身和桥面均遭受破坏并在地震后成为危桥,如图 10 所示。该桥周边田地及跨越的沟渠可见多处喷砂冒水点。而且,在该圯工桥北侧,同时发生严重的液化导致的侧移,产生的地裂缝长度绵延约 200 m,有的裂缝宽度垂直距离多达 0.5 m,朝向沟渠的方向,伴有多级不同宽度的地裂缝,如图 11(a) 所示。由于该处的地裂缝规模较大,现象突出,在当地引发议论。考虑到社会影响问题,被当地迅速推平,如图 11(b) 所示。由图可知,侧移导致地裂缝的规模以及圯工桥与地裂缝的大致空间位置关系。



(a) 近景

(b) 远景

图 10 液化造成的桥梁破坏

Fig. 10 Damage of bridge induced by liquefaction



(a) 侧移导致地裂缝

(b) 侧移规模

图 11 破坏桥梁附近的液化侧移实景

Fig. 11 Photo of lateral spread induced by liquefaction

### 3.4 地震液化层的深度

液化土层的深度是地震液化非常关心的问题。通常情况下,仅依靠宏观调查很难掌握液化土层的深度特征,需要后期通过钻孔勘探揭露的地层与喷出物对比,确认液化层深度。但是,这种方法并非完全可靠。比如:在地层旋回沉积的地区,会给液化层深度的确定带来多解性;对于砾性土液化,喷出物与液化实际地层不完全一致<sup>[3]</sup>。因此,确认液化层的深度问题,实际是一个复杂难题。

如前文所述,由家用水井的特点所决定,当井口出现喷砂冒水,可以确定至少该井深度的土层发生液化,加之家用水井的深度数据相对可靠,因此,此次地震液化调查,能够较准确地获取液化土层的深度特征。

根据目前对液化分布区的水井调查情况统计,家用水井深度从 6~30 m 不等,不过主要集中在地下 7~12 m 和 20~25 m 这 2 个深度区间。水井的深度,在所调查范围内没有区域特征。同一村庄中,2 个主要深度区间的水井均存在。深井是因为当地村民考虑水质需要,与地下水位的埋深无关,这也表明这 2 个主要含水层之间具有相对稳定的隔水层。家用水井,由于都是村民亲自负责建造,所以几乎全部都有准确深度。村民口述的家用水井深度误差不会超过 1 m,而且同一村庄的水井深度大概范围能够相互验证,井深信息可靠性能得到保证。但是,地下水位的埋深,村民确实不易掌握。由于家用水井的深度肯定位于稳定水位以下,进而可以推测地下水位埋深在 6~7 m 以内。不过,对于地震液化而言,这一地下水位数据过于粗糙,参考价值不大。实地调查中,研究发现了十几口敞开水井,可见水位距离地面 2.0~3.5 m 左右,能够反映当地地下水位真实情况,具有一定参考性。

调查发现,7~12 m 的家用水井以喷砂冒水为主,截至目前调查情况,地震后出现喷砂冒水的家用水井最大深度为 14 m。20~25 m 的家用水井则是单纯冒水。在调查过程中,值得注意的液化实例是:某户院中恰有

2口不同深度的家用水井,两者直线距离不足5 m。地震发生后,深度为12.5 m的水井出现明显的喷砂冒水,持续时间约1 h。可以推测,该处的液化土层埋深至少为12.5 m。而另一口深度7 m的水井仅出现冒水现象,且为清水,这应该是受下部土层液化影响所导致。另外,具有明确喷砂冒水点的村庄中,20多米的家用水井普遍出现严重的冒水现象,甚至喷水高度2~3 m,但是水也未见明显浑浊,而且这并非个例。研究者推测20多米井深以下的土层也有可能发生液化,但是由于深度原因和(或)液化程度有限,喷砂较为困难。无论从液化基本理论,还是从上述液化实例推测,这种深层土的液化可能性尚无法完全排除。因此,此次地震是否存在埋深在20 m以上的土层液化问题,还有待于深入探究。以往地震液化调查中,因为缺乏家用水井的线索,这种现象很难发现。

相比之下,农用机井的喷砂冒水,与其穿越的土层和井管破坏位置有关,其液化深度需结合地层情况分析。在车王村附近的3口农田机井均出现喷砂冒水现象。对喷出物进行颗粒分析试验并确认,2口新建机井喷出淡黄色粉土,如图12(a)所示。1口老旧机井喷出深灰色粉砂,如图12(b)所示。其中,1口新建机井处具有地下50 m的钻孔勘探资料,初见地下水位埋深2.29 m,所揭露地层情况及其岩性描述,如表2所示。若以喷出物和实际地层信息对比,可知该层粉土可能位于地下2.8~5.2 m,也可能来自其下5.2~10.2 m粉砂的粉土夹层,甚至有可能来自24.0~25.6 m的粉土层。另外,喷深灰色粉砂的机井,与新建机井直线距离约600 m。若与上述地层钻孔资料对比,可以推测,液化土层应在地下12.3~14.3 m,也可能位于地下15.1~22.8 m。由于两者距离较小,地层大致埋深变化不大,因此外推结果的偏差应该不大。农用机井的喷砂冒水情况,也反映了此次地震的液化土层的埋深可能较大。

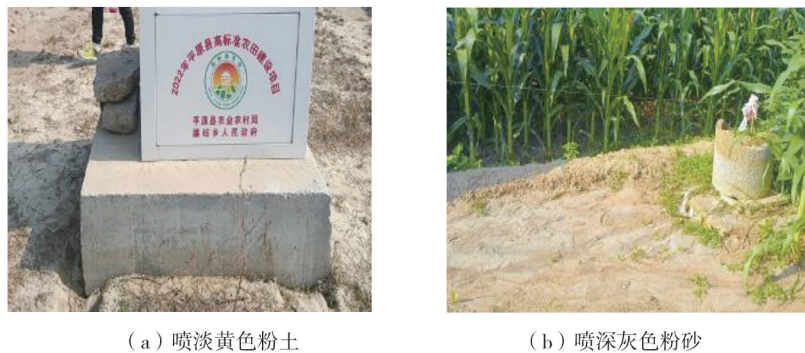


图12 机井喷砂

Fig. 12 Sand ejected from the motor-pumped well

在农田路旁直接喷出地表的液化土层深度,需后期通过钻孔勘探手段进一步研究确定。根据水井的喷砂冒水情况,此次地震液化的土层埋深主要在7~12 m,最大深度至少可达14 m,也可能存在更大深度的土层液化。根据对国内外48次地震液化实例的统计,国内大陆的液化砂土层的埋深主要在0~6 m,其中2~4 m最为集中,10 m以上的基本没有,而其他地区的液化砂土层埋深主要在2~8 m,其中4~6 m最为集中,10 m以上的占有一定分量<sup>[16]</sup>。就地震液化而言,震级5.5并不算大,但是在这样的中震背景下,液化土层的埋深却相对偏大,其发生机理有待于进一步深入探究。

表2 液化导致破坏的机井的地层情况

Table 2 Stratum nearby the water well damaged by liquefaction

层底深度/m	地层厚度/m	地层岩性描述
2.80	2.80	粉土夹粉质黏土;棕黄色,粉土较松散,中部夹粉质黏土,棕色,较致密
5.25	2.45	粉土;浅黄色极松散多见云母,下部粒粗
10.22	4.97	粉砂;黄色,底部0.40 m黄绿色,有粉土夹层
14.30	4.08	粉细砂;12.30 m以上棕黄,以下深灰色,中部含黏性土
15.08	0.78	粉质黏土;深灰色淤泥质性,较软裂隙发育粉细砂填充,有贝壳
17.40	2.32	粉细砂;深灰色质,纯黑色矿物,含量较多
22.82	5.42	细砂;深灰色黑色矿物较多,质纯
24.00	1.18	粉质黏土;棕灰棕褐色,具黏塑性,致密,含少量姜石,夹裂隙粉砂填充
25.65	1.65	粉土;淡黄色较松散,含少量姜石头及铁锰结核
30.30	4.65	黏土;棕红色,黏塑性强,下部含砂量较多。27 m处见有铁锰结核,隔水

续表

层底深度/m	地层厚度/m	地层岩性描述
31.20	0.90	粉砂:浅黄色,含黏性土
33.00	1.80	粉土:棕褐色,黏塑性弱,下部含较粗的砂粒
33.80	0.80	粉质黏土:棕色,黏塑性强,致密,有铁锰结核,有裂隙,被粉砂填充,隔水
38.50	4.70	粉砂:浅黄色,质纯
43.57	5.07	粉土:土黄色,夹黏塑性,含少量姜石头
44.60	1.03	粉砂:浅黄色,质不纯
47.12	2.52	粉质黏土:棕褐及灰褐色,黏塑性强,致密,含少量姜石,有贝壳
48.60	1.48	粉土:褐色,较松散,局部含贝壳较多
50.00	1.40	粉质黏土:棕黄色,黏塑性强,致密,含少量姜石头

## 4 液化区异常分析

此次地震液化点,主要分布在地震烈度图的 6 度区边缘及其外围 5 度区,距离仪器震中 6~12 km 范围内。迄今,在河漫滩上发现的喷砂冒水点距离仪器震中最远可达 17 km。在 2008 年汶川 8.0 级地震中,曾在 6 度区发现 10 余个地震液化点<sup>[3]</sup>。在 2018 年松原 5.7 级地震中,也曾在 6 度区发现 10 余个液化场地<sup>[17-18]</sup>,当时总体上数量不多。而此次地震,液化主要发生在 6 度区边缘及 5 度区,这与以往地震液化认识有着明显不同。

就地震烈度图而言,一方面,同以往地震一样,受限於地震应急响应的人员和时间,震后发布的地震烈度图无法面面俱到,抽样点数有限。另一方面,6 度及以上地震烈度的评定,目前以房屋震害作为主要评价依据。不过,在房屋震害相对不严重的情况下,容易掺杂较多的人为因素。根据中国地震局工程力学研究所强震动观测中心提供的数据,距离液化区最近的 2 个台站(均约 5 km),记录到的地震峰值加速度分别为 232.7、242.3  $\text{cm/s}^2$ 。而且,根据实地调查情况,液化区村庄中南北向的院墙倒塌、破坏较为普遍。“从街道往胡同望去,都在修院墙”是在液化区村庄调查的一个普遍印象。砖砌院墙的倒塌、破坏,也说明地表加速度较大,一般可认为地表加速度达到 0.2  $g$  左右,宏观震害现象也与仪器的加速度数值基本一致。因此,地震动峰值加速度较大,应该是在 6 度区边缘及 5 度区出现地震液化的基本条件。

调查走访中,当地村民普遍反映,液化主要分布区的地势相对较低,尤其是车王庄等的地势要比周边低大约 3~4 m(当地村民口述为“矮一房子”),也通过高程数据和相关的地质认识确认了这一事实。平原地区,地形高差本身不显著,且高精度的高程数据涉密。尽管如此,基于可公开的高程数据,绘制得出穿越液化分布区的南北向和东西向的高程剖面,如图 13 所示,仍能清晰地表明这种凹形洼地确实存在。液化区的高程低大约 3~5 m,地形剖面与当地村民所述情况吻合。另外,根据已有研究,由于历次黄河下游的泛滥和改道,黄泛平原沉积物交错分布,使得平原上广泛存在缓岗(岗,即高地)、微斜平地、洼地和沙丘等,形成了“岗坡洼”起伏的微地貌,分布着大小不同类型的洼地<sup>[6-7]</sup>。平原县境内的浅平洼地,多呈凹状,其中较大的洼地就包括张官店洼。受限前人工作的细致程度,张官店洼的边界并不清楚,是否与图 13 高程剖面显示范围一致,目前无法确定。但是,张官店村是此次地震液化的 16 个液化点之一,且距离液化分布区的中心不足 2 km。这些认识的吻合,进一步表明此次地震液化分布范围异常与洼地有密切关系。

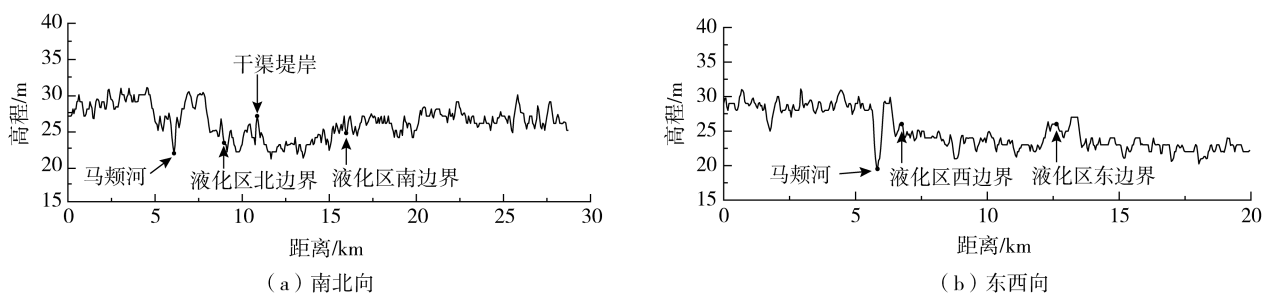


图 13 液化区高程剖面图

Fig. 13 Elevation profile in liquefaction region

根据现有工程地震学认识,凹状地形的洼地可能会造成局部地震动的放大,特别是对于第四系土层覆盖深厚的场地。而且,洼地的地下水位通常埋深小,同样地震动下更容易发生液化。依据地震液化的宏观调查特征,并结合已有认识,研究者认为,此次地震液化分布范围异常,受黄泛区特有的“岗坡洼”微地貌影响较大。本文中,研究暂将这种影响称为微地貌效应,至少包括了局部地形、水文地质和工程地质等条件差异的综合影响,进而导致地震液化的加重。至于微地貌效应,对黄泛区地震液化的影响程度及发生机理,还有待于深入探究。

值得注意的是,对于黄泛区一个5.5级地震尚且如此,可以推测在更强烈的地震动下,这种微地貌效应会更强烈。倘若以当地抗震设防烈度直接进行工程场地的液化判别,将会得到偏于危险的结果。因此,合理考虑微地貌效应的液化判别分析方法,有待进一步考虑和研究。尤其是对于黄泛区的液化灾害防治,这种需求更为迫切。

## 5 黄泛区地震液化的风险与挑战

我国黄泛区面积约25万平方公里,其所在的华北地区,具有强震的地质构造背景。加之,该地区第四系覆盖层厚,隐伏断层多且研究不充分,这一定程度上又增加了强震发生的不确定性。

根据现有认识,我国东部的强震,主要发生在华北地区,特别是华北平原内部。华北平原活动地块,有历史记载以来发生过7次7级以上地震,如1976年唐山7.8级地震等。华北平原的强震主要发生在平原内部的北北东走向隐伏断裂上,另外,7级以上地震还沿内部次级地块边界发生,如1937年菏泽7.0级地震和1966年邢台7.2级地震。除了活动地块边界带的强震之外,华北平原内部还发育2条次级地震带,一条是唐山-河间-磁县地震带,另一条是安阳-菏泽-临沂地震带。这2条地震带,被认为是新生地震带<sup>[10]</sup>。可以说,黄泛区一直具有较高的地震风险。

山东平原5.5级地震,发生于鲁西北黄泛平原,其地形地貌与地质条件特征在黄泛区具有典型的代表性。然而,仅在5.5级的中震下,此次地震液化的相对范围和液化土层深度都超过以往认识,且受黄泛区特有的“岗坡洼”起伏的微地貌影响明显,导致了一定的液化灾害。黄泛区的土壤液化,在中震背景下就表现出一定的破坏性,也具有较为明显的区域特殊性。可以推测,在更大震级的地震下,黄泛区的地震液化问题将会更加复杂和突出,甚至导致更为严重的地震液化灾害。

如前文所述,黄泛区处于华北平原的核心地带,人口稠密、经济发达、工程密集,并有多个百万人口以上城市。一旦发生严重的地震液化灾害,势必会给黄泛区的经济和社会发展带来更大的威胁。但是,目前,关于黄泛区的液化问题的研究较少,而且主要局限于某工程遇到的粉土或砂土的液化动力特性开展。针对黄泛区的液化分析和判别方法以及合理的抗液化工程措施,目前研究均不充分,几近空白,亟待开展。黄泛区地震液化风险的防治,面临诸多复杂问题和挑战。

## 6 结论

历史上,黄泛区虽发生多次地震液化,但是均无系统的调查和认识。本文以震害调查为主要手段,首次对黄泛区的真实地震液化实例进行调查和剖析,初步掌握了山东平原5.5级地震液化的特征,并发现了与以往不同的液化新现象,丰富了低震级下的液化认识,为开展黄泛区地震液化研究,提供了原始资料和全新线索。得出如下主要结论:

1) 平原5.5级地震中,主要是粉土和粉砂发生液化,占比91%;根据水井喷砂冒水情况,液化土层的深度主要集中在7~12 m,最大液化深度至少为14 m,可能存在更大深度的土层液化,超过国内以往地震液化的主要深度范围,低震级下的地震液化深度及发生机理,有待于进一步深入研究;液化点主要集中在距离震中的6~12 km范围内,位于地震烈度图的6度区边缘及5度区,并且液化范围相对偏大,这与已有认识不同。

2) 液化点范围分布异常,与黄泛区特有“岗坡洼”起伏的微地貌有密切关系,存在微地貌效应。而现有液化分析与判别方法中,尚无法考虑微地貌效应的影响,有待进一步研究。

3) 在中震背景下,黄泛区的土壤液化就表现出一定的破坏性和特殊性。更大地震下,黄泛区将面临更严重的地震液化风险。然而,针对黄泛区的液化分析和判别方法,以及合理的抗液化工程措施,目前研究均不充分,几近空白,亟待开展。

## 参考文献:

- [1] 黄茂松, 边学成, 陈育民, 等. 土动力学与岩土工程[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 64-86.  
HUANG Maosong, BIAN Xuecheng, CHEN Yumin, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(8): 64-86. (in Chinese)
- [2] 吴琪, 徐雨, 陈国兴. 我国近 20 年 11 次地震的土壤液化灾害回顾[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 961-975.  
WU Qi, XU Yu, CHEN Guoxing. Review of soil liquefaction manifestation and its consequences for 11 earthquakes in China over the last 20 years[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 961-975. (in Chinese)
- [3] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.  
YUAN Xiaoming, CAO Zhenzhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [4] 陈龙伟, 汪云龙, 袁晓铭, 等. 2023 年甘肃积石山 6.2 级地震中川乡液化流滑灾害调查及诱因初析[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 187-193.  
CHEN Longwei, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Preliminary analysis for the triggering of soil flowslide that occurred in Zhongchuan Town following the 2023 Jishishan  $M_s$ 6.2 earthquake in Gansu Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 187-193. (in Chinese)
- [5] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1985.  
LIU Huixian. Earthquake damage of Tangshan earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1985. (in Chinese)
- [6] 冯大奎, 张光业. 全新世黄河下游平原地貌和自然环境的演变[J]. 河南大学学报, 1988(1): 27-33.  
FENG Dakui, ZHANG Guangye. Geomorphology and natural environmental evolution of plain in the lower reaches of the Yellow River during Holocene[J]. Journal of Henan University, 1988(1): 27-33. (in Chinese)
- [7] 叶青超. 华北平原地貌体系与环境演化趋势[J]. 地理研究, 1989, 8(3): 10-20.  
YE Qingchao. Landform system of the great plain of north China and its tendency of environmental evolution[J]. Geographical Research, 1989, 8(3): 10-20. (in Chinese)
- [8] 郑景云, 文彦君, 方修琦. 过去 2000 年黄河中下游气候与土地覆被变化的若干特征[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 3-19.  
ZHENG Jingyun, WEN Yanjun, FANG Xiuqi. Changes of climate and land cover in the middle and lower reaches of the Yellow River over the past 2000 years[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 3-19. (in Chinese)
- [9] 孟凡荣. 鲁西北黄泛平原区水土流失特征及防治对策[J]. 山东水利, 2016(2): 17-19.  
MENG Fanrong. Characteristics and prevention measures of soil and water loss in the Yellow River plain area of northwest Shandong province[J]. Shandong Water Resource, 2016(2): 17-19. (in Chinese)
- [10] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(10): 1607-1620.  
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2013, 43(10): 1607-1620. (in Chinese)
- [11] 刁守中, 山东省地震局. 20 世纪山东十大地震[M]. 北京: 地震出版社, 2009.  
DIAO Shouzhong, Shandong Earthquake Administration. Top 10 serious earthquakes in 20th century occurred in the precinct of Shandong Province[M]. Beijing: Seismological Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 董正方, 王仁辉, 曹献伟, 等. 黄泛区粉砂土动强度与抗液化强度试验研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 162-168, 186.  
DONG Zhengfang, WANG Renhui, CAO Xianwei, et al. Experimental study of dynamic and Anti-Liquefaction strengths of silty sand in Yellow River flood area[J]. China Earthquake Engineering Journal. 2021, 43(1): 162-168, 186. (in Chinese)
- [13] 李晓静, 姚凯, 李术才, 等. 黄泛区饱和粉土动强度特性试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(3): 78-81.  
LI Xiaojing, YAO Kai, LI Shucai, et al. Test study on dynamic characteristics of saturated silt in the Yellow River flood area[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(3): 78-81. (in Chinese)
- [14] 刘颖. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984.  
LIU Ying. Sand liquefaction during earthquakes[M]. Beijing: Seismological Press, 1984. (in Chinese)
- [15] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2009 年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [16] 王维铭. 场地液化特征研究及液化影响因素评价[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
WANG Weiming. Study on liquefaction characteristics and liquefaction influencing factors assessment[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [17] 李平, 田兆阳, 薄景山, 等. 松原 5.7 级地震砂土液化研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 91-99.  
LI Ping, TIAN Zhaoyang, BO Jingshan, et al. Study on sand liquefaction of the magnitude 5.7 Songyuan earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 91-99. (in Chinese)
- [18] 姜伟, 李兆焱, 卢坤玉, 等. 5.28 吉林松原地震液化特征初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 52-60.  
JIANG Wei, LI Zhaoyan, LU Kunyu, et al. Preliminary analysis of liquefaction characteristics induced by the Songyuan earthquake of May 28 in Jilin, China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 52-60. (in Chinese)