

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220107002

# 我国近20年11次地震的土壤液化灾害回顾\*

吴琪<sup>1,2</sup>, 徐雨<sup>1</sup>, 陈国兴<sup>1,3</sup>

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124;  
3. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009)

**摘要:** 土壤液化是地震灾害的主要原因之一。液化通常指地震引起的粒状土超静孔压增长及随后的软化现象。近年地震液化灾害在全球呈上升趋势。本文回顾了我国2003年新疆 $M_s$ 6.8级巴楚地震、2005年 $M_s$ 5.7级九江地震、2008年 $M_s$ 8.0级汶川地震、2010年 $M_s$ 7.1级玉树地震、2011年 $M_s$ 5.8级盈江地震、2014年 $M_s$ 6.6级景谷地震、2015年 $M_s$ 6.5级皮山地震、2016年 $M_s$ 6.7级高雄地震、2016年 $M_s$ 6.7级阿克陶地震、2018年 $M_s$ 5.7级松原地震及2020年 $M_s$ 6.4级伽师地震的典型液化现象及其地表特征, 总结液化导致的地质灾害及其诱因, 完善我国地震液化数据库。主要结论如下: (1) 土壤液化主要沿等震线长轴方向分布, 特别在河谷、湿地、堤坝及农田等高地下水位区易产生地震液化现象。液化迹象表现为地表喷水冒砂、地裂缝、塌陷、不均匀沉降等宏观现象; (2) 沉积物喷出地表迹象包括单个砂孔、串状砂孔、线状砂孔、喷水冒砂条带等形式, 泥水喷出物携裹黏土、粉土、砂土, 砂砾, 甚至卵石, 导致校园操场/广场、农田、水井、管道和河道等破坏; (3) 液化常导致路面、堤坝等开裂, 路面裂缝多呈顺路向裂缝和路边裂缝, 堤坝裂缝大多分布于坝顶及坝坡的纵向裂缝, 呈剪切裂缝; (4) 液化引起的地基沉降和侧移会导致浅基础建(构)筑物倾斜、变形甚至倒塌, 挡土结构破坏, 桥墩倾斜和移位, 水利水电设施丧失功能; (5) 汶川地震的液化场地在余震中发生二次液化现象, 液化后土体抵抗再次液化的强度问题应予关注; (6) 汶川地震及松原地震中发生低烈度区(Ⅵ烈度区)的土壤液化现象, 汶川地震深层土壤液化、松原地震低水位土壤液化现象均超出现行规范规定的认识。

**关键词:** 土壤液化; 地表液化迹象; 场地破坏; 液化后果; 液化数据库

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0961-15

## Review of Soil Liquefaction Manifestation and Its Consequences for 11 Earthquakes in China Over the Last 20 Years

WU Qi<sup>1,2</sup>, XU Yu<sup>1</sup>, CHEN Guoxing<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;  
2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
3. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Soil liquefaction is a key reason of earthquake damage. Liquefaction refers to the phenomena of earthquake-induced generation of excess pore water pressures and consequent softening of saturated sandy soils. In recent years, the earthquake-induced liquefaction disasters have been increasing worldwide. The soil liquefaction manifestations and consequences of liquefaction are reviewed, includ-

\* 收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504301)、中国博士后科学基金面上项目(2021M690279)资助

作者简介: 吴琪(1991—), 男, 副教授, 博士。主要从事混合料动力特性研究。E-mail: qw09061801@163.com

通讯作者: 陈国兴(1963—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

ing the 2003 Bachu  $M_s$  6.8 earthquake, the 2005 Jiujiang  $M_s$  5.7 earthquake, the 2008 Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake, the 2010 Yushu  $M_s$  7.1 earthquake, the 2011 Yingjiang  $M_s$  5.8 earthquake, the 2014 Jinggu  $M_s$  6.6 earthquake, the 2015 Pishan  $M_s$  6.5 earthquake, the 2016 Gaoxiong  $M_s$  6.7 earthquake, the 2016 Arketao  $M_s$  6.7 earthquake, the 2018 Songyuan  $M_s$  5.6 earthquake, and the 2020 Jiashi  $M_s$  6.4 earthquake, in China. In addition, the seismic liquefaction-induced damages and corresponding reasons are summarized to update the soil liquefaction history case database. The main results are as follows: (1) The distribution of soil liquefaction manifestations is mainly along the long axis of the seismic intensity contours. Soil liquefaction is prone to occur in areas with high underground water levels, such as river valleys, wetlands, dykes and dams, and farmland. Surface manifestations of liquefaction include ejection of soil-water mixtures at the surface, ground failures (surface cracking, lateral spreading, settlement), landslides, slumping of embankments, etc. (2) The ejecting forms of soil-water mixtures include single hole, string holes, linear holes, ejection belts, etc. The soil ejections may contain clay, silt, sand and gravel particles, and cobbles. These can lead to damages of farmlands, playgrounds/squares, and river courses, as well as rupture or severing of sewer, water, fuel, and other buried lifelines. (3) The consequences of liquefaction can lead to cracking, sliding, and overtopping of dyke and dams, and highway embankments. Pavement cracks are mostly along the longitudinal axis and sides of a road, and most of the dyke and dam cracks are shear-induced longitudinal cracks in the dam crest and the downstream and upstream slopes. (4) The liquefaction-induced ground settlement and lateral spreading can cause tilt, distortion, and collapse of shallow-founded buildings and structures; buoyant uplift of buried structures, failure of earth-retaining structures; lateral slide and shear failure of piles and pier walls supporting bridges, water conservancy and hydropower facilities lose function. (5) The post-earthquake-induced liquefaction phenomenon in the liquefied site was discovered in the site investigation after the Bachu earthquake, and soil re-liquefaction during the aftershock was observed in the liquefied site during the Wenchuan great earthquake. Consequently, the re-liquefaction resistance of the post-liquefaction soil should be deserved further more attention. (6) The soil liquefaction phenomena in the low-intensity regions (intensity VI) in the Wenchuan great earthquake and the Songyuan earthquake, in the deep layer soils in the Wenchuan great earthquake, and in the low-water level soils in the Songyuan earthquake are beyond-existing seismic design code knowledges.

**Keywords:** soil liquefaction; liquefaction manifestations; ground failures; liquefaction consequences; liquefaction database

## 引 言

我国地处环太平洋地震带与阿尔卑斯山脉-喜马拉雅地震带的交汇处,地震断裂带非常发达,是世界上地震最为频发的国家之一。此外,我国地震活动的主要特点是频度大、强度大、震源浅、分布广。依据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)<sup>[1]</sup>,地震烈度7度及以上地区的面积占国土面积的59%,地震烈度8度及以上地区的面积占国土面积的18%,28个省会城市和超过2/3的百万人口

以上城市位于7度以上高烈度区域,且全部国土面积均处于地震烈度6度及以上地区。地震是危及人民生命财产的突发式自然灾害,其造成的经济损失和人员伤亡十分惨重,土壤液化是最主要的地震地质灾害。据统计,自20世纪以来,我国死于地震的人数达55万之多,占全球地震死亡人数的53%;自1949年以来,100多次破坏性地震袭击了22个省(自治区、直辖市),其中涉及东部地区14个省份,造成27万余人丧生,占全国各类灾害死亡人数的54%,其中,1966年河北邢台地震、1975年辽宁海城地震、1976年河北唐山地震、1999年中国台湾集集

地震和2008年四川汶川地震是我国影响最大、破坏最强烈的几次地震。

现场调查发现,土壤液化现象是地震引起的最突出的地质灾害<sup>[2]</sup>。土壤液化可以引起地表喷水冒砂、裂缝、沉陷、侧向位移或滑坡等现象,从而引起建(构)筑物沉降或倾斜、地下管线与水槽上浮、河岸侧移与桥梁倒塌、土石坝/堤坝滑坡、地下结构与码头设施损坏等<sup>[2-3]</sup>。1966年邢台地震、1975年海城地震、1976年唐山地震都出现了大面积的砂土液化现象,导致公路、桥梁、水利设施、地下管道等发生严重损坏。1976年唐山地震引起的密云水库坝坡液化导致堤坝表面保护层的流滑。1999年中国台湾集集地震引起的土壤液化和侧向变形,造成大范围的地面开裂和房屋破坏。2008年汶川地震引起了大面积的喷水冒砂、地面塌陷和裂缝等宏观现象,并导致大量民房破坏或倒塌<sup>[4]</sup>。李兆焱<sup>[5]</sup>简要回顾了2000年前我国大陆地区发生的8次大地震导致的典型液化现象,包括:1966年 $M_s$ 6.8邢台地震<sup>[6]</sup>、1970年 $M_s$ 7.2通海地震<sup>[7-8]</sup>、1973年 $M_s$ 7.7炉霍地震<sup>[9]</sup>、1974年 $M_s$ 7.1昭通地震、1975年 $M_s$ 7.3海城地震<sup>[10]</sup>、1976年 $M_s$ 7.3龙陵地震<sup>[11]</sup>、1976年 $M_s$ 7.8唐

山地震<sup>[12-14]</sup>及1976年 $M_s$ 7.2松潘地震。这8次地震主要分布在华北地震带和南北地震带,该地区人口集中,经济发达,死亡人数超过万人的通海地震、唐山地震和汶川地震,都发生在这一地区。王维铭<sup>[15]</sup>结合上述8次地震震害资料,并结合2003年 $M_s$ 6.8巴楚地震<sup>[16]</sup>及2008年 $M_s$ 8.0汶川地震<sup>[17]</sup>液化数据,建立了液化数据库,分析了地下水位和液化土层的埋深、密实度、颗粒粒径和标贯试验锤击数等场地土条件。

2000年以来,大面积的土壤液化现象及其引起的地面结构和地下设施的严重破坏在我国各地的灾难性地震中屡屡发生,现场调查发现有明显土壤液化现象的地震至少有11次,表1汇总了与之对应的地震参数,多位学者对这些地震中的土壤液化现象及其引起的地质灾害进行了现场调查与研究。本文回顾了我国近20年11次地震的人员经济损失及地震烈度分布,总结了地震地质灾害类型,重点阐述地震引起的典型土壤液化现象及其分布特征、液化导致的地质震害及其诱因,以期增强对地震液化现象的认识及其后果的重视,并完善我国地震液化数据库,为土壤液化机理研究、液化判别及其灾害减轻措施等提供基础数据。

表1 我国近20年液化场地的地震参数

Table 1 Seismic parameters of liquefied sites in China over the last 20 years

序号	地震名称	地震日期	震中位置			震级 $M_s$	震源深度/ km	震中 烈度
			北纬	东经	参考地名			
1	巴楚地震	2003-02-24	39.50°	77.20°	新疆喀什地区巴楚县	6.8	25.2	IX
2	九江地震	2005-11-26	29.60°	115.70°	江西省九江县-瑞昌市	5.7	6	VII
3	汶川地震	2008-05-12	31.00°	103.40°	四川省汶川县	8.0	14	XI
4	玉树地震	2010-04-11	33.05°	96.92°	玉树藏族自治州玉树市	7.1	14	IX
5	盈江地震	2011-03-10	24.65°	24.65°	景颇族自治州盈江县	5.8	10	VIII
6	景谷地震	2014-10-07	23.40°	100.50°	云南省普洱市景谷县	6.6	5	VIII
7	皮山地震	2015-07-03	37.60°	78.20°	新疆和田地区皮山县	6.5	10	VIII
8	高雄地震	2016-02-06	22.94°	120.54°	中国台湾省高雄市美浓区	6.7	15	IX
9	阿克陶地震	2016-11-25	39.27°	74.04°	新疆阿克陶县	6.7	10	VIII
10	松原地震	2018-05-28	45.16°	124.42°	吉林市松原县	5.7	13	VII
11	伽师地震	2020-01-19	39.83°	77.21°	新疆喀什地区伽师县	6.4	16	VIII

## 1 近20年国内地震液化及其灾害

### 1.1 2003年新疆巴楚地震

2003年2月24日新疆喀什地区巴楚县发生 $M_s$

6.8级地震,震源深度25 km,震中烈度IX度,主震后又发生3次5级以上余震,最大余震5.9级,发生在2003年3月12日,俗称“巴楚-伽师地震(简称巴楚地震)”<sup>[18]</sup>。地震造成268人死亡,4 853人受伤,其中,主要受灾区巴楚县琼库勒恰克乡死亡267人,受灾人口约66万,受灾面积约2.2万 km<sup>2</sup>,经济损失约

14亿元<sup>[5]</sup>。此次地震为新疆有地震记录以来损失最大的一次地震,也是20世纪50年代以来新疆死亡人数最多的一次地震。地震等震线如图1所示,震中烈度Ⅸ度。

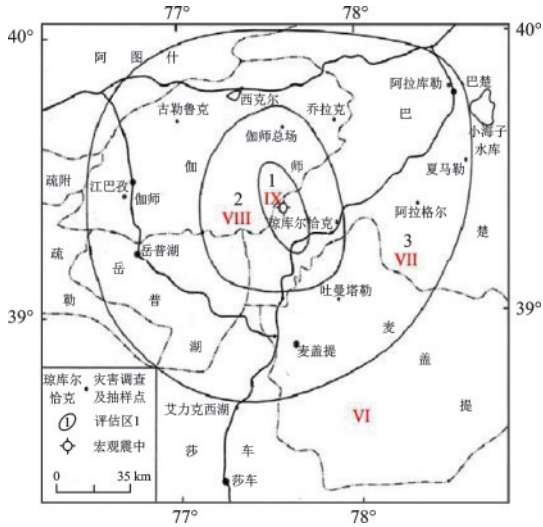


图1 2003年 $M_s$ 6.8级巴楚地震烈度图<sup>[5]</sup>

Fig.1 Seismic intensity contours for the 2003 Bachu  $M_s$  6.8 earthquake<sup>[5]</sup>

此次地震中发生了大规模的土壤液化现象。调查发现不同烈度区内均有大量液化引起的地质灾害。李兆焱<sup>[5]</sup>通过现场调查绘制了土壤液化分布

图,如图2所示。处于Ⅸ度及Ⅷ度区附近的叶尔羌河北岸地区,砂土分布广泛,且河道纵横交错,地下水位高,该地区多处发生液化,液化场地沿河流走向基本呈带状分布。典型液化现象包括:(1)克孜努尔中学(Ⅸ度区)操场上大面积冒砂积水,分布单个砂孔(砂坑)、串状砂孔、喷水冒砂带等多种形式的液化现象(图3(a)和(b));(2)色力布亚镇6大队3小队(Ⅸ度区),发现有喷水冒砂引起的孤立大砂坑,坑深0.95 m、直径约2.5 m(图3(c));(3)英吾斯

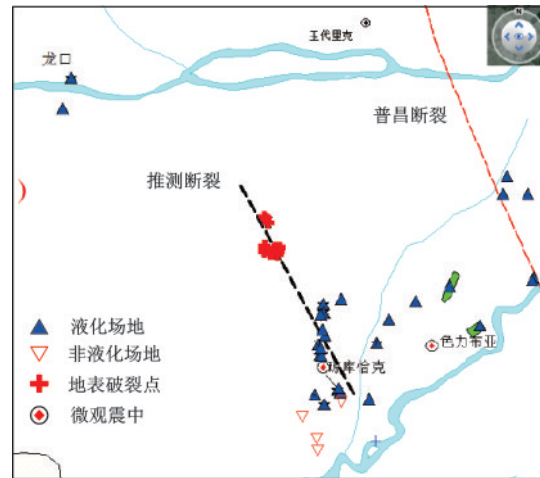
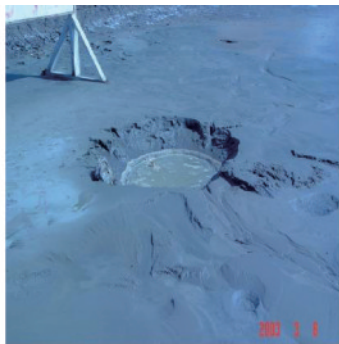


图2  $M_s$ 6.8级巴楚地震土壤液化分布图<sup>[5]</sup>

Fig.2 Locations of soil liquefaction sites during the Bachu  $M_s$  6.8 earthquake<sup>[5]</sup>



(a) 克孜努尔中学液化现场



(b) 克孜努尔中学液化现场二



(c) 色力布亚镇6大队3小队液化现场



(d) 英吾斯塘14大队液化现场



(e) 协海尔乌斯塘大桥墩液化现场



(f) 震后振动再液化

图3  $M_s$ 6.8级巴楚地震典型液化震害<sup>[5]</sup>

Fig.3 Typical soil liquefaction manifestations during the Bachu  $M_s$  6.8 earthquake<sup>[5]</sup>

塘14大队(Ⅷ度区),水塘附近出现地裂缝,并有珠串状液化孔(图3(d));(4)协海尔乌斯塘大桥处,河流东岸1m的漫滩上,喷水冒砂孔、地裂缝广泛分布。最大地裂缝长15m、宽40cm、深1m。裂缝顺河向发育,河西岸的水泥护坡产生多排裂缝(图3(e))。此外,在科克铁提沙漠河床现场勘查中,稍大的振动会导致水从地下渗出(图3(f)),这表明高地下水位区在余震中易发生再液化现象。

此次地震中,除了发现大面积的砂土液化现象,还发现砂土液化导致的次生地震震害:(1)公路多处裂缝,主要为顺路方向裂缝和路边坡裂缝;(2)不均匀的地基沉降致使工程设施和建筑物出现不同程度的破坏;(3)地裂缝导致上部建筑物开裂。(4)液化喷水冒砂导致水井和管道破坏;(5)液化喷出泥水混合物覆盖大量农田,有些区域甚至喷水成塘;(6)液化喷水淹没学校操场。

巴楚地震液化的单孔喷砂量不大,分布在广大乡村地区,有多处喷水成湖塘,这是此次地震液化的一个特点。此外,此次地震的土壤液化主要分布在沿河地段,沼泽地和沙漠低地也有少数分布。

### 1.2 2005年江西九江地震

2005年11月26日江西省九江县与瑞昌市交界处发生 $M_s$  5.7级地震,震源深度6km,震中烈度Ⅶ度,地震波及江西省九江县、瑞昌市及湖北黄梅县、武穴市<sup>[19]</sup>。地震造成13人死亡,82人重伤,693人轻伤,直接经济损失20.4亿元人民币。九江地震灾区大部分地区人口密集,村庄遍布。此次地震的等震线如图4所示<sup>[20]</sup>。烈度Ⅶ区内砂土液化引起的喷水冒砂、地面塌陷、地裂缝和崩塌等地质灾害现象普遍。



图4 2005年 $M_s$  5.7九江地震烈度图<sup>[20]</sup>

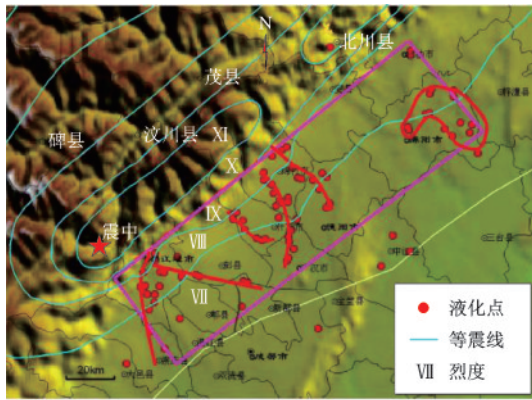
Fig.4 Seismic intensity contours for the 2005 Jiujiang  $M_s$  5.7 earthquake<sup>[20]</sup>

塌陷是此次地震最严重的地质灾害,其范围分布广,农田、河谷、村庄,甚至房屋内均有分布。塌陷导致房屋地基下沉、房屋破坏或者农田被毁,严重威胁了塌陷区人民的生命、财产安全。地震塌陷的几何形态多为圆形或椭圆形,最大直径为25m,可见深度最大达8m。此次地震产生近10处长度50m以上地震裂缝,最长1.6km以上,宽度可达10cm,裂缝主要呈NE走向,主要分布在高丰、赛湖农场、永安大堤、新港一带。砂土液化地点主要分布在农田、河谷、村庄以及部分居民屋内,喷水冒水持续10分钟以上,位于瑞昌市彭城街道、大塘村、赛湖农场和港口镇一带。

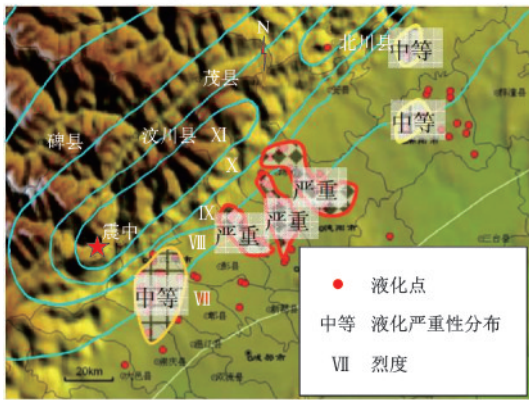
### 1.3 2008年四川汶川地震

2008年5月12日四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县发生 $M_s$  8.0级特大地震,震源深度约15km,断层长度约300km,震中烈度Ⅺ度。地震灾区涉及四川、甘肃、陕西、重庆、云南等10省(区、市)的417个县(市、区),总面积约50万 $km^2$ ,其中极重灾区和重灾区51个县市,总面积132 596  $km^2$ <sup>[21]</sup>。地震造成69 227人遇难、17 923人失踪、374 643人不同程度受伤、1 993.03万人失去住所,受灾总人口达4 625.6万人,直接经济损失8 451.4亿元<sup>[22]</sup>。本次地震中喷水冒砂、地表裂缝、地面沉降等液化宏观现象普遍<sup>[23]</sup>。中国地震局工程力学研究所依据现场调查资料绘制了土壤液化地点及其严重性分布图(图5(a)),地震烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度内均有液化现象,共发现液化点(带)达118处。此外,根据房屋建筑破坏等级划分标准以及地表破裂情况<sup>[24]</sup>,给出了严重、中等、轻微的场地液化严重性等级分布情况(图5(b)),其中严重区域3个,中等区域3个,其他为轻微区域。

由于烈度Ⅹ度和Ⅺ度主要分布于山脉之中,故液化点分布相对较少。液化点集中在成都、德阳及绵阳市沿 $N45^\circ E$ 方向的长方形区域(160 km $\times$ 60 km),其长边方向与等震线长轴方向一致。绵阳地区的液化程度相对较轻,主要分布在烈度Ⅶ和Ⅷ度区的绵阳市游仙辖区和江油市区,其中,Ⅶ度区的液化点略为集中。游仙辖区为丘陵地带,液化点分布较为零散,位于河谷河流的一级阶地或河漫滩上,系第四纪地层,呈马蹄形分布。成都市液化点的严重性程度属于中等,主要位于都江堰市,液化主要发生在2个条带上,烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ度区内



(a) 土壤液化地点及分布图



(b) 场地液化严重性等级分布情况

图5 2008年 $M_s$  8.0级汶川液化地点及其严重性分布图<sup>[23]</sup>  
Fig.5 Liquefied sites and the severities of liquefaction consequences during the 2008 Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake<sup>[23]</sup>

均有液化发生,但Ⅷ度区内的液化点最为集中。绵阳市的土壤液化最为严重,主要集中在绵竹市、什

邛市和德阳城区,其中,绵竹市的液化最为严重,土壤液化在烈度Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度区均有发生,且在Ⅷ度区的液化点较为集中。绵阳市的液化点呈3条带状分布,但液化点并不沿河流分布。说明这一带可能存在古河道。

本次地震中的液化喷出物较以往地震丰富,涵盖粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾石及卵石。液化喷出物以粉砂和细砂为主,约占50~60%。图6(a)为绵竹市板桥镇兴隆村村民住宅室内喷出的粉砂,呈浅黄色,覆盖厚度达10~20 cm。液化引起地面错位,导致该住宅后墙基础下沉,墙体水平沉降裂缝明显,主体结构受损严重。绵阳游仙区涌泉居民区喷出浅黄色粉细砂(图6(b)),绿化小区内均有不同程度的喷水冒砂,震后人工湖水位略有上升。据当地保安人员介绍,地震后1小时,水柱高度仍有30 cm左右。喷出物的中砂、粗砂占20~30%。德阳地区南丰镇毗卢小学喷出中砂(图6(c)),喷水高度约3 m,持续约3分钟,喷砂量约5 m<sup>3</sup>,地面下沉20~30 cm,教室地面隆起,墙体严重开裂,学校无喷水冒砂地方房屋损坏较轻,只有落瓦、少量微裂缝。绵阳市马井镇双石桥村地表喷出物为灰白色粗砂(图6(d)),稻田和菜地有喷水冒砂,地面下沉,单孔面积约5 m<sup>2</sup>,砂层厚约30 cm,附近砖木房有横向开裂。现场考察发现10余处有砾卵石喷出,最大粒径达15 cm。绵阳新桥镇民主村、绵阳市湔氐镇白虎头村及德阳柏隆镇松柏村等均发现有砂砾土喷出,液化带上民房破坏严重,约倒塌30%~40%。袁晓



(a) 板桥镇兴隆村地表喷出物-粉砂



(b) 绵阳市游仙区地表喷出物-粉、细砂



(c) 南丰镇毗卢小学地表喷出物-中砂



(d) 马井镇双石桥村地表喷出物-粗砂



(e) 新桥镇民主村地表喷出物-砾石



(f) 湔氐镇白虎头村地表喷出物-卵石

图6  $M_s$  8.0级汶川地震液化地表喷出物<sup>[23]</sup>

Fig.6 Liquefied soil ejection during the Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake<sup>[23]</sup>

铭等<sup>[25]</sup>分析发现:砾性土液化场地的峰值加速度介于0.15g~0.50g,Ⅸ度区有5例,仅占总数的6%,Ⅷ区内约占总数的50%。

土壤液化导致不少的农田、公路、桥梁、居民住宅、工厂和学校的破坏。据不完全统计,有20余个村庄的水井不同程度地发生了喷水冒砂现象,近千亩农田、120多个自然村、8所学校、5个工厂受到不同程度的液化影响,一些房屋建筑、学校教学楼、厂房和水井被废弃。由于土壤液化发生在农村地区,大量喷水冒砂导致农田被填埋,液化引起的地裂缝使农田蓄水困难。此外,液化喷出物还堵塞了河床。液化导致公路震害4处:路堤塌陷、路面开裂

(图7(a));10余座桥梁基础处发生液化现象,近一半桥梁震害明显(图7(b));液化导致结构性差的农房倒塌(图7(c)),有较多设有圈梁、构造柱的房屋发生整体倾斜、下沉现象;有5处工厂受到不同程度的液化影响,其中,什邡爱迪尔家俱厂内喷水冒砂400 m<sup>2</sup>,喷水高1.5 m,墙体严重变形,地表开裂(图7(d)),厂内水泥路开裂,人行道隆起,地面下沉;有8所学校受液化的影响,包括:液化带贯穿学校,教学楼基础下沉、墙体倾斜与开裂(图7(e)),砖混结构的食堂及框架结构的宿舍楼整体下沉;有20余个村庄的水井不同程度地发生了喷水冒砂,多数水井被完全填埋(图7(f))。



图7  $M_s$  8.0级汶川地震典型液化震害<sup>[23]</sup>

Fig.7 Typical liquefaction-induced damages during the Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake<sup>[23]</sup>

汶川地震的土壤液化有3个典型特点:(1)没有发现液化减震实例,凡是液化场地,震害均比周围场地的严重;(2)Ⅵ度区内发生了土壤液化现象,且有明显的液化灾害;(3)几乎所有液化场地均伴随地裂缝,导致液化灾害加重。此外,还发现两个特殊现象:①距震中较远的德阳市柏隆镇果园村在 $M_s$  8.0主震时发生液化,该场地在 $M_s$  6.4余震时再次液化;②主震时,成都、绵阳、雅安和德阳市均发生了液化喷水高度超过10 m,最大达15 m,且喷出物均为20 m以下的土层。该现象证实了深层土液化的存在。

#### 1.4 2010年青海玉树地震

2010年4月4日青海省玉树县发生 $M_s$  7.1级地震,震源深度14 km,震中烈度Ⅸ度,玉树州辖区各县均有不同程度受灾。地震造成2 698人死亡,

270人失踪,直接经济损失7 806亿元人民币。地震造成连续的地表破裂,大量民房倒塌<sup>[26]</sup>。土壤液化并不丰富,主要集中在玉树县的扎区河谷(图8(a)),并引发次生地质灾害。在结古镇西部扎拉那一带,公路路基下伏为河漫滩相砂土,地下水位浅,液化引发路基变形,致使路面呈波状起伏并发生开裂(图8(b))。

#### 1.5 2011年云南盈江地震

2011年3月10日云南省盈江县发生 $M_s$  5.8级地震,震源深度10 km,震中烈度Ⅷ度。地震造成25人死亡,250人受伤,13万人受灾。盈江盆地浅埋地下水、冲积粉细砂。地震引起盈江盆地的广泛土壤液化,表现为地表喷沙冒水、开裂、下沉和侧向滑动,造成房屋倒塌、江堤和道路开裂、水利设施淤



(a) 地震引起的扎曲河漫滩砂土液化



(b) 液化导致的扎曲北侧公路路基变形

图8 2010年 $M_s$  7.1级玉树地震土壤液化及其诱发灾害<sup>[26]</sup>  
Fig.8 Soil liquefaction manifestation and its consequences of the 2010 Yushu  $M_s$  7.1 earthquake<sup>[26]</sup>

埋、电线杆下沉等破坏<sup>[27]</sup>。盈江地震土壤液化喷出物主要有两种形态:一是丘状粉砂,一般高不超过30 cm,直径10~50 cm,在液化严重的区域成群分布(图9(a));二是沿地裂缝或喷水口随水流向四周散布的细砂,覆盖于地表(图9(b)),干燥松散。在贺哈、允冒等村寨,液化引起的地裂缝延展至房屋、围墙等,导致上部建筑开裂(图9(c)),使未震损倒塌的建筑丧失使用功能。在缓坡地带,土壤液化使地表发生侧向滑动,导致其上构(建)筑物受损。如由县城通往新城的江北岸沥青路面县道,在内倾弧形转弯处发生路面开裂(图9(d))。此外,液化导致地基承载力和摩阻力显著降低,建(构)筑物出现下沉。如弄兴村附近的多根水泥电线杆下沉几十厘米甚至超过1 m,其附近往往有明显的液化喷出物(图9(e))。液化对水利设施的破坏显著,允冒村附近的灌溉机井被液化泥沙淤埋(图9(f)),封闭抽水井发生高压喷水和砂土充淤现象。



(a) 贺哈村盈江是外侧喷沙冒水



(b) 展动堤附近细砂沿地裂缝喷出地表



(c) 液化引起的贯穿地面与墙体的裂缝



(d) 沥青路面弯转处被液化的基础拉裂



(e) 喷砂冒水与电线杆下沉



(f) 封闭抽水井同震高压喷水

图9 2011年 $M_s$  5.8级盈江地震诱发土壤液化灾害<sup>[27]</sup>

Fig.9 Soil liquefaction manifestation and its consequences during the 2011 Yingjiang  $M_s$  5.8 earthquake<sup>[27]</sup>

震后调查发现,盈江大堤约19 km严重开裂,岸堤裂口宽10~40 cm,平均深1 m,部分裂缝深达3 m,断续分布,绝大部分沿大堤顶部中央展布,走向以平行大堤方向为主,少部分斜切、横切大堤,部分地段的堤顶中部发生塌陷<sup>[27]</sup>。江堤开裂的主要原因(图10):地震时上覆坝体使粉砂层坝基中的高压孔隙水无法及时排泄,发生了严重的土壤液化,在坝体重力作用下液化粉砂发生侧向流动,导致大坝产生侧向滑动应力,由于大坝为梯形对称结构,致使

坝堤中央的裂缝最发育。坝基侧向流动压力使两侧的喷砂冒水现象严重。盈江上游展动堤附近的喷砂以粒径0.25~0.075 mm的细砂为主,而下游贺哈堤附近的喷砂主要为0.075 mm左右的粉砂。河道附近地下水埋深大多小于1.5 m,成为土壤液化灾害的易发区。

### 1.6 2014年云南景谷地震

2014年10月7日云南省洱市景谷傣族彝族自



图10 盈江大堤土壤液化灾害效应示意图<sup>[27]</sup>

Fig.10 Schematic diagram of soil liquefaction hazard in the Yingjiang embankment<sup>[27]</sup>

治县发生 $M_s$  6.6级地震,震源深度5 km,震中烈度Ⅷ度。地震造成1人死亡,323人受伤,经济损失17

余亿元。地震造成普洱市景谷县、思茅区、宁洱县、镇沅县、澜沧县、景东县和临沧市临翔区、双江县、云县9个县(区)的37个乡镇受灾。发现震中区有土壤液化和地裂缝现象。现场考察绘制的震中区地裂缝和液化分布如图11(a)所示<sup>[28]</sup>。地裂缝的单条规模不大,集中出现在震中区地形平坦的Ⅰ级阶地上,喷水冒砂点呈串珠状直线分布。土壤液化集中分布于两处:观察点No.1位于勐嘎南500 m稻田中,规模较大,呈线状分布(图11(b)和(c)),由多个冒水孔组成,长3~7 m,宽约0.8 m;观察点No.2位于芒费,有7处大的喷水冒砂点,均呈长条线状分布,规模最大的喷砂带长12 m、宽1 m、厚0.3 m。另有两处喷砂带呈反向共轭分布现象(图11(d)),在这些线状延伸的喷砂地带,喷砂孔呈平直的串珠状排列(图11(e))。

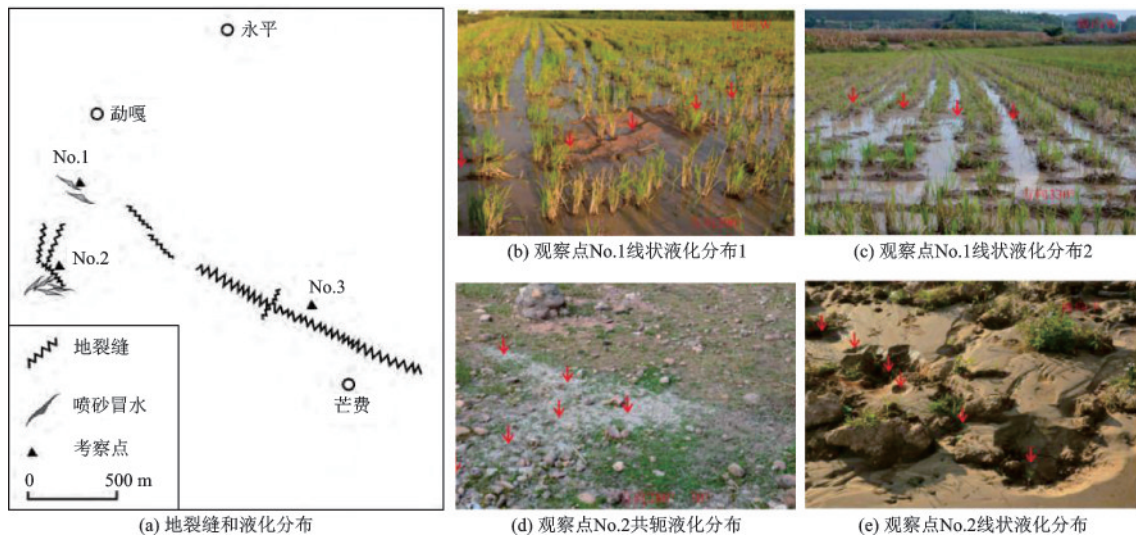


图11 2014年 $M_s$  6.6级景谷地震地裂缝和土壤液化位置图及典型液化形态<sup>[28]</sup>

Fig.11 Locations of ground fissures and soil liquefaction sites and typical liquefaction manifestations during the 2014 Jinggu  $M_s$  6.6 earthquake<sup>[28]</sup>

### 1.7 2015年新疆皮山地震

2015年7月3日新疆维吾尔自治区和田地区皮山县发生 $M_s$  6.5级地震,震源深度10 km,震中烈度Ⅷ度,等震线长轴呈NWW走向,面积为1 110 m<sup>2</sup>,存在Ⅸ度异常点(图12)。地震造成4人死亡,48人受伤,灾区总面积达14 580 m<sup>2</sup>,造成和田地区皮山县、喀什地区叶城县及兵团第十四师皮山农场受灾<sup>[29]</sup>。

地震引起的喷水冒砂、地裂缝、崩塌等地震地质灾害,主要分布在Ⅷ度及Ⅶ度区。土壤液化主要分布在Ⅷ度区,其中,在皮西那乡5队农田出现多处喷水冒砂现象,喷砂口直径约30 cm,喷出锥径达

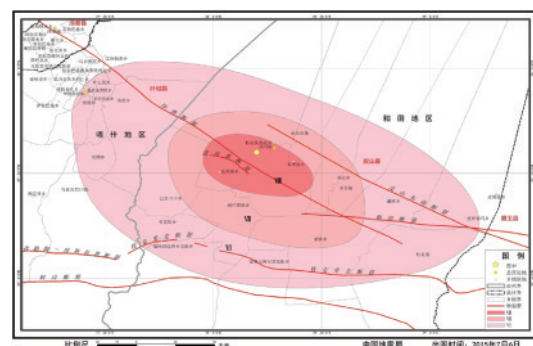


图12 2015年 $M_s$  6.5级皮山地震烈度图<sup>[29]</sup>

Fig.12 Seismic intensity contours for the 2015 Pishan  $M_s$  6.5 earthquake<sup>[29]</sup>

1.5 m,喷出物为细砂和粉砂(图13)。在皮山县固玛镇雅普泉北侧2.5 km处发现一系列液化土喷出

口(图14),呈线状分布于农田低洼积水处。液化导致雅普泉北侧一水塘边的黄土边坡出现坍塌现象。皮山县地处昆仑山西麓,山前地带北侧为塔克拉玛



图13 皮西那乡农田中喷水冒砂口<sup>[30]</sup>

Fig.13 Soil ejections in the farmland, Pixina town<sup>[30]</sup>



图14 固玛镇液化喷水冒砂<sup>[30]</sup>

Fig.14 Soil liquefaction ejections in Guma town<sup>[30]</sup>

干沙漠,主要为粉砂与细砂地层,级配较差,地下水位较浅,液化地点较多且较严重。

### 1.8 2016年中国台湾高雄地震

2016年2月6日中国台湾省高雄市发生 $M_s$  6.7级地震,震源深度15 km,震中烈度IX度,台南市受地震的影响最大,地震造成117人死亡<sup>[31]</sup>。台南市发生大范围的砂土液化现象(图15(a)),其原因主要有<sup>[32]</sup>:(1)台南地处嘉南冲积平原,地下水位浅、砂土层厚,易于液化;(2)因台南冲积层较厚,地震波在深厚土层传播中被放大,导致地表加速度的放大显著,震动历时延长,进一步加重液化。台南安南区液化震陷达30~100 cm,给建筑物和基础设施造成很大破坏。安南区的溪顶里,土壤液化导致整个小区的地层下陷,最严重一栋楼的底层超过一半的高度陷入地下(图15(b))。

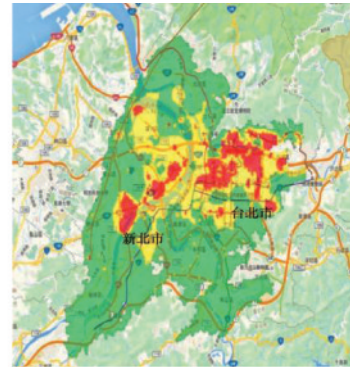
此次地震增强了中国台湾的土壤液化危害性意识。中国台湾地质调查所根据土壤液化危害性等级,将台北市和新北市分为红(高风险区)、黄(中等危险区)、绿(低风险区)3个液化潜势区<sup>[33]</sup>。



(a) 土壤液化,房屋裂缝喷泥沙



(b) 液化导致楼房整体下陷



(c) 台北市、新北市液化潜势图

图15 2016年 $M_s$  6.7高雄地震土壤液化现象及中国台湾省台北市、新北市液化潜势图<sup>[32]</sup>

Fig.15 Soil liquefaction manifestations and liquefaction potential map in the Taipei and Xinbei regions during the 2016 Gaoxiong  $M_s$  6.7 earthquake<sup>[32]</sup>

### 1.9 2016年新疆阿克陶地震

2016年11月25日新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县发生 $M_s$  6.7级地震,震源深度10 km,震中烈度VIII度。地震造成1人死亡。烈度等震线大致呈椭圆形,长轴方向为NWW(图16(a)),其中,烈度VIII、VII和VI度区的面积分别为1 046 km<sup>2</sup>、5 045 km<sup>2</sup>和11 515 km<sup>2</sup>。地震影响波及塔吉克斯坦。本次地震存在2个宏观震中:维日麻村和布拉克村,均发育大量的地震地质灾害,包括土壤液化、地裂缝、崩塌和

滑坡及不稳定边坡等(图16(b))<sup>[34]</sup>。

现场调查发现<sup>[34]</sup>,大量的土壤液化现象仅发生在2个宏观震中地区,涉及面积约1 000 m<sup>2</sup>。维日麻村附近的液化多数在泉眼通道喷出(图17(a)),部分地点的液化土沿地裂缝喷出。地震造成约20%的泉眼发生土壤液化,喷砂口直径0.05~0.2 m,喷出锥径0.3~1.5 m,喷出锥最高达15 cm,喷出物多为灰绿色黏土(图17(b))。在喷水冒砂口边开挖探槽,显示靠近地表的细砂层、粉土层为冻土层(图17(b)),泉眼中多为松散、含水

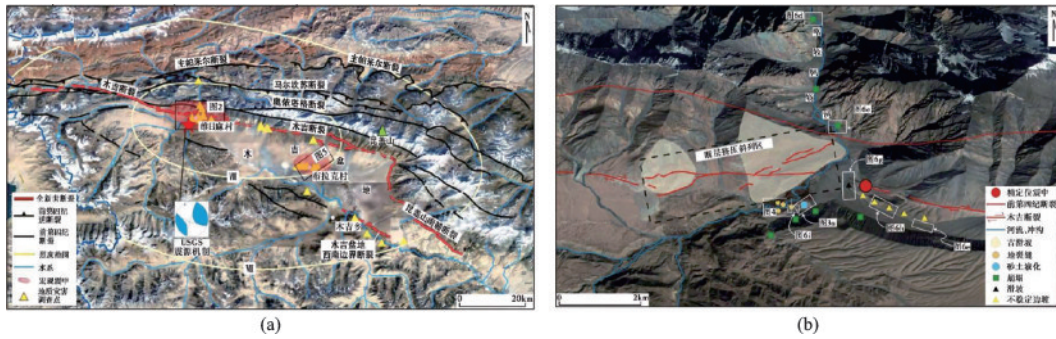
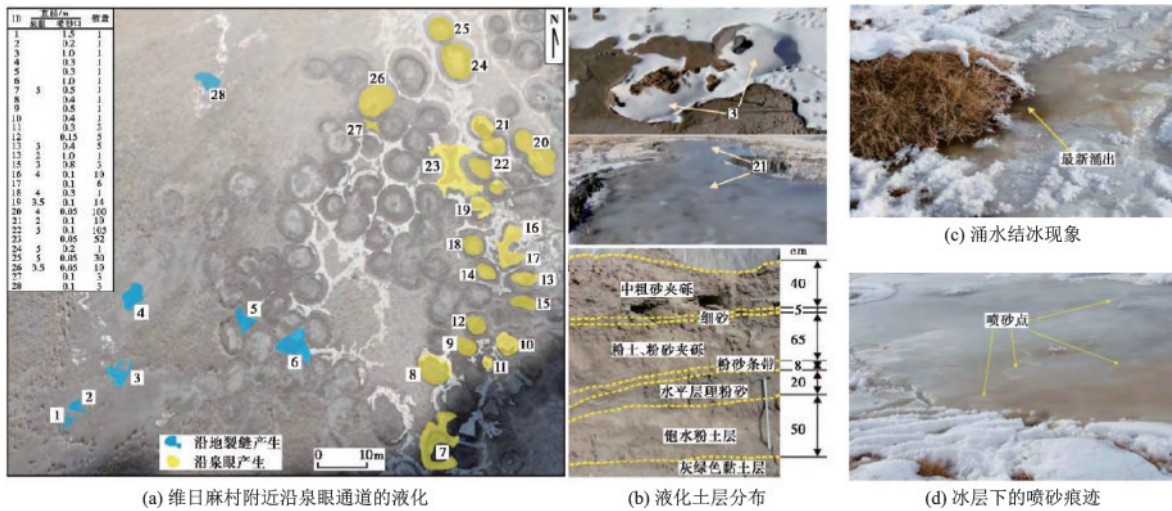


图16 2016年 $M_s$  6.7级阿克陶地震烈度及地震灾害分布<sup>[34]</sup>

Fig.16 Seismic intensity contours and seismic damage distribution during the 2016 Arketao  $M_s$  6.7 earthquake<sup>[34]</sup>



(a) 维日麻村附近沿泉眼通道的液化

(b) 液化土层分布

(c) 涌水结冰现象

(d) 冰层下的喷砂痕迹

图17 阿克陶地震震中土壤液化现象<sup>[34]</sup>

Fig.17 Soil liquefaction manifestations in the epicenter region of Arketao earthquake<sup>[34]</sup>

量低的粉土、粉砂,地震作用未对冻土层造成影响,从而使液化土沿结构松散、未被冰冻的泉眼和地表裂缝向上喷出,形成一系列的喷出锥。在布拉克村东100 m的山前冲积扇前缘与木吉河交汇处的湿地、沼泽区,发现片状分布的液化喷出物。由于该地区平均气温在 $-15^{\circ}\text{C}$ 以下,未找到喷水冒砂的直接证据,但发现一系列全新的涌水结冰现象。由于地表已经形成大面积的冰层,致使液化喷出物沿草甸根部涌出,并迅速结冻(图17(c));在冰层之下依旧能发现少量的喷砂痕迹,但冰层厚度较大,喷砂表现为冰层之下形成了一个圆形的喷砂点(图17(d))。

### 1.10 2018年吉林松原地震

2018年5月28日新吉林省松原市发生 $M_s$  5.7级地震,震源深度13 km,震中位于松原市宁江区毛都站镇,震中烈度Ⅶ度,地震影响面积超过1 000  $\text{km}^2$ ,地震烈度分布如图18所示。现场调查没

有发现人员伤亡<sup>[35]</sup>。本次地震场地效应明显,尤其以土壤液化现象最为突出。液化场地集中在Ⅶ度区的牙木吐村、复兴村、姜家围子村附近,Ⅵ度区也分布多个土壤液化场地。

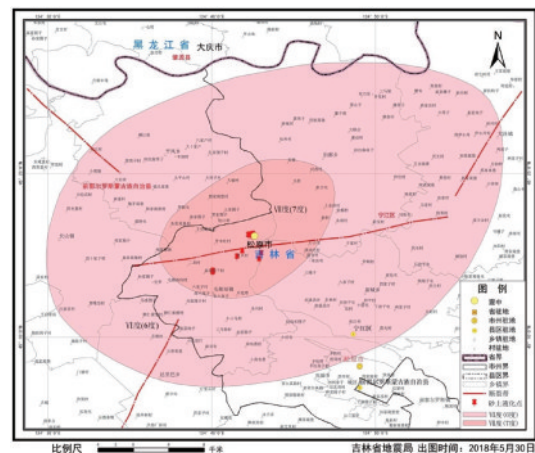


图18 2018年 $M_s$  5.6级松原地震烈度图<sup>[35]</sup>

Fig.18 Seismic intensity contours for the 2018 Songyuan  $M_s$  5.6 earthquake<sup>[35]</sup>

土壤液化区处于松辽盆地腹地,为松嫩低平原。该地区以Ⅲ类场地为主,少量为Ⅱ类场地,大部分场地地下水位较高,浅于2 m;场地有较浅的黏土层和填土层,砂土层分布较厚且较松散,易于液化。土壤液化现象绝大部分发生在水田中,部分液化点影响到房屋地基的稳定性,导致地基不均匀沉降。现场调查发现200多个液化点,主要有两个液化带(图19),沿松花江分布。

复兴村和牙木吐村的稻田有大面积喷水冒砂,影响范围超过800 000 m<sup>2</sup>,液化喷砂孔密集分布,液

化喷砂孔大多分布于低洼区,大多数喷出物包含黑褐色粉细砂、灰色-灰黄色细砂、粉细砂,局部的液化喷出物有红色沫状物。喷出物最大沙坑,直径约3 m,深超过2 m(图20(a))。姜家围子村的村委会广场喷水冒砂现象尤其严重,震后的喷水冒砂持续时间长。从村委会后院开始,穿过广场和100 m左右的农田,截止在村民家前院稻田,有非常明显南北向带状特征(图20(b))。现场调查发现姜家围子村支部附近液化场地的地下水位很深,通过激光测距仪实测村委会自然水井的水位6.7 m,超过依据《建筑抗震设计规范》<sup>[36]</sup>规定的可不考虑场地液化影响的地下水位深度。现场调查发现,有10多个液化点分布在Ⅵ烈度区,低震级低烈度的多个场地发生液化是本次地震一个突出特点。在Ⅵ烈度区的郎家窝堡村(图20(c)和(d)),发现了长200 m、宽约10 cm的液化裂缝横穿村民门前菜地;葱田的液化裂缝带喷砂量较多,堆积厚度约5 cm。在复兴村东1.5 km的松花江岸边(图20(e)),发现了40多个喷砂孔(带),大体成南北向带状分布,长度接近2 km;该液化带有多处裂缝,裂缝最宽达15 cm,呈串状连续喷砂孔(图20(f))。

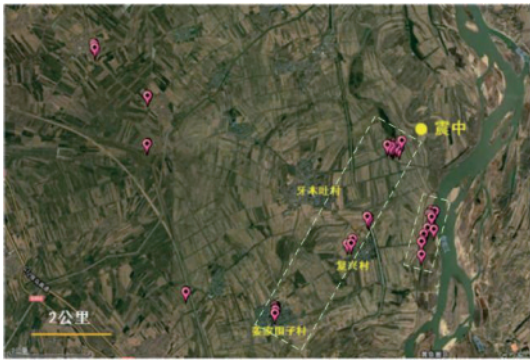


图19 Ms 5.6级松原地震液化场地分布图<sup>[35]</sup>

Fig.19 Locations of soil liquefaction site during the Songyuan Ms 5.6 earthquake<sup>[35]</sup>

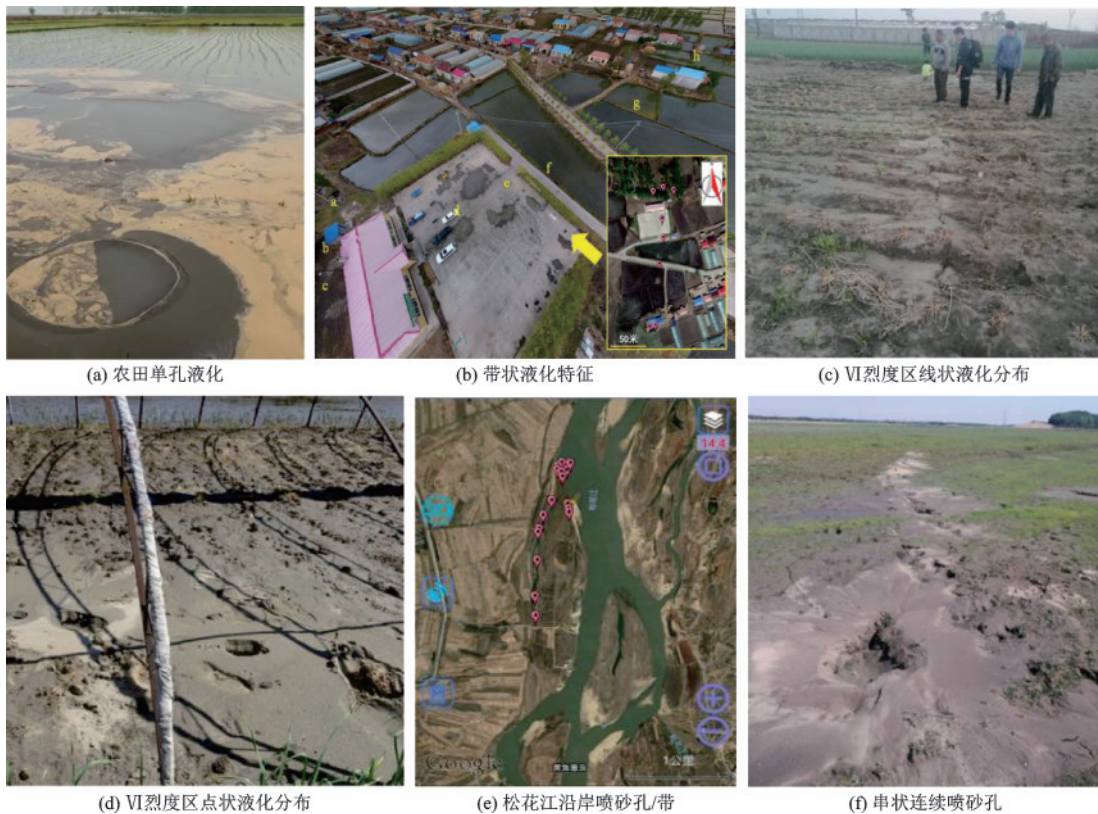


图20 Ms 5.6级松原地震砂土液化现象<sup>[35]</sup>

Fig.20 Soil liquefaction manifestations of the Songyuan Ms 5.6 earthquake<sup>[35]</sup>

### 1.11 2020年新疆伽师地震

2020年1月19日新疆维吾尔自治区的伽师县发生 $M_s$  6.4级地震,震源深度16 km,震中烈度Ⅷ度。地震造成1人死亡、2人轻伤。地震地质灾害集中Ⅷ度区,主要包括地裂缝、土壤液化和崩塌。基于现场调查的四个观察点资料,绘制了本次地震地质灾害的分布图,如图21所示<sup>[37]</sup>。

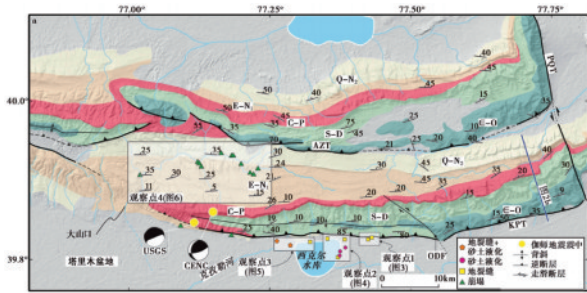


图21  $M_s$  6.4级伽师地震地质灾害分布图<sup>[37]</sup>

Fig.21 Seismic geological hazard distribution during the Jiashi  $M_s$  6.4 earthquake<sup>[37]</sup>

观察点2和3均有土壤液化现象及地裂缝。观察点2主要位于西克尔库勒镇和西克尔水库区域内。西克尔大坝严重破坏,坝顶裂缝最大深度约4 m、长约900 m。坝后坡分布较多低洼积水坑,分布范围较大,植被茂密。仅在坝后5~700 m的范围内发现了4处砂土液化现象,最大喷砂锥径达3 m;液化喷出物包括灰色、灰褐色、黄褐色的粉砂和粉土等。图22为西克尔大坝裂缝和土壤液化分布。观察点3位于西克尔库勒镇西约3 km处。该观察点发现沿314国道纵向发育的大面积地裂缝,裂缝宽约3 cm、深约33 cm,多数裂缝长100~200 m,最长约500 m;部分裂缝有灰褐色泥质粉砂涌出。

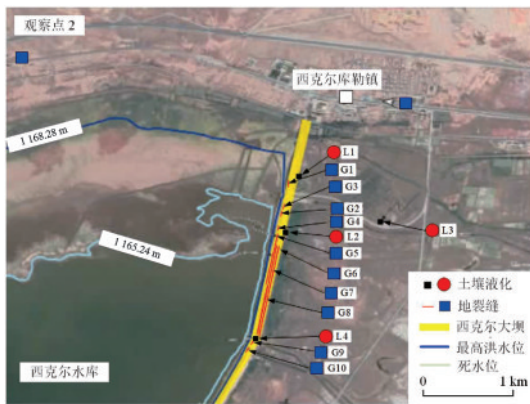


图22 西克尔大坝地裂缝和土壤液化分布<sup>[37]</sup>

Fig.22 Locations of ground fissures and soil liquefaction sites in the Seaker dam<sup>[37]</sup>

## 2 总结与讨论

收集和整理了我国近20年来11次地震的液化现场调查结果,以补充和完善我国的液化资料数据库,主要总结如下:

(1) 在地震烈度Ⅵ~Ⅺ区均发生了土壤液化现象,且烈度越高,地震导致的液化震害越严重。液化场地主要沿等震线长轴方向分布,河谷、湿地、堤坝、农田等地下水位区场地,易发生地震液化。地表液化迹象表现为喷水冒砂、裂缝、塌陷、不均匀沉降等宏观现象。

(2) 喷水冒砂是土壤液化最普遍的现象,液化土喷出迹象包括单个砂孔、串状砂孔、线状砂孔、喷水冒砂带等形式。喷砂孔直径可达3 m、深度超过2 m;最长喷水冒砂时间约1 h,喷水最高约10 m。泥水喷出物含有黏土、粉土、泥质粉砂、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾石及卵石等,通常会导致校园操场/广场、农田、河道、水井、地下管道等破坏。

(3) 液化导致地面、广场、农田、路面及堤坝等开裂,部分裂缝延伸至建筑物,导致建(构)筑物沉降、倾斜或裂缝;公路路面裂缝多呈顺路向和路边裂缝,导致路面滑移、边坡失稳或存在安全隐患。堤坝裂缝大多沿堤坝纵向发育,分布于坝顶和坝坡,裂缝最深可达4 m、最长约500 m;液化引起的场地沉降和侧移导致挡土结构破坏、桥墩倾斜和移位,以及水利水电设施丧失功能。

(4) 发现汶川大地震液化场地在余震中再次发生液化的现象,这与液化土壤震后土层变密、液化强度增大而难以二次液化的传统认识不一致。液化后土体抵抗再次液化的强度问题应予关注。

(5) 低烈度区(Ⅵ区)土壤液化现象在 $M_s$  8.0汶川地震及 $M_s$  5.6松原地震中均有发现,这与我国现行《建筑抗震设计规范》<sup>[35]</sup>规定Ⅵ度区不考虑场地液化的影响有悖。Ⅵ度区土壤液化灾害的问题应予关注。

(6) 汶川大地震证实了20 m以深的深层土壤液化现象,喷水高度达10~15 m。发现了低震级松原地震Ⅷ度区的液化场地地下水位深度大于《建筑抗震设计规范》<sup>[35]</sup>规定的可不考虑液化影响的地下水位深度的现象。深层土液化、低水位场地土液化现象的问题应予关注。

### 参考文献:

[1] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:

- 中国标准出版社, 2015.
- [2] 陈国兴, 金丹丹, 常向东, 等. 最近 20 年地震中场地液化现象的回顾与土体液化可能性的评价准则[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2737-2755.  
Chen G X, Jin D D, Chang X D, et al. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes in recent twenty years and liquefaction susceptibility criteria for soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (10): 2737-2755. (in Chinese)
- [3] Idriss I M, Boulanger R W. Soil liquefaction during earthquakes[R]. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [4] 曹振中, 袁晓铭, 孙锐, 等. 汶川大地震液化宏观现象概述[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 645-650.  
Cao Z Z, Yuan X M, Sun Y, et al. Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (4): 645-650. (in Chinese)
- [5] 李兆焱. 基于巴楚地震调查的液化判别方法研究[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2012.  
Li Z Y. A study into liquefaction discrimination methods based on surveys of the Bachu earthquake [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [6] 陈运泰, 林邦慧, 林中洋. 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 1975, 18(3): 164-182.  
Chen Y T, Lin B H, Lin Z Y. Research on the focal process of the Xingtai earthquake in 1966 based on observations of ground deformation [J]. Journal of Geophysics, 1975, 18(3): 164-182. (in Chinese)
- [7] 张四昌, 刘百箴. 1970 年通海地震的地震地质特征[J]. 地质科学, 1978, 13(4): 323-335, 393-394.  
Zhang S C, Liu B C. Seismological and geological characteristics of Tonghai Earthquake in 1970 [J]. Scientia Geologica Sinica, 1978, 13(4): 323-335, 393-394. (in Chinese)
- [8] 刘玉权, 黄震民, 杨来宝. 1970 年通海地震的水平位移研究[J]. 地震研究, 1984, 7(2): 187-196.  
Liu Y Q, Huang Z M, Yang L B. Research on horizontal displacement of Tonghai Earthquake in 1970 [J]. Journal of Seismological Research, 1984, 7(2): 187-196. (in Chinese)
- [9] 唐荣昌, 黄祖智. 炉霍地震考察记[C]//中国地震学会成立 20 周年纪念文集, 北京: [s.n.], 1999.  
Tang R C, Huang Z Z. Investigation of Luhuo Earthquake [C]//Collected Works of the 20th Anniversary of the Founding of the Chinese Seismological Society. Beijing: [s.n.], 1999. (in Chinese)
- [10] 地面运动组. 海城地震震害分布与场地条件的关系 [R]. 北京: 中国科学院工程力学研究所, 1975.
- [11] 张四昌, 徐杰. 1976 年龙陵地震地震地质特征的探讨 [J]. 地震研究, 1978, 1(3): 44-54.  
Zhang S C, Xu J. Discussion on the seismological and geological characteristics of the Longling Earthquake in 1976 [J]. Journal of Seismological Research, 1978, 1 (3): 44-54. (in Chinese)
- [12] 唐山地震砂土液化联合研究小组. 唐山地震砂土液化现场勘查资料研究报告[R]. 北京: 铁道部铁道科学研究所, 1982.
- [13] 唐山地震砂土液化联合研究小组. 唐山强震区地震工程地质研究—第二部分场地液化[R]. 北京: 中国建筑科学研究院勘察技术研究所, 1980.
- [14] 尹荣一, 刘运明, 李有利, 等. 唐山地区地震液化与地貌之间的关系[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 110-112.  
Yin R Y, Liu Y M, Li Y L, et al. The relation between earthquake liquefaction and landforms in Tangshan region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4): 110-112. (in Chinese)
- [15] 王维铭. 场地液化特征研究及液化影响因素评价[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
Wang W M. Study on liquefaction characteristics and liquefaction-influencing factors assessment [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [16] 李兆焱. 基于巴楚地震调查的液化判别方法研究[J]. 国际地震动态, 2013(3): 43-44.  
Li Z Y. Research on Liquefaction discrimination method based on Bachu earthquake survey [J]. International Earthquake Dynamics, 2013(3): 43-44. (in Chinese)
- [17] 曹振中, 侯龙清, 袁晓铭, 等. 汶川 8.0 级地震液化震害及特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3549-3555.  
Cao Z Z, Hou L Q, Yuan X M, et al. Characteristics of liquefaction-induced damages during Wenchuan  $M_w$  8.0 earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (11): 3549-3555. (in Chinese)
- [18] 李兆焱, 孙锐, 曹振中, 等. 静力触探法对巴楚地震液化判别的适用性[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3907-3912.  
Li Z Y, Sun Y, Cao Z Z, et al. Feasibility of cone penetration test to evaluating Bachu earthquake liquefaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3907-3912. (in Chinese)
- [19] 李传友, 曾新福, 张剑玺. 2005 年江西九江 5.7 级地震构造背景与发震构造[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(3): 343-354.  
Li C Y, Zeng X F, Zhang J X. The tectonic background and seismogenic structure of the Jiujiang  $M5.7$  earthquake in Jiangxi Province in 2005 [J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2008, 38(3): 343-

354. (in Chinese)
- [20] 曾新福, 汤兰荣, 江春亮, 等. 九江—瑞昌 5.7 级地震地质灾害特征及发震构造[J]. 华北地震科学, 2018, 36(2): 8-17.  
Zeng X F, Tang L R, Jiang C L, et al. The geological hazard characteristics and seismogenic structure of the Jiujiang-Ruichang  $M_{s}5.7$  earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 2018, 36(2): 8-17. (in Chinese)
- [21] 陈国兴, 景立平, 李永强. 汶川地震中小型水库震害与数据库[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [22] 民政部, 发展改革委, 财政部, 等. 关于印发汶川地震灾害范围评估结果的通知[R]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府, 2008.
- [23] 曹振中. 汶川地震液化特征及砂砾土液化预测方法研究[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2010.  
Cao Z Z. Characteristics of soil liquefaction in the great Wenchuan earthquake and procedures for gravelly soil liquefaction evaluation [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)
- [24] 地震现场工作第三部分: 调查规范: GB/T 18208.3—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [25] 袁晓铭, 王海, 曹振中, 等. 汶川地震砾性土液化场地特征解析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2733-2743.  
Yuan X M, Wang H, Cao Z Z, et al. Interpretation to characteristics of gravelly soils silts that liquefied in Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2733-2743. (in Chinese)
- [26] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树  $M_{s}7.1$  级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 289-296.  
Yin Y P, Zhang Y S, Ma Y S, et al. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu  $M_{s}7.1$  earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289-296. (in Chinese)
- [27] 姚鑫, 张加桂, 张永双, 等. 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震诱发砂土液化灾害特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 152-161.  
Yao X, Zhang J G, Zhang Y S, et al. Study of sand liquefaction hazard features induced by Yingjiang  $M_{s}5.8$  earthquake on March 10, 2011 [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 152-161. (in Chinese)
- [28] 常祖峰, 陈晓利, 陈宇军, 等. 景谷  $M_{s}6.6$  地震同震地表破坏特征与孕震构造[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2539-2552.  
Chang Z F, Chen X L, Chen Y J, et al. The co-seismic ground failure features and seismogenic structure of the Jinggu  $M_{s}6.6$  earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2539-2552. (in Chinese)
- [29] 新疆维吾尔自治区地震局. 2015 年 7 月 3 日皮山 6.5 级地震灾害损失评估报告[R]. 新疆: [s.n.], 2015.
- [30] 姚远, 胡伟华, 吴国栋, 等. 2015 年 7 月 3 日新疆皮山  $M_{s}6.5$  地震烈度与地震地质灾害特点[J]. 地震工程学报, 2016, 38(4): 663-668.  
Yao Y, Hu W H, Wu G D, et al. Geological hazard characteristics and seismic intensity of July 3, 2015, Pishan, Xinjiang,  $M_{s}6.5$  earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 663-668. (in Chinese)
- [31] 胡进军. 2016-02-06 台湾高雄地震事件[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 191-192.  
Hu J J. 2016-02-06 Taiwan Gaoxiong earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 191-192. (in Chinese)
- [32] 李兆焱, 袁晓铭. 2016 年台湾高雄地震场地效应及砂土液化破坏概述[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(3): 1-7.  
Li Z Y, Yuan X M. Seismic damage summarization of site effect and soil liquefaction in 2016 Kaohsiung earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(3): 1-7. (in Chinese)
- [33] 台北市、新北市液化潜势图[EB]. <http://www.Ettoday.net/news/20160317/664563.htm>.
- [34] 姚远, 陈杰, 李涛, 等. 2016 年 11 月 25 日新疆阿克陶  $M_{w}6.6$  地震宏观震中与地质灾害[J]. 地震地质, 2018, 40(2): 426-439.  
Yao Y, Chen J, Li T, et al. Geological hazard characteristics and macroscopic epicenter of November 25, 2016, Arketao, Xinjiang,  $M_{w}6.6$  earthquake [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(2): 426-439. (in Chinese)
- [35] 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 W, Li Z Y, Lu K Y, 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)
- [36] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [37] 姚远, 李涛, 刘奇, 等. 2020 年 1 月 19 日新疆伽师  $M_{w}6.0$  地震震中区地质灾害特点[J]. 地震地质, 2021, 43(2): 410-429.  
Yao Y, Li T, Liu Q, et al. Characteristics of geological hazards in the epicenter of the Jiashi  $M_{w}6.0$  earthquake on January 19, 2020 [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(2): 410-429. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)