

# 杭州市地理地质特点

(2021年5月)

## 1. 杭州市自然地理特点

杭州市地处长江三角洲南翼，首批国家历史文化名城和长三角经济区重要中心城市之一，地理坐标为东经  $118^{\circ} 21'$  -  $120^{\circ} 30'$ ，北纬  $29^{\circ} 11'$  -  $30^{\circ} 33'$ 。杭州现下辖 10 个区、2 个县，代管 1 个县级市里，市域总面积 16596 平方公里。东临杭州湾，陆域与安徽接壤（图 1）。



图 1 杭州市地形图

杭州地形复杂多样，地势自西向东逐渐降低，受山脉水系影响，呈山水相依般的水墨画卷。西部属浙西北中低丘陵区，低山丘陵与河谷盆地相间排列，交错分布，形成中山-深谷、低山丘陵-宽谷和河谷平原三种地貌，主干山脉有天目山、白际山和龙门山等，最高峰为白际山的清凉峰（海拔 1781 米）；东部为浙北堆积平原，面积占市域总面积的 34.4%，地势低平，

河网和湖泊密布。杭州拥有千岛湖、钱塘江、东苕溪和京杭大运河等著名水体，具有典型的“江南水乡”特征。

杭州属亚热带季风区，四季分明，光照充足，雨量充沛。2019年市区平均气温 18.0℃，比上年低 0.1 度；总降水量 1650 毫米，比上年减少 178 毫米；总日照时数 1658 小时，比上年减少 87 小时；年极端最高气温 39.4℃（桐庐，8 月 28 日），极端最低气温-3.7℃（临安，1 月 27 日）；空气优良天数为 287 天，优良率为 78.6%；市区 PM2.5 平均浓度 37.7 微克/立方米，二氧化氮年均浓度值 41 微克/立方米，二氧化硫年均浓度值 7 微克/立方米。

钱塘江、富春江、新安江水面较宽，早晚江面水寒，与空气温差大，会沿江面形成小气候，凝成或浓或淡、若有若无的白雾。特别是从新安江水电站 70 米深处喷涌而出的江水常年保持 14℃至 17℃，致使大坝至白沙大桥一带十多公里的水温保持在摄氏 14℃左右，早晚温差大，凝成了水汽，形成远近闻名“白沙奇雾”景观。

## 2. 杭州市地质概况

### 2.1 地层

#### 2.1.1 基岩地层

杭州市隶属扬子地层区的江南地层分区，跨越江山-临安和杭州-嘉兴两地层小区，基岩地层发育较为齐全，除三叠纪地层缺失以外，元古代（距今 10 亿年）至第三纪（距今 300 万年）地层均有分布，共划分为 6 个群 48 个组级岩石地层单元。元古界由浅变质的碎屑岩、火山岩组成，震旦系和古生界由海相碎屑岩、碳酸盐岩组成，中、新生界由陆相碎屑岩夹火山

岩组成，地表出露的地层主要为奥陶纪、石炭纪灰岩及侏罗纪火山岩。

### 2.1.2 第四纪松散层

区内第四系从中更新世（距今 78.1 万年）到全新世（距今 2500 年）的地层均有发育。根据区内第四系结构、沉积物特征、成因类型和地貌形态，将其划分为平原区和山麓沟谷区。

#### （1）山麓沟谷区

主要以洪积、坡洪积地层为主，少量为残积、残坡积地层，常在山前、坡麓及沟谷见及，结构松散，通常具有二元结构，及上部为棕红（黄、灰黄）色粘土、粉质粘土、粉砂等，下部为棕黄色砂砾石、砂砾石混粘性土等。局部含较多的碎石、砾石。厚 3~10m。

#### （2）平原区

第四纪地层发育齐全，沉积物厚度变化大，沉积类型复杂多样，岩相变化剧烈，岩性组合复杂。

**中更新统（距今 78.1~12.6 万年）地层：**上组地层在各区均有发育，由西向东层底埋深变化较大，介于 34~100m 之间，钱塘江地层区砂砾石层埋藏较深，一般为 64~81 m，且在古河谷最深部位厚度最大。主体岩性为棕黄、褐黄、灰绿或杂色（含砾石）粉质粘土、砂砾石、砾石混粘性土等，含水量高，为区内第 II 承压水含水层赋存地层。下组主要分布于萧山六工段~头蓬东北的围垦区。由厚层冲洪积砂砾石与薄层冲湖积杂色粘性土构成。底板埋深一般为 105~120m，顶板埋深一般为 95~100 m。

**上更新统（距今 12.6~1.17 万年）地层：**受气候变迁影响，自下而上包括三个由粗到细的沉积旋回，“粗”颗粒层主要为粉细砂、粉土、砂砾石、中粗砂等，含水量相对较高，为区内第一承压水含水层赋存地层。流-软塑状，俗称“软土层”，局部地段缺失；“细”颗粒层主要为粘性土、粉质粘土、粘土等，可塑-硬塑，俗称“硬土层”，局部地段缺失。因此总

体具三硬三软结构。

**全新统（距今 1.17 万年~今）地层：**广布全区，组成平原表部。也具有两个沉积旋回，可划分为下、中、上三个组。下组下部为灰、深灰色淤泥质粘土、粉质粘土（软土层），局部夹粉砂薄层，流塑-软塑。上部为河湖相沉积的粉质粘土、粘土（硬土层），该硬土层除苕溪地层区有少量分布外，其它地区普遍缺失；上组通常组成平原表部，顶部 0~1.7m 为耕植土或人工填土，其下为砂质粉土、粉砂、粉质粘土、粘土等，软塑-可塑。

### 2.1.3 工程地质

#### （1）岩体工程地质特征

杭州市基岩区，自元古代至中生代的地层均有分布，故岩石成因复杂、类型多样、工程性质差别较大。大部分岩体属坚硬、较坚硬岩，抗压强度普遍大于 30MPa，抗风化能力较强，裂隙一般发育或不发育，均匀性和稳定性较好，工程地质条件良好。但由第三系、白垩系、志留系、泥盆系、奥陶系、寒武系及元古代的泥岩、碳酸盐岩夹泥砂岩、砂岩夹泥岩等构成的软硬不均岩体，其抗压强度多小于 10MPa，岩性差异大、岩体完整性和均匀性较差，工程地质条件复杂，应注意其夹层及可能造成的不良地质作用。

#### （2）土体工程地质特征

杭州市山麓沟谷区土体以棕红色、棕黄色含砾粉质粘土、含粘性土砾石层为主。残坡积地段主要为可塑~硬塑状，承载力较高；低洼地段接近地下水位，饱和，软塑~流塑状，强度低，压缩性高，不宜利用。当出露于山坡地带时，由于该层均匀性较差，密实度低，是滑坡多发地段，作为建筑地基时，要调查、评价地基不均匀性及地基、边坡的稳定性，要有防止措施。

杭州市平原区第四纪覆盖层厚达 5~139m 左右，表层主要为人工填

土。因本区复杂的古地形地貌及第四纪以来古气候的剧烈变化、海平面的多次升降、多期构造运动的影响，导致了多次堆积和侵蚀作用的交替，不仅使第四系具相变复杂，岩性复杂、厚度变化大和垂向上土层硬软交替、多次组合的特点，且构成了杭州以软弱地基（硬土层）为主的基本类型。

## 2.2 构造

杭州地质演化历史复杂。构造格架由北东向、东西向、北西向三组区域性断裂带组成。

区域性断裂构造按空间展布形态主要有：1) 北东向马金-乌镇断裂带，白垩纪以来的活动性明显减弱；2) 北东向萧山-球川断裂带，次级断裂发育，第四纪以来断裂具一定的活动性；3) 东西向昌化-普陀断裂，燕山期以来的构造变形及岩浆活动强烈，局部在晚近期仍有活动；4) 北西向孝丰-三门湾断裂带，发育密集的次级断裂。

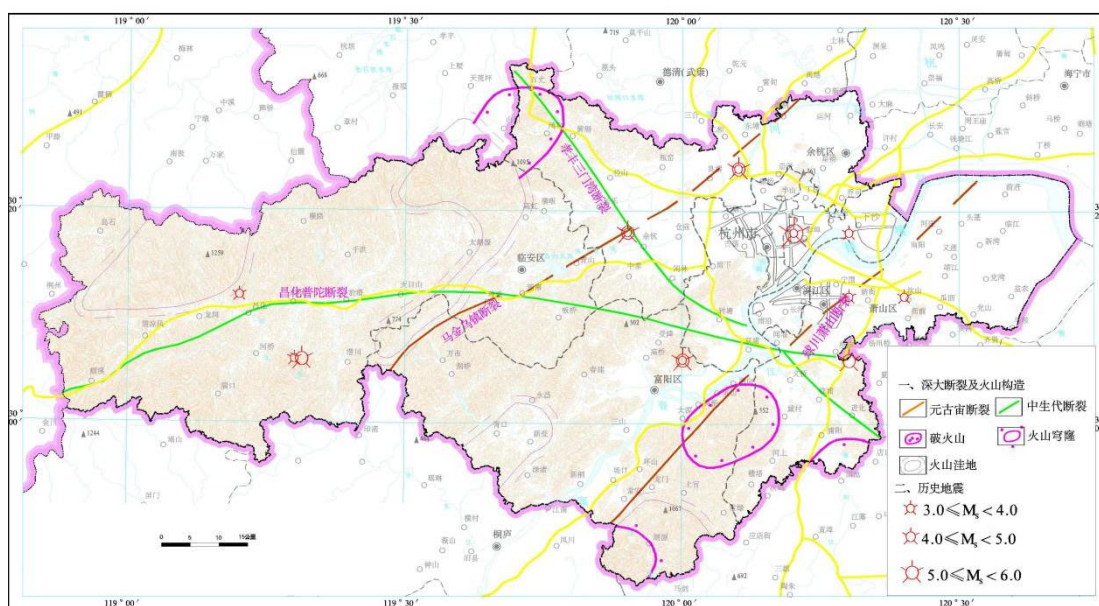


图2 杭州主城十区深大断裂与历史地震分布图

区域性断裂带成生时代早、规模大、切割深，具多期活动性和不同的表现形式特征，反映为同一断裂带力学性质的多重性和主体与局部应力与边界条件改变的差异性。三组区域性断裂带组成构造格架，不同程度地控制着区内的沉积作用、岩浆活动和构造变形。其中北东向断裂带活动时间

最长，控制了古生代早中奥陶世（杭嘉台地）、早中志留世（钱塘海盆）地层的沉积。北东、东西及北西向多组断裂或其中两组的交切地段，控制了区内的燕山晚期的岩浆侵入与火山喷发活动。断裂构造形成时期依次为北东向-东西向-北西向，强烈活动期分别为印支期、燕山期，对应的主期力学性质为挤压逆冲、剪切走滑、拉张断陷。

一般断裂多分布于区域性断裂带之间及主断裂旁侧，以北东向、北西向两组为主，局部发育东西向及北北东向断裂。断裂主要形成于印支末期，燕山期以来表现为继承性活动。根据其褶皱构造的时空关系，可分走向断裂与倾向断裂。发育于露头区褶皱中的断裂如余杭中泰、西湖周边等地的走向断裂，多造成地层缺失，局部可见断面较陡立，并显示多期活动特征，以压扭、逆冲性质为主。北西向断裂以张性-张扭性断裂为主，常切割褶皱枢纽，构成自西南至东北的地堑式断陷组合。

### 3. 杭州湾的形成变迁和古地理演变过程、演化规律

#### 3.1 岸线变迁

进入全新世后，杭州湾成为钱塘江与东海的接入口，则受海平面升降的影响较强，并在潮汐作用和北面古长江的共同作用下，钱塘江和杭州湾的南北迁移极为频繁，据地方志记

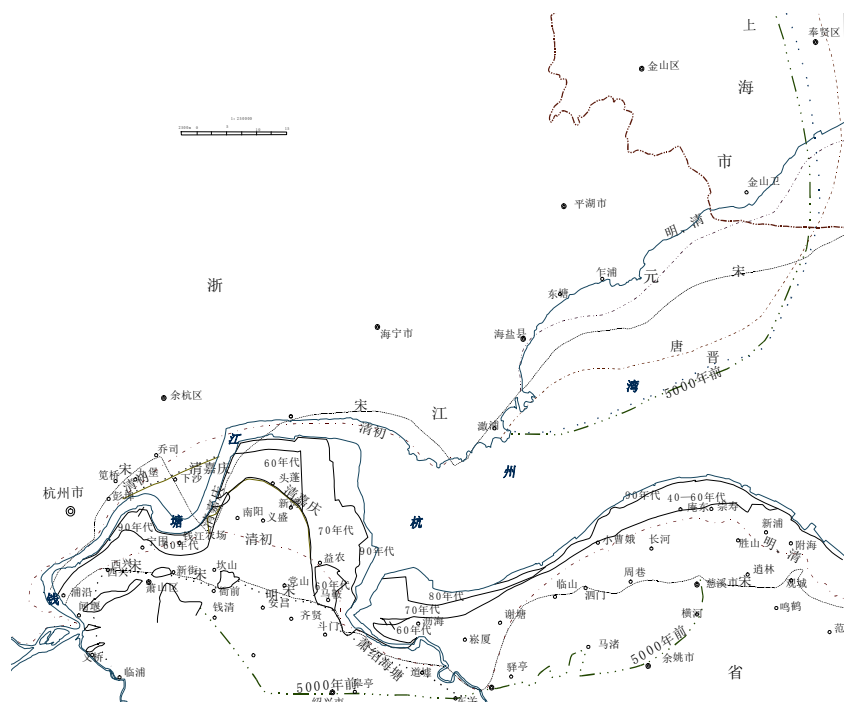


图3 历史记载钱塘江及杭州湾演化变迁图

载和遥感影像特征，钱塘江流域从 5000 前开始不断发生河床摆动和海岸线的变迁（图 3）。同时，在内外动力和人工作用下，数经沧桑之变后，逐渐形成现今的全新世平原。

距今约 10ka 时，气候开始转暖，古钱塘江经余杭留下、杭州彭埠、萧山头蓬、澉浦-秦山南东、海盐呈北东 60-80° 弧形状进入上海金山卫南的古杭州湾中，在古钱塘江南岸的萧山义桥和萧山-新街-义盛及绍兴一带发育古湖泊，杭州湾中形成边滩、天然堤及泥质坝。距今约 10-7.5ka，海平面上升，海水西侵，岸线位于慈溪范市-余姚马渚-上虞沥海-绍兴钱清-萧山义桥-杭州周浦、转塘-杭州-余杭乔司-海宁袁家坝-海盐澉浦-海宁周王庙-桐乡屠甸-平湖市新丰、新仓-上海胡桥一线，区内钱塘江基本被淹没，仅剩留下-上塘一段，于祥符桥入杭州湾，古杭州湾呈东西向展布。

距今 7.5ka-5ka，气候转冷，海平面下降，杭州湾沿岸绝大部分处于剥蚀区，部分则为潮上带位置，萧山宁围、杭州三墩等残存泻湖相堆积，其余则为潮滩环境；古钱塘江可能沿周浦、西兴、海宁斜桥、嘉兴新篁、平湖黄菇方向东流入海，古曹娥江则由绍兴入杭州湾。

大约距今 4000 年，钱塘江与杭州湾位置雏形形成。距今 2100-2600 年，萧山-慈溪-镇海一线以南地区业已出水成陆，萧绍、宁奉平原形成，那时杭州湾堪称“大喇叭”，其口宽达百余公里，湾顶位于现今杭州，南界于今日萧山-慈溪-镇海一线，曹娥江口有一个次级喇叭型河口湾。距今 2500 年前后，杭州湾中由于沙坎成长到一定的高程，潮波发生强烈变形而破裂，形成了涌潮。

距今 2100 年后，由于海平面下降，古长江口南移，三角洲不断向测区北东方向的海域延伸和乍浦-金山深槽潮流的冲刷，导致其对杭嘉湖平原的影响作用日益减小，特别是长江所携带物为杭州湾南岸淤涨输送堆积物来源，同时接受钱塘江上游所下来的河流携带物和海水潮流携带泥砂的

堆积，渐形成现今之钱塘江河口和杭州湾独特地貌--三角湾海岸。由于河口段水动力条件复杂，宽浅的河槽和岸坡由疏松的砂质粉土和粉砂组成，使河槽极不稳定，导致两岸产生大冲大淤的变化，形成钱塘江河床南、北往返摆动和杭州湾北岸侵蚀内塌、南岸淤涨北进的现象。

距今 1600 多年以来，钱塘江河口及杭州湾涨涌强烈，岸线变迁频繁。据历史资料及考察，公元四世纪以前（唐），杭州湾北岸大致在玉盘山-澉浦一线，当时乍浦以南为一片沃野，其上坐落古镇多座；西段岸线大致在尖山-青龙山-笕桥-古荡一线，迳流、潮流出入于青龙山、赭山之间，西湖与海相通，直到公元十一、二世纪时（北宋、南宋），海岸线仍稳定在此线附近。公元十四世纪初（元），潮流对海塘冲蚀作用明显增强，为防止海塘被冲决，多次采用砌石护坡措施，自唐宋开始，先后修筑了长达 150km 的人工堤坝；明清以来，修筑了石塘 100km 之多，是我国著名的水利工程之一。至明、清时代，北岸处于相对较稳定，南岸则继续接受冲积物淤涨成陆，向北推进。公元 18 世纪（清后期）后，在人工促淤、围垦下，南岸仍以每年 50m 左右速度向北外涨。

### 3.2 演化趋势

杭州湾海岸属海滨平原型淤泥质海岸，因向钱塘江口具江岸变窄、江底变浅趋势，迫使潮波变形破裂，导致潮流对北岸强烈冲刷，冲刷物质则由潮流带至南岸淤积，这一动态发展的踪迹从 20 世纪 50、60、70、80、90 年代不同时期的航卫片上也可得到佐证。从演变形迹分析，钱塘江-杭州湾北岸一直遭受侵蚀，岸线后退，属连续侵蚀型；南岸则均处于淤涨状态，岸线外移，属连续堆积型。

概括而言，最近年来杭州湾海滨平原淤泥质海岸线一直处于侵蚀和淤涨的变化中，稳定不变仅是相对而言，在前期变化剧烈地段后期有所缓和，然北塌南淤的总趋势仍存在。



#### 4. 杭州市主城区地下含水层和地面沉降

杭州市主城区地下水类型主要为孔隙潜水、孔隙承压水。孔隙潜水水质类型主要为  $\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$  型水，为第 I 含水层组，分为三个部分， $I_0$  层组（顶部）局限于钱塘江两岸、苕溪、浦阳江流域部分地区，单井涌水量在  $1000\text{m}^3/\text{d}$  左右，部分区域水量较贫乏，一般为微咸水、咸水，供水意义一般； $I_1$  层仅在三大流域局部分布； $I_2$  层在区内广泛分布，钱塘江流域较厚，其单井涌水量  $1000\sim 5000\text{m}^3/\text{d}$ ；孔隙承压水水质类型主要为  $\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水，为第 II 承压含水层组，主要分为两层，以中更新统上组砾（卵）石为主上部含水层组，主要分布在钱塘江流域及浦阳江流域，在苕溪流域局部分布，层顶埋深  $43\sim 46.3\text{m}$ ，层厚  $1.5\sim 45\text{m}$ ，其单井涌水量为  $1000\sim 3000\text{m}^3/\text{d}$ ，一般为淡水，为区内具有供水意义的主要含水层；以中更新统下组砾（卵）石层为主下部含水层组，仅于钱塘江流域东北部局部分布，层顶埋深  $78\sim 94\text{m}$ ，层厚  $10\sim 20\text{m}$ ，其单井涌水量为  $100\sim 1000\text{m}^3/\text{d}$ ，水质一般为淡水，为区内具有供水意义的第二主要含水层。

历史上地面沉降灾害主要发生在主城区和西湖环山的平原区，主要因地下水开采和地面堆载形成。目前杭州严格控制地下水的开采量，对地面沉降控制较好。但随城市建设的飞速发展，城市表层因大面积加载（堆积物、高层建筑等）、卸载（基坑开挖、隧道开挖等）而造成地面沉降时有发生，以淤泥质土分布深厚地区较明显。

因地下水含水层组含水量的多少直接影响本层及顶底层岩土体物理力学性质，自然土体呈平衡状态，一旦开采或抽取地下水，势必打破这种平衡，形成地面沉降、海水入侵等。地面沉降严重时形成地面塌陷，楼房开裂，甚至倾覆灾害；海水入侵会使淡水咸化，失去饮用水供水能力，只能用于工业冷却用水。同时咸化地下水会对未加防腐剂的水泥桩基形成侵

蚀，严重时影响建筑安全。因此，杭州市主城平原区已基本不具备大量开采地下水的功能。如需应急开采，建议在西湖周边、余杭北部及袁浦、象山等地寻找孔隙承压水、岩溶水应急水源地。

## 5. 杭州市地震概况

据《1:50万浙江省构造体系分布规律图》，杭州处于嘉兴-常山地震带杭嘉湖4.75-5.25级地震危险区的西南部，属地震少、震级小、烈度低、区域构造稳定性相对较好的相对稳定区，但存在发生6级左右地震的地震构造背景和地震活动性背景。

### 5.1 历史地震

据历史记录，杭州市域及邻近地区范围内 $M \geq 3\frac{1}{2}$ 级地震共72次，现代地震仅5次，区内地震最大震级为5级（杭州，929），富阳 $4\frac{3}{4}$ 级（1855），均属浅源构造地震，震源深度10-15km，最大震中烈度为6度。

据浙江省地震局现代地震监测资料，区内唯一一次 $M \geq 4$ 地震为2017年临安市4.2级地震，震源深度15千米，此外仅有几个 $M_L 1-2$ 级的小震活动，对中小震进行重新定位后发现，近年来尚未有 $M_L \geq 1.0$ 的地震发生。由此说明，杭州地区地震的震级与频度都较低，地震活动性较弱，反映出处于相对稳定状态。

### 5.2 地震影响场与地震危险性

浙江省工程地质研究所（石树中等，2002）通过对杭州地区的应力场进行数值模拟认为，杭州地区为应力增量、应变增量和应变能密度增量增加最快地区，是本省及其邻区地震危险性最高的地区，远场强震对本区有不可忽视的波及影响。历史上，杭州、南黄海、长江口、溧阳、扬州等地发生的中、强地震对场址区的影响烈度最大为VI度，远场（郟城，1668） $8\frac{1}{2}$ 级大地震在场址区的影响烈度为VI度。据现有资料分析，近场和远场

地震在场址区的影响烈度最大为VI度；按基本烈度指标，本区地壳稳定性分级属稳定区。

## 6. 杭州主要地质灾害与不良地质体

杭州市不良地质体及地质灾害类型较多，不良地质体以饱和砂土、岩溶和软土为主；地质灾害规模以中小型为主，主要有滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷和地面沉降等。

### (1) 地质灾害

滑坡是本区最为常见的突发性地质灾害，主要发生在山区丘陵地带，滑坡体坡度大多在 $5\sim 15^\circ$ 之间。杭州市滑坡的诱发因素主要是降雨，其次是人类工程活动，此外还包括风化、侵蚀等其他因素。

崩塌是杭州市主要地质灾害之一，以岩质崩塌居多，土质崩塌较少，多与人乱开采土石方、建设工程挖方护坡及基坑开挖支护不当有关。大多数发生在山区公路沿线、采石场及建房开挖的边坡等人工切坡地段，尤以采石场边坡崩塌隐患为甚。

杭州市泥石流灾害主要集中在临安、富阳、萧山区等地，主要发生于泥、页和凝灰岩岩出露，残坡积层较厚的沟谷区域，发生时往往伴随特大暴雨灾害。

地面沉降主要发生在城市和西湖环山的平原区，主要因地下水开采和地面堆载形成。目前杭州严格控制地下水的开采量，对地面沉降控制较好；随城市建设的飞速发展，城市表层因大面积加载而造成地面沉降，以淤泥质土分布深厚地区较明显。

### (2) 不良地质体

岩溶塌陷：主要分布在西湖区、余杭区及上城区，多数分布在寒武系、石炭系和二叠系灰岩出露区附近的覆盖型岩溶区，沿构造断裂带呈带状分

布，多数由于长期过量开采地下水所引起。

砂土液化：可能发生于地下 20 米内的全新世饱和沙土或粉土层，钱江新城、滨江区、萧山市区、钱塘新区等沿钱塘江两岸地区广泛分布，分轻微液化区和中等液化区，其在地震、动荷载或其它外力作用下，易产生液化，致使地基失效。随着城市的建设，特别是地铁建设会更加经常触发砂土液化灾害。

软土地基问题：多发生在高含水性的海相沉积的淤泥质土层分布区，土层厚 10-40m，埋深变化较大，具有高含水量、高压缩性、低强度、触变性、饱和与承载力低等特点，一经扰动土的强度便被破坏，对基坑开挖、支护均有较大影响，压缩变形直接导致地基的不均匀沉降，并引起建筑物沉降、倾斜、产生裂缝甚至破坏等，不适于作建筑物的地基。在此类地段进行规划建设时，特别是城市地下空间的开发利用，如轨道交通等，应重点考虑软土的沉降和低强度对工程及轨道运维的影响。