

# 中国沿海地面沉降与防治对策

李铁龙, 易立新, 金朝晖, 侯建伟  
(南开大学环境科学与工程学院, 天津, 300071)

**摘要:** 本文通过文献综述, 介绍了我国地面沉降灾害的基本情况。根据本文统计, 地面沉降主要出现我国中东部及沿海地区 17 省市, 成灾总面积超过  $5 \times 10^4 \text{km}^2$ , 已经成为沿海城市主要地质灾害。论述了地质构造背景对沿海地区地面沉降分布的制约机制, 分析了沉降灾害对社会经济造成的影响及损失, 并提出相应减缓和防治对策。

**关键词:** 地面沉降; 地质灾害; 防灾减灾

## On Effects of Land Subsidence upon Chinese Coastal Areas and the Control Countermeasures

Tielong Li, Lixin Yi, Zhaohui Jin, Jianwei Hou (School of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Subsidence has occurred in 17 provinces and coastal metropolis, the total area over  $5 \times 10^4 \text{km}^2$ . The interaction between subsidence and rising of the sea level become one of the main hazards to the coastal cities. Land subsidence has not only caused the safe altitudes, infrastructure projects, house, and other buildings to be ruined directly, but also destroyed the development of the social-economic system indirectly by activating the tide disaster and the waterlogging disaster. On the other hand, the integrated action of intensively tectonic subsidence and excessively groundwater exploitation, make the situation more serious. This paper discussed the features of the land subsidence and analyzed the influenced on our social-economic system. Finally, the control countermeasures of subsidence were brought out to minimize the losses.

**Keywords:** Land Subsidence; Geological Disaster; Disaster Prevention & Reduction

### 1. 引言

地面沉降是我国平原地区的主要地质灾害, 已经成为制约我国社会、经济可持续发展的重要灾种之一。造成地面沉降的主要原因是地下水长期超量开采, 以及第四纪以来活动断裂和区域性构造沉降。我国东部地区人口稠密, 经济发展快速, 自 80 年代以来, 已经形成了以长江三角洲地区和黄淮海平原地区为中心的两大沉降区。地面沉降一旦形成便难以恢复, 其发展过程基本上是不可逆的, 地面沉降对我国东部地区国家经济建设和生态环境均造成很大影响。加强对我国东部区域性整体沉降地区的战略对策研究, 预测地面沉降未来发展趋势, 探讨及采取有效的防治措施, 是防灾减灾, 维护东部地区社会可持续发展的当务之急<sup>[1]</sup>。

### 2. 我国地面沉降的成因类型

#### 2.1 地面沉降的成因

地面沉降的原因很多, 有自然因素, 如地质构造、气候等; 也有人为因素, 如过量开采地下流体等。地面沉降一般在未固结的松散砂、砾层中易于发生。在内陆盆地、海洋平原区等地形都会发生, 但以后者相对发生的较多。从地层结构来看, 透水性差的隔水层(粘土层)与透水性好的含水层(砾质土层、砾层、砂砾层)互层结构易于发生地面沉降, 即在含水性较好的砂层、砂砾层内抽排地下水时, 隔水层中的孔隙水向含水层流动就会引起地面沉降。

人类活动不但是导致地面沉降的主要因素, 也是加剧地面沉降的因子, 主要表现为:

大量抽取液体资源（地下水、石油等）、地下气体（天然气、沼气等）活动是造成大幅度、急剧地面沉降的主要原因；

采掘地下固体矿藏（如沉积型煤矿、铁矿）形成的大范围采空区，及地下工程（隧道、防空洞、地下铁道等）是导致地面下沉变形的原因之一；

地面上的人为振动作用以及重大建筑物、蓄水工程也是引起地面沉降的一个重要因素；

一般大量开采地下资源等导致的沉降，是规模较大的大型的地面沉降；采掘地下固体矿藏引起的是规模相对前者要较小；建筑物静负荷、人为振动等引起的仅是小范围或者局部的地面沉降。

### 3. 地面沉降状况

全国发生地面沉降的地区，自北向南依次有：黑龙江、辽宁、北京、天津、山西、陕西、河北、河南、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、云南、海南等省市，几乎遍及整个沿海地区，沉降面积超过 5.0 万平方公里。目前我国形成的地下水降落漏斗已有 100 多个，面积达 15 万平方公里，而且在华北地区有近 7 万平方公里面积的地下水位低于海平面；在全国沉降幅度大于 100cm 的城市约 20 处，其中属沿海的城市占 3/4<sup>[3]</sup>，沉降中心累计最大沉降量超过 2m 的有上海、天津、太原、台湾等地。

最早发现地面沉降的是上海市，1922~1938 年地面平均下沉 26mm，至 1965 年沉降中心地面沉降最大值达 2.63m，最大沉降速度每年达 110mm；北京市区东部 600km<sup>2</sup>，地面出现沉降，最大沉降累计达 550 mm；天津市 1959 年开始出现地面沉降，1980 年范围扩大到 7300 km<sup>2</sup>，沉降量 100mm 以上的范围已达 900 km<sup>2</sup>，沉降大于 1m 的范围达 135 km<sup>2</sup>，最大累计沉降量为 2.5 米；西安市地面沉降发现于 1959 年，到 1988 年最大累计沉降量已达 1.34 米，年平均沉降量 30-70mm 的沉降中心有 5 处多，沉降量 100mm 的范围达 200 km<sup>2</sup>；太原市沉降量大于 200mm 的面积有 254 km<sup>2</sup>，大于 1000 毫米的沉降区面积达 7.1 km<sup>2</sup>，最大累计沉降量达 1380mm。

此外，宁波、常州、苏州市、无锡市、嘉兴市、杭州市、台北、沧州、唐山等地区也发现地面沉降，新开发的城市海口市也已出现地面沉降<sup>[4]</sup>。具体情况见地面沉降情况统计表。

我国地面沉降情况统计表

地区		沉降时段	最大沉降量 m	最大沉降速率 mm/a	影响面积 km <sup>2</sup>	备注
黑龙江 <sup>5</sup>		1981-1985	0.05	3-4	220-300	哈尔滨、大庆、齐齐哈尔、佳木斯出现了
辽宁阜新 <sup>6</sup>			4.38		100	主要分布在新邱、海州、东梁、清河门 4 个井田的中心部位
河北沉降区 <sup>1,7</sup>	任丘市沉降区	1983-1988	0.55	34	2000	整个河北平原自五十年代中期开始沉降，沧州最甚
	唐山市		0.756			
	唐山宁河		1.326			
	唐山滦县		0.964			
	固安	1983-1988	0.212			
	霸县	1970-1983	0.74	36.2		
		1983-1988		54.2		
	肥乡	1977-1984	0.45	57.9		
	邯郸	1963-1968	0.2			
	沧州	1970-1988	0.93	52	3000	累计下沉量-200 mm 的范围
	营里	1969-1985	0.2			
天津市 <sup>8-9</sup>		1923-1999	2.91	260（极端）	10000	从 1910-1953 年(塘沽北侧)大沽原点趋势性下降速率为 5.6mm/a，自 1959 年始，形成市区、塘沽、汉沽、大港及海河下游工业区 5 个沉降中心，沉降量 100 毫米以上的范围已达 900 平方公里
山西省 <sup>1,10,11</sup>	大同市	1988-2000	0.124m	31	160	始于 70 年代
	榆次			10—20		
	介休		0.065m	5—7.5		
	太原城区	1979—1982	1.967	114	254	沉降量大于 200mm 的范围
		1979—1982			7.1	沉降量大于 1000mm 的范围
	太原吴家堡	1980	0.819			太原地区沉降面积为 2700
		1982	1.232	206		
		1987	1.38	29.8		
山东省 <sup>12-15</sup>	德州	1978-1992	0.387	50	2073.5	
	济宁	1988-1997	0.202	31.5	80	沉降量大于 60mm
	菏泽	1978-	0.077	9.68		聊城、滨州等城市也有地面沉降

我国地面沉降情况统计表

地区		沉降时段	最大沉降量 m	最大沉降速率 mm/a	影响面积km <sup>2</sup>	备注
陕西省 1,16,17	西安	1972-1983	0.77	30-70		自 50 年代后期开始西安市及近郊出现 7 个地面沉降中心最大沉降速率为 136 mm·a <sup>-1</sup>
		1983-1988	1.94	26.8	200	沉降量 100mm 的范围
	咸阳	1987	0.042	5		
河南 18-19	许昌	1985 发现	0.208	20.5	3.3	沉降量在 150mm 以上
					9.0	沉降量在 100mm 以上的面积
					54	沉降量在 50mm 以上的面积
		1985-1989	0.082	20.5		
	开封					
	洛阳	79 年发现	0.113			
	安阳		0.337	65		
	濮阳	1997-2000		49		
徐州地区		0.600	60			
安徽省 <sup>20</sup>		1970-1992	1.02	110	360	阜阳地区
北京 1,21,22	东北部	70-80 年代	0.559		600	北京城郊区的沙河、小汤山、高丽营等地均曾发生过地表不均衡沉降现象
	城区				178	累计沉降量大于 100 毫米
		1935-1955		3.52		以西单—东单一带较为显著
		1956-1995		50	800	
上海 <sup>23</sup>		1921-1965	2.63	59.3	400	
		1966-1995	0.116	3.9	1069.03	边缘高程为 4.0m 的沉降洼地
江苏省 24-28	常州市	60-90 年代	1.5	137	43(>600mm)	目前累计沉降量在 200 mm 以上的面积超过 5000km <sup>2</sup> ，而 500mm 地面累计沉降面积近 2000 km <sup>2</sup> ，沉降量 1m 以上的面积为 100 km <sup>2</sup>
	苏州市	1956-1997	1.8	100	270(>100mm)	
	无锡	1965-1985	1.48		220(>100mm)	
浙江省 29-32	宁波	1965-1989	0.350	30	65	沉降量在 50mm 以上的面积
	嘉兴	1964-1994	0.709	44.5	600	沉降量在 50mm 以上的面积
	杭州		0.155		0.51	
云南 <sup>33</sup>	昆明	1979-1988	0.227	30		以小板桥为中心的沉降区
		1993-1997	0.110	25.1		在海埂以北的河尾村、渔户村一带地区
广东省 34-35	湛江	-2000	0.273	7		海康城月镇、东莞麻涌、潮州南龙湖、汕头北下棠、潮阳西北西庐、海丰可塘等地也发生地面沉降

我国地面沉降情况统计表

地区		沉降时段	最大沉降量 m	最大沉降速率 mm/a	影响面积km <sup>2</sup>	备注
福建省 <sup>36-38</sup>	福州	1967-1986	0.414	20	1.5	其沉降中心在华林路与东大路之间的五四路附近
	地热田北段	1987-1992	0.679	130.3		1957 年开始，速率 2.9—21.8mm/a
海南省						90 年代发现海口市最大沉降量达 0.07m
台湾省 <sup>39</sup>	台北地区	20 世纪 50 年代			1165	始于 20 世纪 50 年代初期的台北地区，西部沿海平原区尤以彰化、云林、嘉义、屏东等地显著
	屏东地区	1970-2001	3.20	400		
	彰化地区	2000-2001		176		

全国基本上发育在长江下游三角州平原、河北平原、环渤海、东南沿海平原、河谷平原和山间盆地几类地区，总沉降面积超过  $5 \times 10^4 \text{km}^2$ ，年均直接损失1亿元以上

4.中国沿海地质环境与地面沉降区域分异

中国大陆东部濒临渤海、黄海、东海、南海，自北向南依次为辽东丘陵、辽河平原、华北平原、山东丘陵、长江中下游平原、东南沿海丘陵，地跨温带、亚热带、热带三个气候区。中国沿海地区地貌特征显示“两高两低”（山东丘陵、东南沿海丘陵与华北平原、华东平原），基底构造总的格局是“两隆两拗”（辽东隆起、浙闽隆起与华北拗陷、苏北拗陷）。在华北平原和华东沿海平原，由于基底被华夏系和新华夏系切割，形成次一级的隆起和拗陷，在新构造期中仍有差异性的升降运动存在。所以，新生代地球动力学系统决定了中国东部沿海地质环境和灾害的地域分异格局。

根据新构造类型和大地构造单元，中国东部沿海地质环境分区如表一<sup>[32]</sup>。

表一：中国东部沿海地质环境分区

分区名称	大地构造单元	新构造类型
苏北滨海平原北部（灌河口以北）	鲁苏隆起	升降过渡区
苏北滨海平原南部（灌河口以南）	苏北拗陷	强烈沉降区
长江三角洲平原东部（南通以东）	下扬子台褶带	徐缓沉降区
太湖湖沼平原西部	下扬子台褶带	升降过渡区
杭嘉湖平原南部	太湖—钱塘褶皱带	升降过渡区
宁绍平原（古台地区）	浙闽隆起	间歇上升区
宁绍平原（古河地区）	浙闽隆起	间歇上升区
河北滨海平原北部	华北拗陷（沧县隆起）	间歇沉降区
河北滨海平原中部	华北拗陷（黄骅拗陷）	强烈沉降区
河北滨海平原南部	华北拗陷（埕宁隆起）	间歇沉降区
鲁北滨海平原	华北拗陷（济阳拗陷）	强烈沉降区
东海大陆架	以东海陆架拗陷带为主	以沉降为主

从地面沉降灾害分布的地质环境看，其成因表现为构造下沉与人类活动影响的综合作用。在强烈构造沉降区，由于沉积了巨厚新生代地层，成为现代城市和农业取水层，因而也是地下水开发最强烈的地区。构造沉降背景下的地下水开发，使得地面沉降灾害愈加强烈。

5.地面沉降灾害的特点

地面沉降灾害表现为渐变性、人为性、阶段性、可控性等特性。

## 5.1 地面沉降灾害的渐变累积性

与地震、泥石流等突发性地质灾害不同，地面沉降是缓变的、潜在的地质灾害，其最终的结果是不断累积的。例如，1921 年前上海市区地面无明显沉降现象，1910—1919 年间水准测量发现有细微变化；从 1921 年发现地面沉降后，市区地面沉降现象日益明显。从 1921—2000 年的 80 年内，上海市中心城区约平均累积下沉了 1.892m，平均每年累积下降 23.650mm，最大累积沉降量达 2.630m，沉降面积约 400km<sup>2</sup>。

## 5.2 地面沉降灾害的人为性

地下水开采是引起地面沉降的主要原因。地面沉降与地下水的开采在时间、地区、层次分布上有直接关系。随着社会经济的发展，城市用水量急剧增加，地下水开采量逐年增加，地面沉降也日趋明显。例如我国的河北平原、天津、上海等地，由于工业区内深井分布过于集中，地下水过量开采，造成沉降区域迅速扩展，形成沉降漏斗，如河北地下水超采形成 7 大漏斗，面积高达 4.4 万平方公里。在地区分布上，地下水开采中心与沉降中心区基本相符，地下水开采量较大的地区其地面沉降量也较大。在层次分布上，某含水层的地下水被大量抽取后，其压缩量与地面沉降量成正相关关系。

工程施工对地面沉降的主要影响方式有基坑开挖和井点降水等。由于基坑的地基卸荷，基槽底有较大的回弹变形，从而导致基础周围地面发生沉降变形，甚至发生失稳和坍塌。例如在上海动工兴建的深大基坑围护结构中，约有 1/3 曾发生失稳和不同程度的坍塌。

## 5.3 地面沉降灾害的阶段性的

地面沉降灾害的人为性使其地面沉降具有显著的阶段性的，从而其对社会和经济造成的影响也具有阶段性的。比如上海地面沉降历经沉降明显、沉降加快、沉降剧烈、沉降缓和几个阶段；从 1966 年开始为控制地面沉降后的缓慢沉降时期，其间经历了微量回弹、微量沉降、沉降加速等阶段。

## 5.4 地面沉降灾害的可控性的

地面沉降灾害的人为性和发展的阶段性的又使得其地面沉降表现出一定的可控性的。由于采取限制和压缩地下水开采措施，1962 年以后上海地面的严重沉降逐年得到缓和；在采用推广地下水人工回灌措施后，自 1966 年起，市区地面沉降得到初步控制，并出现微量的回弹。但是，20 世纪 90 年代后由于建筑工程猛增，大量的基坑开挖、井点降水，又致使地面沉降加速。

## 6. 社会经济影响的

随着经济和人口城市化的发展，地面沉降及其所造成的环境灾害已十分严重，而且造成的损失是综合的，危害是长期的、永久的，其危害程度也是逐年增加的。在沿海地区，地面沉降加大了海水入侵，倒灌和内涝积水的危害，堤坝下沉、河道淤积、防洪能力大减。无论是沿海或内地，地面沉降还导致工业民用建筑物破坏、地下管道断裂，水准测量高程基准网失效、社会安定等一系列经济、环境及社会问题，我国每年由此造成的直接经济损失达数百亿元。据统计，从 1961 年到 1970 年这十年中，为了克服地面沉降造成的危害，日本东京江户三角洲约 47 km<sup>2</sup>面积内，筑堤防潮，整修港湾河道及下水道，修缮民房等，共计花费了 820 亿日元；我国常州、无锡、苏州三市，仅因地面沉降造成地面积水一项，直接经济损失达 1000 多万元，间接损失无法估计<sup>[4]</sup>；从 1921—2000 年这 80 年期间，上海由于地面沉降灾害所加重的潮灾和涝灾经济损失就分别为 1754.9 亿元和 847.77 亿元<sup>[40]</sup>；据有关资料统计 1959—1993 年天津地面沉降总损失为 1896 亿元，其中直接损失为 172 亿元。

地面沉降在沿海大部分地区正在继续产生和加剧，具体危害性表现为：

### 6.1 对城市建设的破坏作用

地面沉降对城市建设有极大的破坏作用，主要表现为造成建筑物的下沉及破坏、破坏了市政设施，造成的巨大经济损失，严重影响城市安全。地面沉降造成建筑物的整体下沉，影响了原建筑物的正常使用，局部地段地面不均匀下沉甚至使大型建筑物开裂、破坏，造成煤气、自来水、排污管道断裂，道路开裂，桥墩错位，铁路断裂，严重影响城市安全。如天津市某立交桥，建成仅三年就出现引桥和主桥错落；苏州齐门铁路大桥桥墩已累计下沉了 1.45m<sup>[41]</sup>；唐山市因地下水过量开采，水位累计下降 33m，造成 317 km<sup>2</sup>的地面下沉，新建的唐山体育馆，1988 年因地面沉降、地面塌陷，工程全部报废<sup>[4]</sup>。

### 6.2 海水入侵

滨海地区大规模开采地下水，地下水位下降，必然造成地面沉降，地面沉降又导致海堤的沉降，使海堤失去其应有的作用，造成海水泛滥，淹没大量农田。地下水位的下降还造成海水入侵地下水体，使地下水含盐量增大，造成大面积土地盐渍化<sup>[4]</sup>。大量研究表明，当地面沉降量累计超过 100cm 时，其灾害作用便显著地表现出来，造成地表和地下排水不畅、建筑地基下陷、井筒出现上抬或断折现象等。特别是因地面高程损失，城市防潮设施功能降低，风暴潮灾害损失逐年加重，以至酿成海咸水入侵灾害，使得地下水咸化。这类灾害是缓慢发生的，一旦灾害发生，如得不到应有控制，灾害损失将会成倍地逐年增加，后果相当严重<sup>[3]</sup>。例如荷兰的滨海城市阿姆斯特丹，多年来依靠取用滨海砂丘中的淡水作为供水水源，随着采水量的不断加大，地面沉降也逐渐明显，下伏咸水不断上升。

### 6.3 含水层被破坏

除因海水入侵而被咸化外，还会由于超抽，特别是出现“抽砂”<sup>[42]</sup>现象，含水层中的砂砾会移动、变位和压缩，造成含水层的天然状态被改变，从而使整个含水构造有被毁坏之危险。

### 6.4 加剧了洪涝灾害

地面沉降使得城市的安全高程<sup>[40]</sup>丧失，影响了城市防洪、防汛效能，造成防汛墙失去作用，河流泄洪能力减弱，使下水道流向变化，出现反水、倒流现象，部分下水管道甚至开裂、破碎、塌陷、堵塞，严重影响了城市积水的排出。下水道大面积积水，洪水上岸使沿海和沿江的码头、仓库、工厂以及居民区受淹。70 年代，风暴潮对我国沿海地区造成的直接经济损失为 2~4 亿元每年；90 年代，已接近百亿元每年<sup>[41]</sup>；天津市因地面沉降使得海河泄洪能力由 1200 m<sup>3</sup>，降至 400 m<sup>3</sup>，塘沽新港花费大量人力、物力来加高海堤，盐场坨地码头每年培土(1.0×10<sup>5</sup>)m<sup>2</sup>，耗资 50 万元。苏、锡、常三市因地面沉降，汛期实际受淹面积大大增加。地面沉降还造成流经这些城市的运河逐渐成为悬河，太湖也成为悬湖，加剧了洪涝灾害。

### 6.5 海平面上升

沿海地区地面沉降最直接的后果是海平面上升，由此可能导致城市及土地淹没和海洋灾害的增加。我国沿海低地的地面沉降与海平面上升叠加在一起，将会进一步丧失地面标高，降低泄洪功能和抵御风暴潮的能力<sup>[43]</sup>。如 1980 年 7 月 22 日 8007 号台风自广东徐闻、海康地区登陆，最高潮位达 5.94m，造成 1059 人死亡，经济损失 4 亿元；1986 年 9 月 5 日，8616 号台风登陆，最高潮位达 5.38m，造成 397 人死亡，经济损失 4.64 亿元；天津市曾受到 1985



年 8 月 2 日、9 日及 1992 年 9 月 1 日两次风暴潮的袭击，造成直接经济损失上亿元。

1992 年中科院地学部组织考察组，对沿海地区海平面上升问题作了专门考查，并根据国内外资料的综合分析，估算了我国沿海三大三角洲地区到 2050 年海平面可能上升的幅度；有文献估计，若海平面上升 30cm 而不加保护，自然海岸线将后退 50km，淹没土地达  $10000\text{km}^2$ ，若海平面上升 100cm，海岸线将后退 70km，淹没土地达  $16000\text{km}^2$ ，届时各沿海城市将是一片泽国。中国地质大学沈孝宇教授提出警告：这种地面沉降如果不加治理而继续扩大下去，我国某些城市（如宁波），将在下个世纪沉入海底<sup>[42]</sup>。

## 6.6 破坏地质环境

地面沉降破坏了原来的地质环境<sup>[42]</sup>使其成为不稳定的结构，一旦遭受其他地质灾害的侵袭(如地层、塌陷等)，则对环境的破坏更加严重，就有可能成为新灾害的重灾区。

## 6.7 影响了交通运输业

地面沉降造成道路高低不平，给公路、铁路运输增加了许多不安全因素，有时甚至使公路、铁路改线，对地面要求较高的机场一旦出现地面不均匀沉降，其危险性是相当大的。山东泰安<sup>[4]</sup>火车站 1977-1982 年因附近开采地下水，造成路基下沉、站房开裂，自 1979 年起车辆限速通过，年损失达 40 万元，其整治费用已达 3000 余万元；地面的下沉影响航运交通，使通过城市的河流坡度加大，冲刷随之加剧，淤积加重，内河桥下净空减小<sup>[40]</sup>，过船能力大大降低。这对一些水系发育的河网区城市，其影响尤为严重。

## 7. 防灾、减灾对策

我国拥有 18000km 的海岸线，专属海域约  $300 \times 10^4\text{km}^2$ ，陆地的沉降，海平面的升降，海陆交互作用，必然引起海岸线的不断变迁，这将直接影响海岸及浅海域资源的开发和保护。世界 2/3 以上的人口居住在离海岸 60km 的范围内，这个地带人类工程经济活动最激烈，产生的环境问题也最多，所以把海岸带的综合管理、控制沿海地区地面沉降与海平面上升列为国家的重要议事日程，实属发展之所需。

过量抽排地下水或其他液体矿体、气体是导致地面沉降的主要原因。因此，减轻地面沉降灾害的措施主要是控制地下液体和气体矿藏的开采量，调整地下水开采、进行地下水人工回灌等。普遍采用的措施有：

### 7.1 含水层加压注水

通过人工回灌井直接对承压含水层进行人工回灌加压<sup>[44]</sup>，目前是阻止或缓解地面沉降唯一有效的方法。该方法成功地用于控制美国加利福尼亚南部的威尔明顿油田的地面沉降，效果非常理想。加压注水，一方面提高油田石油的产量，另一方面用于控制油田的地面沉降；从开始注水到 1969 年，地沉面积就有 1958 年的  $58\text{km}^2$  减少到  $8\text{km}^2$ ，地面回弹 0.3m；

用井给承压含水层加压注入处理后的淡水还可以在含水层中形成一个水压屏障，它可以防治海水入侵，这个方法在美国加利福尼亚已经成功运行 25 年多了。

### 7.2 探明沉降机理，调整开采层

地面沉降实际上是一个很复杂的过程，人们不可能直接观察它的变化机理<sup>[4]</sup>。因此建立沉降量与取水量等数学模型，进行中心控制试验可以从理论上进行地面沉降研究，预测沉降的发展趋势及将来的可能沉降量，并进行地下水的采、灌数学模型研究，根据地下水均衡，合理确定允许开采量，科学地布置开采井位，调整地下水开采层次，指导城市的地下水合理开发利用。

### 7.3 建立法规，加强管理

运用法规、行政管理手段，加强沉降区地下开采方面的统一管理，制定控制审批增打新井制度，倡导居民节约用水，压缩用水，严格控制地下水的开采量，达到用水与供需平衡，控制降落漏斗的扩展，在城区严禁采掘、城区外围限量开采地下矿藏等减缓措施，防止或控制地面沉降的继续发展。

### 7.4 改变城市用水结构

地面已发生沉降的城市，应在减少地下开采的同时，想法引调远方的客水，对三水(雨雪水、地表水、地下水)进行统一规划，建立节水型国民生产体系及城乡生活方式。例如天津的引滦工程。新建城镇就尽量避开致灾区，先找到充足的水源后再规划城市，不得先建市后寻找水源。

### 7.5 进行人工回灌，利用地下水库的调蓄作用

沉降量较大的地区应减少或停止地下水的开采，控制地面沉降的发展，并进行水的回灌(可以是汛期的洪水)，提高地下水位，降低暂时性沉降。局部地区可进行特殊液体的回灌，甚至进行灌浆。此方法收到抬高水位、缓和地面沉降、水质好转和地下水致冷效益增加等良好效果。

### 7.6 建立长期地面沉降观测网

建立观测网，能及早发现一些地区出现沉降的苗头，从而把它控制在最初始的阶段。通过观测，建立起本地区沉降范围、沉降量的数据库，从而可以进行数理统计等分析研究工作，也为采取保护措施提供了可靠依据。

## 8. 结论

我国的地面沉降是在经济快速发展过程中，过量开发利用地下水产生的环境地质问题；地面沉降和相对海平面上升是制约我国沿海地区经济和社会可持续发展的重大战略问题之一，其防治不仅是地质环境保护的需要，也是保证区域水资源可持续利用、地区经济可持续发展的必不可少的先决条件，因此必须从战略角度加大投入，提高控制研究水平，对其进行全面、系统的研究。在此基础上，提出防治技术对策、管理策略、经济政策意见等，以确保21世纪中国沿海地区资源和环境持续利用及经济和社会可持续发展。

### 参考文献

1. 薛禹群. 关于加强我国东部地区地面沉降问题与可持续发展对策研究的建议, 2004 年科学发展报告, 北京: 科学出版社, 2004.
2. 段永侯. 我国地质灾害的基本特征与发展趋势. 第四纪研究, 1999 (3):208-216.
3. 刘玉海. 21 世纪中国沿海城市面临的主要地质灾害问题. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9: 120-126.
4. 朱根山. 地面沉降的危害及对策探讨. 南京建筑工程学院学报(自然科学版), 1994, (1): 77-79.
5. 张克绪, 李明幸, 周宏. 哈尔滨市开采地下水引起的地面沉降及其对工程的危害. 自然灾害学报, 1998, 7(4): 98-105.
6. 赵明鹏. 阜新地区矿山地质灾害及其防治对策. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 64-68.
7. 陈绍绪, 王川华, 刘素英, 聂宝华. 河北平原的地面沉降. 灾害学, 1994, 9(1): 48-53.
8. 金爱善. 采用神经网络模型对天津滨海新区地面沉降预测的研究. 现代地质, 2000, 14(4): 475-478.

9. 吴铁钧, 金东锡. 天津地面沉降防治措施及效果. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 6-12.
10. 范建明. 大同市区地下水超采引发的环境地质问题与相应对策研究. 地下水, 2003, 25(1): 19-20.
11. 田新生, 宁维亮. 山西省地下水超采引起的环境地质问题及保护策略. 地下水, 1998, 20(2): 47-50.
12. 孟庆峰, 董三强, 颜世强. 德州市主要地质灾害及防治对策. 山东地质, 2000, 16(2): 31-35.
13. 王晓燕, 李相才. 遏制地面沉降 保护地质环境. 山东地质, 2000, 18(6): 46.
14. 张文治, 殷宪坤, 潘宝玉. 济宁市城区地面沉降监测与成果分析. 地矿测绘, 2002, 18(3): 15-18.
15. 韩景敏. 山东省地面沉降及其防治对策. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 33-35.
16. 杜忠潮, 郭晓辉. 咸阳城市环境问题的现状与对策. 咸阳师范学院学报, 1995, 10(3): 33-39.
17. 索传郢. 西安地沉发育特征及承压水资源管理模型中约束条件的确定. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5: 82-87.
18. 完恩发. 探讨许昌市地面沉降的原因及其对策. 干旱环境监测, 1994, 8(2): 116-118.
19. 李珂凌, 宋丽红, 魏永齐. 河南省濮阳市主要环境地质问题及其防治对策. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 112-115.
20. 张朝新, 郑三元. 阜阳市的地面沉降与对策. 地下水, 1995, 17(1): 43-45.
21. 纪玉杰. 北京城郊的地面沉降成因浅析. 北京地质, 1996(3): 15-19.
22. 崔亚莉, 邵景力, 谢振华, 贾汀. 基于 MODFLOW 的地面沉降模型研究——以北京市区为例. 工程勘察, 2003, (5): 19-22.
23. 刘飞, 慎乃齐, 陈华英. 上海市地面沉降的发展过程与危害. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001, 94-96.
24. 张落成, 吴楚材. 无锡市水环境变化及其引发的地质灾害问题与对策. 生态环境, 2004, 13(1): 34-36.
25. 伍洲云, 余勤, 张云. 苏锡常地区地裂缝形成过程. 水文地质工程地质, 2003(1): 67-72.
26. 袁铭, 刘争齐, 黄翔. 苏州市地面垂直形变场的时空特征. 工程勘察, 2000(6): 46-48.
27. 袁铭. 苏州市地面沉降现状及其防治对策. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(1): 93-95.
28. 丁致中, 潘树仁, 黄伟斌. 常州市地面沉降的危害及控制. 中国煤田地质, 2001, 13(2): 120-122.
29. 李振东, 郑铎鑫. 宁波市土层变形特征及地面沉降机理的研究. 河北地质学院学报, 1989, 12(1): 8-17.
30. 凌泽民. 宁波市主要环境地质问题及其防治对策研究. 中国岩溶, 1996, 15(1-2): 124-131.
31. 李冬田, 章采, 童亮, 任可仁. 论嘉兴市地面沉降及其防治. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(2): 69-73.
32. 谢志仁. 海面变化与环境变迁, 贵州科技出版社, 1995, 贵阳.
33. 姜朝松, 邵德晟, 樊友心, 胡耀雄, 周瑞琦. 昆明市地面沉降发展过程及其特征. 地震研究, 2001, 24(1): 55-60.
34. 闫满存, 王光谦, 李华梅, 李保生, 文启忠. 广东沿海陆地地质灾害孕育环境探讨. 热带地理, 2000, 20(4): 250-255.
35. 夏法, 黄玉昆. 广东的地质灾害与地质环境. 自然灾害学报, 1995, 4(3): 83-91.
36. 周伟, 刘用泉, 吴文飞, 周峥嵘, 范德江. 福州市地热田地面沉降机理及对策. 青岛海洋大学学报, 1994: 127-131.
37. 郑承忠. 福建沿海暨台湾海峡地质灾害初探. 台湾海峡, 1994, 13(4): 404-411.
38. 黄春鹏, 刘志逊, 苏茂凯. 福建省地质灾害的现状及其防治对策. 地质灾害与环境保

- 护,2000,11(1):27-30.
39. 龚士良.台湾地面沉降现状与防治对策. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(3):24-31.
  40. 张维然, 段正梁, 曾正强, 康一亨.上海市地面沉降特征及对社会经济发展的危害. 同济大学学报(自然科学版),2002,30(9):1129-1133.
  41. 侯艳声, 郑铎鑫, 应玉飞.中国沿海地区可持续发展战略与地面沉降系统防治. 中国地质灾害与防治学报,2000,11(2):30-33.
  42. 瞿鸿模.城市地面沉降的危害与防治. 地理知识,1991:25-28.
  43. 段永侯.我国地面沉降研究现状与 21 世纪可持续发展. 中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):1-5.
  44. Joseph F. Poland, Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. Published in 1984 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.