第24卷第4期 西安工程学院学报 Vol. 24 No. 4
2002年12月 JOURNAL OF XI'AN ENGINEERING UNIVERSITY Dec. 2002

美国的地面沉降及其对策

亓军强， 施 斌， 蔡 奕， 丁 勇， 邵 丽
（南京大学地球科学系，南京大学地球环境计算工程研究所，江苏 南京 210093）

[摘要] 简要介绍了美国地面沉降研究的现状，包括沉降的类型、机理、治理措施和监测手段，以期对我国的地面沉降研究和防治起到借鉴作用。

[关键词] 地面沉降；类型；机理；对策
[中图分类号] P642.26 [文献标识码] A [文章编号] 1007－9955(2002)04－0058－05

[作者简介] 亓军强(1977－)，男，硕士研究生，以地球环境计算工程为研究方向。

地面沉降是地面由于地下物质运移而发生的渐进下陷或急剧下沉。这是一个全球性问题，仅在美国，已经有遍及45个洲超过44 030 km^2的土地受到了地面沉降的影响，相当于新汉布什尔州与佛蒙特州的总和。由此引发的经济损失更是惊人：仅在圣克拉拉山谷，沉降所造成的直接经济损失，在1979年大约为1.31亿美元，而到了1998年则高达3亿美元。造成这一灾害的原因主要有含水层的压实、有机质土的疏干排水、地下采矿、水压实、自然压实、溶坑以及永冻土的解冻等。随着对地下水的进一步开发，现有的地面沉降问题将会更加恶化并可能引发新的沉降问题，而由此所直接引发的沉降占美国已确认地面沉降的80%。笔者根据Devin Galloway，David R. Jones和S. E. Ingebritsent等人编写的LAND SUBSIDENCE IN THE UNITED STATES等资料对美国的地面沉降研究作一综述，以期对国内地面沉降的研究起到借鉴作用。

1 地面沉降类型

根据土质条件，美国的地面沉降主要可以分为三大类：第一类，含水层压实引发的地面沉降；第二类，有机土的疏干引发地面沉降；第三类，洞穴塌陷引发的地面沉降，现详述如下。

1.1 水层压实引发的地面沉降

抽汲地下水(或石油与天然气)时，伴随着地下水从沉积含水层组中，尤其在那些厚层的半固结淤泥、粘土层(弱含水层)组中排出，含水层的孔隙体积和总体蓄水能力大幅度减少，并且不能完全恢复，最终表现为地面沉降。这类沉降的成因有二种机理：一个是有效应力原理，另一个是水动力固结理论。这两个原理将含水层的压实分为两个过程，前者解释了含水层在抽水过程中的压实引发的地面沉降，后者解释了抽水以后的残余压实引发的地面沉降。

根据有效压应力理论，抽水以前，上覆土层和水的重力由孔隙水压力和粒间有效压力共同平衡；抽水后总压力不变，孔隙水压力降低，有效压力增加；这样，颗粒骨架所受压力增加，土层被压缩，微观上表现为颗粒之间的孔隙度降低，宏观上表现为含水层变薄，其过程见图1。抽水结束后，地面沉降并未停止，这可以用水动力固结理论来解释，在抽水过程中透水层的放水速度比弱透水层快，因而水位下降也快，停止抽水后，由于两类含水层之间水位高度不同，存在水位差，而表现为弱透水层向透水层渗水，弱透水层因而继续有压实作用，仍有沉降发生。

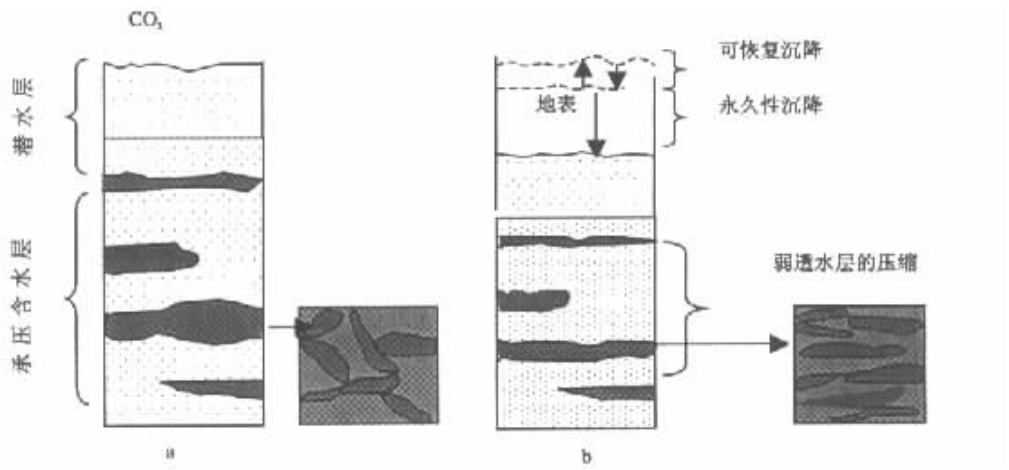
此类沉降主要发生在加州硅谷、圣琼魁因山谷、德克萨斯的休斯敦—加尔维斯敦地区，还有拉斯维加斯山谷和亚历桑那州的中南部。

1.2 有机质土的疏干引发的地面沉降

在自然条件下，有机质土含水量高，土层处于缺氧状态，这时碳质有机质的积累速度要快于它的分解速度。土层中的水被抽排出之后，便处于富氧状

[收稿日期] 2002－06－10

万方数据



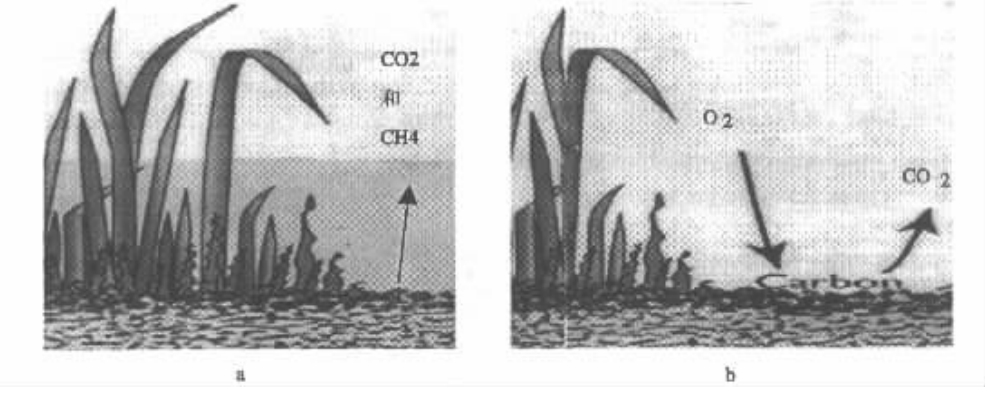
a－弱透水层的颗粒骨架中的空隙解释了其蓄水性;b－弱透水层的颗粒骨架压实重组后,空隙度减小,蓄水能力降低

图 1　含水层压实引发的地面沉降的原理示意图

态。富氧状态下,土中的微生物变的较为活跃,分解作用的速度明显加快。土层中因分解作用而失去的碳大部分转化为二氧化碳气体进入大气中。除此之外,压实、干燥、风蚀、水蚀和燃烧也是分解的重要因素。全美有机质土的总面积约为 207 200 km^2,其中近一半是阿拉斯加的苔类泥炭。美国本土 48 个州的有机质土,大约 70% 分布在受过冰河作用、苔类泥炭较为常见的北方地区。苔类泥炭主要由泥炭藓及相关物种构成,具有较高的酸度,即便是经过排水作用也并不会轻易分解。但农业改造后,比如说施肥和使用重度石灰提高了其 pH 值,那么苔类泥炭就会迅速分解。在有机质土沉降的案例中,有些快速沉降(25.4～76.2 mm/a)是浅水莎草和芦苇残渣分解造成的。在萨克拉曼多—加利弗利亚圣琼魁三角洲和佛罗里达沼泽区的地面沉降是典型的有机质土沉降,其分解过程如图 2。

1.3　洞穴塌陷引发的地面沉降

与地下洞穴(溶洞)有关的地面沉降,其发生比较突然,有时还会带来灾难性的后果。它一般是由地下水水位的下降所引发。某些岩石,如蒸发盐矿物(盐,石膏和硬石膏)和碳酸盐矿物(方解石和白云石)具有易溶于水的水文地质特性。盐和石膏在水中的溶解能力分别是方解石的 7 500 和 150 倍。美国大约 35% ～ 40% 的国土是以为蒸发岩基础的。与溶解相关的沉降遍及全美各主要盐盆。以喀斯特著称的特殊风化地形有助于碳酸盐岩石的溶解。碳酸盐喀斯特地貌覆盖了美国俄克拉荷马州塔尔萨以东 40% 的潮湿地区。尽管此类塌陷仅限于局部区域,但它们可以通过把污染物引入地下水系统而影响塌陷以外的地区。纽约瑞茨奥佛和佛罗里达中西



a－在水淹状态下,有机质分解缓慢,主要生成 CO_2和 CH_4;b－与空气接触时,O_2 会加快泥炭土和有机质的分解,而主要生成物为 CO_2 和水

图 2　有机质分解引发的沉降原理示意图

万方数据

部的洞穴塌陷主要是盐类和石灰石类洞穴塌陷。

深层抽水使下部含水层的水位下降,上下含水层的水头差增加,从而使水的下蚀能力增强,地下溶洞的上覆压力加大,地下支撑结构被破坏 沉积碎屑不断沿着溶蚀裂隙渗到地下硐室中,最终塌陷形成突发性的灰岩坑(图 3)。

2 缓解措施

2.1 ASR 技术的应用

为了满足供水和改善水质的要求,含水层存储和恢复技术(ASR)在美国各州得以广泛的应用,如德克萨斯,新墨西哥,内华达,亚利桑那,加利福尼亚和佛罗里达等州。在圣克拉拉山谷,目前的需水量仍然很大,但由于地表水的引入,回灌得以实施,使得地下水抽汲量减少,,从而防止了地下水位重回历史最低位。另外,该区水资源管理局在当地的河流上建立了 5 个蓄水坝以收集雨水,这样增加了河水对流经区的地下水的补给。这样该区是美国第一个被发现也是第一个采取了有效措施而在 1969 年前后终止了沉降的地区。同样的情况还有亚历桑那州的中南部,通过引入科罗拉多河的河水减少了对水的需求强度,从而缓解了地面沉降。

2.2 改变土地使用类型

将土地使用由农业用地型向城市用地型转变,以降低需水强度,防止地下水位的进一步下降。特别适用于佛罗里达州的泥沼区,这种方法可以防止有机土的进一步分解。

2.3 节水

利用含水层组贮藏和运输地下水,要优于造价高昂的地表蓄水和输水系统。因此节水是制止沉降的一项重要举措。如在圣琼斯地区,目前人均用水量只有 1920 年的五分之一,远低于了过去作为农业用地时的用水量。因此即便是在 1976～1977 和 1987～1991 年,这两个加州的主要的旱期里,水位还是保持在历史最低水位以上。

2.4 加固堤防

以防止洪水泛滥,和海水入侵。例如在加利福尼亚州的 SACRAMENTO－SAN JOAQUIN 三角洲,大面积的人工堤坝及人工岛有效的保护了这个三角洲,使之免遭海水的入侵,同时维持了有利的淡水坡度,保持了它的淡水源作用。

2.5 立法

在圣克拉拉山谷成立了一个专门的水资源管理机构来管理该区的用水,使地表水和地下水得到了长期有效的综合利用。许多地区甚至采取法制措施来防治地面沉降。例如 1980 年通过了“亚历桑那地下水管理法案”。其基本目标是 加强对已衰竭含水层组的管理 把有限的地下水资源进行最合理的分配;发展新的水资源供应来增加亚历桑那的地下水资源。

2.6 减少落水洞产生的影响

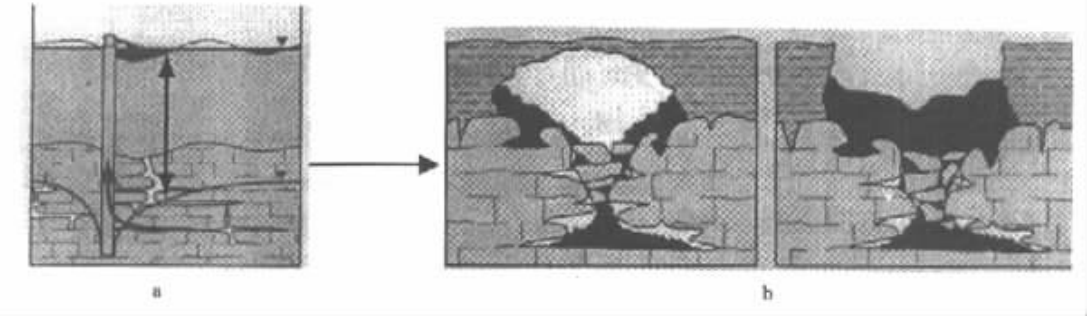
已有的案例表明,落水洞的活动与地下水的抽取有直接关系,控制地下水位的波动可以防止落水洞的形成。

佛罗里达西南水资源管理区与其他水资源机构通力合作,设立了佛罗里达中西部地下水的临界水位。最低水位的提出将会改良一些诱发条件,减少落水洞产生的影响。

3 地面沉降的监测

3.1 伸长计——测量地面沉降和水平位移

钻孔伸长计可记录地表与钻孔底部的参照点之间垂直距离发生的连续变化。在含水层系出现压实的地区,伸长计是精确测量观测点连续变形的最有效的工具。当地下阶地标志处于压实含水层系底部



a－抽水时下部含水层水位下降引起上下部两含水层水头差增大;b－沉积物渗入硐室,最终穹顶失去平衡塌陷形成溶蚀坑

图 3 洞穴塌陷示意图

万方数据

时,伸长计可以作为局部测量的稳定参照点或初始点。在一个简单的仪器中插入多级伸长计还可以同时测量不同深度段的含水层系的压实程度。

3.2　雷达干涉测量技术(InSAR)

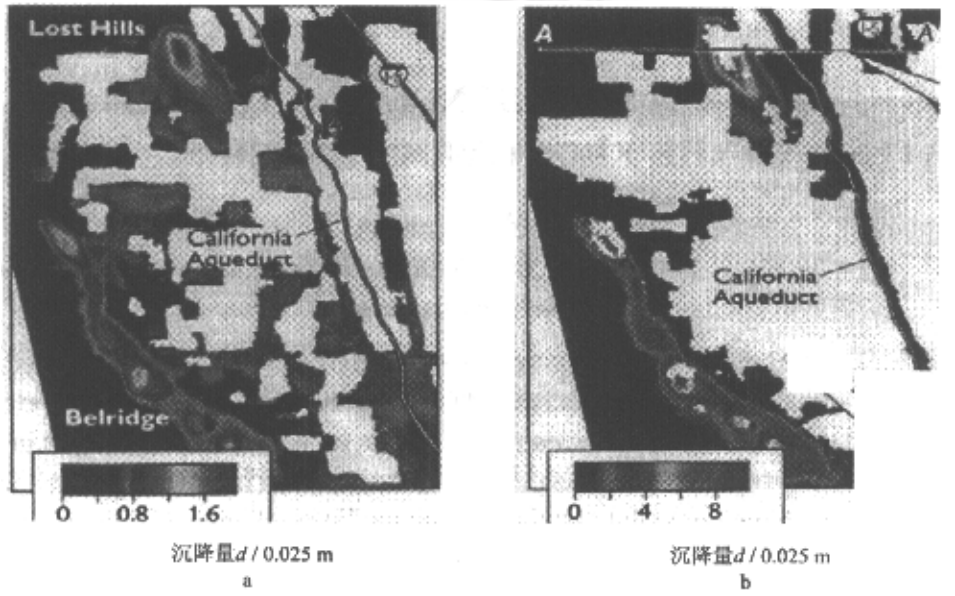
干涉测量合成孔径雷达(简称 InSAR)是一种高效的新工具。它运用雷达信号测量地壳变形。它的出现使空间清晰度和测量分辨率达到空前的高度。合成孔径雷达(简称 SAR)通过空间飞行器卫星绕轨道运行,数学的合成一个大型的操作天线,并产生高空图像分辨能力。对某个地区而言,若在一段时期内,它有一些稳定的雷达反射物体,那么就可对反射物体处的变化进行高精度的测量。在理想状况下,可测量出 5～10 mm 的抬升变化。图 4 是加州 San Joaquin Valley 的一个油田区的雷达干涉图,空白区为信号不连续区,主要是指农作物产区。

3.3　GPS 测量

基于人造卫星的全球定位系统(GPS)的诞生之前,地面测量最常用的工具是经纬仪和光电测距仪(简称 EDM)。水准测量技术方法很简单,但它的精确度却很高,即使在测量精度要求不高的情况下,这种方法也能够测量到数英里外 0.05(1 mm)英尺的抬升变化。但在大规模的测量中,水准测量和 EDM 测量所产生的错误就会明显增加。当测量范围较小(不超过 8 km)且测量密度较大时,人们通常采用气泡水准测量,因为它的精确度高而且成本相对较低。对于大规模的区域网应该采用先进的全球定位系统(GPS)进行全方位的测量。GPS 可借助于人造地球卫星进行三边测量定位。它的原理就是利用雷达信号从卫星传到接收天线所需的时间来计算距离。通过接收器与至少 4 颗人造卫星之间的距离(即三边测量术)就可准确地确定所处位置的三维坐标。目前 GPS 可达到的的精度为 5～8 cm。在地面沉降和其他的地壳运动测量中,当两台 GPS 接受器放在各自的观测点上同时接受由同组卫星群(至少由 4 颗人造卫星组成)发射出的雷达信号时,这两个观测点的相对位置即可确定。在随后的某个时间段里,当人造卫星再次捕捉到这两个观测点时,它们在这段时间里发生的相对运动就可被测出。测量网上的各个观测点都可采用该方法进行测量。第一个地面沉降监测测量网 1992 年在加利福尼亚莫哈韦沙漠的 Antelope 山谷中诞生。它主要用于确定古阶地的沉降,确保测量点间(间距为几十英里)的测量精度以便今后的沉降监测。GPS 测量技术也是一种多功能的勘探手段,它可以迅速地判定沉降的大概位置,以便设置更加精密可随时随地测量的仪器(如伸长计)。加拿大和伊朗也已应用了这种监测方法。如在伊朗的 Rafsanjan 平原。1998 年和 1999 年的两次 GPS 大地高程检测,8 个月的沉降量为 10～80 mm,其测量精度在 5～8 mm 之间。表 1 列出了各种沉降监测方法的比较。

4　结语

根据土质条件,美国的沉降主要有 3 种类型:含



a－35 天内的沉降量;b－8 个月内的沉降量

图 4　雷达干涉图

万方数据

表 1 沉降监测方法的比较

测量方法	测量方式	分辨率	空间测量密度	空间测量范围
水准仪	垂直测量	0.1～1	10～100	线—网
光电测距仪	水平测量	1	10～100	线—网
伸长仪	垂直测量	0.01～0.1	1～3	点
卷尺	水平测量	0.3	1～101～10	线列
不胀钢尺	水平测量	0.000 1	1	线
石英管	垂直测量	0.000 01	1	线
GPS	水平测量	20	10～100	网
	垂直测量	5		
InSAR	测距	5	100 000～10 000 000	象素点

注 表中所示分辨率为最大分辨率；InSAR 图上的一个象素点在实际地面上代表 40～80 m^2

水层组的压实，有机土的疏干以及可溶岩的洞穴塌陷产生的沉降。对 3 种沉降过程的研究表明，人类活动尤其是对地下水的恶性开采是引起沉降的主因，为此美国各州提出了以下措施：

(1)调整用水类型，生要是引入地表水，限制使用地下水。

(2)改变用水方向，也就是变农业耗水型为工业节水型。

(3)提高用水观念，做到政府立法管理和提高民众节水意识相结合。

(4)提高监测手段，根据雷达干涉技术与水准测量和 GPS 测量技术所具有的互补性，综合运用不同的监测技术以达到最有效的监测目的。

通过以上措施，优化资源分配和资源管理尽量减少人类抽排地下水对沉降的诱发作用是处理这类地质灾害已被证明的可行缓解方式。

[参 考 文 献]

[1] Devin Galloway, David R Jones and S E Ingebritsen. LAND SUBSIDENCE IN THE UNITED STATES[M]. U. S. GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 1999. 1182.

[2] John W bell, Falk Amelung and Alan R Ramelli. 美国内华达州拉斯韦加斯地面沉降 新的大地测量数据揭示空格局局部化，受构造控制和沉降速率趋缓[A]. Laura Carbognin, Giuseppe Gambolati, A Ivan Johnson,等编. 地面沉降—第六届地面沉降国际讨论会论文选[C]. 张阿根,刘毅,魏子新,等译. 北京 地质出版社,2000.

[3] 张阿良,刘毅,龚士良. 国际地面沉降研究综述[A]. Laura Carbognin, Giuseppe Gambolati, A Ivan Johnson,等编. 地面沉降—第六届地面沉降国际讨论会论文选[C]. 张阿根,刘毅,魏子新,等译. 北京 地质出版社, 2000.

[4] Michelle Sneed, Michael T pavelko and Devin l Galloway. 限定厚层弱含水层垂直水力扩散系数时对残余含水体系的压实模拟[A]. Laura Carbognin, Giuseppe Gambolati, A Ivan Johnson, 等编. 地面沉降—第六届地面沉降国际讨论会论文选[C]. 张阿根,刘毅,魏子新,等译. 北京 地质出版社,2000.

THE GROUND SUBSIDENCE IN THE UNITED STATES AND THE RELATIVE COUNTER MEASURES

QI Jun-qiang, SHI Bin, CAI Yi, DING Yong, SHAO Li

(*Dept. of Earth science, Nanjing University, Advanced Computational Engineering Institute for Earth Environment, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*)

Abstract: The study of the ground subsidence in the united states is introduced briefly in this paper, including the types, mechanisms, disposing measures and monitoring methods of the subsidence, in order to use for reference to the research of the subsidence in china.

Key words: subsidence; type; mechanism; countermeasure

万方数据