

# 上海地下水流场变化及对地面沉降发展的影响

龚士良<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局地面沉降研究中心, 上海 200072; 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

**摘要:** 针对近年来上海地下水采灌格局新的变化态势, 利用地下水位与地层变形的实测数据, 分析了地下水渗流场变化及对地面沉降发展的影响。结果表明: 开采地下水直接影响地下水流场分布; 埋深 170~300 m 的深部含水层集中开采导致的地下水位持续下降以及地表下至 75 m 范围内的浅部含水层的工程降水和建筑荷载, 是目前上海地面沉降的两大制约因素; 深部含水层地下水开采量已超过总采量的 80%, 其地层压缩量占地面沉降比例超过 50%, 75 m 以浅地层的固结压缩则占近 30%。提出了地下水资源开发管理和地面沉降系统调控的对策与措施, 有助于减弱地面沉降及其社会危害。

**关键词:** 地下水开采; 渗流场; 地下水位; 地面沉降; 上海

**中图分类号:** P642.26

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-643X(2009)03-0001-06

## Change of Groundwater Seepage Field and its Influence on Development of Land Subsidence in Shanghai

GONG Shi-Liang<sup>1,2</sup>

(1. Center for Land Subsidence of China Geology Survey, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Poinced to the new change situation of the groundwater exploitation and fills in Shanghai at the recent years, using the measured data which related the groundwater level and the stratum deformation, this paper analyzed the influence of changing the groundwater seepage field to land subsidence development. The result indicated that: Exploitation groundwater directly influence to distribution of seepage field; The water table 170—300m depth aquifer central exploitation caused the groundwater level to drop steady, and the surface to the 75m scope in shallow aquifer engineering precipitation and the building load are two key restriction factors of land subsidence at the present in Shanghai. In the deep aquifer, exploitation quantity of groundwater has surpassed 80% in total, its stratum deformation has surpassed 50% in land subsidence, consolidation compression of shallow stratum from surface to the 75m, to account for nearly 30%. Countermeasures and measures for groundwater resources exploitation management and land subsidence system control are helpful to reduce the land subsidence disaster and its society harm.

**Key words:** groundwater exploitation; seepage field; groundwater table; land subsidence; Shanghai

开采地下水导致水位下降是上海地面沉降形成与发展的关键因素, 而第四纪地层的固结压缩是内在原因。地面沉降是渗流场变化及地层应力重分布的过程。本文通过上海地下水采灌历史, 分析目前开采格局新的变化特征, 剖析地面沉降新的发展态势, 并探讨进一步深化地下水系统管理与地面沉降综合防治的对策措施。

## 1 背景情况概述

### 1.1 第四纪地层与含水层系统

上海第四纪地层厚约 300 m。受地质历史时期海平面升降变化影响, 长江河口地区海陆变迁频繁, 第四纪地层在垂向上具有砂性土与粘性土交互的沉积韵律, 并存在水平向的沉积相变<sup>[1]</sup>。埋深 150 m 以浅, 为欠固结~正常固结的浅海—滨海相和河流三

收稿日期: 2009-04-06

基金项目: 国土资源部首批百名优秀青年科技人才计划(200218)

作者简介: 龚士良(1965-), 男, 上海人, 博士, 教授, 主要从事地下水资源与地面沉降研究。曾获中国地质学会青年地质科技金锤奖、国土资源部优秀青年科技人才称号。

角洲相的粘性土和砂层;150 m以深,由正常固结~超固结的河流相的砂层和湖相杂色粘土层组成。

地表以下至75 m范围内,普遍分布欠固结的海相沉积的饱和和软弱的粘性土地层,使上海成为典型的软土地基地区。此区间段内,工程基础施工及城市地下空间开发利用非常频繁和集中,极易诱发或加剧土体的固结压缩<sup>[2]</sup>。第四纪地层是上海地下水

资源的主要赋存场所。第四系含水层系统可分为一个潜水层和五个承压层,其中潜水层与地表水系有水力联系,第一、二、三承压含水层相互间局部存在沟通,第四、五承压含水层相互间局部也存在沟通。上海与江苏的苏锡常、浙江的杭嘉湖等地区,同处长江三角洲水文地质构造单元内,为统一的地下水含水层系统<sup>[3]</sup>。上海第四系含水层基本特征见表1。

表1 上海第四系含水层基本特征

沉积时代	含水层	岩性	顶板埋深	层厚	富水性
Q <sub>4</sub>	潜水层	灰褐色砂质粉土	—	2~10	10~100
Q <sub>3</sub> <sup>2</sup>	第一承压层	灰黄色细砂	25~35	6~15	300~500
Q <sub>3</sub> <sup>1</sup>	第二承压层	深灰色中粗砂	60~75	20~40	1000~3000
Q <sub>2</sub> <sup>2</sup>	第三承压层	黄灰色中粗砂	110~125	15~30	1000~3000
Q <sub>1</sub> <sup>2</sup>	第四承压层	杂色含砾中粗砂	170~180	60~80	3000~5000
Q <sub>1</sub> <sup>1</sup>	第五承压层	杂色含砾中粗砂	250~260	20~40	3000~5000

m, m<sup>3</sup>/d

## 1.2 地下水采灌历史与现状

上海在1860年开凿了第一口深井,至1921年地下水开采量已达 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,1949年增至 $8750 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。建国后开采量剧增,全市年度开采总量迅速突破 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水开采同时存在“三集中”,即集中于中心城区、集中于100 m以浅的第二承压层、集中于每年5~10月的夏季,致使地下水位急剧下降,地面沉降快速发展。1965年以后,通过压缩地下水开采量、调整开采层次和布局、实行“冬灌夏用”等综合措施,开采强度明显降低。20世纪80年代、90年代因经济快速发展,全市地下水开采量增长明显,但城区总体处于有效监管中。近年来,地下水开采持续显著减少,2008年全市开采总量为 $3475.77 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中中心城区 $579.43 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,均处于建国以来最低水平(图1)。

地下水人工回灌自1966年开始全面展开,回灌量持续增长,全市最高年回灌量约 $2750 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,中心城区超过 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。20世纪90年代中后期,因产业结构调整,回灌工作受到一定影响。近年来得到有效加强,2008年全市回灌总量 $1763.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,中心城区 $1198.58 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图2)。

目前上海地下水的采灌格局,总体呈现如下特点:中心城区采灌基本平衡、近远郊开采集中且呈常年性开采、深部第四五承压层开采集中、受毗邻的江浙地区地下水开采影响明显等。

2008年,第二~第五承压含水层的开采比例依次为6.8%、13.1%、59.0%、21.1%,回灌比例依次为47.6%、37.1%、14.7%、0.6%。

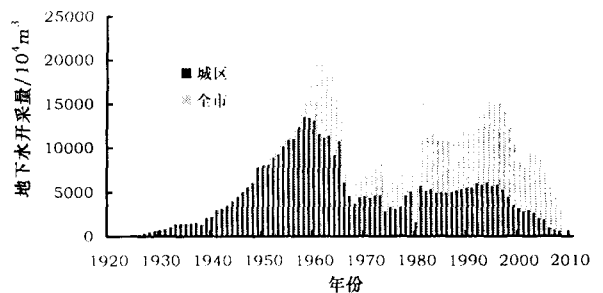


图1 上海地下水年度开采量变化

## 1.3 地面沉降发展过程

上海地面沉降始现于1921年,至2008年地面平均沉降1.981 m,最大沉降量3.045 m,最大沉降速率超过110 mm/a(1957~1961年)。地面沉降发展以1965年为界分为两个时期,之前为快速发展阶段,其后至今为沉降控制阶段(图3)。

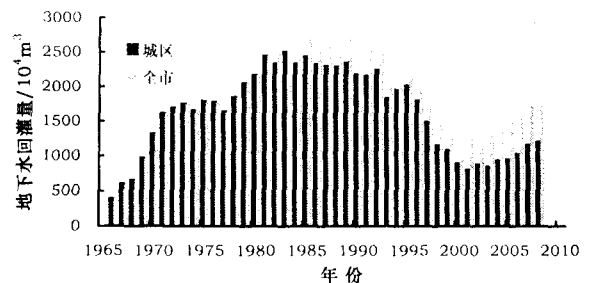


图2 上海地下水年度回灌量变化

1921年~1965年的45年间,地面累积沉降1.69 m,平均沉降速率37.6 mm/a;1966年~2008年的43年间,累积沉降0.291 m,平均沉降速率6.8 mm/a。

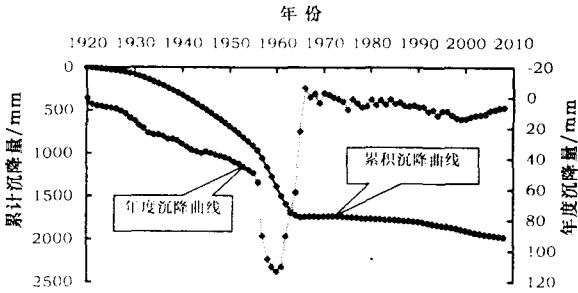


图 3 上海地面沉降发展过程

20 世纪 80 年代末期以来,受大规模城市改造与工程建设影响,地面沉降明显增长<sup>[4]</sup>,全市平均沉降速率增至 10 mm/a 左右。2004 年以后渐趋缓和,2007 年、2008 年已连续两年减少至不足 7 mm/a。

地面沉降造成高程损失并逐年累积,同时逐渐向外围蔓延扩展,在上海的陆域范围普遍形成沉降区,特别是黄浦江两岸的中心城区沉降洼地更为明显。地面沉降显著改变了上海自然地理的下垫面形态,成为河口海岸地区环境变异的重要表现形式之一<sup>[5]</sup>,并对城市防汛安全造成严重影响<sup>[6]</sup>。成为城市灾害系统中的主要环节。上海地面沉降造成的经济损失初步估算已超过  $3000 \times 10^8$  元人民币<sup>[8]</sup>。

## 2 地下水流场变化与地层变形效应

### 2.1 渗流场变化及其特征

上海地下水渗流场与开采格局的变化有直接关系。天然状态下上海地下水流动滞缓,渗流场的分布形态及其变化主要取决于含水层开采格局的变化。开采地下水导致水位降落漏斗的形成和发展,直接

控制着地下水流场的形态与变化。第二至第五承压含水层是上海地下水开采的主要层位,水位降落漏斗的变化与开采历史和动态过程密切相关。全市地下水水位降落漏斗中心区的最低水位标高见表 2。

中心城区是地面沉降危险性最高的地区,该区内尽管地下水开采已严格限制,但受区域性地下水位的动态变化明显。中心区典型监测孔四个含水层的水位动态变化曲线见图 4,全市地下水开采强度与等水位线分布现状见图 5。

表 2 地下水降落漏斗中心水位标高 m

含水层	原始	1963	1985	1990	1995	2000	2005	2008
二	2.0	-37.0	-6.2	-8.2	-14.1	-17.9	-15.6	-25.2
三	2.0	-40.0	-16.0	-20.0	-29.0	-35.0	-32.0	-39.3
四	2.0	-19.0	-28.0	-31.1	-46.8	-48.0	-50.3	-46.1
五	2.0	-20.0	-34.4	-37.9	-40.0	-46.0	-69.1	-55.0

以往历史上,地下水开采集中于中心城区、集中于第二承压层、集中于每年的夏季,这种在地区、层次、时间上的过度集中,是地面沉降急剧发展并迅速成为城市地质灾害的重要原因。之后,对开采布局进行调整,即压缩开采总量、开采区由城区转移至近远郊、主采层由浅部含水层调整为深部含水层,由此地面沉降得到有效缓和。开采布局的调整是合理和适时的,也产生了显著的控沉实效。但随着 40 余年的时间延续和不断强化,开采格局却日益显露新的“集中”态势:地下水开采虽实现了宏观管理,但集中开采区的水位降落漏斗仍在发展,浅部的第二、三含水层在调整为非主采层后,水位显著回升。这两层也是

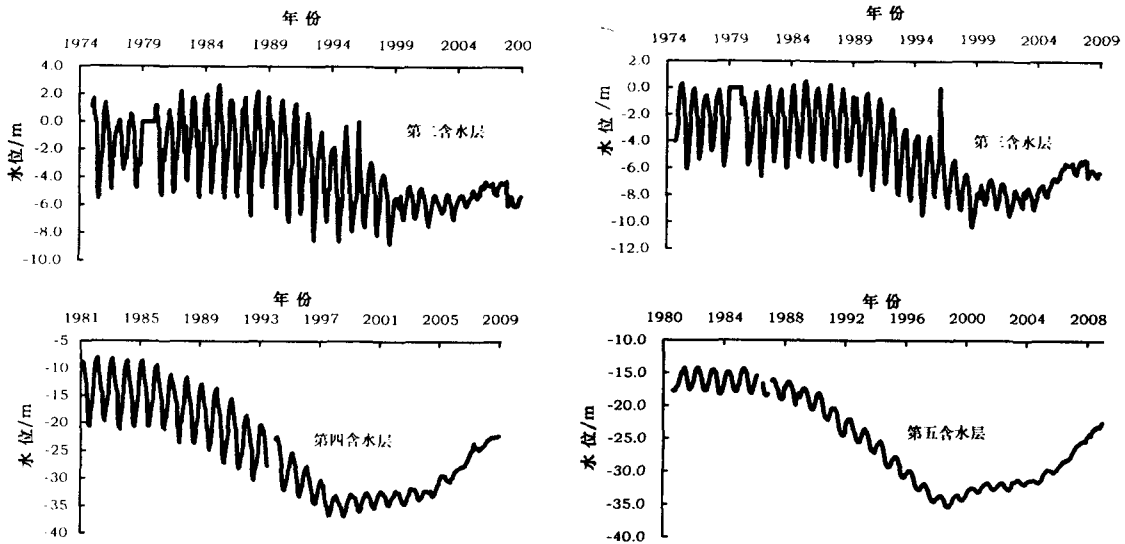


图 4 中心城区含水层地下水位变化历时曲线



中未能包含,成为管理盲区。

工程设计施工通过疏干或降压,降低突涌等工程问题发生的可能性和危害程度。工程降水的渗流场变化,内在作用机制与开采过程是相同的<sup>[10]</sup>,但浅部地层颗粒较细、砂粘交互,渗流缓慢、排水不畅,时间效应存在明显差异。另外,邻近的江浙省区的地下水开采,也对上海的地下水开采格局带来一定影响。在上海的西北与西南地区,出现并不断发展的水位降落漏斗,与此关系密切。

地下水流场的形态与变化,同时也受地层结构的影响。地层岩性差异和沉积相变,会使渗流场与应力场发生变化,在地层界面和岩性变化地段,将加剧渗流的突变和非线性。由此可以看出,在地下水开采的作用下,上海地下水流场的变化是非常显著的。而深部第四五含水层的地下水位持续快速降低的现状,以及由此导致的环境危害,应予以高度关注。上海地下水开采格局新的发展态势和特点,以及导致的地下水流场的变化,必须引起足够重视。

### 2.2 地层变形效应分析

地下水的开采格局不仅制约着地下水流场的平面分布,也通过地下水位的变化使含水层及相邻土层的应力状态发生改变和重新分布,并由此导致土体固结压缩,引起地面沉降。地层应变特征与土体自身性质密切相关,含水砂层与软土层在水位变化作用下的变形明显不同。75 m 以浅的三个软粘性土层,第三软土层因直接上覆于第二承压含水层之上,且夹有较多粉细砂层,呈砂粘互层的“千层饼”状,其变形随水位变化比较明显;而第一、二软土层则基本不受水位变化影响,呈现持续压缩<sup>[11]</sup>,具有明显的流变特性<sup>[12]</sup>(图 6)。

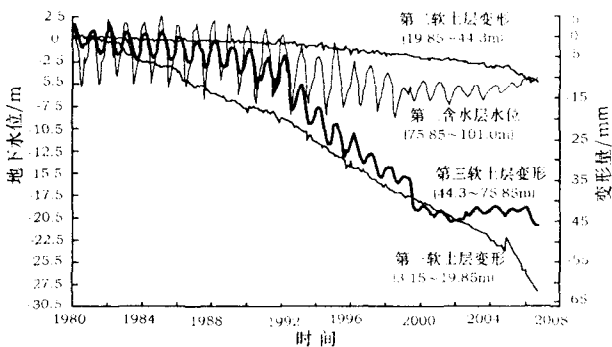


图 6 软土层变形特征

含水砂层由于颗粒较粗,随水位变化呈弹性变形,基本无时间滞后,但在长期周期性的水位升降作用下,残余变形逐渐显露<sup>[13]</sup>。而水位持续走低,使含

水层始终处于压缩状态,沉降效应明显,尽管水位近年来逐渐恢复,但变形仍在持续增长,这在目前的第四五含水层中表现尤为突出(图 7)。

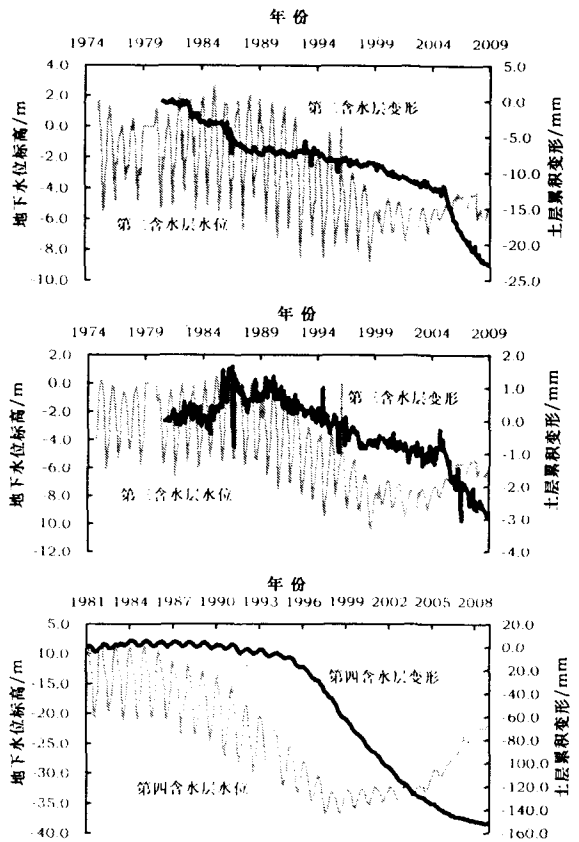


图 7 含水层变形特征

目前,上海软土层的变形占地面沉降量的 27.6%,而第四五含水层则占 52.2%。因此,尽管深部土层固结程度高,相同开采强度下的沉降效应较浅层小,但深部含水层封闭性更强,获得的补给更为有限,集中开采的环境后果非常严峻。单纯地通过开采层次的调整来取得地下水资源开发与地面沉降控制的协同,实际上不是最有效和可持续性的<sup>[14]</sup>。

建筑与工程荷载也是地层应力场变化的影响因素,复合地基或桩基础,通常将砂性土地层作为持力层,或借助地层的摩阻力提供支撑,从而使土层受到附加荷载,并在基础周围产生应力重分布,在应力消散过程中引发地层固结压缩,导致各类工程的工后沉降明显<sup>[15]</sup>,并对区域沉降带来一定影响。

### 3 地面沉降系统调控对策

经典的有效应力原理,是剖析开采地下水引起的地面沉降问题的理论基础和重要手段。由此建立地下水渗流与地层固结的耦合模型能很好地刻划实

际问题,并为地下水资源开发管理与地面沉降预警预报等防治工作提供了技术支持<sup>[16]</sup>。

在地面沉降研究中,曾根据先期固结压力确定临界水位,根据地下水补给情况确定可采资源量,等。但在防治实践中,却未能充分发挥预期实效,说明地面沉降问题远非模式概化如此简单<sup>[17]</sup>。区域上的水量或水位均衡不能减弱和消除开采井周围的沉降效应,只要有开采、有地下水位的下降,土层压缩与地面沉降是难以避免的。因此,在考虑地质环境容量和承载能力前提下,防治沉降速率过快、累积沉降过大等灾害性地面沉降,才是关注的重点。在此基础上,研究确定相应的控制阈值和预警指标,更有实际指导作用。

针对上海地下水采灌的新格局,以及不同地层的变形特征,笔者提出刚性控制与柔性调节相结合的地面沉降系统调控对策措施。刚性控制即是地面沉降防治工作必须依法执行,以法规化、制度化、标准化推进,制定地面沉降控制的总体和长远目标,确定刚性硬指标。严格限制地下水开采量,严格控制地下水水位降幅,切实降低深部含水层开采强度。

柔性调节是指在具体实施时,可针对实际情况,在不同时期、不同阶段,可有所区别和差异,在总框架内确定不同控制指标。也就是刚性的总目标,可以通过柔性的分解予以实施。如采用“间采间歇”方式,避免持续开采;加强人工回灌,促进含水层回复,并以砂层的回弹,相对降低软土层流变在地面沉降中所占比例;结合工程实际,在浅部砂层进行回灌,减弱工程建设的沉降效应;夏季为开采地下水高峰,可以允许有较大的沉降量,而在冬季则应尽力缩减;城区沉降较大,在其外围应尽量减小;软土层塑性的持续压缩,可让弹性较好的含水砂层,借助人工回灌等措施带来的膨胀回弹予以适当抵消。上述地面沉降系统调控对策措施,具有现实可行性,也非常必要。

## 4 结 语

地面沉降是上海突出的环境地质问题。目前深部含水层集中开采导致的水位持续下降,以及城市建设过程中的工程降水与建筑荷载,是地面沉降新的发展态势。基于地下水渗流场与地层应力场的分析,寻求和实施系统调控技术措施,有助于地面沉降防治取得新突破。

### 参考文献:

- [1] 邱金波,李 晓.上海市第四纪地层与沉积环境[M].上海:上海科学技术出版社,2007:117-126.
- [2] 龚士良.上海城市建设对地面沉降的影响[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):108-111.
- [3] 龚士良.长江三角洲地质环境与地面沉降防治[C]//.中国地质学会:第六届世界华人地质科学研讨会论文集.2005:25-34.
- [4] Gong Shi-liang. Analysis on Land Subsidence Due to Construction Engineering in Soft Region of Shanghai [C]//. Land Subsidence—Proceedings of the Seventh International Symposium on Land Subsidence (Vol. I). Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005:82-87.
- [5] 陈吉余,陈沈良.河口海岸环境变异和资源可持续利用[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(2):1-7.
- [6] 龚士良.上海地面沉降与城市防汛安全[J].水文地质工程地质,2008,35(4):96-101.
- [7] Gong Shi-liang. The Effect of Land Subsidence in the Urban Calamity System of Shanghai[C]//. Land Subsidence—Proceedings of the Seventh International Symposium on Land Subsidence (Vol. II). Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. 2005: 844-850.
- [8] 曾正强,陈华文,张维然,等.上海市地面沉降灾害经济损失评估[C]//.地质环境经济论文集.北京:中国大地出版社,2003:60-66.
- [9] 龚士良,叶为民.上海深基坑工程地面沉降评估理论与方法[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):55-60.
- [10] 骆祖江,李 朗,曹惠宾.复合含水层地区深基坑降水三维渗流场数值模拟[J].工程地质学报,2006,14(1):72-77.
- [11] 龚士良.上海软粘土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J].工程地质学报,2002,10(4):378-384.
- [12] Gong Shi-liang. The Microscopic Characteristics of Shanghai Soft Clay and Its Effect on Soil Body Deformation and Land Subsidence[J]. Environmental Geology, 2009,56(6):1051-1056.
- [13] 张 云,薛禹群,吴吉春.抽灌水条件下上海砂土层的变形特征和变形参数[J].水利学报,2006,37(5):560-566.
- [14] 龚士良.地面沉降研究与防治认识论与方法论刍议[J].城市地质,2007,2(1):16-19.
- [15] 严学新,龚士良.上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J].水文地质工程地质,2002,29(6):21-25.
- [16] 龚士良.上海地下水资源系统开发与管理[J].管理工程学报,1999,13(1):47-49.
- [17] 陈崇希.关于地下水开采引发地面沉降灾害的思考[J].水文地质工程地质,2000,27(1):45-48+60.