

可视化地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用

The application of the information system of visualized strata model to the research of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area

王福刚¹, 梁秀娟¹, 于 军²

(1. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘 要: 在我国多个城市发生了由于地下水过量开采而引起的地面沉降现象, 并由此造成了重大的环境问题和经济损失, 预测与控制地面沉降已经成为这类城市发展中必须面对的问题。基于地面沉降产生的机理, 在 GIS 平台上建立了第四系地层三维可视化地层模型信息系统, 该系统可以直观地显现不同性质土层的空间展布形态和空间组合特征, 实现了研究区地层的拆分与组合, 剖面的任意切割与显示, 指定深度切割水平剖面, 任意视角观测地层等地层信息的三维可视化直观表达, 为研究地面沉降问题提供了宝贵的资料信息和有利条件。

关键词: 地面沉降; 地层; 地层模型信息系统; 三维可视化

中图分类号: TU 431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2005)02-0219-05

作者简介: 王福刚 (1975-), 男, 辽宁普兰店人, 博士生, 2001 年 6 月毕业于吉林大学, 获硕士学位, 主要从事水文地质与水资源评价管理研究。

WANG Fu-gang¹, LIANG Xiu-juan¹, YU Jun²

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, China)

Abstract: Land subsidence caused by excessive exploitation of groundwater, has occurred in many cities of our country and thereout leads to great environmental problem and economy loss. The problems of forecast and control of land subsidence must be solved in these cities. Based on the mechanism of land subsidence, the information system of 3D visualized model for Quaternary strata is constructed on the GIS platform. The system can intuitively and veritably show the spatial outspread shape and spatial combination feature of strata with different properties. Also, the following information such as the strata separation and combination, cut and display of sections, section at the appointed depth, observation of the strata in different visual angle, can be handily displayed by the three dimensional visualized strata model. The strata model can provide valuable information and favorable conditions for the research of land subsidence.

Key words: land subsidence; strata; strata model information system; three-dimension visualization

0 概 述

地面沉降是指在自然和人为因素作用下, 由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象^[1]。我国已在 16 个省、市的近 50 个城市发生了地面沉降^[2], 相对海平面上升问题已成为 21 世纪我国沿海地区实现可持续发展面临的重大环境问题, 而地面沉降是造成我国沿海地区相对海平面上升的主导和决定因素^[3]。江苏省苏州, 无锡和常州(下面简称苏锡常)是地面沉降较为严重的地区^[4~7]。因为长期过量开采地下水, 苏州市 1965~1983 年累计最大沉降量 761 mm, 无锡市 1964~1984 年累计最大沉降量 903 mm, 常州市 1970~1989 年累计最大沉降量为 820 mm, 至 1998 年苏锡常 3 市区地面沉降中心的最大累计沉降量分别达 1682, 1100, 949 mm^[4]。苏锡常平原自 1989 年以来, 已有 18 处发生地裂缝^[8]。

苏锡常 3 市由于地面沉降, 造成市区地面积水, 管道弯折, 码头仓库进水, 防洪工程效益下降, 井管

抬生, 倾斜、断裂, 水井被破坏, 使城镇水准点失效^[4, 9], 给城市建设带来重大的危害和经济损失。据不完全统计, 近 10 年来, 3 市地面沉降所造成的直接经济损失约 70 多亿元^[4]。

1 研究区地面沉降机理与建立地层模型信息系统的重要意义

1.1 研究区地层特征及地面沉降机理

苏锡常研究区(见图 1)第四系由全新统、上更新统、中更新统和下更新统组成。第四系较发育, 分布范围遍布全区, 厚度达 70~335 m。由于中更新世以来的 4 次海水入侵, 在第四系松散层中形成 3 次较大的沉积旋回, 在地层上表现为粘土层与砂土层相间出现。粘土层的压缩性为中等, 透水性较差, 渗透系数多在 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/s 之间^[5]。典型的地层结构如图 2

基金项目: 江苏省重点项目(苏锡常地面预警系统[1999]061)

收稿日期: 2004-03-08

所示,土层的主要物理力学性质见表 1^[5]。研究区前第四系地层除在低山丘陵有零星裸露外,大部分均被较厚的第四系松散层所覆盖。

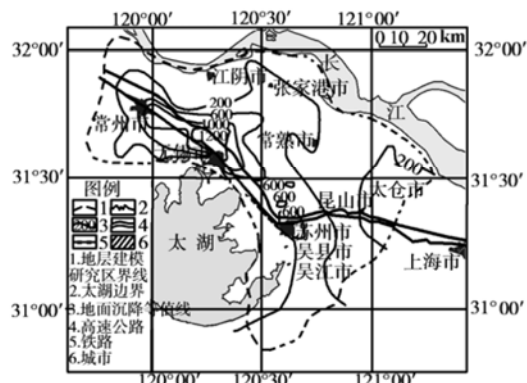


图 1 地层模型建模研究区范围图

Fig. 1 The study area of strata model

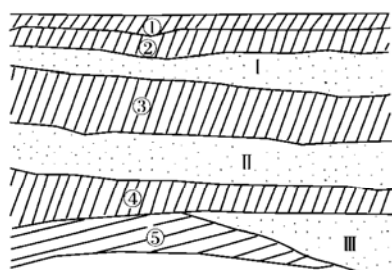


图 2 苏锡常地区典型地层结构示意图

Fig. 2 The typical stratigraphic structure in Su-Xi-Chang area

表 1 粘性土层的主要物理力学性质^[5]

Table 1 The physical and mechanical properties of cohesive soil

土层	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	初始孔隙比	压缩系数 $\alpha/(\text{cm}^2\cdot\text{kg}^{-1})$
①	1.89	30.0	0.89	0.036
②	1.85	31.0	0.96	0.036
③	1.82	32.4	0.89	0.027
④	1.97	22.0	0.67	0.021

研究区地下水资源丰富,含水层发育,根据成因和埋藏条件,将含水岩系划分为 1 个潜水含水层和 3 个承压含水层(见图 2)。I 承压含水层,顶板埋深 10~100 m,岩性以灰黄色粉砂为主,厚度变化较大,平均厚度 10~20 m; II 承压含水层,顶板埋深 80~140 m,岩性以灰色中、细砂为主,局部分布有砂砾石层,分布稳定,厚度 25~50 m,渗透系数为 $(1.2\sim 2.9)\times 10^{-2} \text{ cm/s}$; III 承压含水层,顶板埋深 130~170 m,岩性为灰白色粗砂、砾石层,厚度 10~20 m,分布不稳定,有的地方缺失^[5]。苏锡常 3 市主要开采地下第 II 承压含水层^[4, 5, 8, 10]。

通过研究发现地面沉降是由土体固结变形引起的,影响土体固结变形的内因有:土体的地质成因、展布方式、物质成分、结构特征、物理力学性质等;外因有附加应力大小、作用方式、持续时间等^[1]。其中开采地下水是诱发地面沉降的直接因素^[1~9],而抽

汲地下水形成的地面沉降研究的核心与难点是粘性土中孔隙水运移问题,它也是土体环境地质和外动力地质灾害研究的前缘热点^[1]。据上海市区的监测资料,弱透水的粘性土层的压缩量可占整个地面沉降量的 80%以上^[9],而常州多年监测资料显示,区内产生地面沉降的主要压缩层为第 II 承压含水砂层和与之水力联系密切的粘性土层顶板,其压缩量占总压缩量的 92.9%^[8]。另外,在研究中还发现基底面的起伏是产生地面不均匀沉降进而导致地裂缝的一个关键因素^[8, 10]。所以在地面沉降研究中明确基底面起伏形态、含水层和粘性土层的空间展布和结构特征是非常重要的。

1.2 建立地层模型信息系统的重要意义

通过以上分析可见,在地面沉降机理预测和控制研究中,都需要对地层的空间展布形态、结构特点、物理力学性质、地下水分布与开采状况进行综合研究。因而,利用当代计算机信息化技术,建立地层可视化模型,为研究人员直观再现研究区不同性质(地质成因,展布方式,物质成分,结构特征,物理力学性质,水力特征)地层的空间展布形态和地层间的组合关系,对地面沉降研究是十分有利和必要的。另外,对于国内大多数城市,多年的地质、水文地质及工程地质等勘察工作积累了大量地层钻孔、剖面等地层信息资料,基于大量的已有资料,构建整个研究区可视化地层模型信息系统,不仅是地质资料科学化管理的需要,更是研究工作现代化和适应当代科技发展信息化的需要。

2 三维可视化地层模型信息系统的建立及其在地面沉降研究中的应用

2.1 可视化地层模型信息系统的建立

由于研究区地面沉降主要发生于第四系地层空间,因此在建立研究区三维地层模型时,对前第四系基岩地层不做详细划分,将其整体视为区内第四系地层的基底。根据研究区的地质及水文地质资料,建模中将全新统地层概化为一层,上更新统、中更新统和下更新统地层均概化为两层,下更新统地层与下伏基岩呈角度不整合接触,具体描述见表 2。

本次建模采用的软件为 GMS^[11](The Department of Defense Groundwater Modeling System)软件,该软件由美国杨伯翰大学环境模拟实验室和美国陆军水路试验站合作开发而成的,目前已经在世界 70 多个国家得到广泛应用。以 GMS 软件为操作平台,利用能较好表征研究区地层特征的 336 个钻孔资料,采用地层钻孔插值方法,创建了研究区地层的三维地层模型信

息系统。该信息系统实现了地面沉降研究中的地层信息的可视化表达。关于建模的具体步骤和操作在此不做详述, 仅重点阐述建成后的地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用及其实际意义。

表 2 地层模型系统中地层划分

Table 2 Division of strata			
地 层 年 代	地 层 序 号	地 层 划 分	与图 2 中地 层对应关系
第 四 系 地 层	全新统	1 全新统粘性土层	①
	上更新统	2 上更新统上部粘性土层	②
		3 上更新统下部砂层	I
	中更新统	4 中更新统上部粘性土层	③
		5 中更新统下部砂层	II
	下更新统	6 下更新统上部粘性土层	④
		7 下更新统下部砂层	III
	前第四系地层	8 第四系基底基岩地层	⑤

2.2 可视化地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用

(1) 可视化地层模型信息系统对第四系地层及基底基岩地层起伏特征的客观再现(图 3~5), 为地面不均匀沉降研究提供了有利条件。

图 3~12 图例说明: 图 3~12 中的图例旁的数字为地层序号(见表 2), 其代表的含义如下: 1 为全新统粘性土层(图 2 中的①层); 2 为上更新统上部粘性土层(图 2 中的②层); 3 为上更新统下部砂层(图 2 中的 I 承压含水层); 4 为中更新统上部粘性土层(图 2 中的③层); 5 为中更新统下部砂层(图 2 中的 II 承压含水层); 6 为下更新统上部粘性土层(图 2 中的④层); 7 为下更新统下部砂层(图 2 中的 III 承压含水层); 8 为第四系基底基岩地层(图 2 中的⑤层)。

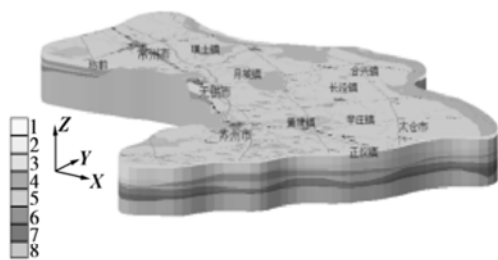


图 3 地理图与地层模型整体组合图

Fig. 3 Topographic map combined with strata model

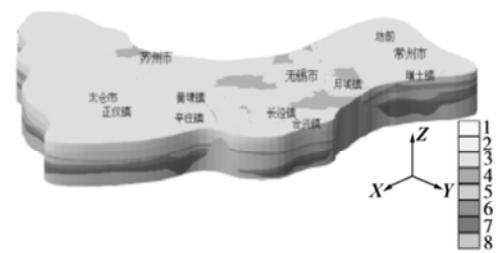


图 4 不同角度显示的地层整体组合图

Fig. 4 Whole strata displayed in different visual angle

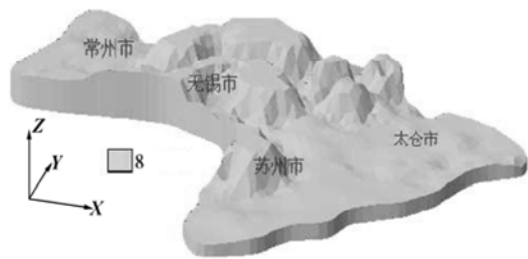


图 5 第四系基岩基底起伏形态图

Fig. 5 Outspread shape of bedrock base of quaternary strata

苏锡常地区的地裂缝主要是地面不均匀沉降的结果, 而基岩面起伏、土层结构是影响地面不均匀沉降的内在因素。地层模型信息系统直观再现了发生地面沉降的第四系地层空间结构(图 3, 4)和基岩面起伏特征(图 5), 并实现了“实地对照”功能, 使我们方便地了解地表任意一个位置对应的地下地层的特征(图 3); 同时还可以从任意视角观测地层的空间展布形态(图 4), 实现了地层信息三维可视化。这些信息的获得为地面不均匀沉降的研究创造了有利条件, 如根据图 5 所显示的基岩面起伏信息, 在苏锡常中部地区基岩面向上隆起, 相对起伏大, 而太仓东南部地区基底相对平缓, 由此可以初步确定在地下水位大幅度下降情况下, 不均匀沉降易发生于无锡东北部地区, 相比之下太仓东南部地区则易发生均匀性沉降; 由不均匀沉降产生的地裂缝, 如 1994 年无锡市石塘湾镇地裂缝、长泾镇地裂缝、河塘镇等多处地裂缝的地理位置分布便说明了这一分析的正确性。

(2) 可视化地层模型信息系统以分解或组合形式再现含水层(图 6~8)和弱透土层(粘性土层)(图 9)的空间展布特征, 为地面沉降研究提供了可靠依据。

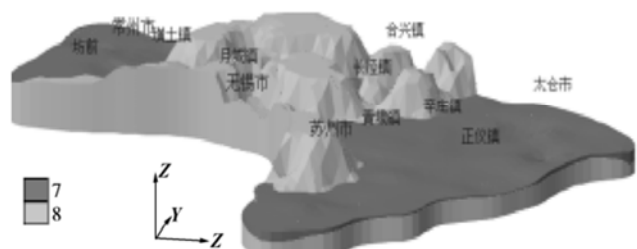


图 6 上更新统砂层空间展布及其与基岩接触关系图

Fig. 6 Spatial outspread shape of sand layer of upper Pleistocene series and its contact with bed rock strata

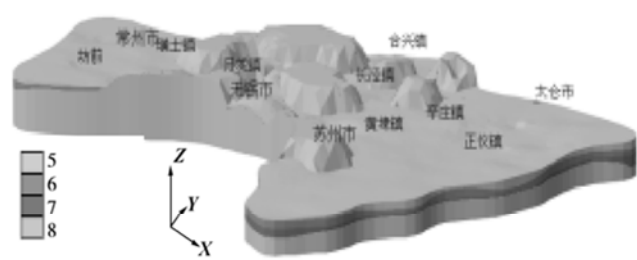


图 7 中更新统砂层空间展布及其与基岩接触关系图

Fig. 7 Spatial outspread shape of sand layer of mid Pleistocene series and its contact with bed rock strata

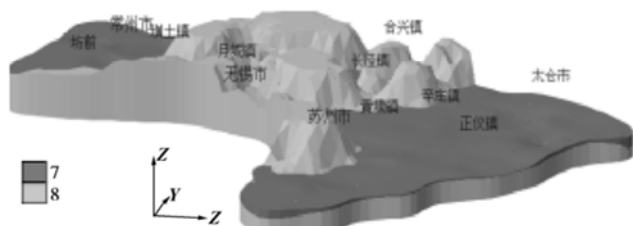


图 8 下更新统砂层空间展布及其与基岩接触关系图

Fig. 8 Spatial outspread shape of sand layer of lower Pleistocene series and its contact with bed rock strata

超量开采含水层中地下水是苏锡常地区地面沉降产生的直接因素,而弱透水的粘性土层的物理力学性质则影响着地面沉降的程度。因此,查清含水层和粘性土层的空间展布特征对地面沉降的研究至关重要。地层模型信息系统直观再现了研究区 3 个承压含水层(由表 2 知, I, II, III 承压含水层分别对应于上、中、下更新统砂层)的空间展布形态及其与基岩地层的接触关系(图 6~8);同样,也可将与含水层联系密切的 3 个弱透水层(见表 2, 粘性土层②, ③, ④)客观再现,在此仅给出以分解方式显示的 II 承压含水层顶板弱透水层③(由表 2 知,该粘性土层对应于中更新统粘性土层)的空间展布形态,见图 9。由图 6~8 可见,3 个承压含水层在区域上的分布是不均匀的, I 承压含水层主要分布于研究区东、南部; II 承压含水层在区域上分布较广,仅在中部地区由于基底基岩地层的隆起而缺失; III 承压含水层在西北部也有少量分布,但在东、南部分布范围明显小于 I, II 承压含水层。由图 9 可见 II 承压含水层顶板粘性土层在研究区的分布较广泛,仅在中部地区缺失。

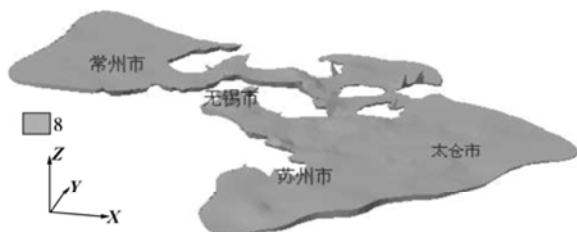


图 9 中更新统粘性土层空间展布形态图

Fig. 9 Spatial outspread shape of cohesive soil layer of mid-Pleistocene series

(3) 地层模型信息系统可以显示任意指定地层高程的水平剖面(切片)(图 10),也可显示不同位置的竖向剖面(图 11),并实现了多方向多角度剖面的组合显示(图 12),清楚地将研究区地层结构与组合特征以三维的形式呈现出来,为研究工作提供了非常有利的信息。

地层模型信息系统可在任意地层高程上切出水平地层剖面(图 10)(也可以以任意角度切出斜向切片),以帮助研究人员了解某一指定深度不同地层的水平分布与组合形态,这种功能相当于医学上的 CT(Computerized Tomography, 计算机 X 射线断层造

影术—电脑断层摄影法),可以称之为地学上的“CT”。由图 10 可以清楚的“看到”到地面以下 60 m 深处的水平面上,将会出现何种属性的地层,地层间的接触关系如何等地层信息。由图 11 可以清楚了解到不同部位垂向上地层属性特征与地层间的组合与接触关系,结合图 10~12,研究人员能够清楚的了解任何一个地层不同部位的地层结构特征和组合形式。

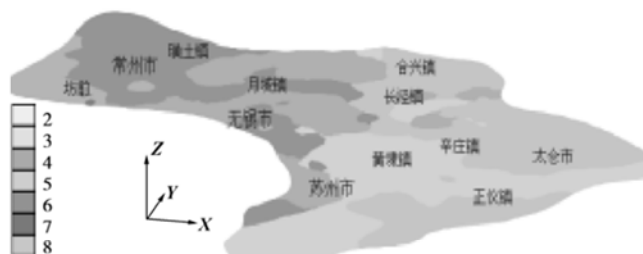


图 10 60 m 深处地层的水平剖面(切片)

Fig. 10 Level section of strata in the depth of 60 m

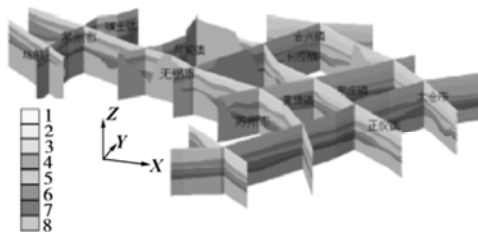


图 11 地层竖向剖面组合图

Fig. 11 Combination of vertical section of strata

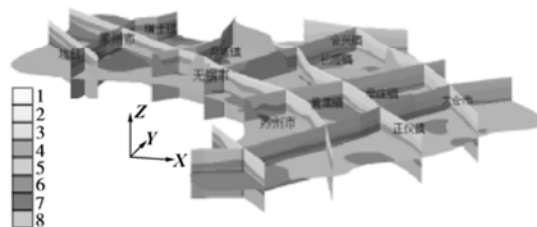


图 12 130 m 处的水平剖面与竖向剖面组合图

Fig. 12 Vertical section of strata combined with level section in the depth of 130 m

在(2)、(3)节所述的地层模型信息系统的这些功能为地面沉降机理分析、地面沉降预测与地面沉降的控制问题提供了丰富的三维可视化地层信息,为研究地面沉降工作提供了十分有利的研究工具。下面利用(2)、(3)节所提供的信息对苏锡常一带地面沉降的特点做一简要分析。

苏锡常三市主要开采地下第 II 承压含水层,实际开采量分别超过允许开采量的 28%, 50% 和 15%,到 1998 年,三市开采中心最大水位埋深分别达 55, 58 和 72 m^[4]。第 II 承压含水层上、下的粘土层③, ④(对应于中、下更新统粘性土层,见表 2)具有中等的压缩性(见表 1), I 承压含水层上部的粘土层②(对应于上更新统粘性土层,见表 2)压缩性较③, ④稍大(见表 1)。由图 6 知 I 承压含水层在苏州西部的无锡、

常州地区缺失,因此Ⅰ承压顶板粘土层②在无锡、常州地区直接与Ⅱ承压含水层顶板粘土层③接触(见图11,12),形成厚度较大的可压缩层;又由图10知,在60 m深处水平面上,苏州东部大部分地区(如其中的太仓市)揭露到Ⅰ承压含水层,无锡、常州大部分地区揭露的是粘土层③,仅在无锡很小的局部地区和常州西部地区揭露Ⅱ承压含水层。

因此,当水位降至60 m时,可以做如下分析预测:在无锡北部及常州大部分地区将发生①,②,③弱透水的粘性土层的塑性压缩,且这种压缩是不可恢复的;而在苏州东部大部分地区将发生①,②和Ⅰ承压含水层的压缩,因苏锡常地区地势较平坦,对于苏州东部的大部分地区因Ⅰ承压含水层占据了60 m以浅可压缩的第四系地层厚度中的一部分,且其压缩系数远小于粘性土层压缩系数,因而苏州东部地区的压缩程度将远小于无锡、常州地区的沉降量,这与图1上的地面沉降等值线所反映的信息是一致的。

当然,全区水位在同一水平面上不可能同时都降至60 m深,因此压缩产生的等值线将呈现以严重超采的苏锡常市区为中心的不规则“漏斗”形状,漏斗的不规则性和西北—东南的方向性(图1)是地面不均匀沉降的外在体现,它除了受地下水的超采影响外,还显示出与基底基岩面的起伏形态(图4)和地层的物理力学性质与组合特征(图11,12)相关的特点(从图11,12上可见,苏锡常一带,可压缩的粘性土层厚度大且分布稳定,其粘性土层的伸展方向与图1中的地面沉降等值线的长轴方向是一致的)。

地面沉降是由内外因素共同决定的,内外因素相互作用并随时间不断变化导致了地面沉降的复杂性和多变性特点。因此,研究地面沉降需要综合考虑多种因素,上面分析仅是为了说明地层模型信息系统的应用而做的概略性分析,目的只是为了向读者介绍一种研究地面沉降的有利工具和方法。

3 结 论

(1)地层模型信息系统实现了研究区地层的模拟与再现,使研究人员对研究区地层结构、地层间复杂的接触关系、地层的空间展布形态有了更形象、更具

体的认识。借助于地层模型,研究人员可以很容易确定含水层、弱透水的粘性土层和第四系基底的空间展布特征,为研究地面沉降机理、地面沉降预测和地面沉降的控制提供了有利的条件和快捷的工具。

(2)地层模型信息系统操作简便,可以灵活实现地层的拆分与组合、不同位置与角度地层剖面的切割与组合、任意视角观测地层、地层单层显示与组合显示等功能,在水源地勘察、地下水库选址、城市规划等地壳浅表的工程建设中,同样具有重要的利用价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 闫世骏,刘长礼.城市地面沉降研究现状与展望[J].地学前沿,1996,3(1,2):93-98.
- [2] 段永侯.我国地面沉降研究现状与21世纪可持续发展[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):1-5.
- [3] 郑铎鑫,武强,应玉飞,等.中国沿海地区相对海平面上升的影响及地面沉降防治策略[J].科技通报,2001,17(6):51-55.
- [4] 徐翠云.江苏省地质灾害与防治探讨[J].地质灾害与环境保护,1998,9(3):45-48.
- [5] 张云.苏南地区地面沉降概述[J].地质灾害与环境保护,1999,10(3):66-71.
- [6] 陈锁忠,黄家柱,闫国年.江苏省锡山市西部地区地下水资源计算模型研究[J].地质科学,2002,37(1):96-103.
- [7] 丁致中,潘树仁,黄伟斌.常州市地面沉降的危害及控制[J].中国煤田地质,2001,13(2):53-54.
- [8] 伍洲云,余勤,张云.苏锡常地区地裂缝形成过程[J].水文地质工程地质,2003,(1):67-72.
- [9] 杨健,李智毅,陈庆寿.北京市平原区建设用地地面沉降评估—以北京市外二环京哈高速公路京密路段沉降区为例[J].地质与勘探,2003,39(1):86-90.
- [10] 胡建平,吴士良.苏锡常城市群地区地下水环境问题[J].水文地质工程地质,1998,(4):5-7.
- [11] The Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University. Groundwater Modeling System tutorials[M].2002.