

地面沉降多尺度三维可视化技术研究

朱琳^{1,2} 官辉力^{1,2} 林学钰^{1,2} 李小娟^{1,2} 任应超³ 荆灵玲^{1,2}

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 三维信息获取与处理教育部重点实验室, 北京 100048;

3. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要 整合多源数据, 即实测数据、矢量数据、数值模型数据、遥感数据, 在三个不同空间尺度上, 即区域尺度、中尺度和微观尺度, 实现地面沉降发生过程的三维可视化表达, 其中微观尺度的沉降模拟是写意表达, 而区域尺度和中尺度下的沉降模拟则是采用三维体视化表达方式; 并针对不同空间尺度, 分别给出建立相应尺度地面沉降模拟模型的方法以及数据结构. 同时, 以地面沉降最为严重的苏州—无锡—常州地区为例, 进行多尺度地面沉降动态过程三维可视化表达应用, 建立的模型能够使研究者以交互的方式在三维空间上迅速、全面地掌握地面沉降发生过程, 进而为地面沉降研究提供一个全新的可视化操作平台.

关键词 多尺度 可视化 地面沉降

空间信息的多尺度可视化是当前地理信息科学研究的热点问题, 将不同种类的数据信息输入到计算机里, 实现整合并进行多尺度表达, 用形象直观的图像加深研究者对空间信息数据含义的理解, 让研究者在三维空间环境中掌握地理环境过程. 目前, 通常利用虚拟现实建模语言(virtual reality modeling language, VRML)、虚拟现实系统的专用软件开发工具包(如 world toolKit, WTK)、基于 OpenGL 的自主开发等方式实现信息的可视化. 国外在可视化技术方面取得的最新研究成果主要包括体数据的实时动态显示、商品化的具有力反馈的三维交互设备、MERL 体数据实时动态显示系统等方面^[1]. 在地学领域中, Thurmond 等^[2]利用 VRML 虚拟现实建模语言, 结合摄影和显微镜摄影, 实现新墨西哥东南部碳酸盐露头的多尺度表达; Zhu 等^[3]利用 GeoStar 结合建筑表现几何形态、地形数据、建筑纹理、影像数据等矢量和栅格数据, 实现虚拟城市的表达; Martin Ross^[4]建立了三维地质框架模型(3D Geologic Framework Model, GFM), 用来增强对全区含水层的理解程度; Aki Artimo^[5]

运用 Earth Vision 地质模型软件建立了芬兰西南部的 Virttaankangas 含水层的三维地质模型. 在国内, 颜武强^[6]利用地下水位 DEM 曲面实现地下水降落漏斗、流场、流向的可视化表达. 此外, 一些学者针对多尺度空间数据索引方法^[7]、LOD(level of details)技术^[8]等方面做了研究. 可以看出, 目前在地学领域中主要针对地形、城市建筑、静态地质现象、数据信息等方面进行多尺度表达研究, 将地学现象的演化过程、复杂的空间数据以及抽象的属性数据以生动、快速的方式描述出来, 从而便于研究者进行数据分析, 挖掘数据之间的内在联系.

地面沉降是一种缓慢变化的动态过程, 伴生环境地质灾害地裂缝, 加剧了地面沉降的危害, 为了有效进行地面沉降防治工作, 许多工作者开展了关于地面沉降机理研究、监测、防治等方面的系列工作. 已有的研究成果通常以二维平面图或表、2.5 维空间数据形式进行表达, 难以在三维空间中反映地面沉降灾害在空间上的分布特征, 更不能满足人们对大量的地面沉降数据进行快速的查询、分析要求. 目前, 针对地面沉降可视化的问题, 已经展开

2009-05-20 收稿, 2009-07-22 收修稿

* E-mail: hi-zhulin@163.com

了一些研究工作。王福刚等^[9]在GMS平台上建立了苏锡常地区地面沉降第四系地层三维可视化模型；杨朝辉^[10]利用IDL语言将地面沉降数据以等沉降线图、三维立体曲面图等形式进行表达；朱琳等^[11]将虚拟现实技术应用到苏锡常地区地面沉降中，利用Visual C++结合OpenGL，实现对地面沉降的形成环境、演化过程进行真三维仿真。然而，地面沉降是一个复杂的动态过程，在进行三维可视化表达时，需要从多个尺度表达地面沉降过程，才能便于研究者全面感知、认识和理解该地质过程。本论文基于多源数据，针对不同应用目的，建立区域尺度、中尺度和微观尺度的地面沉降三维可视化模拟模型，为地面沉降研究提供一种科学、便捷的可视化工具。

1 数据准备

数字高程模型数据 (Digital Elevation Model, DEM): 比例尺为1:5万的数字高程模型，反映地形信息。本次研究为了在OpenGL环境中，方便、快捷地读写模型数据，以文本存储的形式，记录该模型左下角的地理坐标、行列数、格网边的长度以及按照行列顺序排列的高程值。

地层数据: 记录了含水层组的地层分层信息。地层数据记录了反映每个地层形态的一系列空间离散点坐标(X, Y, Z)以及相应的地层属性(岩性描述)，便于研究者在三维空间中观察模拟模型时，进行地层信息的查询。

地层缺失边界数据: 属于矢量数据，记录了各地层的缺失边界，由一系列离散点组成。该边界与地面沉降数值模型中每个地层的缺失边界相同。

孔隙比数据: 孔隙比即孔隙的体积与土粒的体积之比。由于地层固结沉降，土层孔隙度不断减小，进而减少了地下含水层的储水空间，用于沉降模拟的微观表达。该数据记录了孔隙比以及粒度组成。

地面沉降数值模拟数据: 根据地面沉降数值模型模拟获得地面累计沉降量数据^[12]，某一时刻的地面累积沉降量数据记录了一系列点坐标(X, Y)以及相应的地面累积沉降量；此外数值模型还可以给出各地层的地层沉降量数据，对于每个地层记录了一系列空间点坐标(X, Y, Z)、地层沉降量、地层号以及记录沉降的时间。

地层纹理数据: 为了增强三维可视化的效果，并提高图像渲染速度，拍摄野外获取的钻孔岩芯，并对纹理图像进行预处理，获取指定格式和大小的图像。

遥感影像数据: 通过图像匹配、接边纠正及影像镶嵌等方法对研究区的遥感图像进行处理，得到地面纹理数据，通过纹理技术将该影像图绑定到DEM上。

由于涉及不同类型的数据源，可将数据坐标系统、高程系统、地图投影方式进行统一；对于图形数据则需经过处理得到符合OpenGL标准尺寸要求的纹理图像。此外，获取的多种数据分辨率也有所不同，需要根据不同的应用目的，将数据信息进行整合和可视化。其中DEM、遥感影像数据、地面累计沉降量数据用于区域大尺度(公里级)的地面沉降三维可视化表达；地层数据、地层缺失边界数据、纹理数据、各地层沉降数据用于中尺度(米级)地层沉降的三维表达；孔隙度则用于微观尺度(毫米级)的沉降写意表达。

2 模拟技术

地表形变模拟: 为了便于研究者对区域内地面沉降的发生发展过程有一个宏观的认识，利用数字高程模型数据，建立地形格网模型。基于该模型，利用地面累计沉降量数据，建立区域尺度的地面沉降模拟模型。具体步骤如下：

首先，由于地面沉降数值模型模拟出的地面累计沉降数据点的数量较多，某一时间切片上的地面累计沉降量数据点可达6310个。直接利用某一时刻的原始地面累计沉降数据点构建三角网(A)；

然后，对DEM中的网格节点(B_i)进行遍历，判断 B_i 位于 A 的哪个三角形中，在确定三角形 A_i 后，再依据 A_i 中已知沉降量的三个顶点，进行线性插值求出 B_i 点的沉降量。

最后，利用DEM格网结点的高程值减去计算出的累计沉降量，得到沉降后的DEM。

按照上述过程，对多个时刻的地面累计沉降量数据进行处理，获得时间序列的地表形变模拟模型。此外，将建立的地表形变模拟模型存储于数据库，便于模型的读取和可视化，具体数据表结构见表1。

表1 地表形变模拟模型数据表结构

序号	字段名称	字段代码	字段类型
1	地表模型名称	modelname	text
2	沉降时间节点个数	strdate	int
3	沉降后的地表模型中格网节点的高程数据流信息	zsubdata	image
4	沉降后的地表模型中格网节点的累计沉降量数据	acusubdata	image

形变后的地层模拟：本文针对地层分布呈层状的情况进行讨论，利用地层数据，结合研究区边界以及所有地层的缺失边界，采用“一次构 TIN，分层处理”的方法，从基岩开始由下向上依次建立地层模型，具体过程可参照文献 [13, 14]。由于构成每个地层的三角网个数、三角网节点数目均相同，每个网点顶、底板高程值不同。从基岩开始由下向上依次处理每个地层模型的三角网点(见图 1)，将下部地层的上顶板高程值与当前地层的下底板高程值相等，以保证沉降后不同地层之间不会出现“悬空”现象，确保模拟形变的地层连续。按照上述方法模拟一系列时刻形变后的地层模型，若相邻两个时刻的时间间距过大，可能会在虚拟过程中造成地层形变出现“跳跃”现象，在没有数据可以补充的情况下，可通过对两个时段间的地层沉降数据进行插值。由于地层沉降现象发生比较缓慢，相邻较近的两个时段内数值变化不会相差很大，则选用线性插值求出两时段间的地层沉降量。

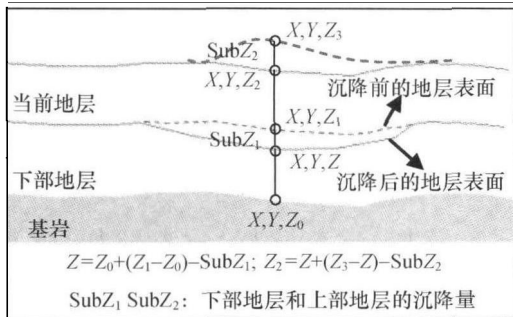


图1 当前地层顶板三角网点高程值计算方法示意图

利用已经建立的、某一时刻的地层，根据时间关系将形变后的地层模型按照时间顺序组织成一个序列，通过计时器控制这些形变后的地层按时间序列逐个显示，从而虚拟表达出某时段内的地层形变的动态过程。

中尺度地层沉降虚拟模型是建立在水文地质结构模型基础上，在存储模型时，应该将二者统一起来。在存储地层沉降模型，利用相同的字段，建立水文地质结构模型和地层沉降模型间的链接关系。

微观：本次以写意的方式刻画土体孔隙比降低的动态过程，即该过程不能真实地代表土体在一定压力作用下的压缩过程。首先，根据获取土样的物理参数(主要是孔隙比 e 、土体颗粒组成及粒径大小)，在给定体积大小的土体内(单位 mm^3)，采用体视化方式刻画不同粒径大小的土体颗粒(给定体积 V ，不同粒径大小的土体颗粒个数由获取的土样物理参数计算获得)，在三维空间上将土体的初始状态进行表达。然后，假设土体仅发生垂直方向上的形变，土体孔隙比降低，重新排列土颗粒的空间位置，进而刻画出土体形变的动态过程。由于微观尺度的沉降模拟模型是一种写意表达，数据量较小，可以进行实时建立。

3 可视化技术

对于区域尺度的地表形变模拟模型，利用旋转矩阵、缩放因子等改变模型的视图矩阵，对目标物体进行旋转、缩放、平移等操作，实现对目标物体的全方位、多角度的观察。对于建立的中尺度地层沉降模拟模型，研究者可以利用“巷道漫游”的方式进入地层内部进行观察，此时，通过定义视景体或裁切面(裁剪平面由方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 确定)，位于视景体或裁切面以外的部分都会被剪掉，从而提高视角范围内场景的实时更新速度。

纹理映射技术是模拟自然景物表面细节的一种有效方法。将获取的二维颜色纹理，映射到几何模型的三维表面上，模拟空间物体的表面细节。由于进行地层沉降三维可视化需要用到多个纹理，在进行地层沉降过程渲染前必须加载纹理，这样会使程序变慢。本次利用纹理对象技术，每个纹理对应一个整数(即纹理的 ID 号)，在进行纹理映射时，直接利用 OpenGL 中 `glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, TexId)` 创建纹理，进而提高图像渲染速度。

4 试验应用

苏州—无锡—常州位于长江三角洲腹地，是我国地面沉降最为严重的地区^[15]。本次以苏锡常地区为

例,展示区域尺度、中尺度和微观尺度的地面沉降动态过程,便于研究者清晰了解地面沉降的发生过程。

苏锡常地区位于东经 $119^{\circ}39'$ 至 $121^{\circ}23'$, 北纬 $30^{\circ}45'$ 至 $32^{\circ}05'$, 行政区划上隶属于常州、无锡、苏州三中心城市, 简称“苏锡常地区”, 总面积约为 16000 km^2 。苏锡常地区以冲积平原区为主, 水文地质结构为层状实体, 形态相对简单且地层分布也比较连续。第四系地层广泛发育, 沉积物厚度 $150\text{--}260 \text{ m}$, 主要为砂与粘土交替出现, 具有明显韵律变化的疏松碎屑沉积。地层由老至新可分为: 下更新统(Q1)、中更新统(Q2)、上更新统(Q3)和全新统(Q4)地层。

区域尺度: 为了从区域尺度上了解研究区地面沉降的发生过程, 可以按照时间顺序依次从数据库中读取已建立的地表形变模拟模型数据。在渲染地表形变的动态过程中, 利用 TM 遥感图像进行纹理绑定。研究者可以从任意角度和方位观察地表形变过程。图 2(a)和图 2(b)分别给出 1996 年第一季度的沉降后的地面模拟模型和 2006 年第四季度的模型, 遥感片上粉红色的区域代表城市, 黑色的区域代表水体, 青绿色的区域代表农田、森林。从图中可以看到三中心城市发生了较为严重的地面沉降。

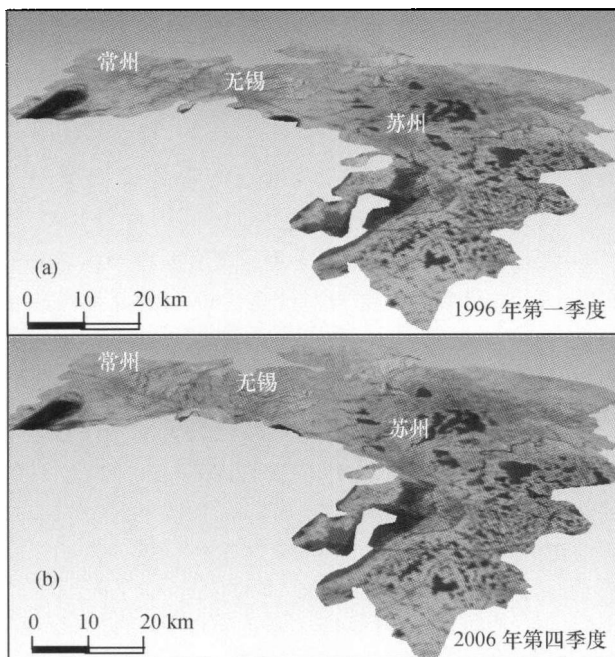


图 2 区域尺度的地面沉降模拟

(a) 1996 年第一年度沉降后模型; (b) 2006 年第四季度沉降后模型

中尺度: 苏锡常地区由于弱透水层和含水砂层共同压缩而产生地面沉降, 利用中尺度的地层沉降虚拟表达模型, 可以直观掌握每个地层的沉降过程。由于地层沉降数值相对于整个地层的厚度来说较小, 可以通过夸大的方式进行表达。图 3 给出以巷道漫游的方式进入无锡西部地区前洲镇周边的地层内部, 观察四个剖面(左、右、前、上)的地层沉降过程。图中地层由下至上分别为: 基岩、下更新统粘性土层、中更新统砂层、中更新统粘性土层、上更新统粘性土层和全新统地层。在该过程中, 采用纹理映射技术将处理后的钻孔岩芯纹理绑定到地层表面, 增强表达的真实性。图 4 是在地层外部观看地面沉降的动态过程截图。

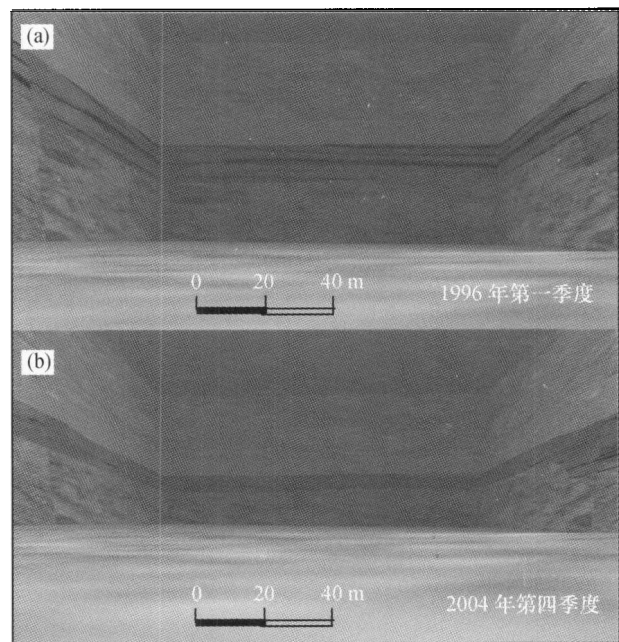


图 3 中尺度的地层沉降模拟 (地层内部)

(a) 1996 年第一年度地层沉降模拟;

(b) 2004 年第四季度地层沉降模拟

微观尺度: 依据南京师范大学采集的第 II 承压含水层在 $75.00\text{--}83.90 \text{ m}$ 深度区间的土样, 基于土样的部分物理力学性质指标(表 2)实现微观尺度的土层形变可视化。由于粒径在 $0.05\text{--}0.01$ 和 <0.01 范围的土体颗粒仅占 1.3% , 本次在进行三维表达时, 没有将这部分颗粒进行表达。此外, 为了便于三维可视化表达, 将 $0.5\text{--}0.25$, $0.25\text{--}0.075$ 以及 $0.075\text{--}0.05$ 区间内的土体颗粒直径分别用 0.3 ,

表2 试验土样的物理力学性质指标^{a)}

容重/ kN·m ⁻³	含水量/ %	孔隙比	压缩系数/ MPa ⁻¹	粒度组成(%) (粒径单位/mm)				
				0.5—0.25	0.25—0.075	0.075—0.05	0.05—0.01	<0.01
19.03	24.0	0.724	0.078	18.0	74.3	5.1	1.3	1.3

a) 引自文献[12]

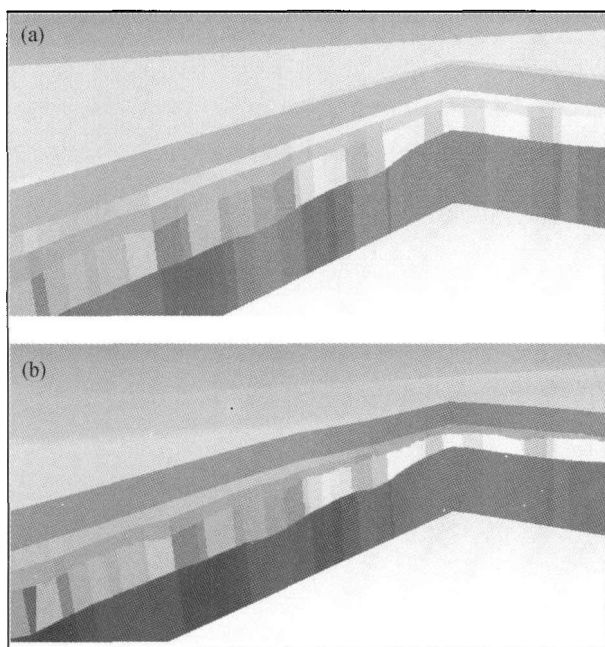


图4 中尺度的地层沉降模拟 (地层外部)

(a) 1996年水文地质结构模型; (b) 2004年水文地质结构模型

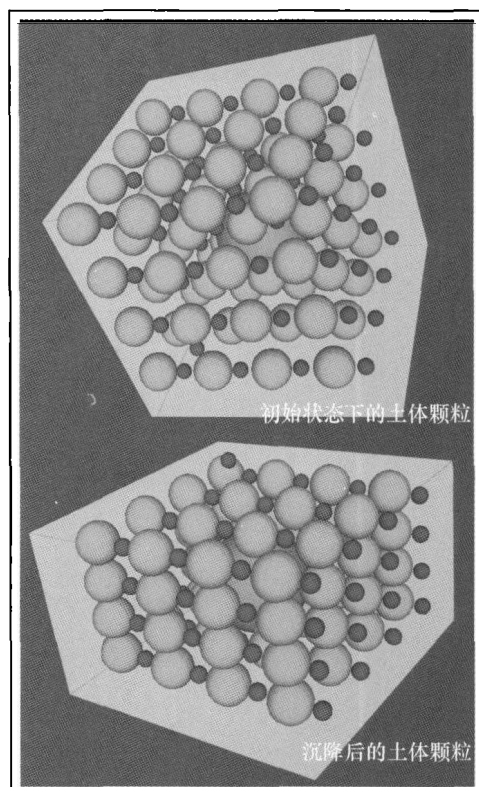


图5 微观尺度的地层沉降模拟

0.15和0.06mm进行写意表达. 研究者可以从多个角度和方位观察微观尺度下土颗粒的压缩过程(图5).

5 结论

本文基于数值模型模拟地面沉降量数据,建立了区域尺度(公里级)、中尺度(米级)以及微观尺度(毫米级)的地面沉降三维可视化模拟模型. 利用区域尺度的地表形变模型,研究者可以直观地了解大尺度上地面沉降的分布情况以及变化过程;基于中尺度的地层沉降模拟模型,则能够掌握每个地层的沉降过程;而微观尺度下,则可以清晰地观察土体颗粒压缩的过程. 多尺度的地面沉降三维可视化表达能够为不同研究目的的研究者提供一个直观的依据.

展望以后的工作对以下两个方面尚须深入的研究: (1) 时间尺度是研究地面沉降的一个重要因子,在今后的工作中可以探讨不同时间尺度上实现地面沉降的三维表达技术; (2) 探讨增强虚拟对象逼真表达效果的技术与方法.

参 考 文 献

- 1 清华大学计算机软件研究所可视化技术与图形学实验室, http://vis.cs.tsinghua.edu.cn/visual_technology.htm
- 2 Thurmond JB, Drzewiecki PA, Xu XM. Building simple multi-scale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language(VRML). Computers & Geosciences, 2005; 913-919
- 3 Zhu Q, Li DR, Gong JY, et al. The integrated spatial databases

- of Geostar. *Geo-Spatial Information Science*, 3(4): 20—23
- 4 Martin Ross, Michel Parent, Rene Lefebvre. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: A case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13 (5—6): 690—707
- 5 Aki Artimo, Joni Mäkinen, Richard CB, et al. Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer, southwestern Finland. *Hydrogeology Journal*, 2003, 13 (3): 378—386
- 6 颜辉武, 马晨燕, 费立凡. 地下水流场的三维数值模拟及可视化研究. *中国图像图形学报*, 2004, 9(12): 1490—1495
- 7 赵芳芳, 张 军. 多尺度空间数据索引方法研究. *测绘工程*, 2008, 17(2): 26—29
- 8 曹 敏, 杨长兴, 杨 炼. 大规模地形漫游中动态 LOD 算法研究. *计算机技术与发展*, 2008, 18(10): 187—193
- 9 王福刚, 梁秀娟, 于 军. 可视化地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用. *岩土工程学报*, 2005, 27(2): 219—223
- 10 杨朝辉, 苏 群. IDL 语言在地面沉降可视化研究中的应用. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2005, 18(1): 52—56
- 11 朱 琳, 苏小四, 段福州, 等. 苏锡常地区地面沉降的虚拟表现. *自然灾害学报*, 2007, 16(1): 136—140
- 12 南京大学, “苏锡常地区地面沉降模型研究”子专题研究报告, 2006
- 13 朱 琳, 段福州, 苏小四, 等. 苏锡常地区含水层结构和地下水位的虚拟表达. *水文地质工程地质*, 2007, 2: 63—66
- 14 朱 琳, 苏小四, 段福州, 等. 含水层结构和地下水形态的虚拟模拟. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(2): 400—405
- 15 薛禹群, 张 云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 585—593