

地下水变化的空间技术监测和预测

叶叔华, 黄 斌

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘 要 针对地下水变化的监测和预测的现状,提出了空间对地观测技术(InSAR、GPS 和卫星重力技术)监测地下水变化的新手段,分析了其在监测和预测地下水变化的应用中需要解决的几个关键科学问题,同时建议我国应抓住机遇,尽早启动有关部门开展该领域的跨专业的研究.

关键词 地下水变化,空间技术,监测,预测

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)04-1030-05

Space technique monitoring and prediction of ground water changes

YE Shu-hua, HUANG Cheng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract In view of existing situation of monitoring and predicting of groundwater changes a new method is presented that the groundwater changes are monitored by space-based observation techniques, such as InSAR, GPS and satellite gravity technique. Several scientific issues needed to be resolved in monitoring and predicting process by space technique are analyzed. Finally, some suggestions are presented.

Keywords groundwater change, space technique, monitoring, prediction

0 引 言

我国人均占有的水资源量仅为世界平均水平的 1/4,是全球 13 个严重缺水的国家之一.随着我国经济的发展,对地下水的需求也急剧增长,目前我国每年开采的地下水总量超过 1000 亿立方米^[1].过量开采地下水引起的地面沉降和生态环境恶化,对人们的生产、生活会造成巨大的危害,而且极大地影响和制约着当地国民经济的可持续发展.建国以来,我国因地下水开采等引起的地面沉降造成的损失累计已达 4500~5000 亿元.但合理地开采地下水不仅可以有效地缓解供水不足的问题,带来一系列生态与经济效益,而且通过适当降低地下水位,可有效防治土壤盐碱化,有利于提高防洪、排涝标准.因而合理规划和利用地下水资源是解决全国性的水资源短缺和抑制地面沉降等国家重大需求的问题.而为合理规划和利用地下水资源,必须对地下水变化进行监测

和预测.

1 地下水变化的监测和预测的现状

目前监测地下水变化主要使用传统的观测手段,如钻井观测和水准观测,它们除耗资大、占用劳动力多、精度较低外,而且空间分布相对过于稀疏.例如,在经济发达的上海地区,地下水观测井才 5 眼,地下水观测井之间的距离相差数公里到数十公里,其地理分布极不均匀,难以捕捉到含水层和地下水变化的空间细节,也无法做到不间断的实时监测.这些传统观测手段的局限性已成为进一步发展地下水文学研究、地下水资源管理和评价、水文及灾害预报的瓶颈.此外,为提供准确的预警预报,必须建立符合实际的地下水流—地面沉降模型,导致现有模型预测精度不高除了建模本身的问题外,主要原因之一是:缺乏高时空分辨率高精度的直接或间接监测手段.

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-06-20.

作者简介 叶叔华,女,广东顺德人,天文学家,中国科学院院士,1988 年曾当选国际天文联合会副主席,主要从事天体测量与天文地球动力学研究.(E-mail:hc@shao.ac.cn)

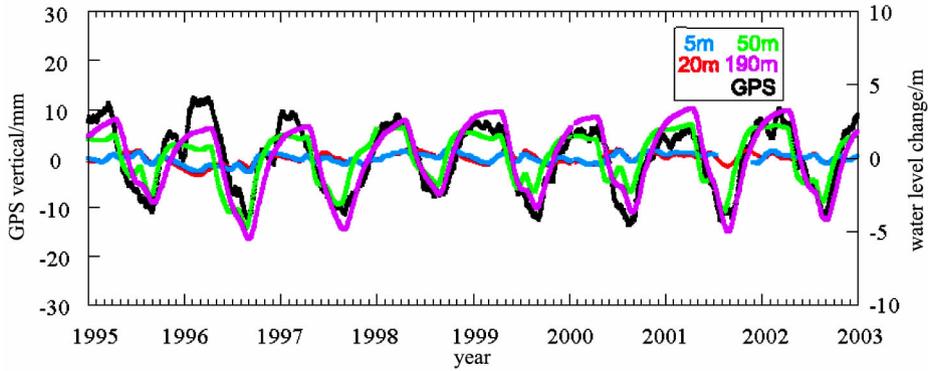


图 1 TSKB 站 GPS 测得的垂直运动与附近地下水观测井的水位变化比较
 Fig.1 Comparison between vertical motion measured by GPS station TSKB and change of groundwater level nearby observation wells

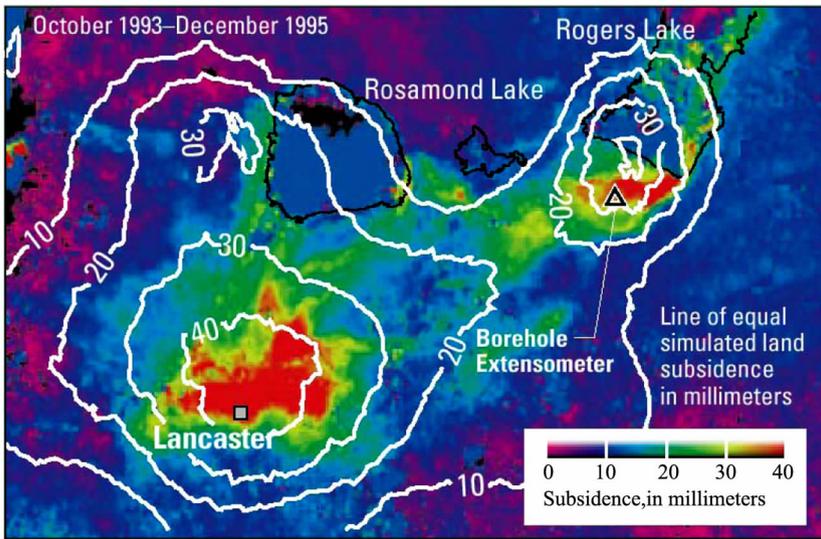


图 2 DInSAR 获取的加州 Antelope 峡谷地区的地面沉降与基于水文地质参数模拟的地面沉降比较
 Fig.2 Comparison between land subsidence of Antelope canyon district by DInSAR and that by hydro-geological parameter simulation

近十几年,一些新的空间对地观测技术(例如, InSAR、GPS 和卫星重力技术)的出现,由于具有全天候、高精度、空间覆盖范围广、系统长时间稳定度好以及分析处理资料快速及时等优点,为解决这一问题提供了新的手段。

GPS(全球卫星定位系统)精密定位技术具有时间分辨率高(1 天),水平监测精度高(mm 级),提供了探测由地下水运动产生的地表形变新途径。2004 年,日本学者 Munekane 研究日本 IGS 站 TSKB 垂直方向运动异常时,发现该站上 GPS 测得的垂直运动与该站附近的观测井的水位变化有很好

的统计相关性(图 1),从而首先揭示了地下水运动和含水层压缩是可以在 GPS 形变信号中反映出来的^[2]。虽然作者并没有开展更深一步的研究工作,但这为用 GPS 技术研究地下水的运动和含水层的物理特征和物理参数提供了重要依据。

合成孔径雷达干涉技术(InSAR)是一种使用微波探测地表目标的主动式遥感技术。InSAR 相对于其他测量方法而言,具有很高的空间分辨率(几米至几十米)及覆盖范围(每幅图像几千至一万平方公里)。用相位信息进行地表变形测绘,可以达到很高的精度(mm 级,理论上可以达到子波长级的精度)。1998 年,美国地质调查局的 Galloway 等首先提出

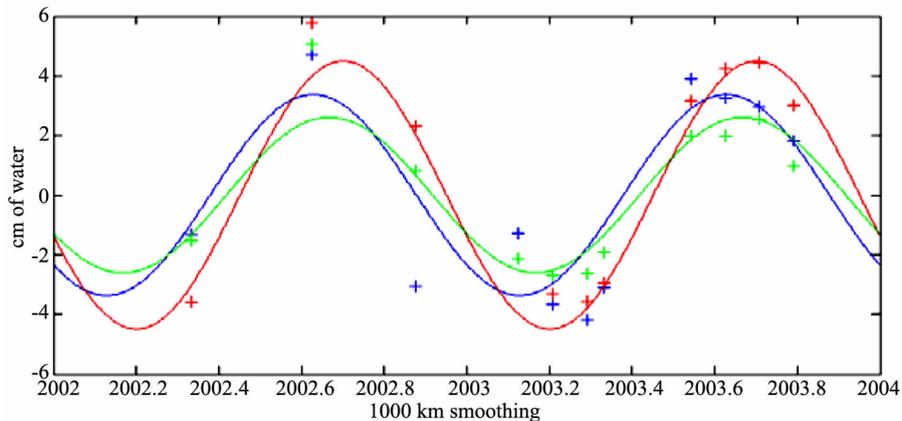


图3 长江流域地表地下水变化的周年信号比较

Fig. 3 Comparison of surface and ground water in Yangtze River basin

用差分干涉测量技术(DInSAR)监测含水层压缩和地面沉降问题. 用一对 ERS 影像, Galloway 发现 DInSAR 获取的加州 Antelope 峡谷地区的变形图和基于水文地质参数模拟的含水层压缩变形图吻合得相当好^[3](图 2). 图中彩色的底图为 DInSAR 获取的地面沉降图, 而白色的等高线为水文地质参数模拟的地面沉降, 二者在变形趋势上基本一致. Galloway 的这一研究首次证实了地下水活动引起的含水层压缩和地面沉降可以在高分辨率的 DInSAR 变形图上反映出来.

2003 年, Hoffmann 等^[4]用 DInSAR 技术、水准测量资料和水流模型模拟的地下水位估算了加州 Antelope 峡谷地区含水层高空间分辨率(1 英里 \times 1 英里)的非弹性骨架贮水系数和压缩时间常数. 以后, Hoffmann 又用这些高分辨率的参数来初步优化区域“地下水流和地面沉降模型”, 发现优化后的模型模拟的地面沉降不论是在量级上还是在空间范围上都比以前的模型大大接近实际的地面沉降场, 改善程度(地面沉降差异的平方和)达到 73%.

近年来发展起来的卫星重力测量技术, 如美国与德国合作的重力恢复与气候实验计划(GRACE)卫星, 由于采用星载 GPS 和非保守力加速度计等高精度定轨技术, 使重力场精度与时间分辨率大大提高, 这使地下水运动导致的地下水质量的重新分布有可能在时变重力信号中反映出来, 这为监测地下水的变化提供了又一个崭新的手段. 目前 GRACE 卫星资料处理的初步结果表明: 卫星重力测量已有能力对全球水循环提供大尺度的观测约束, 其时间分辨率为 30 天, 而空间分辨率可达到 400 公里左右. 在 500 公里空间尺度测量的地下水的精度达到

1 厘米等效水高. 我们利用 GRACE 重力卫星资料已初步检测到长江流域 1000 公里范围内, 地表地下水变化的周年信号^[5](图 3). 图中红线和红点是美国国家海洋大气局(NOAA)的 CPC(Climatic Prediction Center)的结果, 绿线和绿点是美国航空航天局(NASA)的 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)全球水模型的结果, 蓝线和蓝点是 GRACE 的结果. 由 GRACE 测得的地表地下水周年振幅和相位都与模型结果吻合.

国内外有关地下水流—地面沉降模型的研究进展相对比较缓慢^[6,7]. 早期上海地质工程勘察院与比利时合作开展地面沉降研究, 于 1989 年完成了我国第一个地面沉降模型. 1995 年地矿部水文地质工程地质研究所等在此基础上, 又提出“地下水水量—水位—沉降联合数学模型”^[8]. 上世纪末上海市地质调查研究院李勤奋等^[9]完成了第三个模型, 目前他们仍在继续研究如何考虑非线性变形的问题. 我国发生不同程度地面沉降的城市已达四十多个, 但进行过实际地下水流—地面沉降模拟的城市迄今仅上海和天津二个. 目前用于预警预报的地下水流—地面沉降模型, 不仅缺乏用于模型约束条件的高时空分辨率高精度的直接或间接观测资料, 而且由于其水流模型的准三维性、水流模型中的参数静态不变性、沉降模型的垂向一维性、水流模型和沉降模型的非完全耦合性, 与实际水文地质情况不符^[10], 无法满足日益增长的精确预警预报的需要及揭示地下水受人类活动、经济建设发展和地质条件影响的科学规律.

纵观上述地下水流—地面沉降模型现状中的问题和不足, 可以发现, 除了现实情况本身的复杂性和模型的理论研究存在一定的滞后外, 最重要的问题

是缺乏高精度高时空分辨率的地面沉降资料. 高精度高时空分辨率的 GPS, InSAR 和重力资料改进地下水流—地面沉降模型, 使其更加符合区域实际水文地质情况, 提高预警预报的精度. 一方面, GPS 和 InSAR 获取的地面形变资料, 辅以一定地面资料和理论模型, 可以估算部分含水层物理参数(如孔隙度、压缩时间常数等等), 这些估算的高时空分辨率的含水层物理参数可以取代以前以常数或分块常数形式出现的物理参数, 用于建立地下水流—地面沉降模型; 另一方面, GPS, InSAR 和重力资料可以作为地下水流—地面沉降模型的总体约束. 重力可以直接作为地下水流模型的约束, 即对一个区域, 重力的变化应该反映该区域流入和流出的地下水之差. GPS 和 InSAR 获得的是总地面沉降, 它是地下水流—地面沉降模型中各含水层和弱透水层沉降量的总和, 从而 GPS 和 InSAR 的形变测量结果可以作为地下水流—地面沉降模型的一个总体约束; 反过来, 地下水流—地面沉降模型的反馈结果又可检验 GPS, InSAR 和卫星重力测量的监测结果.

2 需解决的几个关键科学问题

利用 GPS, InSAR 和卫星重力测量等现代空间对地观测技术提供的观测资料, 并结合传统的水文地质观测资料, 形成对一个典型区域地下水变化的常规、一体化和准实时监测. 以空间对地观测技术提供的高精度、高时空分辨率的观测资料结合水文地质观测资料作为边界约束条件, 辅以地下水运动的地球物理理论模拟, 通过一定的地球物理反演过程, 以获取该区域地下含水层物质特征的详细信息, 并建立更可靠的地下水运动模型, 进而为精确预警预报服务. 但要完成这样的任务, 尚需解决以下几个关键科学问题:

(1) 提升空间观测技术(GPS、InSAR 和卫星重力技术)算法和资料分析手段, 提高其监测与地下水运动相关的质量迁移和地面沉降信号的精度、可靠性和敏感性的问题. 地下水运动产生的地表形变主要反映在垂直方向上. 理论模拟表明, 虽然对某些地下水运动比较活跃的地区, 在长期和季节性时间尺度上的地表形变量级最大可达每年米级, 但是对大多数地区, 为了实现对地下水运动的实时监测, 要求单天垂直运动的测量精度达到 5 mm 或更小. 虽然 GPS 测定水平运动的精度已经达到亚厘米甚至毫米级的精度, 但由于 GPS 技术本身的特点, GPS 技术测定垂直运动的精度要比水平运动的测量精度低

2~5 倍, 一般为 10 mm 或更大. 从目前的 GPS 垂直运动精度提高到 5 mm 或更小需要模型改正和数据处理技术上的巨大飞跃^[11]. 最新的研究表明, 通过一定的手段扣除一个区域内的 GPS 精密定位的共同误差, 垂直运动的测量精度可以明显提高. 对 InSAR 而言, 基于永久散射体的干涉测量技术^{[12][13]}(PSInSAR)和角反射器干涉技术^{[14][15]}(CRInSAR)在一定程度上解决了 InSAR 时间和空间失相关的问题, 然而它们也使 InSAR 以“面”为基础的测量变为以“点”为基础的测量, 减小了其空间分辨率. 如何将它们与 DInSAR 一起综合建模, 使其精度稳定可靠地达到理论的 3 mm 但又不减低其空间分辨率? 目前 InSAR 监测地表变形基本上在一维(即视线方向)上, 这影响了测定精度, 如何实现 InSAR 检测三维/三维形变? 为了充分利用卫星时变重力场提取水储量变化信号, 目前迫切需要解决如何提高时变重力场的空间分辨率问题.

(2) 分离空间技术观测得到的与地下水运动相关的地面沉降和质量迁移信号和其他信号(如构造运动信号等)的问题. 由于空间技术测量得到的地表形变信号包括了多种地球物理过程的贡献, 地下水运动监测和含水层物理特征研究要求把地下水运动产生的地表形变信号和其它形变信号分离开. 这就要求首先对地壳构造运动以及大气、海洋、地表水引起的地表形变作深入的研究, 并采用一定的方法从总的信息中予以扣除.

(3) 空间技术观测得到的与地下水运动相关的地面沉降和质量迁移资料以及地面观测资料的同化和融合问题. GPS, InSAR 和卫星重力技术在监测形变方面是互有优缺点的: GPS 的时间分辨率高, 但是空间分辨率相对较低; InSAR 的空间分辨率高, 但是时间分辨率相对较低; InSAR 是一种一维相对观测, GPS 可以看作是一种三维绝对观测; InSAR 技术和 GPS 技术结合, 并辅以一定理论(如 Bayes 统计理论和 Markov 随机场理论), 可以研究高分辨率的三维地表形变场. 卫星重力技术则可以提供大范围的质量迁移信息, 对 GPS 和 InSAR 的地下水运动监测结果提供较大尺度的背景和约束. 如何将这三种空间测量技术加以融合, 以及将它们与传统水文测量和地面重力观测结果加以融合, 是目前尚待解决的重要问题.

(4) 基于空间技术观测资料和地面观测资料同化的区域地下水流—地面沉降建模和预测问题. 地下水流—地面沉降模型本身的理论突破问题: 三维

变系数水流模型的建立和约束问题;水流模型和沉降模型要真正耦合问题;地下水流—地面沉降模型的数值解法问题等。

3 结 语

地下水变化的监测和预测是一项长期任务,也是难点。由于空间技术的发展,该研究的领域正成为当前世界各国空间技术和水文领域科学家关心的热点和研究前沿。例如,2004年欧洲地球物理年会(EGU)就有一个主题分会“Continental hydrology observed with GPS inversions, GRACE gravity and microwave remote sensing”交流这方面的进展。2005年美国春季地球物理年会(AGU)则开辟一个专门的主题分会“Hydrology from space: Applications of Space Geodesy to problems in surface and subsurface water flow and storage”进一步探讨了空间大地测量技术在这方面的应用的可行性及前景。近年来,虽然已经有一些用空间对地观测技术研究地下水运动的成功范例发表在科学杂志上,但是它们还局限于零星的地表形变较显著的地区。从整体看,把空间观测和地面资料以及地球物理模型相整合,形成常规的、一体化的、准实时的监测地下水运动的系统工程,国际上还处于筹划、探讨和试验阶段。如果我们能及时开展这方面的研究,将是我国在这个科研领域与国际最前沿研究接轨的好契机。我国应及早开展这方面的研究,这不仅对提高我国在该领域的国际学术地位有好处,而且对我国的国民经济持续发展、合理利用水资源、预防我国地下水开采引起的广泛地面沉降等都有好处。2006年9月在北京召开的“第五届世界水大会”上,建设部副部长仇保兴指出,未来30年将是中国城市供水最艰难时期,因而利用空间技术监测地面和地下水储量的变化,合理利用水资源就显得特别重要和迫切。

作为一个多学科交叉的前沿研究,地下水变化的监测和预测涉及到空间大地测量学、水文地质学、地下水流体力学、岩土力学和地球物理等多学科。通过研究,相关的研究手段和研究结果能够推广到对其它种类的地下流体,特别是与能源资源密切相关的石油、天然气等的监测和建模。开展这方面研究不仅在提高这些空间观测技术监测精度、优化地下水流和含水层物理模型作出贡献,而且也将为决策部门提供有关环境调查、灾害评估、水利规划和水资源管理方面的第一手观测资料;对定量地认识和预防

地质灾害的发生、合理有效地开发利用地下水、定量评估地下水运动对人类生存环境的潜在性和持久性的影响有重要的现实意义和示范作用。

参 考 文 献 (References):

- [1] 程娟,孙淑云,聂建平,周林菲. 中国地下水资源的开发利用和保护[J]. 水利水电技术, 2003, 34(5): 1~3.
- [2] Munekane H, Tobita M, Takashima K. Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158, 2004.
- [3] Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, Phillips S P, *et al.* Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar[J]. *Antelope Valley, Mojave Desert, California, Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2573~2585.
- [4] Hoffmann J, Galloway D L, Zebker H A. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations [J]. *Antelope Valley, California, Water Resources Research*, 2003, 39(2): 1031.
- [5] Hu X G, Chen J L, Zhou Y H, Huang C, Liao X H. Seasonal water storage change of the Yangtze River basin detected by GRACE[J]. *Science in China, Series D*, 2006, 49(5): 483~491.
- [6] 第四届地面沉降国际讨论会论文集(中译文选集“地面沉降”,地质出版社,1993),美国休斯顿,1991.
- [7] Land Subsidence. Proceedings of the Seven International Symposium on Land Subsidence[M]. Vol. I, Vol. II, Edited by Zhang Agen *et al.*, Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005.
- [8] 朱锡冰,伍磊,奚建国,等. 上海浦东新区“地下水水量—水位—沉降联合数学模型”应用[J]. 1995.
- [9] 李勤奋,方正,王寒梅. 上海市地下水可开采量模型计算及预测[J]. 上海地质, 2000.
- [10] 薛禹群,张云,叶淑君,李勤奋. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 585.
- [11] Dong D, Fang P, Bock Y, Cheng M, Miyazaki S. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B4): 1~16.
- [12] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202~2212.
- [13] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatters in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8~20.
- [14] Xia Y, Kaufmann H, Guo X F. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1167~1172.
- [15] Savio G, Ferretti A, Novali F, Musazzi S, Prati C, Rocca F. PSInSAR validation by means of a blind experiments using dihedral reflectors, Fringe 2005 workshop[J]. 28 November-2 December, Frascati, Italy, 2006, 1~6.