

· 研究进展 ·

京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律

官辉力^{1,2,3*} 李小娟^{1,2,3} 潘云^{1,2,3} 朱琳^{1,2,3}
 张有全^{1,2,3} 陈蜜^{1,2,3} 陈蓓蓓^{1,2,3} 柯樱海^{1,2,3}
 王彦兵^{1,2,3} 高明亮^{1,2,3} 黄志勇^{1,2,3} 李勇永^{1,2,3}

- (1. 首都师范大学 水资源安全北京实验室,北京 100048;
 2. 首都师范大学 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048;
 3. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048)

[摘要] 区域地面沉降是威胁京津冀城市群安全的重大灾害隐患。结合 GRACE、InSAR 等遥感新技术,通过与水文地质学科的交叉研究,初步揭示了京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律,为实现区域地面沉降综合调控,促进区域可持续发展提供科学依据。

[关键词] GRACE;InSAR;地下水;地面沉降;多元场

京津冀地区以不足全国 1% 的水资源维持了约 8% 的人口、10% 的经济总量、10% 的粮食产量。约 70% 的用水需求靠地下水支撑,每年开采量近 200 亿 m³,形成了世界上最大的地下水降落漏斗,面积达 7 万多 km²。地下水过量开采引发了严重的地面沉降。华北平原累积沉降大于 200 mm 的面积达 6.4 万 km²,北京最大的沉降速率达到 11 cm/yr^[1]。

区域地面沉降受到地下水开采、地表载荷、构造与含水层性质等多种因素的综合影响^[2-3],表现出强烈的区域特征。区域地面沉降科学调控需要综合考虑这些因素的耦合作用机制,实现区域整体防治。因此,需要准确获取区域地下水、地表形变等多元信息,并结合水文地质背景揭示其区域演化机制。

遥感以低成本、大范围、高效率的特点获取区域水文地质信息,是现代水文地质研究的重要方法。近些年迅速发展的卫星重力测量与微波遥感极大地丰富了获取的水文地质信息种类。特别是 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 和 InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) 技术,实现了对地下水储量变化、含水层压缩形变的直接观测,在区域地下水、地面沉降研究中表现出良好

的应用潜力^[2,4-8]。但是,受到卫星分辨率、单一传感器、多种影响因素等制约,京津冀地区地下水消耗规律以及区域地面沉降演化机制还有待进一步阐明。

1 华北平原地下水消耗空间差异

受到卫星高度的限制,通常认为 GRACE 只适用于 20 万 km² 以上区域,但实际的地下水资源管理却往往对应更小的尺度。那么,在低于 GRACE 初始分辨率时,GRACE 能否准确监测区域地下水储量变化呢?

Huang 等人利用 2003 年 1 月—2013 年 7 月的 CSR Level-2 Release 05 GRACE 数据,通过有限的实测地下水位数据和通报资料作为先验知识,对华北平原地下水储量变化进行正演模拟,并采用尺度因子对泄露误差进行纠正,反演山前平原(图 1, ~5.4 万 km²,主要分布浅层潜水含水层,用水来源主要靠开采潜水和中东部平原(~8.6 万 km²,主要分布承压含水层,用水来源主要靠开采深层承压水)的地下水储量变化^[9]。

收稿日期:2016-11-07;修回日期:2016-12-25

* 通信作者,Email: gonghl@263.net,pan@cnu.edu.cn

结果发现(图 2),在子区尺度上,利用 GRACE 数据得到地下水储量变化在趋势上能很好地与实测结果吻合,月时间序列之间相关性(R^2):山前平原和中东部平原分别为 0.65、0.60,十三点滑动平均后时间序列之间 R^2 分别为 0.91、0.75。2003—2013 年,山前平原区地下水储量消耗速率为 $46.5 \pm 6.8 \text{ mm/yr}$ ($2.5 \pm 0.4 \text{ km}^3/\text{yr}$),大于中东部平原的 $16.9 \pm 1.9 \text{ mm/yr}$ ($1.5 \pm 0.2 \text{ km}^3/\text{yr}$)。山前平原区地下水储量呈现出较强的恢复能力,即使在 2008—2011 年期间经历两次拉尼娜事件的极端干旱,仍能较快更新和恢复。

NASA JPL(Jet Propulsion Laboratory)最新的 Mascon(Mass Concentration)GRACE 数据显示,京津冀地区地下水储量表现出整体减少的趋势(图 3)。虽然北京、河北等地相继进行了地下水压采,但区域地下水仍处于超采状态^[12-14],与 GRACE 结果较一致。地下水消耗与区域地面沉降表现出一

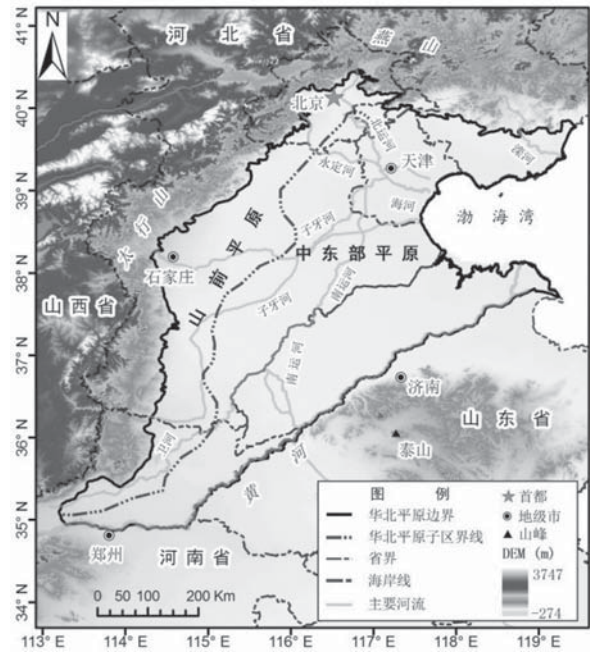


图 1 华北平原及其山前平原、中东部平原位置图

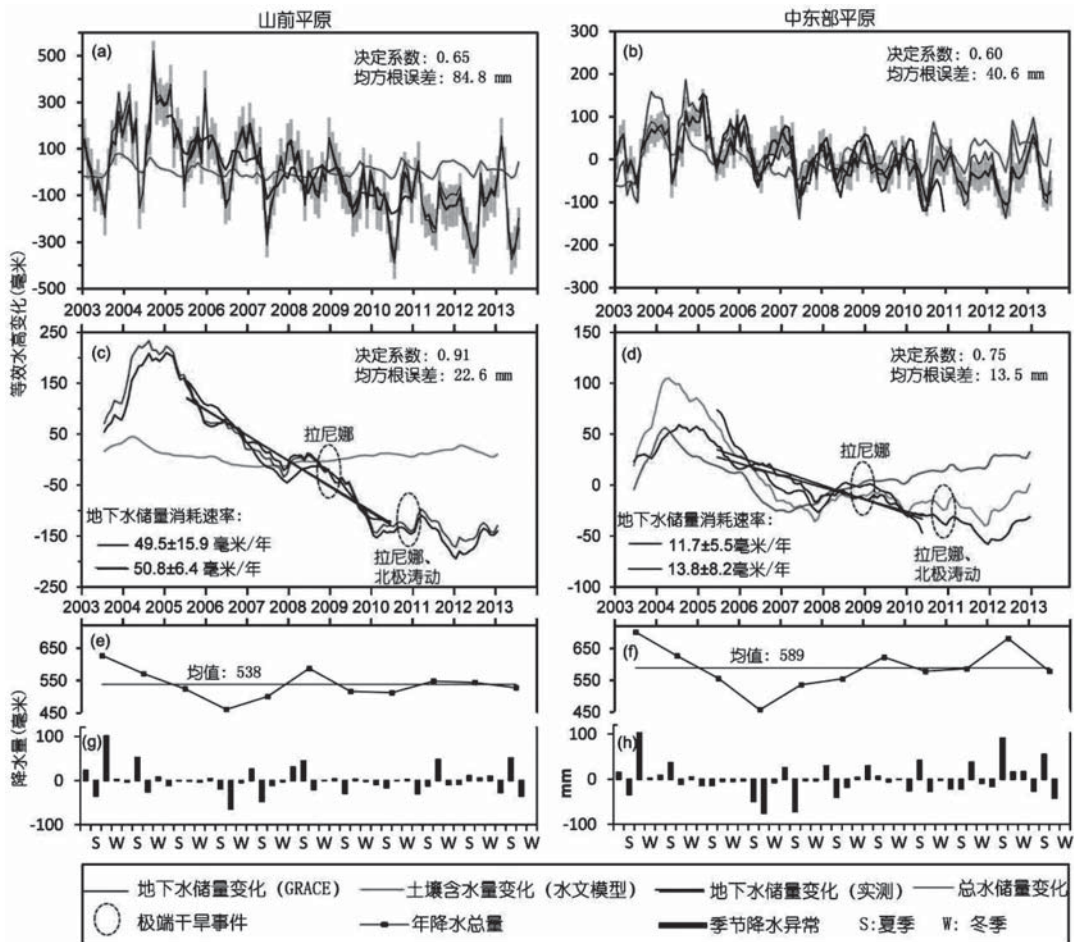


图 2 山前平原和中东部平原地下水储量变化 (GRACE: 红色, 实测: 黑色)、土壤含水量变化 (水文模型)、总陆地水储量变化 (GWS+SWS, 蓝色) 的月时间序列 (a, b) 和十三点滑动平均序列 (c, d), 以及降水量的年总量时间序列 (e, f) 和季节变化时间序列 (g, h)。(a) 和 (b) 中的浅红色条带表示 GRACE 反演误差, (c) 和 (d) 中的消耗速率对应的时间是 2005—2010 年。

定的空间相关性,在沉降严重的沧州、衡水、唐山等地区,地下水消耗速率也较大。但是,这种整体的区域相关性还受到局部的粘土层厚度、动静载荷等其他因素的影响^[10-11]。由于 GRACE 自身信号泄露等引起的误差,更小尺度的影响因素分析还需要借助 InSAR 等其他手段完成。

2 北京区域地面沉降演化特点

单一的 SAR 影像往往受到空间覆盖范围小、时间间隔长、波长单一的限制,难以捕捉复杂地表覆盖下的大都市不均匀地面沉降特征。

Chen 等人采用 41 景 Envisat ASAR 影像以及 14 景 TerraSAR-X 条带式影像,采用差分干涉测量短基线集时序分析方法反演了 2003—2011 年北京平原区地面沉降^[1]。结果发现北京平原区的年平均沉降速率最大达到 11 cm,主要的沉降漏斗(朝阳区)连成一片,朝阳东部是沉降严重区。选取的 10 000 个采样点的平均速率相关性为 0.92, RMSE 为 7.48 mm/yr,结果显示两种卫星结果具有很好的

相关性,表示了采用时序 InSAR 技术获取区域地面沉降速率结果的可靠性,同时验证了采用多平台 SAR 影像反演地面沉降结果的稳定性。

基于短基线集时序分析技术,可进一步分析由多平台 SAR 影像获取的地面沉降信息时空分布特征。北京市主要的沉降漏斗(即朝阳区)基本连成一片,朝阳东部咸宁侯—双桥是沉降严重区域。2003—2010 年间地面沉降量呈现逐年增大的趋势(图 4)。

3 区域地面沉降不均匀特征与原因

除了地下水开采,京津冀地区地面沉降还受到京津/沪高铁等动载荷、CBD 地表建筑等静载荷、构造与水文地质条件等背景环境的综合影响,以及应急水源地、地下水回灌、南水北调等特殊活动影响。

本研究团队在 InSAR 监测的基础上,有效结合 GIS 空间分析技术与水文地质理论方法,通过数据挖掘、大数据思想揭示多元场作用下的区域地面沉降机理。开展了地面沉降与地下水位、地质构造、可

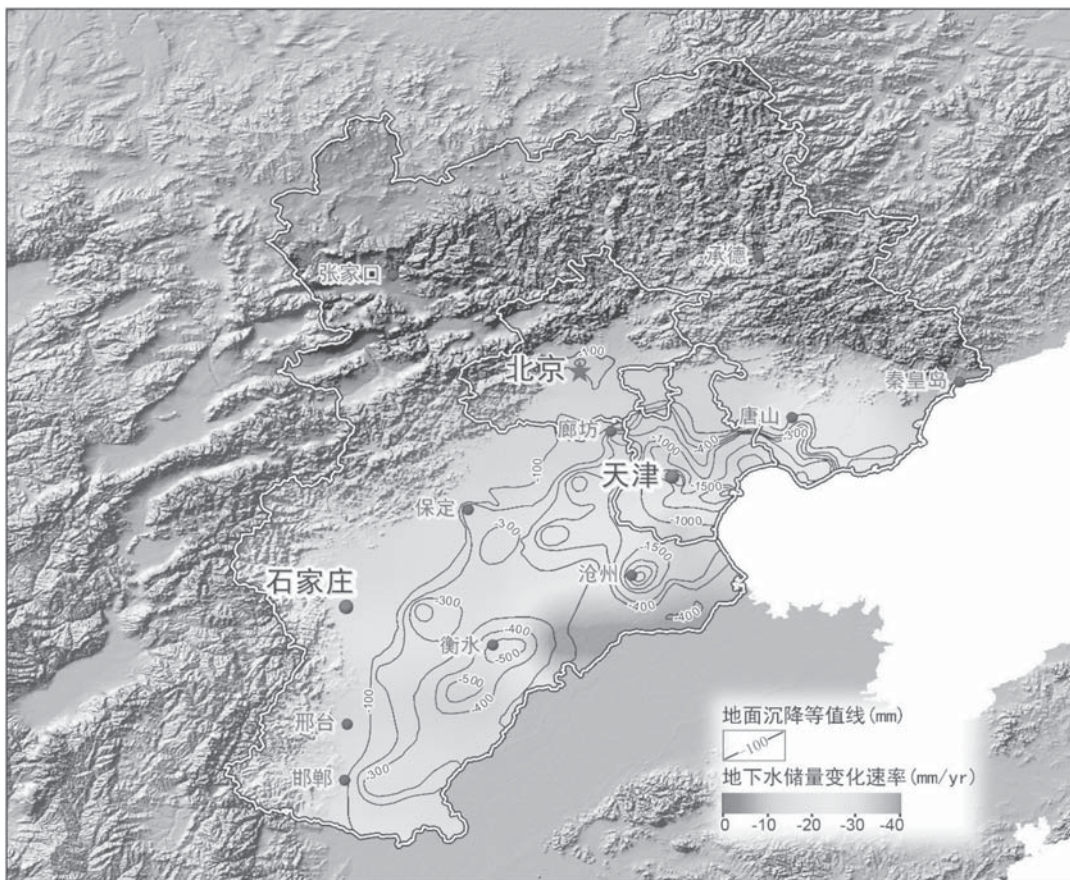


图 3 京津冀区域地下水消耗与地面沉降空间分布图。地下水消耗(2003—2015)通过 NASA JPL 最新的 Mascon GRACE 和 CLM 模型计算得到,地面沉降等值线指截止到 2003 年的累积沉降量。

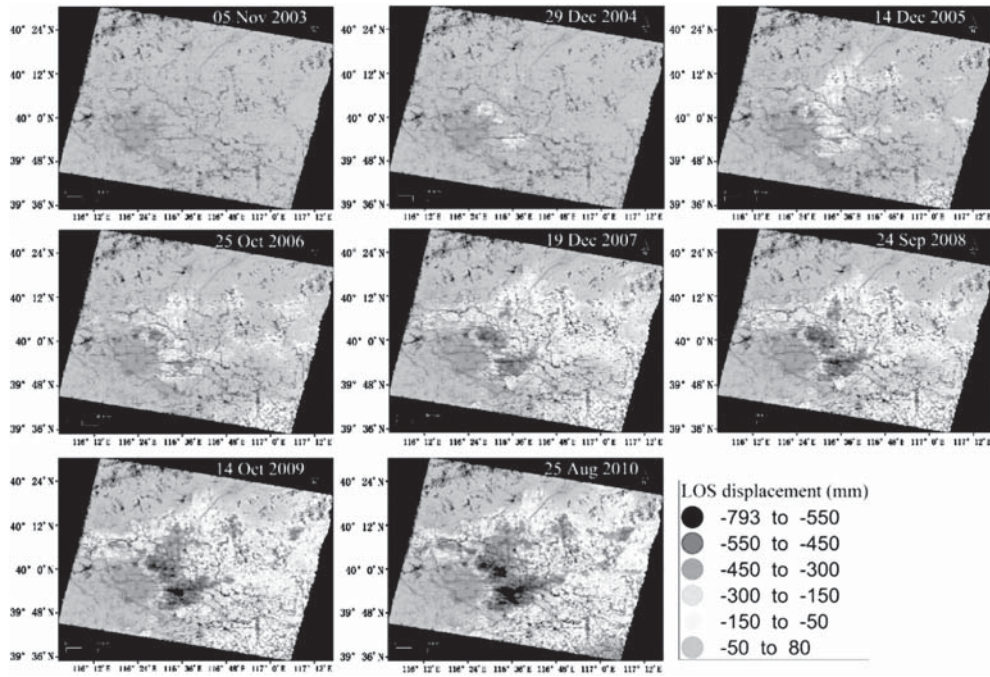


图 4 2003—2010 年北京市累积地面沉降量的时空演化过程

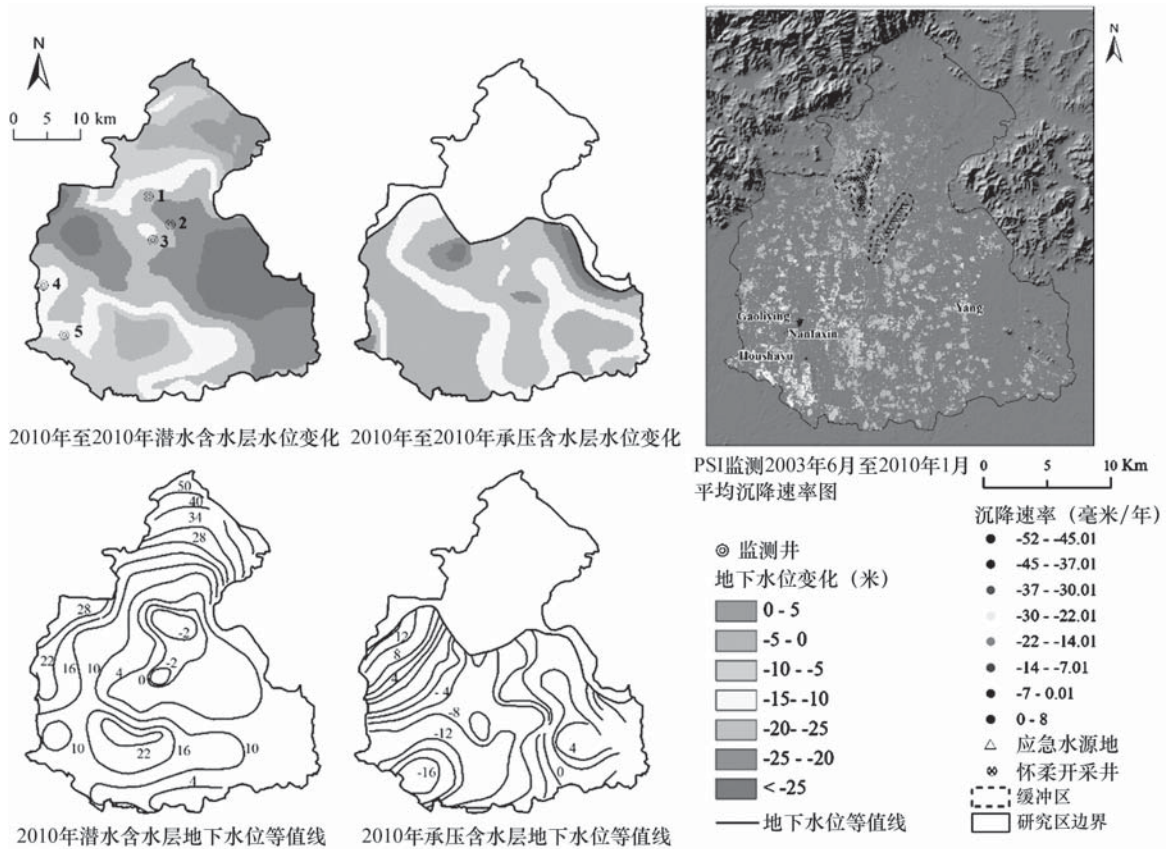


图 5 北京密怀顺地区地下水位与地面沉降空间分布

压缩层厚度以及地层岩性的空间分析,发现了北京平原区由北至南的不同的形变特征^[1]。结合传统光学遥感数据,揭示了不同浅表层空间(地铁、城市密集建筑群、立体交通网络设施)、土地利用模式的沉降差异性^[10,15]。阐明了区域静载荷差异与地面沉降响应关系,发现严重沉降区内的载荷密度与沉降的不均匀性存在较强正相关关系^[11]。发现首都国际机场区域最大沉降速率达到 6.6 cm/yr,但是与地下水位变化相关性不明显,受到多重因素的综合影响^[16]。

多源监测显示北京平原区地面沉降主要发生在深度分别为 64.5—82.3 m、102—117 m 的第二和第三弱透水层,约占整个沉降量的 39%^[17]。在怀柔应急地下水源地地区(图 5),长期超采地下水引发的地面沉降速率为 10 mm/yr,但由于该地区不均匀地面沉降主要由可压缩地层厚度控制,潮白河下游地区沉降更严重^[18]。

4 展 望

在南水北调中线通水、京津冀一体化背景下,区域地下水、地面沉降研究面临新的挑战。在调水、压采、回灌等人为干扰下,长期的地下水负均衡状态能否得到改善,地面沉降将如何响应,京津冀水资源安全如何保障等一系列问题需要多尺度、多学科、多方法综合研究。

随着 GRACE-Follow on 以及欧洲哨兵、我国高分三号等卫星的成功发射,GRACE 与 InSAR 可望联合进行高精度、高分辨率监测。届时,重力、微波、光学等多源遥感数据与地下水渗流模型、土体固结模型等通过 GIS、数据同化、数据挖掘等技术实现耦合模拟,构建由时变重力场、渗流场、应力场、形变场组成的地面沉降多元场分析预测模型,为实现南水北调、京津冀一体化背景下的区域地面沉降综合调控提供科学支撑。

致谢 本研究得到国家自然科学基金(项目批准号:41130744,41171335,41101033,41201420,41201376)和北京市自然科学基金(8101002,8082010,8152012,8162011,J160005)等资助。

参 考 文 献

- [1] Chen M, Tomás R, Li Z, et al. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sensing*, 2016, 8 (6): 10.3390/rs8060468.
- [2] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 卢学辉, 陈蓓蓓, 顾兆芹. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京市地面沉降研究. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1261-1266.
- [3] 潘云, 潘建刚, 宫辉力, 赵文吉. 天津市地下水开采与地面沉降关系研究. *地球与环境*, 2004, 32(2): 36-39.
- [4] 冉全, 潘云, 王一如, 陈琳海, 许海丽. GRACE 卫星数据在海河流域地下水年开采量估算中的应用. *水利水电科技进展*, 2013, 33(2): 42-46.
- [5] 杨雪, 宫辉力, 潘云. 基于 GRACE 重力卫星反演地表负荷形变及 GPS 验证研究. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(3): 156-158.
- [6] Castellazzi P, Martel R, Galloway DL, et al. Assessing groundwater depletion and dynamics using GRACE and InSAR: Potential and limitations. *Groundwater*, 2016.
- [7] Rodell M, Velicogna I, and Famiglietti JS. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-1002.
- [8] Galloway DL, Hoffmann J. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(1): 133-154.
- [9] Huang Z, Pan Y, Gong H, Yeh PJF, Li X, Zhou D, Zhao W. Subregional-scale groundwater depletion detected by GRACE for both shallow and deep aquifers in North China plain. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1791-1799.
- [10] Chen B, Gong H, Li X, Lei K, Ke Y, Duan G, Zhou C. Spatial correlation between land subsidence and urbanization in Beijing, China. *Natural Hazards*, 2015a, 75(3): 2637-2652.
- [11] Chen B, Gong H, Li X, Lei K, Gao M, Zhou C, and Ke Y. Spatial-temporal evolution patterns of land subsidence with different situation of space utilization. *Natural Hazards*, 2015b, 77(3): 1-19.
- [12] Pan Y, Zhang C, Gong H, Yeh PJF, Shen Y, Guo Y, Huang Z, Li X. Detection of human-induced evapotranspiration using GRACE satellite observations in the Haihe River Basin of China. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43. DOI: 10.1002/2016GL071287.
- [13] Pan Y, Gong H, Sun Y, Wang X, and Ding F. Distributed estimation and analysis of precipitation recharge coefficient in strongly-exploited Beijing plain area, China. *Chinese Geographical Science*, 2016. DOI: 10.1007/S11769-016-0839-5.
- [14] Gong H, Pan Y, and Xu Y. Spatio-temporal variation of groundwater recharge in response to variability in precipitation, land use and soil in Yanqing Basin, Beijing, China. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(7): 1331-1340.
- [15] Zhou C, Gong H, Chen B, Zhu F, Duan G, Gao M, Lu W, 2016. Land subsidence under different land use in the eastern Beijing plain, China 2005-2013 revealed by InSAR time-series analysis. *GIScience and Remote Sensing*, 2012, 53 (6): 671-688.
- [16] Gao M, Gong H, Chen B, Zhou C, Chen W, Liang Y, Shi M, Si Y. InSAR time-series investigation of long-term ground displacement at Beijing Capital International Airport, China. *Tectonophysics*, 2016, 691(Part B): 271-281.
- [17] Zhang Y, Gong H, Gu Z, Wang R, Li X, Zhao W. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(2): 397-409.
- [18] Zhu L, Gong H, Li X, Wang R, Chen B, Dai Z, Teatini P. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 2015, 193: 243-255.

Groundwater depletion and regional land subsidence of the Beijing-Tianjin-Hebei area

Gong Huili^{1,2,3} Li Xiaojuan^{1,2,3} Pan Yun^{1,2,3} Zhu Lin^{1,2,3}
 Zhang Youquan^{1,2,3} Chen Mi^{1,2,3} Chen Beibei^{1,2,3} Ke Yinghai^{1,2,3}
 Wang Yanbing^{1,2,3} Gao Mingliang^{1,2,3} Huang Zhiyong^{1,2,3} Li Yongyong^{1,2,3}

(1. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048;

2. Base of State Key Lab of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048;

3. MOE Key Lab of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract Regional land subsidence is one of the most serious potential hazards affecting the Beijing-Tianjin-Hebei area. Through joint use of GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) and other remote sensing techniques, the groundwater depletion and associated regional land subsidence in this area are expected to be better understood. The knowledge generated from such a multi-disciplinary way that integrates remote sensing and hydrogeology, will provide reliable information for regional land subsidence mitigation and sustainable development.

Key words GRACE; InSAR; groundwater; land subsidence; multi-factor field

《中国科学基金》征稿简则

《中国科学基金》(双月刊)创刊于 1987 年,由国家自然科学基金委员会主管、主办,旨在成为国家自然科学基金委员会联系广大科学基金项目申请者、承担者、评审者和管理者的桥梁与纽带。

本刊已被 CSCI、CSSCI 等国内各主要检索系统及日本《科学技术文献速报》等国外部分重要检索系统收录。

本刊常设栏目简介:

研究进展:刊登有关学科的具有战略性、全局性、前瞻性的综述性和评论性文章,以促进学科间的了解、交叉与融合。

成果快报:报道和选登重要的、有影响的、具有代表性的科学基金资助项目的研究进展以及优秀人才和优秀群体介绍。

管理纵横:报道国家自然科学基金委员会制定的各种重要的政策、规定和文件通告等;探讨和交流基金申请、评审、管理等方面的经验或体会。

科学论坛:围绕科技界普遍关注的热点与焦点问题,如研究评价、同行评议、学术道德等,各抒己见,展开讨论。

“研究进展”和“科学论坛”类文章需要有 200 字左右的中文摘要,并附英文题目、作者、单位、摘要及关键词;“成果快报”和“管理纵横”类文章无需英文摘要。稿件应附作者真实姓名、工作单位、职务、通讯地址、邮政编码、电话和电子邮件地址。

参考文献采用顺序编码制,附于文末。所有著者,姓在前,名在后(外文用首字母,中间不加缩写点),著者间用“,”隔开,只著录 3 位作者,其余用“等”或“et al.”。参考文献格式(包括标点符号)如下:

(1) 专著[]编著者. 书名(包括副刊名),版本(第一版不标注). 出版地:出版者,年份,页码 (如是译本,在书名后加译者姓名).

(2) 刊物[]著者. 文章题目. 刊物名称,年,卷(期):页码.

(3) 论文集[]著者. 文章题目. 论文集编者(前加“见:”或“In”). 论文集出版地:出版者,出版年,页码.

《中国科学基金》不收取版面费,稿件一经采用,根据规定酌付稿酬,并寄送样刊 2 本。

文章请勿一稿两投,本刊自收到稿件之日起,2 个月内将处理结果通知作者,如逾期未予答复,作者有权另行处理,但需及时通知本编辑部。

编辑部地址:北京市海淀区双清路 83 号(邮编:100085)

期刊网址:<http://pub.nsf.gov.cn/sficc/ch/currentissue.aspx>

投稿网址:<http://zkjj.cbpt.cnki.net/WKD/WebPublication/index.aspx?mid=zkjj>

电子邮箱:weikan@nsf.gov.cn

联系电话:010-62326880, 62326893