

GRACE 卫星在区域地下水管理中的应用潜力综述

胡立堂^{1,2}, 孙康宁^{1,2}, 尹文杰^{1,2}

(1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: GRACE 卫星能反演区域地下水储量的月动态变化, 而且数据免费, 它为区域地下水管理提供了新的方法。首先总结了区域地下水管理、GRACE 卫星在地下水储量和区域地下水管理中的应用现状; 接着通过多个案例分析展示了 GRACE 卫星能成功应用于区域地下水储量动态评价, 而且 GRACE 反演的地下水动态数据能用于区域地下水模型的参数识别, 证实了 GRACE 卫星在区域地下水管理中的应用潜力; 最后指出 GRACE 卫星反演的数据在应用中的两大问题: 该数据无法直接用于区域地下水资源评价和空间分辨率低。GRACE 卫星如何有效用于区域地下水资源评价和如何提高 GRACE 卫星反演数据的空间分辨率是当前研究的发展方向。

关键词: GRACE 卫星; 地下水; 储量; GRACE Follow-on; 降尺度; 数值模拟; 监测; 超采

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

Review on the Application of GRACE Satellite in Regional Groundwater Management

HU Li-tang^{1,2}, SUN Kang-ning^{1,2}, YIN Wen-jie^{1,2}

(1. School of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research

Centre of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: GRACE satellite can be used to derive monthly regional groundwater storage changes, and the data can be freely downloaded, which provides a new method for regional groundwater management. The processes in the management of regional groundwater, the application of GRACE-derived groundwater storage and the current status of GRACE satellite used in regional groundwater management were summarized. GRACE-derived data can be successfully used to the assessment of regional groundwater storage by case studies from the researchers all over the world. GRACE-derived data can be used in model calibration for regional groundwater flow model. GRACE satellite shows great potential in regional groundwater management. However, there are two problems in the application of GRACE-derived data. One is that the data can not be directly used to evaluate regional groundwater resource. The another one is low spatial resolution of GRACE data. Studying on the method for effectively evaluating regional groundwater resources from GRACE satellite and improving the spatial resolution of GRACE-derived data are the problems to be addressed in the future.

Key words: GRACE satellite; groundwater; storage; GRACE Follow-on; downscaling; numerical simulation; monitoring; overdraft

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572220); 国家国防科技工业局高放废物地质处置研究开发项目(科工计(2012)240 号)

作者简介: 胡立堂(1976-), 男, 湖北潜江人, 副教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: litanghu@bnu.edu.cn.

0 引言

近50年来,由于地下水的不合理开采,全球范围内出现不同程度的地下水位下降、地面沉降、海水入侵、河道萎缩、地下水水质恶化、盐渍化、沙漠化等环境地质问题^[1]。地下水动态监测是有效管理地下水的必要手段,因此,区域地下水管理依赖于地下水动态监测数据。就中国来说,国土资源部、水利部已着手联合建设国家地下水监测工程^[2],在全国范围内将耗资数十亿元形成国家级地下水监测站网。然而,地下水监测信息一般代表局部区域地下水动态,而且对于比较大的区域来说,系统的地下水监测网投资和维持成本大。如何结合有限的地下水监测信息和已开展的水文地质条件勘查成果进行有效的区域地下水管理,已成为水资源管理相关部门的现实问题需求。

21世纪是人类利用卫星跟踪卫星和卫星重力梯度技术提升对“数字地球”认知能力的新纪元^[3-4]。地球重力场反演与气候试验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)是美国国家航空航天局(NASA)和德国航空中心(DLR)的合作计划项目,旨在观测地球重力场变化。自2002年发射以来,GRACE卫星在大地测量学、地球物理学、海洋学、水文学和冰川学等方面展示了巨大的应用潜力^[5]。就水文学方面来说,首次使空间探测区域尺度的陆地水储量(Terrestrial Water Storage, TWS)变化成为可能^[6]。TWS包括地下水、地表水、土壤水和雪水。结合GRACE卫星反演的TWS变异数据,通过区域陆面水文模型可反演出地下水储量变化^[7]。GRACE卫星数据的地下水储量估计已经被广泛应用于多个区域,如美国密西西比河流域^[6]、印度^[8-9]、美国伊利诺伊州^[10-11]、也门^[12]。在荒漠和偏远山区,GRACE卫星数据已经成为区域地下水储量评价的唯一希望^[6,13]。GRACE卫星数据是月尺度的,而且可以免费下载,可以弥补地下水监测网的不足,已有应用案例证实了反演的地下水储量数据已经在跟踪地下水储量变化方面显示出了巨大的潜力。

GRACE卫星可提供较高精度的区域地下水储量变化信息,是区域地下水资源评价的重要佐证信息,这些信息可进一步识别地下水补给和排泄条件,从而为区域地下水模型和管理服务。本文讨论国内外相关研究现状和GRACE卫星应用潜力,为GRACE卫星在区域地下水管理中的应用提供参考。

1 国内外相关研究现状

1.1 区域地下水管理和模型

Hubbert早在1940年就提出区域地下水系统概念。文献^[14]陆续对局部、中间和区域地下水流动系统的地形、地质和气候控制因素进行了详细讨论,提出“重力穿层流动”的概念。而将区域地下水模型应用到大尺度含水层开始于1978年美国的RASA (Regional Aquifer System Analysis)项目^[15]。在此项目的18年间,集中研究了25个区域含水层系统,其中包括著名的高盆地(High Plain)含水层系统、加利福尼亚州中央峡谷含水层系统及佛罗里达州和Great Basin含水层系统。整个项目完成了4项工作:①创建了区域水文地质数据库;②建设了水文地质框架(概念模型);③弄清了自然和人类干扰情景对区域地下水含水层系统的影响;④汇编了国家地下水图集。Bakker等通过数值模拟的方式来研究尤卡山区域地下水流^[16]。Rossman等评价了来自美国西部灌溉量很大的7个州88个区域地下水模型^[17],以便于水文地质工作者、建模者、水资源管理者和决策者更好地了解以往的模型成果。美国、英国、澳大利亚等已将区域地下水管理和地下水模型紧密结合在一起,应用地下水模型来指导区域地下水合理开发利用和保护。提高模型仿真性也一直是地下水模型的现实要求和核心任务^[18]。

至今,一些区域地下水数值模型已经研发出来^[17,19-27],而范围较小的地下水模型不胜枚举。表1列出了部分区域地下水模型的位置、面积、目标和参考文献,包括美国、加拿大、中国和欧洲的模式。值得注意的是,澳大利亚大自流盆地(Great Artesian Basin)的模式由 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 单元组成,共超过 6×10^4 个活动单元,面积约 $1.54\times 10^6\text{ km}^2$,其目的是为减缓盆地地下水用水的压力^[24]。在所有模型中,最大的地下水模型是加拿大景观(Canadian Landscape)的地下水模型,其目的是讨论Wisconsinian冰川的前进和后退引起的地下水动态及对生态的影响,模型由404 960个单元组成(每个单元约 62 km^2)和10层(厚度从地面到海平面以下10 km)^[21]。就中国而言,地下水数值模拟开始于20世纪70年代,经过40多年来数学工作者和水文地质工作者以及科研院所的共同努力,地下水模拟技术发展迅速。中国区域地下水流数值模型是伴随国家科技攻关计划和中国地质调查局地质大调查项目进行的。中国地质调查局地质大调查项目在柴达木盆地^[28]、河西走

廊^[29]、山西六大盆地^[30]、塔里木盆地^[31]、准噶尔盆地^[32]、华北平原^[33]、三江平原^[34]、松嫩平原^[35]、西辽河平原^[36]和银川平原^[37]建立了三维地下水数值模型。在中国最大的是华北平原地下水模型^[26,33,38-39],面积达 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。这些模型定量分析了地下水开发利用和地下水动态的关系,为区域地下水资源管理提供了依据。

表 1 部分大区域地下水模型

Tab. 1 Some Regional Groundwater Models

序号	研究区	面积/ km^2	模型目标	参考文献
1	美国高盆地	4.56×10^5	诊断增加供水的可行性,确保高平原经济增长	[19]
2	美国 Edwards-Trinity 含水层	1.44×10^5	调查区域地下水系统特征	[20]
3	加拿大景观	2.53×10^7	讨论 Wisconsinian 冰川的前进和后退引起的地下水动态	[21]
4	美国堪萨斯州西南部	3.13×10^5	描述水文系统的特征和水的可利用性	[22]
5	西欧马斯河流域 (Rhine-Meuse Basin)	2.00×10^5	基于可利用的全球数据集构造模型,并评价其性能	[23]
6	澳大利亚大自流盆地	1.54×10^6	减缓大自流盆地地下水的压力	[24]
7	中国华北平原	1.40×10^5	评价地下水资源的可利用性	[26]、[39]
8	中国黑河流域	1.29×10^5	定量评价区域地下水收支和流动规律	[27]

1.2 GRACE 卫星在区域地下水储量变化中的应用

地球引力场监测卫星的基本原理是万有引力定律,主要思路是通过监测地球引力场的变化得到地球物质量的变化,进而分析地球大气层、地表物质量及地球内部固体物质的变化情况^[40]。GRACE 卫星监测到时变的地球重力场,等价转换为地球表面的质量变化,从而反演得到陆地水储量的变化,通常以等效水柱高表示。为从陆地水储量中分离出地下水储量信息,经常借助全球陆地同化系统 (GLDAS)。GLDAS 是高时间分辨率模型,其目的是获取陆地表面变化的近实时信息。GLDAS 可以模拟大量的气象观测数据限制模型的输出,从而能够准确估计许多水文过程,系统中包括 CLM、MOS、VIC 和 NOAH 模型。GRACE 卫星数据已应用于大地测量学、冰川学、水文学、海洋学和固体地球科学等领域^[41]。据统计 (<http://grace.jpl.nasa.gov/publi->

cations/),自 2000 年以来,GRACE 相关的科技论文数量呈显著增加趋势。从 2011 年起,每年 GRACE 相关的科技论文超过 150 篇,其中部分文献被《Nature》和《Science》等著名期刊收录。

从国外来说,Rodell 等的理论研究表明,在美国中部的高平原含水层上用 GRACE 卫星来观测地下水的变化是可行的,他们发现陆地水储量变化与地下水储量变化和土壤水储量变化之和具有较高的相关性,GRACE 卫星反演与实测的地下水储量变化之间相关系数为 0.58^[42]。Yeh 等发现在美国伊利诺伊州利用 GRACE 卫星估计的地下水与实测数据吻合相当好,地下水季节变化的估计值与实测值吻合较好,认为 GRACE 是反映流域尺度在 $2.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 以上范围内估计地下水储量季节变化的一套新方法^[10]。Rodell 等利用全球陆面同化系统数据从 GRACE 卫星数据中提取了密西西比河流域及其 4 个子流域的地下水储量变化量,发现从 GRACE 卫星反演的陆地水储量中除去雪水储量和土壤水储量则是地下水储量,而且当研究流域的面积大于 $9.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 时的结果比面积约 $5.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 时更准确^[6]。Strassberg 等利用 GRACE 卫星数据对美国中心地带的半干旱高地平原地下水储量变化趋势进行了评估^[43]。Voss 等运用 GRACE 卫星数据评价了中东地区地下水淡水储量的变化趋势^[44]。Awange 等在澳大利亚墨累—达令盆地进行了多年干旱研究,证实实际观测的地下水储量变化与 GRACE 卫星估计的陆地水储量之间有较高的相关性^[45-46]。Rodell 等利用印度某区域的 GRACE 卫星和全球陆地同化系统对地下水消耗量进行了量化^[9]。Sun 等形成了一套利用遥感观测和模拟进行参数估计的方法,发现 GRACE 卫星数据可以推导出地下水模型中具有空间分布的参数^[47]。

就中国而言,GRACE 卫星主要应用范围包括黑河流域、海河流域、长江流域等地下水储量变化情况,主要研究大尺度区域陆地水储量的时空变化特征^[48-53]。曹艳萍等利用 CSR 数据中心公布的 GRACE 卫星重力测量数据,反演得到黑河流域 2002~2008 年水储量变化趋势,并对其进行时序特征和空间分布特征分析^[54]。苏晓莉等使用 GRACE 卫星 8 年 (2002 年 8 月至 2010 年 8 月) 的时变重力位资料,分析了华北地区陆地水量的月变化,发现这段时间内该地区的陆地水储量以每年 -1.1 cm 的趋势减少,并且利用 CPC 水文模型、全球陆地同化系统数据分别估计了华北地区地表水的变化,两者

得到的地表水变化与 GRACE 卫星结果均吻合较好,从而验证了 GRACE 卫星数据的可靠性^[55]。胡小工等利用长时间序列的 GRACE 卫星时变重力数据反演得到长江流域陆地水储量变化,并对 3 个典型区域的水储量变化做了分析,发现 GRACE 卫星数据能有效揭示长江流域水储量季节性变化及其长期变化趋势^[56-57]。冉全等结合 GRACE 卫星数据和全球陆地同化系统反演了 2004~2009 年连续 72 个月的海河流域地下水储量变化^[58]。任永强等利用 GRACE 卫星 CSR05 数据反演推算了海河流域 2005~2009 年地下水储量的时序变化^[59]。

综上所述,国内外应用实例已证实 GRACE 卫星反演区域地下水储量变化具有较高的准确性。GRACE 卫星能反演 2002 年至 2015 年月变化的地下水储量。GRACE 卫星时变数据在区域地下水应用中已显示出巨大潜力,其区域研究范围一般要求在几十万平方千米以上。

1.3 GRACE 卫星用于区域地下水管理

Sutanudjaja 等试图利用全球数据集建立地下水模型,并结合地下水监测数据评判模型的性能^[23]。区域地下水数值模型是区域地下水管理的有效手段,它具有不确定性,而且传统获取实测数据的方法耗时耗力。GRACE 卫星反演的陆地水储量变化数据为区域地下水数值模型的参数率定和校准提供了一种新的机遇和方法。目前,GRACE 卫星多集中于验证地下水储量数据的准确性,将 GRACE 卫星数据应用于区域地下水管理或者区域地下水模型的研究较少。Sun 等首次尝试利用 GRACE 卫星数据和遗传优化算法再次标定西德克萨斯地下水模型,发现 GRACE 卫星数据可以进一步约束参数,同化地下水补给项,从而提高区域地下水模型的有效性^[60]。但该模型将研究区地下水储量变化量作为模型识别项,没有详细讨论 GRACE 卫星多个基础网格单元内的模型识别。Hu 等利用 GRACE 卫星反演的地下水储量变化数据对观测数据较少的柴达木盆地地下水流数值模型进行参数率定工作,取得了较好的效果^[61]。

2 GRACE 卫星在区域地下水管理中的应用展望

2.1 区域地下水资源评价和管理方法

GRACE 卫星可较好反映区域地下水储量变化,但如何应用于区域地下水管理是一个问题。Famiglietti 研究团队最近提出了总地下水压力指数

和可更新的地下水压力指数来衡量区域地下水状况,认为 GRACE 卫星能较好地用于区域地下水资源评价^[62-63]。他们定义总地下水压力指数为地下水总储量和地下水消耗速率之比,可利用地下水压力指数为地下水利用量和可利用量之比;他们分析了世界 37 个大型盆地地下水利用量和可利用量之间的关系,其中地下水利用量借助 GRACE 卫星反演的地下水储量变化数据,将区域含水层的状态分为过量开采、可变可采、人类可支配的可采和无压力开采状态,压力状态与人类活动(经济活动和土地利用)有很大关系;他们认为基于 GRACE 卫星的地下水数据有助于定量分析地下水使用对地下水压力的影响。

当前,中国在国家地下水监测工程基础上,启动了地下水超采治理项目^[64],将禁止或限制地下水开采量,逐步恢复地下水位,使区域地下水补给量和排泄量达到平衡。河北省已作为试点之一^[65],治理重点是以衡水为主的黑龙港运东地区,涉及衡水、沧州、邯郸、邢台等区域。在全国地下水管理中,区域地下水位变化和地下水开采量难以准确衡量和确定。鉴于目前地下水管理相关研究较少,在区域地下水管理中可结合 GRACE 卫星反演数据。GRACE 卫星反演的地下水储量一方面反映区域地下水位的变化,另一方面可间接判定区域调查的地下水开采量数据的准确性,为区域地下水管理提供可行的辅助工具,因此,GRACE 卫星将在区域地下水管理中起着重要的辅助作用。

2.2 GRACE 卫星低空间分辨率问题

GRACE 卫星数据的空间分辨率约为 350 km,该范围内反演的等效水柱高误差小于 1 cm,但大多数地下水研究区小于该尺度,如何提高 GRACE 卫星反演数据的空间分辨率是亟待解决的问题。当前限制 GRACE 时变地球重力场模型精度的主要因素在于南北向条带误差和混频效应。由于 GRACE 双星被设计为“串行式”编队系统,所以仅能感测轨向卫星观测数据,而无法同时获得垂向和径向地球重力场信号。由于获得的卫星观测信号和误差非各向同性,而且 GRACE 卫星串行式轨道设计对经向重力场变化异常敏感,所以导致了削弱地球时变重力场精度的南北向条带误差效应。目前,国内外学者在条带去噪的处理上做了大量工作,并提出了多种去条带方法。Sweason 等首先发现,对于固定次、奇(偶)数阶之间存在着明显的相关性,根据平滑窗口对球谐系数进行多项式拟合得到拟合值,然后从原

始数值中扣除拟合值,从而得到去相关之后的球谐系数值^[66]。Chambers 在计算海水质量变化时,则没有采取滑动窗口的方法,而是对同一次的所有偶(奇)数阶进行一次多项式拟合^[67]。Chen 等在计算苏门答腊岛地震引起的重力变化时,采用了 P3M6 方法,即采用三阶多项式去除六阶及以上阶数的相关性;在研究极地冰川变化、陆地冰川变化和陆地变化时,采用了 P4M6 方法,即采用四阶多项式去除六阶及以上阶数的相关性^[68]。GRACE 卫星的双星被设计为非重复轨道,约 30 d 的卫星轨道在地面的投影轨迹可完全覆盖地球,因此,基于 GRACE 卫星观测数据最大程度仅能获得时间分辨率为 30 d 的时变重力场模型。因为时间变化周期小于 30 d 的海潮和大气潮等高频误差无法从地球时变重力场月模型中精确扣除,所以导致了限制地球时变重力场精度的混频效应。

GRACE 卫星由于自身固有的局限性已无法满足在地球物理学和水文学等研究的要求,如无法实质性降低轨道高度、无法减弱高频信号混淆效应等。基于以上原因,国际众多科研机构正积极寻求下一代更好时空分辨率的卫星重力计划,例如 GRACE Follow-on(双星)、钟摆式(双星)、车轮式(双星和四星)、钟摆和车轮复合式(三星)、三星串行式、不同轨道倾角式(四星)等。其中,GRACE Follow-on 卫星将于 2017 年发射,其反演数据的空间分辨率将增大^[69-71]。Loomis 等讨论了插值公式、相关系数和采样间隔对 GRACE Follow-on 卫星的双星间加速度精度的影响^[72-73]。郑伟等利用重力梯度法研究表明,GRACE Follow-on 卫星比 GRACE 卫星反演的地球重力场数据精度高 61 倍^[4]。根据已有文献,2017 年计划发射的 GRACE Follow-on 卫星将产生至少比 GRACE 卫星高 10 倍的地球重力场精度^[4,70,72-74]。因此,GRACE Follow-on 卫星反演的地下水储量数据时空分辨率将完全满足几千至几万平方千米区域尺度的地下水管理需求,将会比 GRACE 卫星的应用潜力更大更广泛。解决 GRACE 卫星反演数据空间分辨率低的另一种方法是在区域地下水研究的基础上,基于 GRACE 卫星反演数据研究细化 GRACE 卫星空间数据(降尺度)的研究方法,即在 GRACE 卫星反演的区域地下水储量动态数据基础上,结合区域水文地质参数的分布来研究降尺度的方法。例如,Gao 等尝试利用温度植被干旱指数法^[75]来降尺度 GLDAS 模型反演的土壤水分含量数据。

3 结 语

地下水监测是区域地下水管理中最重要基础,然而监测点有限,难以反映区域地下水动态信息。GRACE 卫星能反演区域地下水储量月变化动态,而且数据免费。GRACE 卫星反演的地下水储量变异数据具有应用于区域地下水评价和管理的巨大潜力。本文评述了区域地下水管理的研究进展以及 GRACE 卫星在地下水储量方面的应用现状,通过多个案例分析展示了 GRACE 卫星成功应用于区域地下水储量动态评价。区域地下水模型作为区域地下水管理的辅助手段,GRACE 卫星反演的地下水动态数据可用于约束水文地质参数,部分文献已证实该方法的有效性。

将 GRACE 卫星反演的地下水数据应用于区域地下水管理存在 2 个问题,即无法直接用于区域地下水资源评价和 GRACE 卫星数据空间分辨率低。区域地下水资源评价涉及地下水可利用量和补给资源量。GRACE 卫星反演数据虽然不能直接用于计算地下水资源量,但可作为计算地下水资源量和管理地下水的重要佐证信息,如何有效利用该信息评价区域地下水资源利用状况仍有待进一步的研究,将 GRACE 卫星反演数据用于建立区域地下水模型可能是一个很好的选择。GRACE 卫星反演的地下水储量变化数据空间分辨率低,这是 GRACE 卫星在地下水资源管理应用中的最大障碍,一方面希望 GRACE Follow-on 卫星的发射,适当提高数据的精度和改善空间分辨率,另一方面可借助区域地下水调查的基础数据,研究 GRACE 卫星反演数据的网格细化(降尺度)方法,从而提高其空间分辨率。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 王焰新,马 腾,郭清海,等.地下水与环境变化研究[J].地学前缘,2005,12(增1):14-21.
WANG Yan-xin, MA Teng, GUO Qing-hai, et al. Groundwater and Environmental Change[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(S1): 14-21.
- [2] 范宏喜.开启地下水监测新纪元:聚焦国家地下水监测工程建设[J].水文地质工程地质,2015,42(2): 161-162.
FAN Hong-xi. Open up a New Epoch of Groundwater Monitoring: Focus on National Groundwater Monitoring Engineering Construction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(2): 161-162.

- [3] 郑伟,许厚泽,钟敏,等.地球重力场模型研究进展和现状[J].大地测量与地球动力学,2010,30(4):83-91.
ZHENG Wei, XU Hou-ze, ZHONG Min, et al. Progress and Present Status of Research on Earth's Gravitational Field Models[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(4): 83-91.
- [4] 郑伟,许厚泽,钟敏,等.基于GRACE Follow-on卫星重力梯度法精确反演地球重力场[J].地球物理学报,2014,57(5):1415-1423.
ZHENG Wei, XU Hou-ze, ZHONG Min, et al. Precise Recovery of the Earth's Gravitational Field by GRACE Follow-on Satellite Gravity Gradiometry Method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1415-1423.
- [5] 郑秋月,陈石.应用GRACE卫星重力数据计算陆地水变化的相关进展评述[J].地球物理学进展,2015,30(6):2603-2615.
ZHENG Qiu-yue, CHEN Shi. Review on the Recent Developments of Terrestrial Water Storage Variations Using GRACE Satellite-based Datum[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2603-2615.
- [6] RODELL M, CHEN J, KATO H, et al. Estimating Groundwater Storage Changes in the Mississippi River Basin (USA) Using GRACE[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(1): 159-166.
- [7] RODELL M, HOUSER P, JAMBOR U, et al. The Global Land Data Assimilation System[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [8] TIWARI V M, WAHR J, SWENSON S. Dwindling Groundwater Resources in Northern India, from Satellite Gravity Observations[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(18): L18401.
- [9] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J. Satellite-based Estimates of Groundwater Depletion in India[J]. Nature, 2009, 460: 999-1002.
- [10] YEH P J F, SWENSON S C, FAMIGLIETTI J S, et al. Remote Sensing of Groundwater Storage Changes in Illinois Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12): W12203.
- [11] SWENSON S, YEH J F, WAHR J, et al. A Comparison of Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with In-situ Measurements from Illinois[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16), doi: 10.1029/2006GL026962.
- [12] MOORE S, FISHER J B. Challenges and Opportunities in GRACE-based Groundwater Storage Assessment and Management: An Example from Yemen[J]. Water Resources Management, 2012, 26(6): 1425-1453.
- [13] 尹文杰,胡立堂,王景瑞.基于GRACE重力卫星的甘肃北山地区地下水储量变化规律研究[J].水文地质工程地质,2015,42(4):29-34.
YIN Wen-jie, HU Li-tang, WANG Jing-rui. Changes of Groundwater Storage Variation Based on GRACE Data at the Beishan Area, Gansu Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 29-34.
- [14] TODD D K, MAYS L W. Groundwater Hydrology[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [15] SUN R J, WEEKS J B, GRUBB H F. Bibliography of Regional Aquifer-system Analysis (RASA) Program of the U. S. Geological Survey, 1979-1996[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1997.
- [16] BAKKER M, ANDERSON E I, OLSTHOORN T N, et al. Regional Groundwater Modeling of the Yucca Mountain Site Using Analytic Elements[J]. Journal of Hydrology, 1999, 226(3/4): 167-178.
- [17] ROSSMAN N R, ZLOTNIK V A. Review: Regional Groundwater Flow Modeling in Heavily Irrigated Basins of Selected States in the Western United States[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(6): 1173-1192.
- [18] 陈崇希.“防止模拟失真,提高仿真性”是数值模拟的核心[J].水文地质工程地质,2003,30(2):1-5.
CHEN Chong-xi. "To Prevent Model Loss in Reality and Improve Model Accuracy" Is the Key of Groundwater Numerical Modeling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(2): 1-5.
- [19] LUCKEY R R, GUTENTAG E D, HEIMES F J, et al. Digital Simulation of Ground-water Flow in the High Plains Aquifer in Parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1986.
- [20] KUNIANSKY E L, HOLLIGAN K Q. Simulations of Flow in the Edwards-Trinity Aquifer System and Contiguous Hydraulically Connected Units, West-central Texas[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1994.
- [21] LEMIEUX J M, SUDICKY E A, PELTIER W R, et al. Dynamics of Groundwater Recharge and Seepage over the Canadian Landscape During the Wisconsinian Glaciation[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(F1), doi:10.1029/2007JF000838.
- [22] LIU G S, WILSON B, WHITTEMORE D, et al. Groundwater Model for Southwest Kansas Groundwater Management District[R]. Lawrence: Kansas Geological Survey, 2010.

- [23] SUTANUDJAJA E H, VAN BEEK L P H, DE JONG S M, et al. Large-scale Groundwater Modeling Using Global Datasets: A Test Case for the Rhine-Meuse Basin[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 2913-2935.
- [24] SMITH A J, WELSH W D. Review of Groundwater Models and Modelling Methodologies for the Great Artesian Basin[R]. Clayton: CSIRO, 2011.
- [25] ZHOU Y X, LI W P. A Review of Regional Groundwater Flow Modeling[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(2): 205-214.
- [26] CAO G L, ZHENG C M, SCANLON B R, et al. Use of Flow Modeling to Assess Sustainability of Groundwater Resources in the North China Plain[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 159-175.
- [27] YAO Y Y, ZHENG C M, LIU J, et al. Conceptual and Numerical Models for Groundwater Flow in an Arid Inland River Basin[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(6): 1480-1492.
- [28] 王永贵, 郭宏业, 李健, 等. 柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- WANG Yong-gui, GUO Hong-ye, LI Jian, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Resources and Environmental Problems in the Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [29] 程旭学, 陈崇希, 闫成云, 等. 河西走廊疏勒河流域地下水资源合理开发利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- CHENG Xu-xue, CHEN Chong-xi, YAN Cheng-yun, et al. Investigation and Evaluation on Rational Exploitation and Utilization of Groundwater Resources in the Shule River Basin of Hexi Corridor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [30] 韩颖, 阎世龙, 马汉田, 等. 山西六大盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- HAN Ying, YAN Shi-long, MA Han-tian, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Resources and Environmental Problems in the Six Major Basins in Shanxi[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [31] 刘斌, 门国发, 王占和, 等. 塔里木盆地地下水勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- LIU Bin, MEN Guo-fa, WANG Zhan-he, et al. Groundwater Exploration in Tarim Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [32] 谌天德, 陈旭江, 王文科, 等. 准噶尔盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- CHEN Tian-de, CHEN Xu-jiang, WANG Wen-ke, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Resources and Environmental Problems in Junggar Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [33] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, CHEN Zong-yu, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Sustainable Utilization in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [34] 杨湘奎, 杨文, 张烽龙, 等. 三江平原地下水资源潜力与生态环境地质调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- YANG Xiang-kui, YANG Wen, ZHANG Feng-long, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Resources and Ecological Environment in Sanjiang Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [35] 赵海卿, 赵勇胜, 杨湘奎, 等. 松嫩平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- ZHAO Hai-qing, ZHAO Yong-sheng, YANG Xiang-kui, et al. The Investigation of Groundwater Resources in Songnen Plain and Environment Evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [36] 李志, 于孟文, 张丽玲, 等. 西辽河平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- LI Zhi, YU Meng-wen, ZHANG Li-ling, et al. Investigation and Evaluation of Groundwater Resources and Environmental Problems in the West Liaohe Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [37] 吴学华, 钱会, 郁冬梅, 等. 银川平原地下水资源合理配置调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- WU Xue-hua, QIAN Hui, YU Dong-mei, et al. Investigation and Evaluation of Rational Allocation of Groundwater Resources in Yinchuan Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [38] SHU Y Q, VILLBOLTH K G, JENSEN K H, et al. Integrated Hydrological Modeling of the North China Plain: Options for Sustainable Groundwater Use in the Alluvial Plain of Mt. Taihang[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 79-93.
- [39] SHAO J L, CUI Y L, HAO Q C, et al. Study on the Estimation of Groundwater Withdrawals Based on Groundwater Flow Modeling and Its Application in the North China Plain[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1033-1042.

- [40] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305: 503-505.
- [41] CHEN J L, RODELL M, WILSON C R, et al. Low Degree Spherical Harmonic Influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Water Storage Estimates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): L14405.
- [42] RODELL M, FAMIGLIETTI J S. An Analysis of Terrestrial Water Storage Variations in Illinois with Implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(5): 1327-1339.
- [43] STRASSBERG G, SCANLON B R, RODELL M. Comparison of Seasonal Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with Groundwater-level Measurement from the High Plains Aquifer (USA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(14): L14402.
- [44] VOSS K A, FAMIGLIETTI J S, LO M H, et al. Groundwater Depletion in the Middle East from GRACE with Implications for Transboundary Water Management in the Tigris-Euphrates-Western Iran Region[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 904-914.
- [45] AWANGE J L, SHARIFI M A, BAUR O, et al. GRACE Hydrological Monitoring of Australia: Current Limitations and Future Prospects[J]. *Journal of Spatial Science*, 2009, 54(1): 23-36.
- [46] TREGONING P, MCCLUSKY S, CROSBIE R S, et al. Assessment of GRACE Satellites for Groundwater Estimation in Australia[R]. Canberra: Australian Government National Water Commission, 2012.
- [47] SUN A Y, GREEN R, RODELL M, et al. Inferring Aquifer Storage Parameters Using Satellite and In-situ Measurements: Estimation Under Uncertainty[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(10): L10401.
- [48] 唐国强, 龙笛, 万玮, 等. 全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1013-1023.
- TANG Guo-qiang, LONG Di, WAN Wei, et al. An Overview and Outlook of Global Water Remote Sensing Technology and Applications [J]. *Science China: Technologica*, 2015, 45(10): 1013-1023.
- [49] 孙琴, 谢正辉, 田向军, 等. 基于集合四维变分方法 PODEn4DVar 的 GRACE 陆地水储量同化: 方法与验证[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2753-2767.
- SUN Qin, XIE Zheng-hui, TIAN Xiang-jun, et al. GRACE Terrestrial Water Storage Data Assimilation Based on the Ensemble Four-dimensional Variational Method PODEn4DVar: Method and Validation[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(12): 2753-2767.
- [50] 许民, 张世强, 王建, 等. 利用 GRACE 重力卫星监测祁连山水储量时空变化[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 458-467.
- XU Min, ZHANG Shi-qiang, WANG Jian, et al. Temporal and Spatial Patterns of Water Storage Change of Qilian Mountains in Recent 8 Years Based on GRACE [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 458-467.
- [51] 尼胜楠, 陈剑利, 李进, 等. 利用 GRACE 卫星时变重力场监测长江、黄河流域水储量变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 49-55.
- NI Sheng-nan, CHEN Jian-li, LI Jin, et al. Terrestrial Water Storage Change in the Yangtze and Yellow River Basins from GRACE Time-variable Gravity Measurements[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(4): 49-55.
- [52] 王文, 王鹏, 崔巍, 等. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(6): 759-768.
- WANG Wen, WANG Peng, CUI Wei, et al. A Comparison of Terrestrial Water Storage Data and Multiple Hydrological Data in the Yangtze River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 759-768.
- [53] 刘晓, 范琳琳, 王红瑞, 等. 基于 GRACE 反演水量和生态服务价值的鄱阳湖区水资源承载力评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 12-21.
- LIU Xiao, FAN Lin-lin, WANG Hong-rui, et al. Evaluation of Water Resources Carrying Capacity of Poyang Lake Area Based on GRACE Water Quantity Inversion and Ecological Service Value [J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science and Technology*, 2014, 12(6): 12-21.
- [54] 曹艳萍, 南卓铜. GRACE 重力卫星数据的水文应用综述[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 543-553.
- CAO Yan-ping, NAN Zhuo-tong. Applications of GRACE in Hydrology: A Review[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(5): 543-553.
- [55] 苏晓莉, 平劲松, 叶其欣. GRACE 卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 917-922.
- SU Xiao-li, PING Jin-song, YE Qi-xin. Terrestrial Water Variations in the North China Plain Revealed by the GRACE Mission[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(6): 917-922.
- [56] 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2006, 36(3): 225-232.

- HU Xiao-gong, CHEN Jian-li, ZHOU Yong-hong, et al. Monitoring the Seasonal Variation of Water Storage in the Yangtze River Basin by Using GRACE Space Gravity Measurement[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2006, 36(3): 225-232.
- [57] 白成恕, 马旭辉, 武新明, 等. 利用 GRACE 数据探测长江流域水储量变化[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(5): 165-167.
- BAI Cheng-shu, MA Xu-hui, WU Xin-ming, et al. Changes of Yangtze River Basin Water Storage Based on GRACE Satellite Data[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2013, 36(5): 165-167.
- [58] 冉全, 潘云, 王一如, 等. GRACE 卫星数据在海河流域地下水年开采量估算中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 42-47.
- RAN Quan, PAN Yun, WANG Yi-ru, et al. Estimation of Annual Groundwater Exploitation in Haihe River Basin by Use of GRACE Satellite Data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 42-47.
- [59] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量时变趋势分析[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 88-94.
- REN Yong-qiang, PAN Yun, GONG Hui-li. Haihe Basin Groundwater Reserves Time-varying Trends Analysis[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2013, 34(4): 88-94.
- [60] SUN A Y, GREEN R, SWENSON S, et al. Toward Calibration of Regional Groundwater Models Using GRACE Data[J]. Journal of Hydrology, 2012, 422/423: 1-9.
- [61] HU L T, JIAO J J. Calibration of a Large-scale Groundwater Flow Model Using GRACE Data: A Case Study in the Qaidam Basin, China[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(7): 1305-1317.
- [62] RICHEY A S, THOMAS B F, LO M H, et al. Uncertainty in Global Groundwater Storage Estimates in a Total Groundwater Stress Framework[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5198-5216.
- [63] RICHEY A S, THOMAS B F, LO M H, et al. Quantifying Renewable Groundwater Stress with GRACE[J]. Water Resources Research, 2015, 51: 5217-5238.
- [64] 赵新, 赵洪杰. 地下水超采治理列入国家规划[N]. 黄河报, 2015-03-24(3).
- ZHAO Xin, ZHAO Hong-jie. Included in the Planning of Groundwater Overexploitation Treatment[N]. Yellowriver News, 2015-03-24(3).
- [65] 齐婕. 河北: 探索地下水压采之路[N]. 中国水利报, 2015-05-15(1).
- QI Jie. Hebei: Exploring the Method of Groundwater Exploitation Control [N]. China Water Resources News, 2015-05-15(1).
- [66] SWEASON S, WAHR J. Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8): L08402.
- [67] CHAMBERS D P. Evaluation of New GRACE Time-variable Gravity Data over the Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L17603.
- [68] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. GRACE Detects Coseismic and Postseismic Deformation from the Sumatra-Andaman Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(13): L13302.
- [69] ZHENG W, SHAO C G, LUO J, et al. Improving the Accuracy of GRACE Earth's Gravitational Field Using the Combination of Different Inclinations[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(5): 555-561.
- [70] Thales Alenia Space. Assessment of a Next Generation Gravity Mission for Monitoring the Variations of Earth's Gravity Field Final Report (SD-RP-AI-0688) [R]. Cannes: Thales Alenia Space, 2010.
- [71] FLECHTNER F, MORTON P, WATKINS M, et al. Status of the GRACE Follow-on Mission[J]. Gravity, Geoid and Height Systems, 2014, 141: 117-121.
- [72] LOOMIS B D, NEREM R S, LUTHCKE S B. Simulation Study of a Follow-on Gravity Mission to GRACE[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(5): 319-335.
- [73] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 插值公式、相关系数和采样间隔对 GRACE Follow-on 星间加速度精度的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 822-832.
- ZHENG Wei, XU Hou-ze, ZHONG Min, et al. Impacts of Interpolation Formula, Correlation Coefficient and Sampling Interval on the Accuracy of GRACE Follow-on Intersatellite Range-acceleration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 822-832.
- [74] 罗子人, 钟敏, 边星, 等. 地球重力场空间探测: 回顾与展望[J]. 力学进展, 2014, 44(1): 291-337.
- LUO Zi-ren, ZHONG Min, BIAN Xing, et al. Mapping Earth's Gravity in Space: Review and Future Perspective[J]. Advances in Mechanics, 2014, 44(1): 291-337.
- [75] GAO Z Q, GAO W, CHANG N B. Integrating Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and Regional Water Stress Index (RWSI) for Drought Assessment with the Aid of LANDSAT TM/ETM+ Images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 495-503.