

GRACE 重力卫星数据的水文应用综述

曹艳萍,南卓铜

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:重力反演与气候实验卫星 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)为研究深层地球结构和跟踪地球表面质量变化提供了新手段,在一定程度上完善了当前全球水文监测系统。检测全球或区域水文信息对于研究全球或区域水资源变化和水量平衡具有重要意义。首先对 GRACE 重力卫星进行概括介绍,然后对 GRACE 卫星数据在极地高山冰川、海洋和陆地水储量等方面的应用现状进行分析总结,归纳 GRACE 水文研究中的验证方法,最后总结 GRACE 水文应用中面临的主要技术难点及可能的解决方案。

关键词:GRACE 重力卫星;水文应用;水储量估计

中图分类号:TP 79;P 332 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)05-0543-11

引用格式:Cao Yanping, Nan Zhuotong. Applications of GRACE in Hydrology: A Review[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 543-553. [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.]

1 引言

全球环境变化是当前和未来人类社会共同面临的一个问题。全球变暖、海平面上升、极地冰川融化等全球环境问题与全球地表物质迁移紧密相联。全球水循环涉及大气、海洋和陆地三者之间的相互关系,与全球气候变化息息相关。另一方面气候变化也会影响大气、海水质量的重新分布,比如冰雪消融导致重力变化^[1]。采取多种手段获取水文信息,对于评估、改进和验证气候模型,更好地理解大尺度流域水文过程有重要意义。研究水文问题的常用方法包括水文、陆面过程建模方法^[2-3]、卫星测高^[4]、遥感^[5]等观测手段,然而模型刻画能力、观测技术和数据获取能力的局限性制约了当前全球及区域尺度的陆地、海洋水循环和极地问题^[6]的研究。传统卫星遥感和测高技术往往只能获取表层水变化量;全球水文模型能有效描述水循环问题,但模型本身存在较大的不确定性,需要各种来源的观测数据进行模型验证。重力卫星技术为我们研究地球物质

迁移及全球水文问题提供了新的监测手段,对深入理解全球水循环及对水循环进行有效模拟、更好地把握地球气候和生态系统变化和发展有重要意义。

地球各系统间的质量重新分布和迁移引起地球重力场的变化,在年或季较短时间尺度上,主要由地球表层大气、海洋、陆地水质量交换引起。通过精确观测地球重力场随时间的变化,可以反演地球水质量变化的情况。自重力反演与气候实验卫星(GRACE)实施以来,国内外科研人员利用其获取的重力场信息在地球物理学、大地测量学、海洋学等学科进行相关的研究。本文总结概述 GRACE 卫星在水文相关领域的应用,综述其在极地高山冰川、海洋、陆地水储量等方面的应用现状及主要技术难点和解决方案。

2 GRACE 数据概述

GRACE 卫星由美国宇航局 NASA(National Aeronautics and Space Administration)和德国航天局 DLR(the German Aerospace Center)合作研制,于 2002 年 3 月发射。其宗旨是获取高精度的地球

收稿日期:2011-03-29;修订日期:2011-07-15

基金项目:国家 863 计划项目(2008AA12Z205),中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q10-1)。

作者简介:曹艳萍(1986-),女,河南新乡人,硕士研究生,主要从事 GRACE 重力卫星的应用研究。E-mail:0310cyp@163.com。

通讯作者:南卓铜(1977-),男,浙江乐清人,研究员,主要从事地理信息系统应用、水文建模、数据等研究。E-mail:nztong@lzb.ac.cn。

重力场中长波部分及全球重力场的时变特征,提高对地球变化规律的理解^[7]。

随着 GRACE 卫星不断改善,数据精度越来越高。公布 GRACE 数据集的机构主要有 CSR(the University of Texas at Austin Center for Space Research)^①、GFZ(German Research Center for Geosciences)^②和 JPL(Jet Propulsion Laboratory)^③及 CNES(Center National d'Etudes Spatiales)^{[8]④},可在其官方网站获取数据——地球重力场的无量纲月球谐系数集。由这些系数可求得任意空间域里的重力势或地球表面质量异常等。

当前 GRACE 数据集产品已发展到第 4 代(RL04),新一代数据产品在先前数据产品的基础上改进背景模型^[9-10]和数据处理技术^[11-12]。不同机构提供的 RL04 数据集精度和适应范围不同。其中,除 JPL RL04 质量稍差,其他三机构数据质量差异不大。一些学者采用 CSR RL04 数据^[13-15],一些采用 GFZ RL04^[16-18]。Lombard 等^[19]利用不同数据产品分别计算静态海平面的变化情况,列举 GRGS 和 GFZ 的 GRACE 重力场产品的主要区别,可作为选择数据集的依据。

GRACE 卫星实施目标是:① 确定高精度的静态地球重力场的中长波部分;② 确定 15~30 d 或更长时间尺度的地球重力场的时变特征;③ 监测、分析大气和电离层随时间的变化。

地学和水文领域研究人员希望利用 GRACE 监

测固体地球内部变化,监测地表和地下水的变化情况,监测冰川质量和全球海平面随气候变化的变化情况,研究海洋环流和海洋波动等^[20]。迄今,GRACE 卫星在水文领域已经有较多的应用,很多学者利用 GRACE 卫星数据获取区域蒸散发量、地下水变化量等。

3 GRACE 数据的水文研究应用现状

利用 GRACE 可以监测到足够精度的水文信号^[21-23]。下面分别介绍 GRACE 数据在极地冰盖物质平衡、高山冰川物质平衡、全球海平面变化和陆地水储量等方面的研究和应用。

3.1 GRACE 在极地冰川研究中的应用

随着全球变暖,极地冰川正在消融,对当地的动植物、全球海洋和大气环流及海平面产生了影响。极地冰盖的融化对海平面上升也有重要影响。2007 年政府间气候变化专门委员会 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)指出:本世纪末整个海平面上升幅度为 18~59 cm,如果整个格陵兰岛和南极的冰盖全部融化,会使整个海平面上升约 65 m^[24];冰盖部分损失也可能对海平面造成严重影响,IPCC 第一工作组第 4 次评估报告中指出:格陵兰岛冰盖和南极西部冰盖完全消融,导致海平面分别上升约 7 m 和 5 m。重力测量卫星 GRACE 的诞生为更好地监测极地地区的冰盖变化提供新的方法。如表 1 列举了其中一些典型例子。

表 1 GRACE 卫星数据在极地冰川研究中的应用实例

Table 1 The application of the GRACE satellite data in polar ice study

	研究区域	数据时段	主要结论
Velicogna ^[24]	南极地区	2002~2005	每年以 $152 \pm 80 \text{ km}^3$ 减少,主要发生在西部冰盖
Chen ^[25]	南极地区	2002~2009	整个南极地区消融率是 $190 \pm 77 \text{ Gt/a}$,南极西部消融率是 $132 \pm 26 \text{ Gt/a}$
Velicogna, Wahr ^[26]	格陵兰岛	2002~2006	格陵兰岛南部加速消融,北部不变,整个消融率为 $248 \pm 36 \text{ km}^3/\text{a}$
Slobbe, et al ^[27]	格陵兰岛	2002~2007	雪体积变化率是 $-11 \sim 155 \text{ km}^3/\text{a}$,冰消融率是 $-136 \sim -292 \text{ km}^3/\text{a}$
Chen, et al ^[28]	格陵兰岛	2002~2005	整个格陵兰岛每年以 $-239 \pm 23 \text{ km}^3$ 变化,2004 年夏季东南部分开始加速融化
Ramillien, et al ^[29]	南极与格陵兰岛	2002~2005	格陵兰岛消融率是 $-129 \pm 15 \text{ km}^3/\text{a}$,南极西部消融率是 $-107 \pm 23 \text{ km}^3/\text{a}$,南极东部是 $67 \pm 28 \text{ km}^3/\text{a}$
Baur, et al ^[30]	格陵兰岛	2002~2009	格陵兰岛冰盖量消融呈非线性变化
Syed, et al ^[31]	北极地区	2003~2005	环南极淡水流量增加

① <http://www.csr.utexas.edu/grace>

② <http://isdc.gfz-potsdam.de/grace>

③ <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace>

④ <http://www.cnes.fr>

3.2 GRACE 在高山冰川研究中的应用

高山冰川对气候变化很敏感^[32],与全球变暖息息相关。利用 GRACE 时变重力场数据对高山冰川融化率进行估算^[33-35]得知:整个亚洲的高山冰川在 2003~2009 年间的平均冰消融率是 47 ± 12 Gt/a,等效于海平面上升约 0.13 ± 0.04 mm/a;全球高山冰川加速融化,对全球海平面上升的影响是 0.73 ± 0.10 mm/a^[35];Alaskan 冰川在 2002~2005 年以 101 ± 22 Gt/a 的速率融化^[33];Pataonia 冰川在 2002~2006 年间的冰川消融率是 27.9 ± 11 Gt/a,等效于冰厚度以 1.6 m/a 的速度消融^[36]。

3.3 GRACE 在海洋水文学中的应用

在 GRACE 卫星发射前,Woodworth^[37]分析 GRACE 卫星在海平面变化方面研究的一系列优势,提出了能够提高海洋水平面变化预测精度的方法。很多学者利用 GRACE 卫星数据对海洋进行了系列研究^[14,18-19,38-42],研究结果表明,全球海平面在 2002~2008 年期间的变化幅度是 0.8 mm/a^[14]~ 2 mm/a^[18-19,41],误差主要归因于所采用的冰后回弹模型不同。冰后回弹对重力场的长期变化趋势有影响,且同海洋质量变化趋势属于同一个数量级。在利用 GRACE 进行海洋研究时必须去除冰后回弹的影响,然而即使冰后回弹模型得以改进,当前利用 GRACE 估算海洋水重力依然存在较大的不确定性,这种误差可以达到 0.5 mm/a^[43]。

3.4 GRACE 用于陆地水储量估算研究

借助 GRACE 卫星反演得到的地球重力场,可以推算大区域的水储量变化^[44-45]。对于陆地部分,全球重力场时变特性主要由水质量变化引起^[44,46]。在估算全球、区域和流域等各种尺度的陆地水储量变化研究中,GRACE 卫星得到广泛应用^[47-50]。

3.4.1 全球尺度

重力场变化主要由陆地水储量、冰雪质量(包括极地冰盖和高山冰川),以及其他地球物理信号(冰后回弹、地震变形等)引起。GRACE 数据中含有大气、海洋质量变化等造成的干扰信号,可以采用数值模拟去除该部分的影响^[51];数据前处理去除地球物理信号的影响,最终得到水储量变化量。Schmidt 等^[17]利用 GRACE 计算了全球水储量变化量,分析由地球表面水质量重新分布,引起的表面质量时空变化异常。Andersen 等^[52]利用 GRACE 卫星 15 个月重力场模型研究全球重力的年际变化,研究表明对于空间尺度为 $1\ 300$ km 或者更大的区域,GRACE 卫星可以监测到地下水约 0.9 mm 的等效

水高变化。Rowlands 等^[53-54]利用基于 GRACE 的陆地水储量数据改进了全球水文模型的模拟精度。

3.4.2 区域尺度

GRACE 卫星数据也被应用于区域尺度,如监测北极地区的水储量,结合陆表模型推算该地区雪水当量^[55];获取中欧地区 2002~2003 年间的陆地水储量年际变化量^[56];获取高地平原含水层的季节性陆地水储量变化量^[57]等。GRACE 卫星区域应用受其空间分辨率限制,区域尺度越小,误差越大。Swenson 等^[58]对区域面积为 20 万 km^2 的 Illinois 地区进行研究,首先对 GRACE 数据进行滤波处理,之后求得该地区水储量变化量,用实测值验证 GRACE 结果精度,表明滤波技术可以比较显著地改进 GRACE 空间分辨率。月面质量集中区方法(mascon)^[53]是另一种提高 GRACE 空间分辨率的方法,Andersen 等^[59]采用此方法研究 Bangladesh 地区水储量的年变化,并与其他 3 种方式获取的结果进行比较,得出该地区水储量呈现显著的年变化信号。此外,利用 GRACE 卫星获取的区域陆地水储量,结合水量平衡方程能够监测区域蒸发时变量^[60]、计算模拟冰雪径流和寒区冻结地的渗透量^[61]、估算土壤含水量和地下水储量变化量^[15,62-63]。

3.4.3 流域尺度

由于 GRACE 空间分辨率的限制,GRACE 在流域尺度的应用主要集中于面积较大的流域,如 Amazon-Orinoco 流域^[44,64],Mississippi-Ohio 流域^[65]。Yamamoto 等^[66]利用 GRACE 数据估算湄公河、伊诺瓦底江、怒江和湄南河流域的水储量变化,并与数值模型计算结果对比分析,表明面积较小的流域上 GRACE 反演结果与模型结果相差很大,GRACE 较粗的空间分辨率限制了其在小流域上的应用。Han^[64]提出一种提高 GRACE 估算流域尺度水储量结果精度的方法,即用 GRACE 卫星跟踪数据和加速度数据反演重力势差异,导出区域的重力时变量,与传统球谐系数获取结果相比较,该方法能够获取更高空间精度的水储量异常,时间分辨率可达 15 d。通过利用 GRACE 反演 Amazon 流域 2005 年陆地水储量变化,Chen 等^[67]监测到其干旱事件,证实了 GRACE 重力测量卫星监测大尺度区域严重干旱和洪灾事件的潜力,及改进气候和陆表水文模型^[68-70]的能力。

重力测量得到的陆地水储量 TWS(Terrestrial Water Storage)代表的是水储量的垂直集成估算^[71],包括地下水、土壤含水量、地表水、冰雪和生物含水量。获取陆地水储量之后,就能够对各组分进行估

算,如结合水量平衡方程和水文模型估算地下水储量^[72]、土壤含水量^[21-22]、蒸散发^[73-74],以及计算降水—蒸散发差额^[75]、河流流量^[76]等。有学者结合全球陆地数据同化系统 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)^[77]对各组分进行估算也得到理想的结果。

3.5 GRACE 在中国的研究现状

GRACE 卫星数据在国内也得到一些应用,由

于其空间分辨率的限制,目前只局限于对中国整个陆地区域研究,及国内几大典型流域,如长江、海河等。表 2 归纳了国内近年来发表的主要研究。此外中国青藏高原研究所正在开展基于 GRACE 的青藏高原重力变化和冰川冻土变化研究,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所也在进行黑河流域水储量估算研究。与国外同行对比,国内的 GRACE 研究无论深度和广度都还比较欠缺。

表 2 GRACE 在国内的水文应用实例

Table 2 The hydrology applications of GRACE in China

	研究区域	数据时段	主要结论
Moiwo 等 ^[78]	海河流域	2003~2006	GRACE 结果与实测水文值一致,结果可靠
胡小工等 ^[79]	长江流域	2002~2003	水储量周年变化幅度为 3.4 cm 等效水高
汪汉胜 ^[80]	三峡水库	2002~2004	用同化模型值验证 GRACE 结果,说明其监测水储量变化的有效性
邢乐林 ^[81]	中国及其周边地区	2005	监测到中国水储量几个 cm 等效水高变化

4 GRACE 水储量估算的验证方法

GRACE 监测重力变化是相对容易验证的,因为有直接的地面重力监测数据可以对比。比较而言,GRACE 估算水储量则欠缺直接的监测数据进行比对,因为 GRACE 计算得到的水储量变化是空间尺度上的总水储量的变化。不同文献对反演结果设计了不同的验证方案,多数是模型验证的方法,比如采用气候、水文模型模拟结果^[47,57,65,69,82]或者数值模型^[66]进行验证。在水文领域,水文模型已经成为验证 GRACE 精确度的主要方式^[10]。

Kusche 等^[10]利用全球陆地水文模型 WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model)估算结果验证 GRACE 估算的质量,结果表明两者具有较好的一致性。Wahr 等^[45]的研究表明基于 GRACE 的 Bengal 地区和 Mississippi 流域的水储量估算值的振幅和相位与 CPC (Climate Prediction Center) 水文模型模拟值相一致。全球陆面数据同化 GLDAS 被广泛应用于 GRACE 结果的验证,表明 GRACE 卫星数据能够足够精确地监测到较大流域水储量变化量^[39,44,56,58,73,83]和区域水储量变化量^[59]。Neumeier 等^[84]利用 WGHM、LaD (Land Dynamics) 等模型计算重力变化量,以验证 GRACE 卫星数据推算流域蒸散发的能力^[85]。Frappart 等^[86]验证了 GRACE 估算北方地区雪质量时空变化量的能力。Winsemius 等^[87]利用 GRACE 卫星估算 Zambezi 上游的水储量时变量,通过集总模型 LEW (Lumped Elementary Watershed) 验证其结果,并讨论了偏

差来源及提高 GRACE 时空分辨率的措施。Syed 等^[71]比较分析 GRACE 与 GLDAS 的陆地水储量估算值,提出其差别归因于遗漏表面和地下水成分或雪参数化不足。目前已出现应用简单生物圈模型 JMA-SiB (Japan Meteorological Agency - Simple Biosphere) 和耦合水量平衡方法 CWB (the Combined Water Balance)^[88]、漏桶模型 LBM (Leaky-Bucket Model)^[84]、超导重礼仪 SG (Superconducting Gravimeters) 值^[56]等对 GRACE 计算结果进行验证。

5 GRACE 水文应用的主要技术难点

自重力测量卫星 GRACE 提出到其数据应用于现实生活中,一些学者致力于探究 GRACE 卫星数据期望精度和技术难点。结合 GRACE 数据在水文相关领域的实际应用,归纳总结 GRACE 应用中的精度误差源主要有 3 种^[89-91]:① 卫星测量误差;② 信号泄露;③ 反演过程中背景模型应用误差。需要解决的问题还包括混淆效应^[92]、冰后回弹^[93]、球谐系数高阶部分的噪声污染和条带现象^[44]及低阶球谐系数(主要是一阶项的 C_{20} 项精度低)。这些问题在数据处理过程中若不加以考虑,会直接影响 GRACE 反演的精度和可靠性。

5.1 信号泄露

信号泄露指研究区域外的地球物理信号进入研究区域内,或者研究区域内的信号未完全考虑^[94]。它是利用 GRACE 数据研究水文信号时必须考虑的一个问题。引入空间滤波^[46],采用有限球谐系数^[90]

都会引起信号泄露,而陆地、海洋边界的泄露是水储量反演(特别对于小流域)的一个主要误差源。针对该问题,很多学者提出可以采用均值函数^[14,46]、高斯滤波^[95]、最佳平滑核^[96]来减少信号泄露误差,利用数值模拟定量化空间泄露的变化量。Velicogna 等^[93]利用 GRACE 重力场数据分析格陵兰岛质量平衡时,利用全球数据同化系统(GLDAS)^[77]的 Noah 陆表模型估算来自格陵兰岛外部的陆地水文信号污染值,用 CPC 模型^[97]计算水储量泄露值,然后用 GLDAS 和 CPC 估算值之差作为水文泄漏测量的不确定值,同时还用 ECCO 大气环流模型估算来自海洋的污染信号。Wahr 等^[46]提出,通过将陆地区域裁减出来减少陆地水文信号泄露进入海洋,该方法被 Chambers^[98]应用于监测冰融化对于海洋质量的影响。此外,一种数值模拟技术^[99]被广泛用于去除空间泄露及其他处理过程中引入的偏差^[25,29,36,100]。

5.2 冰后回弹

冰后回弹指冰盖消融后地壳逐渐回弹的现象。经过 5~10 a 的时间阶段,这一现象得以显现。冰后回弹对结冰区域影响显著^[51],极地冰川研究中必须考虑冰后回弹影响。GRACE 不能区分格陵兰岛冰雪近期变化引起的重力信号与冰后回弹引起的重力变化信号^[93],冰后回弹会干扰 GRACE 估算冰盖质量变化量。解决方案是利用数值模型、动态模型^[101]去除冰后回弹影响。现在认为最好的冰后回弹模型^[102],不确定性达到 20%。南极地区的冰后回弹模型缺乏北部区域的基础数据^[25](当代的垂直移动率和约束冰荷载史的地球物理证据),这使得冰后回弹模型误差严重影响南极质量估算值精度^[24,103]。一些学者建议利用 ICE-5G 冰雪冰川消失模型^[104]、配置技术^[65,105]模拟冰后回弹对地球重力场球谐系数的影响。2005 年, Velicogna 等^[93]估算格陵兰岛冰损失趋势时,较好地分析了冰后回弹的影响并去除其影响。

利用 GRACE 数据可以改进冰后回弹模型。例如 Paulson^[106]利用 GRACE 和其他地质观测值来确定冰后回弹模型,从而控制上下地幔粘滞度。

5.3 卫星测量误差

卫星测量误差^[46]包括卫星间距离变化率的系统噪声误差、加速度误差、超稳定振荡器误差和轨道误差,GRACE 反演地球重力场的精度由 GRACE 误差决定。随地球重力场球谐系数阶数增加,卫星测量误差增加,可以通过截断阶数和空间平均来减少该误差的影响^[95]。针对局部地区,利用高斯滤波

和最佳平均核两种方法,即能估算任意区域的水储量变化量,又能减少卫星测量误差且使得信号泄露误差在可接受的范围之内^[95]。为改善 GRACE 测量系统精度,还可以考虑利用 PODAAC 和 ISDC 给出的 GRACE 数据产品的内部误差^[91]。

5.4 混淆效应

反演地球时变重力场时,假定海洋潮汐和大气影响是已知的,通常采用模型从 GRACE 观测值中去除大气、海洋潮汐的影响。理论上,如果这些模型是完美的,GRACE 球谐系数中剩余的时变信号只是由陆地水储量变化引起的。实际上大气—海洋去混淆模型(AOD)^[91]存在误差,这将引起错误的潮汐模拟和不正确的卫星轨道的大气扰动,影响反演重力场的精度。海洋模型误差、大气模型误差和地面水质量变化^[107]、GRACE 球谐系数的不一致性^[87]、GRACE 轨道跟踪测量值和地球物理信号时变变化量的综合效应^[108]均会引起混淆效应。混淆效应是个很重要的问题^[107,109],如果没有清楚地模拟轨道,就无法预测混淆影响^[110]。Han 等^[107]通过模拟海洋潮汐、大气和陆地水储量的时变混淆对 GRACE 卫星月轨道造成的扰动来评估实际混淆效应,提出一种定量化 GRACE 重力场中的混淆效应的方法^[111]。Seo 等^[108]用 GRACE 合成数据和地球物理模型来消除与球谐系数相关的混淆误差。

5.5 球谐系数低阶项存在的问题

地球重力场球谐系数低阶部分中的 C11、S11 和 C10 的反演精度影响 GRACE 估算值,在南极地区尤其明显^[100]。GRACE 卫星一般无法提供一阶项球谐系数,个别应用直接忽略了其影响^[112],这用于趋势评价可能不存在问题,但多数研究认为实际应用不应该忽略一阶项系数^[83,113-114],通常采用地球质心季节变化项计算得到的一阶项值代替 GRACE 数据中的系数值^[14,40]。

GRACE 卫星的轨道几何形状对重力场的低阶项不敏感^[45,115],使得其所确定的球谐系数中的低阶项 C₂₀精度相对较低。由地球自转(EOP)和卫星激光测距(SLR)精确测得的 C₂₁、S₂₁和 C₂₀相对 GRACE 数据精确。实际应用中,通常用这些数据替代 GRACE 中相应低阶系数^[83,115],提高计算精度。Chen^[39]在利用 GRACE 卫星数据计算全球海平面变化时,对球谐系数的 C₂₀项进行 4 种不同的处理,对比显示 C₂₀中存在的概率误差对海平面的变化有重要影响,采用 SLR 的 C₂₀或者 EOP 的 C₂₀可以较显著提高精度。然而,为了减小系数 C₂₀本身较大的不确定性,实际应用中

可直接去除 C_{20} 项^[73,85,116]。

5.6 球谐系数高阶系数中的噪声污染

GRACE 高阶球谐系数受噪声干扰很严重^[44-45]。为了抑制噪声影响,需要对 GRACE 数据进行空间平均^[46]或滤波处理^[58,90,95]。早在 1981 年 Jekeli^[117]在地球重力场估计中引入空间平均方法来提高重力场精度,即对球谐函数系数的高阶项部分进行降权处理。之后许多学者进行了相关研究。

目前用来消除高阶系数噪声污染的滤波器很多,如各向异性非对称滤波器(ANS 滤波器)^[118],全球水文模型先验信息的滤波技术^[85,119]等。Swenson 等^[120]发现重力场球谐系数间存在相关性,从而造成条带现象,由此他们提出一种光谱滤波器去除相关误差。为了减少这种相干噪声,可采用两步滤波法^[25,100],近似去相关且各向异性平滑处理^[121]或次序卷积方法^[10]。Swenson 等^[65,95]利用信号变化和空间相关性发展了一种新的优化滤波器;Han 等^[64]发展了基于波谱误差校正的方向滤波。这些滤波器对于去除条带现象都是比较有效的。

然而引进空间滤波(例如高斯滤波),在消减噪声的同时也可能削减有用信号。如何选择滤波半径,使得在减少误差和噪声污染的同时,不损失有效的地球表面质量变化信息,是需要进一步探讨的问题。另外高斯滤波会显著地影响 GRACE 时变重力场估算流域尺度水储量的季节性变化估算值,需要进一步采用数值方法^[112]提高估算精度。Swenson^[58]估算了由于利用滤波器而造成的误差值,建议依据不同流域的特征,如地球物理位置、形状和流域水文信号特征等共同选择适合该研究区的最佳滤波类型及滤波器参数。Werth^[122]评估了在水文领域广泛应用的 6 种不同类型的滤波器,同样建议滤波器的选择应该因时因地而宜。

6 结 语

GRACE 重力卫星数据在多个学科领域得到广泛的应用。本文概括论述了 GRACE 数据集在冰川、海洋、陆地水储量等领域的应用现状,总结归纳了水文应用上的验证方法、面临的技术问题及相应解决方案。

回顾表明,GRACE 卫星在测量极地冰川、高山冰川、海洋水文和陆面水储量研究等方面具有独特的能力,为研究全球、区域或流域水量平衡提供新视点。然而 GRACE 卫星数据的应用也有一些局限性。

(1) 空间分辨率低,适用于全球或较大尺度的区

域或流域。比较合适的空间分辨率为 400 km ^[53]。对于小区域,需要在球谐域和空间域上进行改进,比如在球谐域上采用各向异性高斯滤波器^[123],基于代理信号信噪比的最佳平滑技术^[82],或者空间域上采用 mascon^[124-125]和球面径向基函数(SRBF)^[87]等方法。基于各种模型和数值方法也可望改进空间分辨率,如基于气候模型的带有时变权重的动态流域函数^[90]和一种关于地球重力势能时空变化量的小波分析法^[126-127]。然而如何进一步提升 GRACE 空间分辨率仍然是亟待研究的课题。

(2) 验证和精度评价。目前 GRACE 水文应用的结果验证多是通过与水文或者陆面模型结果对比分析来实现。一些研究结果表明 GRACE 反演结果与水文模型的结果符合较好^[128],但它们的差异也是不容忽视的。另一方面,水文模型本身不能够完全正确地反演出水文变化量。在这种基础之上的比较是存在争议的。同时对于全球水文信号变化缺乏真实而独立的观测,无法正确解释 GRACE 观测得到的水文信号变化量。

GRACE 在全球或区域水文问题上的应用有很多值得探讨的地方,从数据处理技术和实际应用两方面提高数据质量,并进行合适的验证,才能使 GRACE 卫星成为监测全球或者区域水文信号变化独特而有效的技术手段。

伴随第 3 颗重力卫星 GOCE 的发射成功和其数据的公开,利用重力卫星数据进行水文监测将有更大的发展空间。目前已有学者结合 GOCE 和 GRACE 两颗卫星数据得到 240 阶次的 GOCO01S 重力场模型,得到更为准确的重力数据和更好的空间分辨率^[129]。如何进一步结合分辨率更高的 GOCE 与时间序列更长的 GRACE 卫星数据,提高重力反演能力从而得到更为准确的水文信号估算,将成为水文领域 GRACE 应用的研究重点。

参考文献(References):

- [1] Zhou Xuhua, Wu Bin, Peng Bibo, *et al.* Detection of Global Water Storage Variation Using GRACE[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1644-1650. [周旭华, 吴斌, 彭碧波, 等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1644-1650.]
- [2] Houser P R, Shuttleworth W J, Famiglietti J S, *et al.* Integration of Soil Moisture Remote Sensing and Hydrologic Modeling Using Data Assimilation[J]. Water Resources Research, 1998, 34(12): 3405-3420.
- [3] Milly P, Shmakin A B. Global Modeling of Land Water and Energy Balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) Model

- [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3: 283-299.
- [4] Koblinsky C J, Clarke R T, Brenner A C, *et al.* Measurement of River Level Variations with Satellite Altimetry[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(6): 1839-1848.
- [5] Schmugge T J, Kustas W P, Ritchie J C, *et al.* Remote Sensing in Hydrology[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8-12): 1367-1385.
- [6] Rignot E, Thomas R H. Mass Balance of Polar Ice Sheets[J]. *Science*, 2002, 297(5586): 1502-1506. DOI: 10. 1126/Science. 1073888.
- [7] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, *et al.* The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): L9607.
- [8] Lemoine J M, Bruinsma S, Loyer S, *et al.* Temporal Gravity Field Models Inferred from GRACE Data[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1620-1629.
- [9] Chambers D P. Evaluation of New GRACE Time-variable Gravity Data over the Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17): 1-5.
- [10] Kusche J, Schmidt R, Petrovic S, *et al.* Decorrelated GRACE Time-variable Gravity Solutions by GFZ, and Their Validation Using a Hydrological Model[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(10): 903-913.
- [11] Bettadpur S. UTCSR Level-2 Processing Standards Document for Product Release 0004, GRACE 327-742 (CSR-GR-03-03) [Z/OL]. Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Austin, 2007. <http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php?name=UpDownload>.
- [12] Flechtner F. GFZ Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0004, GRACE 327-743 (GR-GFZ-STD-001) [Z]. GeoForschungsZentrum Potsdam, Department 1: Geodesy and Remote Sensing, Germany, 2007. <http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php?name=UpDownload>.
- [13] Chen J L, Wilson C R. Low Degree Gravity Changes from GRACE, Earth Rotation, Geophysical Models, and Satellite Laser Ranging[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B6402. DOI: 10. 1029/2007JB005397.
- [14] Willis J K, Chambers D P, Nerem R S. Assessing the Globally Averaged Sea Level Budget on Seasonal to Interannual Timescales[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C6): C6015.
- [15] Strassberg G, Scanlon B R, Chambers D. Evaluation of Groundwater Storage Monitoring with the GRACE Satellite: Case Study of the High Plains Aquifer, Central United States[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45: W5410. DOI: 10. 1029/2008WR006892.
- [16] Schmidt R, Flechtner F, Meyer U, *et al.* Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites[J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29(4): 319-334.
- [17] Schmidt R, Petrovic S, Güntner A, *et al.* Periodic Components of Water Storage Changes from GRACE and Global Hydrology Models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B8): B8419. DOI: 10. 1029/2007JB005363.
- [18] Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, *et al.* Sea Level Budget Over 2003-2008: A Reevaluation from GRACE Space Gravimetry, Satellite Altimetry and Argo[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1-2): 83-88. DOI: 10. 1016/j. gloplacha. 2008. 10. 004.
- [19] Lombard A, Garcia D, Ramillien G, *et al.* Estimation of Steric Sea Level Variations from Combined GRACE and Jason-1 Data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254(1-2): 194-202.
- [20] Zhu Guangbin. Investigations on Time-variations of Continental Water Storage with GRACE Gravity Models[D]. Chinese Academy of Surveying & Mapping, 2007: 1-69. [朱广彬. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征[D]. 中国测绘科学研究院, 2007: 1-69.]
- [21] Rodell M, Famiglietti J S. Detectability of Variations in Continental Water Storage from Satellite Observations of the Time Dependent Gravity Field[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(9): 2705-2723.
- [22] 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.
- [23] Rodell M, Famiglietti J S. The Potential for Satellite-based Monitoring of Groundwater Storage Changes Using GRACE: The High Plains Aquifer, Central US[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1-4): 245-256.
- [24] Velicogna I, Wahr J. Measurements of Time-variable Gravity Show Mass Loss in Antarctica[J]. *Science*, 2006, 311(5768): 1754-1756. DOI: 10. 1126/Science. 1123785.
- [25] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, *et al.* Accelerated Antarctic Ice Loss from Satellite Gravity Measurements[J]. *Nature Geoscience*, 2009: 1-4. DOI: 10. 1038/NGEO694.
- [26] Velicogna I, Wahr J. Acceleration of Greenland Ice Mass Loss in Spring 2004[J]. *Nature*, 2006, 443(7109): 329-331.
- [27] Slobbe D C, Ditmar P, Lindenberg R C. Estimating the Rates of Mass Change, Ice Volume Change and Snow Volume Change in Greenland from ICESat and GRACE Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 176(1): 95-106.
- [28] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet[J]. *Science*, 2006, 313: 1958-1960. DOI: 10. 1126/science. 1129007.
- [29] Ramillien G, Lombard A, Cazenave A, *et al.* Interannual Variations of the Mass Balance of the Antarctica and Greenland Ice Sheets from GRACE[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 53(3): 198-208.
- [30] Baur O, Kuhn M, Featherstone W E. GRACE-derived Linear and Non-linear Secular Mass Variations over Greenland[R]. Stuttgart, Germany: Institute of Geodesy, University of Stuttgart, 2010, 1-5.
- [31] Syed T H, Famiglietti J S, Zlotnicki V, *et al.* Contemporary

- Estimates of Pan-Arctic Freshwater Discharge from GRACE and Reanalysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L19404. DOI:10.1029/2007GL031254.
- [32] Lemke P, Ren J, Alley R B, *et al.* Observations, Changes in Snow, Ice and Frozen Ground[C]//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 337-383.
- [33] Chen J L, Tapley B D, Wilson C R. Alaskan Mountain Glacial Melting Observed by Satellite Gravimetry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(1-2): 368-378.
- [34] Luthcke S B, Arendt A A, Rowlands D D, *et al.* Recent Glacier Mass Changes in the Gulf of Alaska Region from GRACE Mascon Solutions[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(188): 767-777.
- [35] Matsuo K, Heki K. Time-variable Ice Loss in Asian High Mountains from Satellite Gravimetry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290: 30-36. DOI:10.1016/j.epsl.2009.11.053.
- [36] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* Patagonia Icefield Melting Observed by Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(22): L22501.
- [37] Woodworth P L, Gregory J M. Benefits of GRACE and GOCE to Sea Level Studies[J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1): 307-317.
- [38] Cazenave A, Cabanes C, Dominh K, *et al.* Present-day Sea Level Change: Observations and Causes[J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1): 131-144.
- [39] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* Seasonal Global Mean Sea Level Change from Satellite Altimeter, GRACE, and Geophysical Models[J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 79(9): 532-539.
- [40] Leuliette E W, Miller L. Closing the Sea Level Rise Budget with Altimetry, Argo, and GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(4): L4608.
- [41] Peltier W R. Closure of the Budget of Global Sea Level Rise over the GRACE Era: The Importance and Magnitudes of the Required Corrections for Global Glacial Isostatic Adjustment[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(17-18): 1658-1674.
- [42] Llovel W, Becker M, Cazenave A, *et al.* Global Land Water Storage Change from GRACE over 2002-2009; Inference on Sea Level[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(3): 179-188.
- [43] Quinn K J, Ponte R M. Uncertainty in Ocean Mass Trends from GRACE[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(2): 762-768. DOI:10.1111/j.1365-246X.2010.04508.x.
- [44] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, *et al.* GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505. DOI:10.1126/science.1099192.
- [45] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, *et al.* Time-variable Gravity from GRACE: First Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): L11501. DOI:10.1029/2004GL019779.
- [46] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and their Possible Detection Using GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B12): 30205-30230.
- [47] Chen J L, Wilson C R, Famiglietti J S, *et al.* Spatial Sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-variable Gravity Observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B8408.
- [48] Syed T H, Famiglietti J S, Chen J, *et al.* Total Basin Discharge for the Amazon and Mississippi River Basins from GRACE and a Land-atmosphere Water Balance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L24404. DOI:10.1029/2005GL024851.
- [49] Tamisiea M E, Leuliette E W, Davis J L, *et al.* Constraining Hydrological and Cryospheric Mass Flux in Southeastern Alaska Using Space-based Gravity Measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(20): L20501.
- [50] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, *et al.* GRACE Observations of Changes in Continental Water Storage[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1-2): 112-126.
- [51] Bettadpur S. GRACE Level-2 Gravity Field Product User Handbook[R]. Austin: Center for Space Research, The University of Texas at Austin, 2003: 1-734.
- [52] Andersen O B, Hinderer J. Global Inter-annual Gravity Changes from GRACE: Early Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(1): L1402. DOI:10.1029/2004GL020948.
- [53] Rowlands D D, Luthcke S B, Klosko S M, *et al.* Resolving Mass Flux at High Spatial and Temporal Resolution Using GRACE Intersatellite Measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): L4310.
- [54] Güntner A. Improvement of Global Hydrological Models Using GRACE Data[J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29(4): 375-397.
- [55] Niu G Y, Seo K W, Yang Z L, *et al.* Retrieving Snow Mass from GRACE Terrestrial Water Storage Change with a Land Surface Model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L15704. DOI:10.1029/2007GL030413.
- [56] Andersen O B, Seneviratne S I, Hinderer J, *et al.* GRACE-derived Terrestrial Water Storage Depletion Associated with the 2003 European Heat Wave[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L18405. DOI:10.1029/2005GL023574.
- [57] Strassberg G, Scanlon B R, Rodell M. Comparison of Seasonal Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with Groundwater-level Measurements from the High Plains Aquifer (USA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(14): L14402.
- [58] Swenson S, Yeh P J, 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): L16401. DOI:10.1029/2006GL026962.
- [59] Andersen O, Berry P, Freeman J, *et al.* Satellite Altimetry and

- GRACE Gravimetry for Studies of Annual Water Storage Variations in Bangladesh[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 2008, 19(1-2): 47-52. DOI: 10. 3319/TAO. 2008. 19. 1-2. 47(SA).
- [60] Ramillien G, Frappart F, Güntner A, *et al.* Time-variations of the Regional Evapotranspiration Rate from GRACE Satellite Gravimetry [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42; W10403. DOI:10. 1029/2005WR004331.
- [61] Niu G, Yang Z. Effects of Frozen Soil on Snowmelt Runoff and Soil Water Storage at a Continental Scale[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 937-952.
- [62] Yeh P, 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; W12203.
- [63] Swenson S, Famiglietti J, Basara J, *et al.* Estimating Profile Soil Moisture and Groundwater Variations Using GRACE and Oklahoma Mesonet Soil Moisture Data[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(1): W1413.
- [64] Han S C, Shum C K, Jekeli C, *et al.* Improved Estimation of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(L07302). DOI: 10. 1029/2005GL022382.
- [65] Swenson S, Wahr J, Milly P. Estimated Accuracies of Regional Water Storage Variations Inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(8): 11. DOI: 10. 1029/2002WR001808.
- [66] Yamamoto K, Fukuda Y, Nakaegawa T, *et al.* Landwater Variation in Four Major River Basins of the Indochina Peninsula as Revealed by GRACE[J]. *Earth, Planets and Space*, 2007, 59(4): 193-200.
- [67] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* 2005 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by GRACE and Estimated by Climate Models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114; B5404. DOI: 10. 1029/2008JB006056.
- [68] Niu G Y, Yang Z L. Assessing a Land Surface Model's Improvements with GRACE Estimates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33; L74017.
- [69] Swenson S C, Milly P. Climate Model Biases in Seasonality of Continental Water Storage Revealed by Satellite Gravimetry [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42; W3201.
- [70] Yirdaw S Z, Snelgrove K R, Seglenieks F R, *et al.* Assessment of the WATCLASS Hydrological Model Result of the Mackenzie River Basin Using the GRACE Satellite Total Water Storage Measurement [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(23): 3391-3400.
- [71] Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, *et al.* Analysis of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE and GLDAS[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44; W2433.
- [72] 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.
- [73] Rodell M, Famiglietti J S, Chen J, *et al.* Basin Scale Estimates of Evapotranspiration Using GRACE and Other Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31; L20504.
- [74] Boronina A, Ramillien G. Application of AVHRR Imagery and GRACE Measurements for Calculation of Actual Evapotranspiration over the Quaternary Aquifer (Lake Chad Basin) and Validation of Groundwater Models[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 348(1-2): 98-109.
- [75] Swenson S, Wahr J. Estimating Large-scale Precipitation Minus Evapotranspiration from GRACE Satellite Gravity Measurements[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7; 252-270.
- [76] Syed T H, Famiglietti J S, Chambers D P. GRACE-based Estimates of Terrestrial Freshwater Discharge from Basin to Continental Scales [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10; 22-40.
- [77] Rodell M, Houser P R, Jambor U, *et al.* The Global Land Data Assimilation System[J]. *American Meteorological Society*, 2004; 381-394. DOI: 10. 1175/BAMS-85-3-381.
- [78] Moiwo J P, Yang Y, Li H, *et al.* Comparison of GRACE with in Situ Hydrological Measurement Data Shows Storage Depletion in Hai River Basin, Northern China[J]. *Water SA*, 2009, 35(5): 663-670.
- [79] Hu Xiaogong, Chen Jianli, Zhou Yonghong, *et al.* Seasonal Water Storage Change of the Yangtze River Basin Detected by GRACE[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(3): 225-232. [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.]
- [80] Wang Hansheng, Wang Zhiyong, Yuan Xudong. Water Storage Changes in Three Gorges Water Systems Area Inferred from GRACE Time-variable Gravity Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3): 730-736. [汪汉胜, 王志勇, 袁旭东. 基于 GRACE 时变重力场的三峡水库补给水系水储量变化[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 730-736.]
- [81] Xing Lelin, Li Hui, Liu Dongzhi, *et al.* Monthly Water Distribution in China and Its Adjacent Area from Time-variable Gravity Field of GRACE[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(4): 35-37. [邢乐林, 李辉, 刘冬至, 等. 利用 GRACE 时变重力场监测中国及其周边地区的水储量月变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(4): 35-37.]
- [82] Chen J L, Wilson C R, Seo K W. Optimized Smoothing of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-variable Gravity Observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111; B6408. DOI: 10. 1029/2005JB004064.
- [83] 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; L14405. DOI: 10. 1029/2005GL022964.
- [84] Neumeier J, Barthelmes F, Dierks O, *et al.* Combination of Temporal Gravity Variations Resulting from Superconducting Gravimeter (SG) Recordings, GRACE Satellite Observations

- and Global Hydrology Models[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 79(10):573-585.
- [85] Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, *et al.* Time Variations of Land Water Storage from an Inversion of 2 Years of GRACE Geoids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(2005):283-301. DOI:10.1016/j.epsl.2005.04.005.
- [86] Frappart F, Ramillien G, Biancamaria S, *et al.* Evolution of High-latitude Snow Mass Derived from the GRACE Gravimetry Mission (2002-2004)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33:L2501.
- [87] Winsemius H C, Savenije H, Van de Giesen N C, *et al.* Assessment of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Temporal Signature over the Upper Zambezi[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12):W12201.
- [88] Nakaegawa T. Detectability Assessment of Interannual Variations in Terrestrial Water Storage from Satellite Gravimetry Using an Offline Land Surface Model Simulation[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(6):1347-1364.
- [89] Ramillien G, Famiglietti J S, Wahr J. Detection of Continental Hydrology and Glaciology Signals from GRACE: A Review [J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29(4):361-374.
- [90] Seo K W, Wilson C R. Simulated Estimation of Hydrological Loads from GRACE[J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 78(7):442-456.
- [91] Seo K W, Wilson C R, Famiglietti J S, *et al.* Terrestrial Water Mass Load Changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42:W5417. DOI:10.1029/2005WR004255.
- [92] 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.
- [93] Velicogna I, Wahr J. Greenland Mass Balance from GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32:L18505. DOI:10.1029/2005GL023955.
- [94] Baur O, Kuhn M, Featherstone W E. GRACE-derived Ice-mass Variations over Greenland by Accounting for Leakage Effects [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114:B6407. DOI:10.1029/2008JB006239.
- [95] Swenson S, Wahr J. Methods for Inferring Regional Surface-mass Anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Measurements of Time-variable Gravity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B9):2193. DOI:10.1029/2001JB000576.
- [96] Swenson S, Wahr J. Monitoring Changes in Continental Water Storage with GRACE[J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1):345-354.
- [97] Fan Y, Van den Dool H, Mitchell K, *et al.* A 51-year Reanalysis of the US Land-surface Hydrology[J]. *GEWEX News*, 2003, 13(2):6-10.
- [98] Chambers D P, Tamisiea M E, Nerem R S, *et al.* Effects of Ice Melting on GRACE Observations of Ocean Mass Trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5):L5610.
- [99] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, *et al.* Antarctic Mass Rates from GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(11):L11502.
- [100] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* Antarctic Regional Ice Loss Rates from GRACE[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(1-2):140-148.
- [101] Velicogna I, Wahr J. Postglacial Rebound and Earth's Viscosity Structure from GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(0):1-12. DOI:10.1029/2001JB001735.
- [102] Tamisiea M E, Mitrovica J X, Davis J L. GRACE Gravity Data Constrain Ancient Ice Geometries and Continental Dynamics over Laurentia[J]. *Science*, 2007, 316(5826):881-883. DOI:10.1126/Science.1137157.
- [103] Barletta V R, Sabadini R, Bordoni A. Isolating the PGR Signal in the GRACE Data: Impact on Mass Balance Estimates in Antarctica and Greenland[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(1):18-30.
- [104] Peltier W R. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE[J]. *Annual Review of Earth and Planet Sciences*, 2004, 111-149. DOI:10.1146/Annurev. Earth. 32. 082503. 144359.
- [105] Wahr J, van Dam T, Larson K, *et al.* Geodetic Measurements in Greenland and Their Implications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(16):567-581.
- [106] Paulson A, Zhong S, Wahr J. Limitations on the Inversion for Mantle Viscosity from Postglacial Rebound[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 168(3):1195-1209.
- [107] Han S C, Jekeli C, Shum C K. Time-variable Aliasing Effects of Ocean Tides, Atmosphere, and Continental Water Mass on Monthly Mean GRACE Gravity Field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B4403. DOI: 10.1029/2003JB002501.
- [108] Seo K W, Wilson C R, Chen J, *et al.* GRACE's Spatial Aliasing Error[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(1):41-48.
- [109] Thompson P F, Bettadpur S V, Tapley B D. Impact of Short Period, Non-tidal, Temporal Mass Variability on GRACE Gravity Estimates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6):L6619. DOI:10.1029/2003GL019285.
- [110] Velicogna I, Wahr J, Van den Dool H. Can Surface Pressure be Used to Remove Atmospheric Contributions from GRACE Data with Sufficient Accuracy to Recover Hydrological Signals? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B8):16415.
- [111] Han S C. Efficient Determination of Global Gravity Field from Satellite-to-Satellite Tracking Mission [J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2004, 88(1):69-102.
- [112] Chen J L, Wilson C R, Famiglietti J S, *et al.* Attenuation Effect on Seasonal Basin-scale Water Storage Changes from GRACE Time-variable Gravity [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(4):237-245.
- [113] Chambers D P, Wahr J, Nerem R S. Preliminary Observations of Global Ocean Mass Variations with GRACE[J]. *Ge-*

- ophysical Research Letters,2004,31(13):L13310.
- [114] Chambers D P. Observing Seasonal Steric Sea Level Variations with GRACE and Satellite Altimetry[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111; C3010. DOI: 10. 1029/2005JC002914.
- [115] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* Low Degree Gravitational Changes from GRACE: Validation and Interpretation[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31; L22607. DOI:10. 1029/2004GL021670.
- [116] Ngo-Duc T, Laval K, Ramillien G, *et al.* Validation of the Land Water Storage Simulated by Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) with Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Data [J]. Water Resources Research, 2007, 43; W4427. DOI: 10. 1029/2006WR004941.
- [117] Jekeli C. Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field[R]. Department of Geodetic Science and Survey, Ohio State University, Columbus, 1981.
- [118] Klees R, Revtova E A, Gunter B C, *et al.* The Design of an Optimal Filter for Monthly GRACE Gravity Models[J]. Geophysical Journal International, 2008, 175(2); 417-432. DOI: 10. 1111/j. 1365-246X. 2008. 03922. x.
- [119] Ramillien G, Cazenave A, Brunau O. Global Time Variations of Hydrological Signals from GRACE Satellite Gravimetry[J]. Geophysical Journal International, 2004, 158(3); 813-826.
- [120] Swenson S, Wahr J. Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33; L8402.
- [121] Kusche J. Approximate Decorrelation and Non-isotropic Smoothing of Time-variable GRACE-type Gravity Field Models [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(11); 733-749.
- [122] Werth S, Güntner A, Schmidt R, *et al.* Evaluation of GRACE Filter Tools from a Hydrological Perspective[J]. Geophysical Journal International, 2009, 179(3); 1499-1515.
- [123] Han S C, Shum C K, Jekeli C, *et al.* Non-isotropic Filtering of GRACE Temporal Gravity for Geophysical Signal Enhancement [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163(1); 18-25.
- [124] Han S C, Rowlands D D, Luthcke S B, *et al.* Localized Analysis of Satellite Tracking Data for Studying Time-variable Earth's Gravity Fields[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(B6); B6401.
- [125] Luthcke S B, Zwally H J, Abdalati W, *et al.* Recent Greenland Ice Mass Loss by Drainage System from Satellite Gravity Observations[J]. Science, 2006, 314 (5803); 1286-1289. DOI:10. 1126/Science. 1130776.
- [126] Fengler M J, Freedon W, Kohlhaas A, *et al.* Wavelet Modeling of Regional and Temporal Variations of the Earth's Gravitational Potential Observed by GRACE[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81 (1); 5-15. DOI:10. 1007/s00190-006-0040-1.
- [127] Nutz H, Wolf K. Time-space Multiscale Analysis by Use of Tensor Product Wavelets and Its Application to Hydrology and GRACE Data [J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 2008, 52(3); 321-339.
- [128] Klees R, Liu X, Wittwer T, *et al.* A Comparison of Global and Regional GRACE Models for Land Hydrology[J]. Surveys in Geophysics, 2008, 29 (4); 335-359. DOI: 10. 1007/s10712-008-9049-8.
- [129] Pail R, Goiginger H, Schuh W D, *et al.* Combined Satellite Gravity Field Model GOCO01S Derived from GOCE and GRACE[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(20); L20314.

Applications of GRACE in Hydrology: A Review

Cao Yanping, Nan Zhuotong

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite has provided a new means to study the deep earth structure and to keep track of mass changes of earth surface. In this paper, applications of GRACE data in the scope of hydrology are summarized on the basis of extensive reviews of relevant literature. This paper starts with a brief introduction of the common available scientific GRACE data sets. Applications in estimating oceanic and terrestrial water storage, as well as those of polar and alpine glaciers are then reviewed, and the approaches to validate the GRACE estimates are followed. Technical issues encountered in hydrological applications and their possible solutions are examined in details. We concluded that it is critically important and valuable to employ the GRACE satellite data to monitor global or regional scale water balance to meet the challenges of global/regional hydrology monitoring and research.

Key words: GRACE-gravity satellite; Hydrological application; Terrestrial water storage estimate