

# GRACE 重力卫星监测新疆干旱特征<sup>\*</sup>

曹艳萍<sup>1, 2, 3</sup>, 南卓铜<sup>1</sup>, 程国栋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730000)

**提 要:** 新疆地处亚欧大陆中部, 远离海洋, 对全球变化响应敏感。文中利用 GRACE 重力卫星数据反演得到整个新疆地区的区域月均水储量变化量, 基于该水储量变化数据, 得到区域旱涝指标 - 相对水储量指数。利用相对水储量指数对新疆 2002 年 8 月 - 2013 年 7 月的干旱情况进行了分析, 研究结果表明: GRACE 方法反演的干旱特征与标准化降水指数(SPI)的结果基本一致; 新疆 2002 年 8 月 - 2013 年 7 月期间共发生了 7 次干旱事件, 其中 2008. 04 ~ 2009. 12 干旱程度最严重, 与近十年新疆干旱灾害实际情况相符合。GRACE 为干旱监测提供了一种新的方法, 具有良好的应用前景。

**关键词:** GRACE; 水储量; 相对水储量指数; 新疆; 干旱

中图分类号: P426. 616

文献标识码: A

干旱是全球最常见的自然灾害之一, 其具有出现频率高、持续时间长、波及范围广的特点<sup>[1, 2]</sup>。干旱的频繁发生和长期持续不仅会导致工、农业生产巨大损失, 也会造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多不利影响<sup>[3]</sup>。因此, 迫切需要对干旱进行有效的监测和预测。

传统的干旱监测方法多是基于站点的气象、水文等数据, 计算降雨量距平百分率(Pa)、标准化降水指数(SPI)、Palemer 干旱指数(PDSI)、作物水分指标(CMI)、地表供水指数(SWSI)等干旱指数。但是由于区域自然环境的空间差异及站点数据的稀少, 通过插值得到的干旱空间分布特征, 精度并不是很高。另外, 水储量主要包括地表水、地下水、土壤水、雪水当量、生物水五类, 多数的干旱指标仅仅是利用单一或者几个变量(如降水、土壤水、径流等)计算所得, 不能反应区域水储量的真正变化情况, 难以准确反映干旱灾害的实际情况。

2002 年 3 月发射的重力反演与气候实验卫星(GRACE)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, 同时也为反演陆地水储量变化提供了新方法。基于 GRACE 反演的水储量变化信息, 可以对区域的干旱特征进行监测, 并在局部地区得到了验证。Yirdaw 等利用 GRACE 反演的水储量数据, 提出了新的干旱指标 - 总水储量亏损系数(TSDI), 分析了加拿大草原的干旱情况<sup>[4]</sup>。Leblanc 等基于 GRACE 反演的水储量, 并结合站点和模拟的水文数据, 研究了澳大利亚东南部 21 世纪早期的多年干旱情况<sup>[5]</sup>。Chen 利用 GRACE 反演和气候模拟方法, 研究了亚马逊流域 2005 年干旱期间的水储量变化特征<sup>[6]</sup>。李琼等利用 GRACE 监测到 2009 年秋至 2010 年春中国西南陆地水储量均呈现明显减少, 与该时段云贵川三省的干旱事件相一致<sup>[7]</sup>。

新疆深居中纬度欧亚大陆腹地, 远离海洋, 受水分来源限制, 降水稀少且蒸发强烈, 属于典型的干旱气候区和生态脆弱区<sup>[8]</sup>。干旱缺水是新疆的主要环境特征, 而由其引发的干旱灾害称为新疆最为严重的自然灾害<sup>[9]</sup>。文中利用 GRACE 反演的新疆 2002. 08 - 2013. 07 水储量数据, 研究了该区 12 年来的干旱情况, 并对该监测干旱方法的适用性进行了评估。

\* 收稿日期: 2014 - 6 - 19; 修回日期: 2014 - 8 - 20。

基金项目: 干旱气象科学研究基金项目(IAM201215); 国家自然科学基金(91125006)资助。

作者简介: 曹艳萍(1986 -), 女, 汉族, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事遥感在寒区旱区水文方面的研究。Email: caoy@lzb. ac. cn

通讯作者: 南卓铜(1977 -), 男, 汉族, 浙江乐清人, 博士研究生导师, 主要研究兴趣包括水文建模、决策支持系统和科学数据共享。Email: nztong@lzb. ac. cn

### 1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处亚欧大陆中部,位于中国西北边陲,地理坐标为  $34^{\circ}25' - 49^{\circ}10'N$ 、 $73^{\circ}40' - 96^{\circ}23'$ ,总面积 166 万  $km^2$ ,占全国陆地总面积的六分之一<sup>[10]</sup>。新疆的地形地貌可以概括为“三山夹两盆”,北面是阿尔泰山,南面是昆仑山,天山横贯中部(图 1)。塔里木盆地位于天山与昆仑山之间,面积 53 万  $km^2$ ,而盆地内为面积 33 万  $km^2$  的中国最大的流动沙漠—塔克拉玛干沙漠。准噶尔盆地面积约 38 万  $km^2$ ,位于阿尔泰山与天山之间;中部的古尔班通古特沙漠面积约 4.8 万  $km^2$ 。在天山东部和西部,还有被称为“火洲”的吐鲁番盆地和被誉“塞外江南”的伊犁谷地。新疆土地资源丰富,全区农林牧可直接利用土地面积 10 亿亩,占全国农林牧宜用土地面积的十分之一以上。

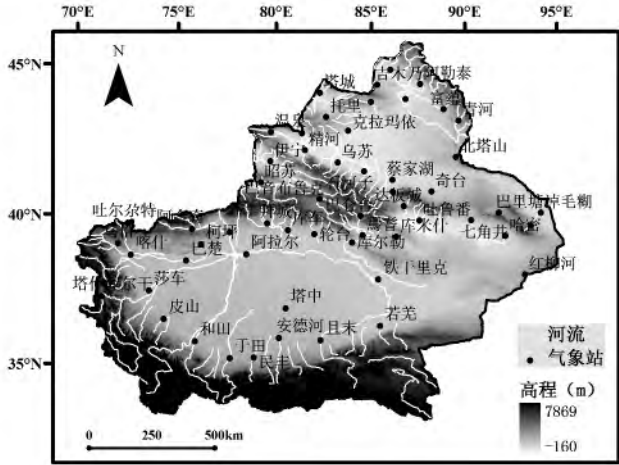


图 1 新疆地形、水系及气象站点位置图  
Figure 1 Terrains and river of Xinjiang and the locations of the meteorological stations

新疆远离海洋,属于典型的温带大陆型干旱气候,年均降水量仅有 145mm;南疆年平均气温为  $7 \sim 14^{\circ}C$ ,北疆为  $-4 \sim 9^{\circ}C$ 。年蒸发量 1500 - 4000mm,年太阳能总辐射量  $5000 - 6490 MJ/m^2$ ,年日照时数为 2500 - 3500 小时。境内有大小河流 570 多条,多年平均地表水年径流量  $884 \times 10^8 m^3$ ;平原区地下水可开采量  $153 \times 10^8 m^3/a$ ;冰川储量  $2.83 \times 10^{12} m^3$ 。

### 2 研究方法

#### 2.1 GRACE 重力卫星数据

采用 UTCSR 数据中心公布的 GRACE RL05 Level 2 数据,时间跨度为 2002 年 8 月至 2013 年 7 月,其中 2003 年 6 月 2011 年 1 月、6 月 2012 年 5 月、10 月 2013 年 3 月数据缺失。基于 GRACE 重力卫星数据反演陆地水储量变化原理<sup>[11][12]</sup>,得到新疆水储量变化量。

利用 Wahr<sup>[13]</sup>的方法,从 GRACE 球谐系数中去除趋势、年周期、半年周期信号和 161 天潮汐效应,得到 GRACE 球谐系数的不确定性,进而得出 GRACE 反演的水储量误差(图 2 中的误差棒)。

#### 2.2 GLDAS 数据

采用 GLDAS Noah 模型的水储量验证 GRACE 反演得到的新疆水储量结果精度。文中的 GLDAS Noah 模型的水储量的空间分辨率为  $0.25^{\circ}$ ,时间分辨率一个月,其包括土壤水和雪水当量两部分。为与 GRACE 数据进行比对分析,需要对 GLDAS Noah 水储量变化量数据进行预处理。首先将格网上的水储量变化量数据展开为球面上的球谐系数<sup>[14]</sup>;之后将这些球谐系数截取至 60 阶次;对截取阶次后的球谐系数进行去相关与扇形滤波处理;最后再反演为格网上的水储量变化量数据。

#### 2.3 气象站点数据

降水资料由中国气象科学数据共享服务网提供,整个新疆地区共 54 个气象站点(图 1)。此外,文中基于 54 个气象站点的降水数据,得到各个站点在 1963.01 - 2013.07 期间的标准化降水指标(SPI)<sup>[15]</sup>时序分布,结合 SPI 值反映的干旱灾害情况,对 GRACE 干旱灾害结果进行评估。

#### 2.4 相对水储量指数

基于 GRACE 水储量变化量,得到相对水储量指数,利用该指数反映干旱特征。相对水储量指数被定义为实际月水储量变化量相对于月均水储量变化量的差值,当相对水储量指数连续三个或者以上月份为负值,就认为该时段发生干旱事件。Thomas 等<sup>[16]</sup>采用该指数反映了亚马逊流域、赞比西河流域、美国东南部地区及美国的德克萨斯州近十年发生的干旱灾害情况。

GRACE 反演的新疆 2002 年 8 月 - 2013 年 7 月,共计 132 个月的水储量数据,对应月份的数据求平均,得到 12 个月各自的水储量变化量的平均状态。在此基础上,2002 年 8 月 - 2013 年 7 月期间各月的水储量变化量减去对应月份的水储量变化量的平均状态,就得到了该区域的相对水储量指数(单位为 mm);

当结果为负值时,说明本区水储量少于水储量的平均状态,处于亏损状态;当结果为正值时,说明本区水储量多于水储量的平均状态;当结果为 0 时,表示本区水储量和水储量平均状态相当。

### 3 结果与分析

#### 3.1 GRACE 数据和 GLDAS 数据对比

基于 GRACE 反演水储量监测干旱灾害前,需要对其精度进行验证分析。文中采用 GLDAS 水文模式的水储量变化量作为参考量,从变化相位及振幅两方面对其进行对比分析。

从图 2 可以看出,GRACE 与 GLDAS 反演的新疆区域平均水储量变化趋势基本一致,2002 - 2004 年水储量逐渐减小;2005 - 2006 年水储量恢复到较高水平;2007 - 2009 连续三年水储量值较小;2010 年以后水储量逐渐恢复。此外,GRACE 和 GLDAS 所得的水储量均有明显的季节变化,夏季水储量处于峰值,而秋季或者冬季水储量处于谷值,谷值出现的月份比较分散。对两组数据进行简单相关性分析,其相关系数为 0.75 ( $p < 0.01$ ),说明 GRACE 与 GLDAS 的水储量变化数据的相位变化显著相关。GRACE 反演的水储量变化幅度为 -38.1 ~ 41.8mm;而 GLDAS 反演的水储量变化幅度小的多,为 -17.1 ~ 20.6mm,这可能是因为 GLDAS 反演的水储量仅仅包括 2m 深的土壤水和雪水当量,而不包括地下水及地表水。

如图 2 中所示,GRACE 反演的新疆地区的水储量变化量的均方差为 12.2mm,在可接受范围内。

#### 3.2 相对水储量指数的时序变化

相对水储量指数小于 0 时,代表区域干旱,值越小,干旱程度越严重。利用 54 个气象站点数据,采用 MicroMet 方法进行插值,得到新疆整个区域的降水量。从图 3 可以看出,相对水储量指数时序分布与降水量的变化趋势基本一致,当降水量多的时候,相对水储量指数值多大于 0,且降水量越多,相对水储量指数值越大;当降水量少的时候,相对水储量指数小于 0,处于水储量亏损状态。例如 2008 - 2009 年期间,降水量很少,该阶段的相对水储量指数大部分为负值,值很小,说明干旱比较严重。但是由于影响 GRACE 水储量的变量除了降水,还有地表径流、地下水和蒸发等,且水储量变化对降水的响应需要一定时间,因此个别时段的降水量和相对水储量指数分布趋势并不一致。例如 2007 年 7 月前后,降雨量很大,但是相对水储量指数依旧为负值。

McKee<sup>[15]</sup>提出了基于降水量的标准化降水指数(SPI),该指标能较好的反映不同时间尺度和区域的干旱程度。文中首先计算了新疆 54 个气象站 3 个月时间尺度的标准化降水指数(SPI3),依据 SPI 干旱等级划分标准(表 1),确定各月干旱的站点,然后计算各月发生干旱事件的站点占全部气象站点的频率。

从图 4 中可以看出,相对水储量指数和 SPI3 反映的干旱站点频率变

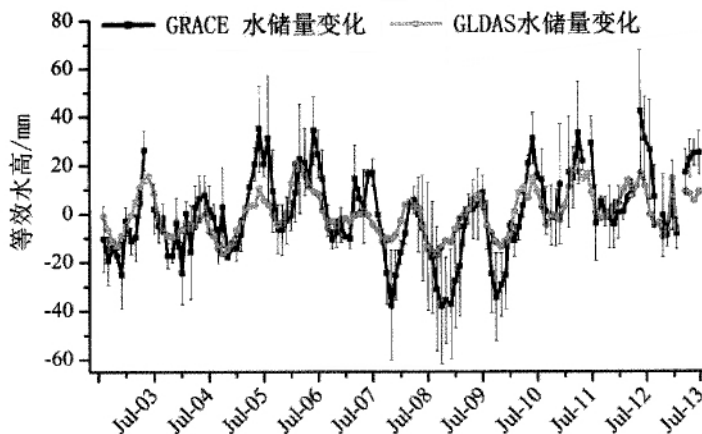


图 2 GRACE 反演与 GLDAS 水文模式的水储量变化对比  
Figure 2 Terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS

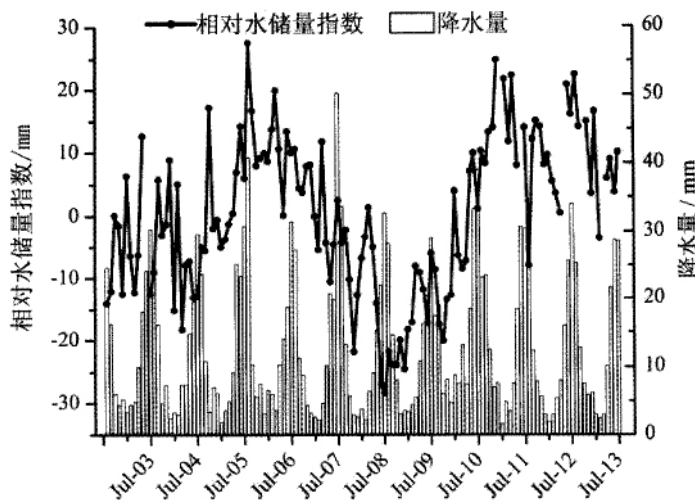


图 3 相对水储量指数和降水的对比  
Figure 3 GRACE - based relative water storage index and precipitation

表 1 基于 SPI 的干旱等级划分  
Table 1 Drought classification based on the SPI magnitude

干旱分级	SPI 值
轻旱	-1.0 < SPI ≤ -0.5
中旱	-1.5 < SPI ≤ -1
重旱	-2.0 < SPI ≤ -1.5
特旱	SPI ≤ -2.00

化趋势大致相反。当相对水储量指数为负值且数值很小时, SPI3 反映的整个新疆地区发生干旱事件的站点频率高; 当相对水储量指数为正值且数值较大时, SPI3 反映的发生干旱事件的站点频率值比较低。这说明 GRACE 反演的相对水储量指数反映的新疆区域发生干旱事件的时间和 SPI3 基本一致, 说明其可用于新疆干旱监测。

如果定义相对水储量指数连续三个月为负值的时间段为干旱时间, 新疆 2002. 8 - 2013. 7 期间发生的干旱事件(表 2)。从表 2 可以看出, 新疆 2002 年 8 月 - 2013 年 7 月期间共发生了 7 次干旱事件。第 6 次干旱持续时间最长, 为 21 个月(2008. 04 ~ 2009. 12); 累积的相对水储量指数值最大, 说明该阶段水储量亏损量最大, 为 -348. 6mm; 平均每月相对水储量指数值为 -28. 3mm, 说明平均每月水储量亏损 -28. 3mm, 干旱程度最严重。其余 6 次干旱持续时间都比较短, 3 - 7 个月不等; 累计的相对水储量指数区间为 -12. 5 ~ -70mm。

表 2 GRACE 监测到的干旱事件

Table 2 Drought events monitored by GRACE satellite

序号	干旱时段	干旱持续时间 (月)	相对水储量指数最小值 (mm)	平均相对水储量指数 (mm/月)	相对水储量指数的累积量 (mm)
1	2003. 02 ~ 2003. 04	3	-12. 3 ( Mar -03)	-8. 3	-24. 9
2	2004. 03 ~ 2004. 09	7	-18. 3 ( Mar -04)	-10	-70
3	2004. 11 ~ 2005. 03	5	-4. 9 ( Jan -05)	-2. 5	-12. 5
4	2007. 04 ~ 2007. 06	3	-10. 6 ( May -07)	-6. 5	-19. 5
5	2007. 08 ~ 2008. 02	7	-21. 8 ( Nov -07)	-8. 8	-61. 6
6	2008. 04 ~ 2009. 12	21	-28. 3 ( Jul -08)	-16. 6	-348. 6
7	2010. 02 ~ 2010. 04	3	-8. 5 ( Mar -10)	-7. 4	-22. 2

由中国水旱灾害公报可知 2007 年 5 月新疆出现水库干涸状态<sup>[17]</sup>。李丽华基于地面干旱监测指数及遥感综合模型监测到 2008 年北疆地区干旱严重, 旱情于 4 月份开始出现, 9 月份稍有减轻, 局部地区仍然严重<sup>[18]</sup>。据干旱气象网新闻报道, 2008 年整个新疆遭遇历史罕见干旱; 据中国气象局资料记载, 截止 2009 年 6 月底, 新疆东部和南部的降水量偏少 3 - 8 成, 局部地区偏少 8 成以上, 而气温则偏高 1 ~ 2℃<sup>①</sup>。GRACE 监测新疆地区 2008 - 2009 年严重干旱灾害情况与这些记载一致。

#### 4 讨论

新疆特殊的地理位置及气候环境决定了其干旱灾害频繁, 但是有限的降水、蒸散发等水文数据资料限制了对其干旱灾害的有效监测。通常大量降水或冰川融水能快速补给地表水资源, 但是已经发生的干旱状况也很难立刻逆转, 这主要是由于区域水储量的恢复需要一定的时间。所以基于降水或蒸散发等水文气象变化量的干旱监测指数, 不能准确反映区域瞬时的水储量情况, 在干旱灾害监测方面仍存在诸多不足的地方。而 GRACE 重力卫星反演得到的水储量变化量, 是包括地下水、地表水、土壤水及冰雪水等的区域总水储量; 基于此提出的相对水储量指数可以精确反演干旱灾害发生的时段和程度。GRACE 重力卫星监测干旱为新疆地区干旱灾害的监测及防治, 以及水资源合理利用制度的制定提供了重要的科学依据。

基于 GRACE 相对水储量指数可以方便快捷的监测区域干旱特征, 但也存在一些不足的地方。GRACE 重力卫星数据的空间分辨率较低, 限制其仅适合于较大区域或流域尺度, 研究表明<sup>[19, 20]</sup>, GRACE

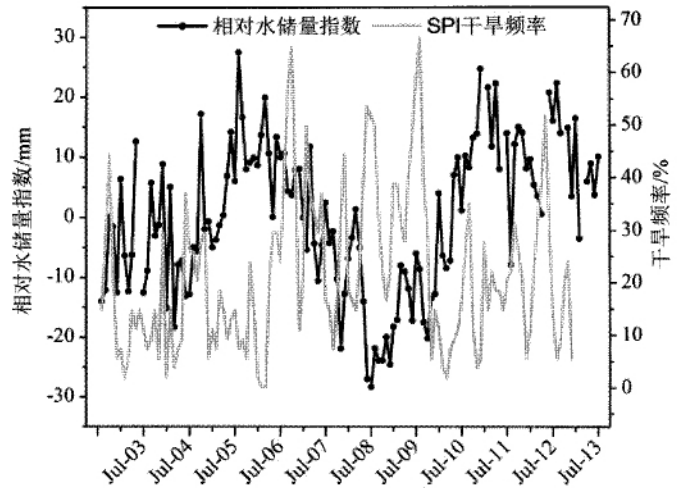


图 4 相对水储量指数与 SPI 干旱频率的比较

Figure 4 GRACE - based relative water storage index and SPI based drought frequency

① <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20080831/12357.shtml>

可应用于面积在 20 万  $\text{km}^2$  左右的区域或流域; 区域或流域尺度越大, 反演水储量结果精度越高。截至目前为止, GRACE 重力卫星数据仅涵盖近十二年的数据。相对水储量指数以月均水储量为标准, 时序越长, 得到的月均水储量越可靠。较短时序数据对 GRACE 监测干旱结果有一定的影响。GRACE 后续卫星于 2017 年发射, 将持续提供全球时变重力场数据, 可为监测干旱提供所需的水储量数据。此外, 除采用相对水储量指数反映干旱特征外, 还可以探讨其它基于 GRACE 水储量的干旱监测因子。

## 5 结论

文在利用 GLDAS 数据验证 GRACE 反演水储量的基础上, 基于 GRACE 水储量数据提出了反映区域干旱特征的因子—相对水储量指数, 并利用其对新疆 2002 年 8 月—2013 年 7 月的干旱特征进行了研究, 得出如下结论:

- (1) GRACE 反演的水储量和 GLDAS 基本一致, 其反演的水储量可作为干旱监测的数据源。
- (2) GRACE 相对水储量亏指数反映的新疆干旱情况和 SPI3 监测结果一致。
- (3) 新疆 2002 年 8 月—2013 年 7 月期间共发生了 7 次干旱事件, 其中 2008.04~2009.12 干旱事件程度最严重。

## 参考文献

- [1] 杨森, 赵正波, 庄晓翠. 西北干旱区阿勒泰地区暖季干旱指数及干旱分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 128–133.
- [2] 王莺, 李耀辉, 胡田田. 基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 244–253.
- [3] 宗燕, 王艳君, 翟建青. 海河流域气象干旱时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 198–202.
- [4] Yirdaw S Z, Snelgrove K R, Agboma C O. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356: 84–92.
- [5] Leblanc M J, Tregoning P, Ramillien G, Tweed S O, Fakes A. Basin scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia[J]. Water Resources Research, 2009, 45(4): 546–550.
- [6] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, Yang Z L, Niu GY. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114: 3093–3107.
- [7] 李琼, 罗志才, 钟波, 汪海洪. 利用 GRACE 时变重力场探测 2010 年中国西南干旱陆地水储量变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843–1849.
- [8] 普宗朝, 张山清. 1961–2008 年新疆夏半年干湿气候时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 138–144.
- [9] 潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 李小飞. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 32–39.
- [10] 胡颖颖, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 黄婷, 朱亚, 买尔当·克依木. 新疆 2001–2010 年农业气候干旱脆弱性分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 254–259.
- [11] 曹艳萍, 南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 719–727.
- [12] 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: Solid Earth, 1998, 103: 30205–30229.
- [13] Wahr J, Swenson S, Velicogna I. Accuracy of GRACE mass estimates[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(6): 178–196.
- [14] Wang H, Wu P, Wang Z. An approach for spherical harmonic analysis of non-smooth data[J]. Computers & geosciences, 2006, 32: 1654–1668.
- [15] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. In: The relationship of drought frequency and duration to time scales[M]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 1993; American Meteorological Society Boston, MA: Anaheim, California, 1993: 179–183.
- [16] Thomas A C, Reager J T, Famiglietti J S, Rodell M. A GRACE based water storage deficit approach for hydrological drought characterization[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41: 1537–1545.
- [17] 2007 年中国水旱灾害公报. 中华人民共和国水利部公报[Z]. 2009: 1–44.
- [18] 李丽华. 北疆地区干旱监测分析研究[D]. 硕士论文, 新疆大学: 乌鲁木齐, 2010.
- [19] Yeh P J F, Swenson S, C, Famiglietti J S, Rodell M. Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J]. Water Resources Research, 2006, 42: 395–397.
- [20] Famiglietti J S, Lo M, Ho S L, Bethune J, Anderson K, Syed T, Swenson S, de Linage C, Rodell M. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L03403–L03406.

## GRACE gravity satellite monitoring of drought characteristics in Xinjiang

CAO Yanping<sup>1 2 3</sup>, NAN Zhuotong<sup>1</sup>, CHENG Guodong<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Xinjiang, far from the sea, is located in the middle of the Eurasian continent and sensitive to global change. In this paper, GRACE gravity satellites data were used to recovery the water storage variation of the Xinjiang. Based on the water storage variations, the water storage deficits were obtained and used to characterize the drought of Xinjiang during August, 2002 and July, 2013. The results showed that the drought characteristics of GRACE-based were consistent with the results of SPI. There were seven drought events in Xinjiang during August, 2002 and July, 2013, and the drought event occurred in April 2008 and December 2009, was the worst one. GRACE provides for a new approach to drought monitoring, with good prospects.

**Key words:** GRACE; water storage variations; relative water storage index; Xinjiang; drought