

2002–2010年长江流域GRACE水储量时空变化特征

许 民^{1,2},叶柏生^{1,2},赵求东²

(1. 冰冻圈科学国家重点实验室,兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000)

摘 要:利用高斯平滑滤波对2002年4月-2010年12月逐月GRACE卫星的时变重力场数据反演得到长江流域大尺度陆地水储量变化,对其时空变化进行研究,并将结果与全球陆面同化数据(GLDAS)模拟结果进行比较。其结论为:根据GRACE数据反演与GGLDAS模拟得到的水储量结果在大多数区域变化趋势相同,两者具有一致性,相关性达到0.89($P<0.05$)。GRACE水储量研究结果表明:① 2002-2010年长江流域水储量呈增加趋势,平均增长速率为0.43 mm/月,相当于约95.04亿 m^3 /年。长江上游增长速率为0.53 mm/月,相当于约67.13亿 m^3 /年;中游增长速率为0.51 mm/月,相当于25.73亿 m^3 /年;下游增长速率为0.36 mm/月,相当于9.14亿 m^3 /年。近9年长江流域水储量共增加约855.33亿 m^3 。② 从多年平均水储量空间分布来看,长江流域冬季月份(12、1、2、3月)水储量处于亏损状态,7-9月水储量处于盈余状态,4-6月下游至上游地区由亏损向盈余状态过渡,而10-11月则从上游至下游地区由盈余向亏损状态过渡。③ 全流域、上游及中游水储量逐月增长速率最大值出现在9月,分别为1.01 cm/a、1.37 cm/a、1.05 cm/a;而下游地区则出现在7月,增长速率为1.62 cm/a。

关 键 词:长江流域;水储量;GRACE卫星;GLDAS模拟;时空变化

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00068

1 引言

水资源变化是国家经济和社会发展最关心的重点问题之一。流域水储量的时空变化研究,对理解全球和局域水循环、研究并预报天气和气候变化、安排农业生产、防治洪涝以及其他自然灾害具有重要意义(钟敏等,2009)。目前陆地水储量的观测方法主要有:① 利用遥感卫星观测反演,这种方法只能得到十几厘米厚度的土壤含水量;② 基于单点的地表水、土壤水以及地下水观测,但该方法只能观测数公里范围内的区域,且在偏远地区难以开展工作。观测空间分布不均匀,对中、长空间尺度陆地水储量变化定量估计的不确定性较大,难以深刻认识陆地水储量变化(含地下水、冰川、冰盖融化等)的地球物理过程;③ 以气象和水文观测资料为基础,结合相关物理规律的模式(如Global Land Data Assimilation System, GGLDAS)模拟方法(Rodell等,2004),这种方法在观测资料稀疏的地区不

确定性较大,导致大气与陆地水文模式输出的陆地水量变化的结果存在一定的差异(Cazenave et al, 2002; Cox et al, 2002);④ 将重力卫星数据用于大、中空间尺度陆地水储量变化监测的研究(Luthcke et al, 2006; Tapley et al, 2004),这种方法的优点是全球观测分布均匀,并且观测尺度统一。GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星在极大程度上弥补了遥感卫星只能观测地表十几厘米厚度的土壤湿度、地表观测台站空间分布不均匀等不足,为定量研究大、中尺度陆地水储量的变化提供了可能。

GRACE时变重力数据为陆地水储量时空变化趋势研究提供了崭新的途径。近几年,研究者们利用GRACE数据估算了覆盖大部分地球陆地区域的多个河流流域的季节性水储量变化。Tapley等(2004)利用2004年GRACE数据对南美洲水量进行了研究,结果表明GRACE重力数据精度较高,能很好的用于大流域水文过程和水量研究。Ramillien

收稿日期:2012-07; 修订日期:2012-11.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41130638, 41030527);全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404);国家自然科学基金青年基金项目(41201025);中科院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金项目(51Y251A61);中国科学院“百人计划”项目。

作者简介:许民(1984-),男,汉,新疆沙湾县人,博士研究生,主要从事3S技术与寒区旱区水文水资源研究。

E-mail: xumin@126.com

等(2004)的研究指出,GRACE的高精度性能探测到地球表面短时间内微小的水当量重新分布,所估计的水储量年变化精度达到1.0~1.5 cm。Velicogna等(2006)利用11个月的GRACE时变重力场数据对密西西比河流域、亚马逊河流域和印度恒河流域的陆地水量的变化进行研究,精度可以达到1.0~1.5 cm等效水柱高。Hu等(2006)利用2002年4月-2003年12月共15个月的GRACE时变重力场,揭示了全球水储量的明显季节性变化,并重点分析了中国长江流域水储量的变化。结果表明长江流域水储量年内变化幅度可达到3.4 cm等效水高,其最大值出现在春季和初秋。杨元德等(2009)利用GRACE的RL4.0数据分析了2003年1月-2007年12月全球27条流域和陆地水储量的季节性和年际变化,GRACE与GLDAS数据均表明2006年后陆地水储量年际变化明显增加。钟敏等(2009)利用近5年GRACE重力卫星数据研究了中国大、中空间尺度的陆地储水量变化趋势。GRACE卫星增进了我们对陆地水储量的宏观了解,为更好的预测全球气候变化、干旱和水资源过程变化研究提供了依据。

目前,针对长江流域水储量变化速率及其时空分布的研究还未深入展开,水储量的变化还缺乏定量的研究,因此,长江流域水储量及其变化信息对中国气候变化和水循环的研究具有重要意义。改进长江流域水储量变化的描述可以减少水量平衡研究的不确定性,更好地理解本流域水储量变化,从而改进水文和气候模式的参数化过程。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

长江流域西起青藏高原,东入东海,西高东低,海拔高差大,地形地貌极为复杂。本文研究区覆盖大通水文站以上各地,位于24.53°~35.95°N,94.47°~118.98°E(图1),流域面积167万 km²。将全流域分为上游、中游、下游3个区,宜昌水文站以上为上游地区,面积约104万 km²,占总面积的62.4%;宜昌至汉口水文站为中游地区,面积约42万 km²,占总面积的24.9%;汉口水文站至大通水文站为下游地区,面积约21万 km²,占总面积的12.7%。受季风影响,流域降水量在年内分布不均,使该区水储量变化表现出很强的季节性。因此,对区域水储量的估算对中国水资源管理至关重要。

2.2 GRACE数据反演水储量方法与原理

GRACE卫星由美国宇航局(NASA)和德国航天局(DLR)合作研制,于2002年3月发射成功。它采用SST-HL/LL测量模式,利用高轨GPS卫星对低轨双星精密跟踪定位,同时两颗低轨卫星在同一轨道平面内前后相互跟踪编队飞行,并利用共轨双星轨道摄动之差高精度测量地球重力场。它提供的高精度地球重力场模型,可以应用于地球物理学、海洋学、气象学等研究领域(Adam, 2002)。将利用GRACE卫星监测到的时变地球重力场,等价转换为地球表面的质量变化,除以水的密度可反演得到陆地水储量变化(Tapley et al, 2004)。其反演过程

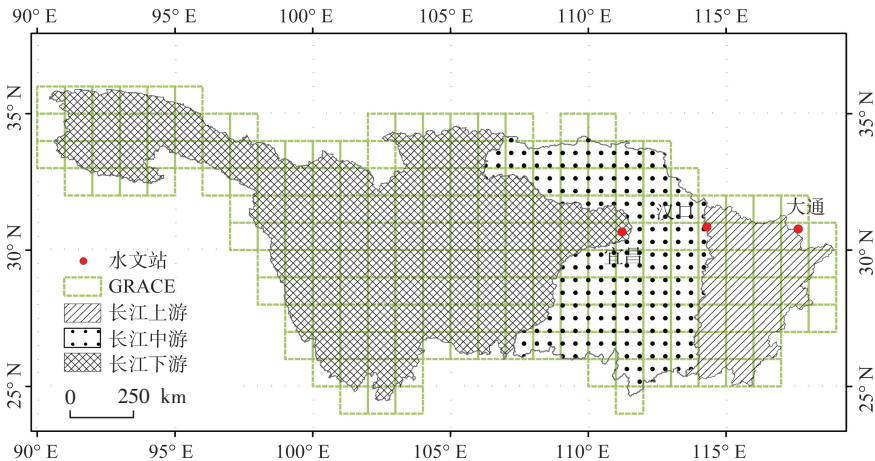


图1 研究区示意图
Fig. 1 Study area and positions of hydrological stations

如下:

地球重力场可以用大地水准面来描述,大地水准面的球谐系数(N)表达式为(翟宁等, 2009):

$$N(\theta, \phi, t) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_m(\cos \theta) [C_m(t) \cos(m\phi) + S_m(t) \sin(m\phi)] \quad (1)$$

式中: l 、 m 分别为重力场的阶数和次数; a 为地球赤道半径; θ 、 ϕ 分别为余纬和经度; $C_m(t)$ 、 $S_m(t)$ 分别为时变重力场系数; $P_m(\cos \theta)$ 是归一化的缔合勒让德函数。

由时变重力场计算水密度变化的公式为(Wahr et al, 1998):

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ave}\pi}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} P_m(\cos \theta) \cdot [\Delta C_m(t) \cos(m\phi) + \Delta S_m(t) \sin(m\phi)] \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ 为水密度变化; ρ_{ave} 为地球平均密度; ΔC_m 和 ΔS_m 为 GRACE 提供的球谐系数变化量; k_l 是 l 阶勒夫数。平均后的水密度变化为(Rodell et al, 2004; Wahr et al, 1998; 翟宁等, 2009):

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{2a\rho_{ave}\pi}{3} \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l P_m(\cos \theta) \cdot [\Delta C_m(t) \cos(m\phi) + \Delta S_m(t) \sin(m\phi)] \quad (3)$$

式中: W_l 为权函数,定义为: $W_0 = \frac{1}{2\pi}$,

$$W_l = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right), \quad W_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1}, \quad \text{其中}$$

$$b = \frac{\ln 2}{1 - \cos(\frac{r}{a})}, \quad r \text{ 是高斯平均半径。}$$

一般情况下,将水密度变化(ρ_{water})转化成等效水高(H_{water}),其公式如下:

$$H_{water} = \frac{2a\rho_{ave}\pi}{3\rho_{water}} \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l P_m(\cos \theta) \cdot [\Delta C_m(t) \cos(m\phi) + \Delta S_m(t) \sin(m\phi)] \quad (4)$$

本文采用的水储量数据是由 2002 年 4 月-2010 年 12 月 GRACE 所测得的共 102 个月平均时变重力场模型反演得到。潮汐影响,包括海潮、固体潮和地球自转产生的极潮都已经在 GRACE 数据处理过程中扣除,非潮汐的大气和海洋影响也在数据处理过程中扣除(Bettadpur, 2003; 汪汉声等, 2007),高斯

滤波为 300 km,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

2.3 GRACE 反演结果与 GLDAS 模型结果比较

为了验证 GRACE 反演结果,将其与现今最好的全球陆面同化模式之一的 GLDAS 中的水文模式结果进行比较, GLDAS 陆地同化数据由美国国家海洋大气局(NOAA)气象预报中心提供。该模式采用的输入数据包括降水分析结果、太阳辐射、地表气压、湿度和 NCEP (National Centers of Environmental Prediction) 提供的地表水平风速数据;模式输出结果包括土壤温度以及 4 层的土壤含水量,模式输出数据是全球陆地网格点上的值,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (Rodell et al, 2004)。需要说明的是,长江源区的 GLDAS 数据暂缺。

图 2a、2b 分别代表由 GRACE 反演和 GLDAS 模拟的 2010 年 5 月水储量变化,可以看出,整体上 GRACE 的反演结果和 GLDAS 模拟结果存在较高的吻合度,尤其是在长江下游地区。整个流域水储量空间变化基本一致,即西北部和东南部水储量为盈余状态,在西南部和东北部有两块区域处于亏损状态。8 月份整个流域水储量基本都为盈余状态,只有西部和北部一小部分地区为亏损状态(图 2c、2d)。2 个结果在一些格网尺度上还是存在一定的差异,相比之下,GRACE 反演结果在空间上连续性更好。

计算整个长江流域的平均水储量变化,由 GRACE 反演的等效水高变化和用 GLDAS 的模型计算结果的比较见图 3a。无论是 GRACE 的反演结果,还是 GLDAS 模拟都显示了长江流域水储量的明显季节性周期;并且 GRACE 反演的结果与模型预报的结果吻合度较高,两者的相关系数达到 0.89 ($P < 0.05$)。从中可以清楚地看到长江流域水储量的周年变化,主要在春季和早秋季节达到最大值,其最大可达到 13 cm 等效水高。

应该指出,虽然 GRACE 反演结果和 GLDAS 模型模拟结果的吻合度总体较好,但是如果精确到格网尺度,两者之间的差异也十分明显。这种差别可能由于水文模型不完善,考虑影响因子不全面,因而未能正确反映水储量的变化规律所致。

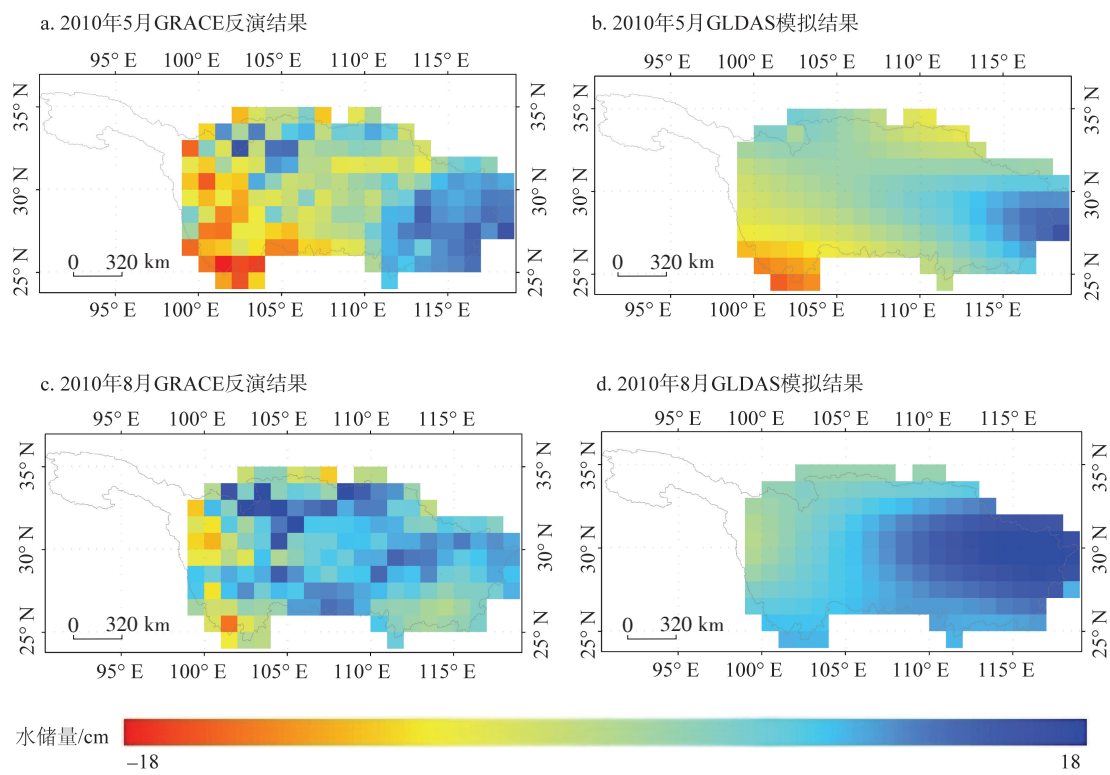


图2 GRACE反演与GLDAS模拟的2010年5月(a, b)和8月(c, d)长江流域水储量比较

Fig. 2 Water storage distribution derived from GRACE and GLDAS of the Yangtze river basin in May (a, b) and August (c, d) in 2010

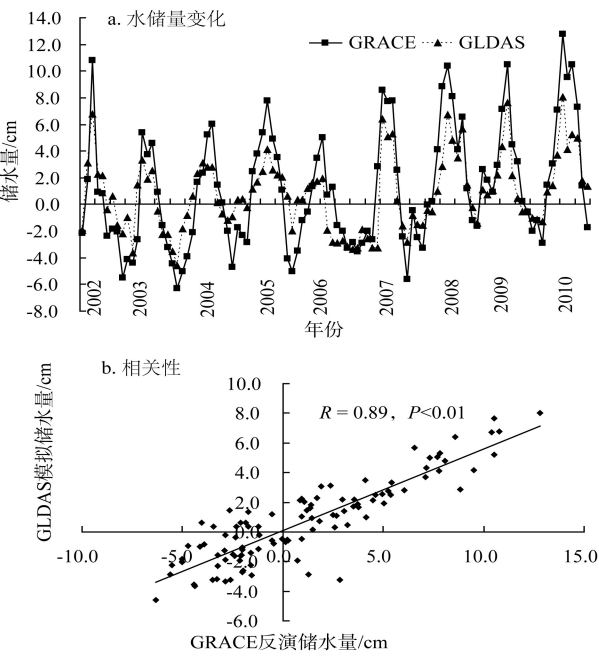


图3 GRACE反演和GLDAS模拟2002-2010年长江流域水储量变化(a)及两者的相关性(b)

Fig. 3 Monthly water storage derived from GRACE and GLDAS in the Yangtze river basin(a) from 2002 to 2010 and the correlation between the two(b)

3 结果分析

3.1 长江流域多年水储量空间分布

利用102个月的GRACE月时变重力场数据反演长江流域水储量变化,并计算了2002年4月-2010年12月的逐月平均水储量空间分布(图4),可以看到显著的季节性空间变化特征。1-4月份除长江源区和下游少部分地区水储量处于量级很小的盈余状态(最大达到2.5 cm),长江流域大部分地区水储量处于亏损状态,均低于-4 cm,长江源区水储量在4月份也处于-2 cm的亏损状态;5月份长江下游地区水储量不断增加,达到5~8 cm,分析其原因可能是上述地区降雨量逐渐增多;6月长江流域大部分地区进入雨季,水储量为盈余状态,而长江源头和东北部水储量出现-3~-2 cm的亏损,但覆盖范围不大;7-9月份长江流域水储量全部为盈余状态,多年平均状态为8~10 cm;10月流域储水量开始由盈余向亏损状态转变,水储量较7、8、9月整体减少,大部分地区呈现平衡状态,只有在流域西南部和源区小部分水储量达到10 cm;11、12月流域水储量进入亏损状态,只有源区还处在盈余状态,水

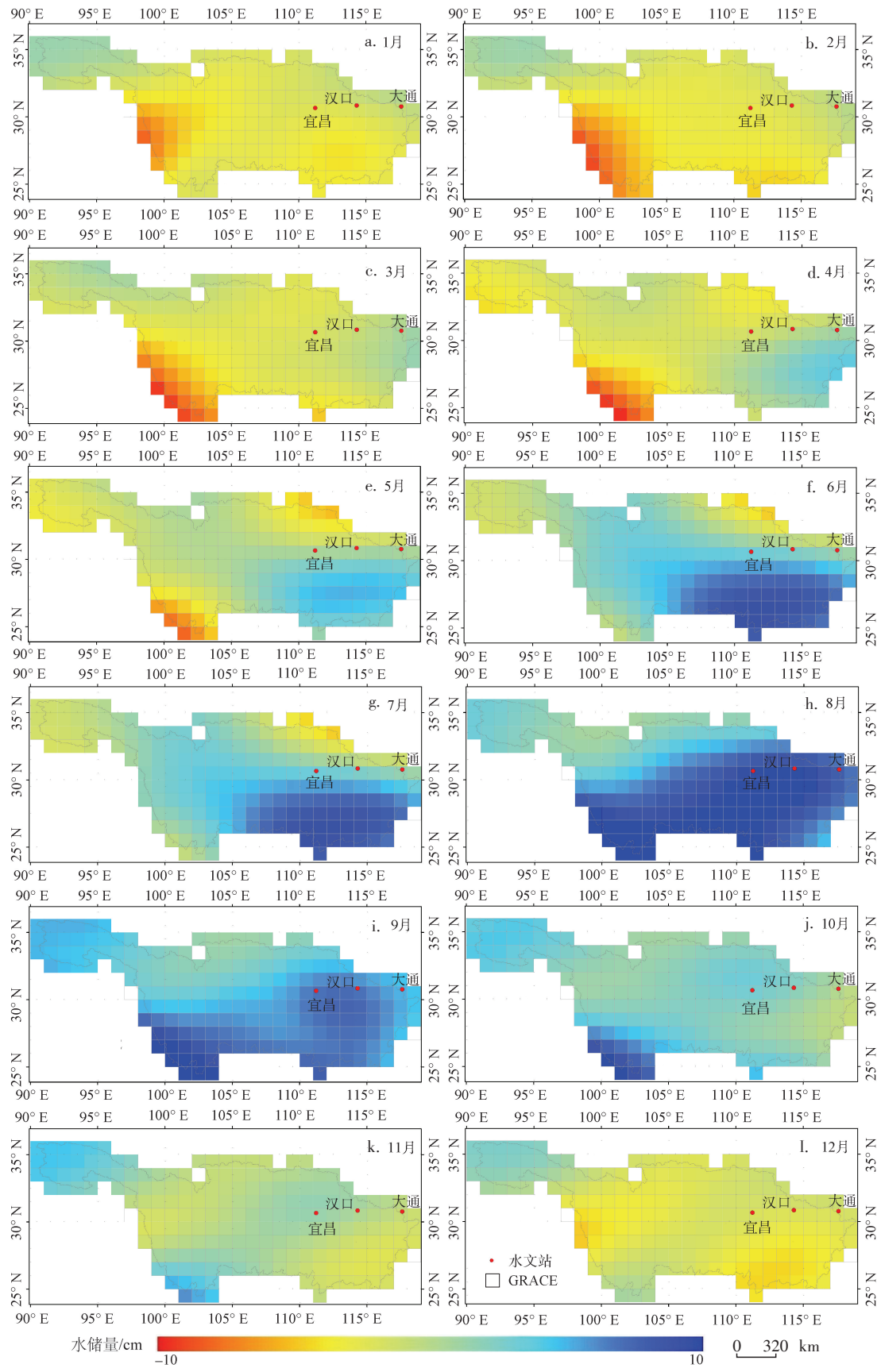


图4 2002-2010年长江流域逐月平均储水量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of monthly average water storage in the Yangtze river basin during 2002-2010

储量2 cm。

3.2 长江流域水储量年际和年内变化过程

利用GRACE时变重力场数据计算长江流域水储量随时间变化情况(图5),可以看出,长江上游、中游、下游及全流域水储量均呈正增长,增长速率分别为0.53、0.51、0.36和0.52 mm/月。上游增长速度相对其他地区要快,这是由于上游地区包含大面积冻土区域以及三峡大坝,一方面由于气候变暖,导致上游部分地区冻土融化,较多地表径流转换为土壤水和地下水(李静等, 2011; Niu et al, 2010),另一方面由于三峡工程的截流作用,使得水储量增加速率较快。

图6为2002-2010年长江流域水储量的年内分

布,可以看到,12月-次年4月,长江上、中游及全流域水储量均为亏损状态,亏损水量约为-3 cm~-1.5 cm; 5-11月为盈余状态,最大值为10 cm。在下游地区年内亏损状态在11月到次年3月,其水储量盈余状态要比其他流域提前1个月;从盈余和亏损所占的时间长度来看,各流域都是5个月的亏损状态和7个月的盈余状态。长江上游和中游水储量最大值出现在8月,分别为5.17和8.63 cm,最小值出现在2月,分别为-3和-2.96 cm;长江下游水储量最大值出现在7月,为9.45 cm,最小值出现在12月,为-3.08 cm。从流域来看,水储量最大值也出现在8月,为6.5 cm;最小值出现在2月,为-2.76 cm。总体上长江下游水储量多年平均值要大于上游和中

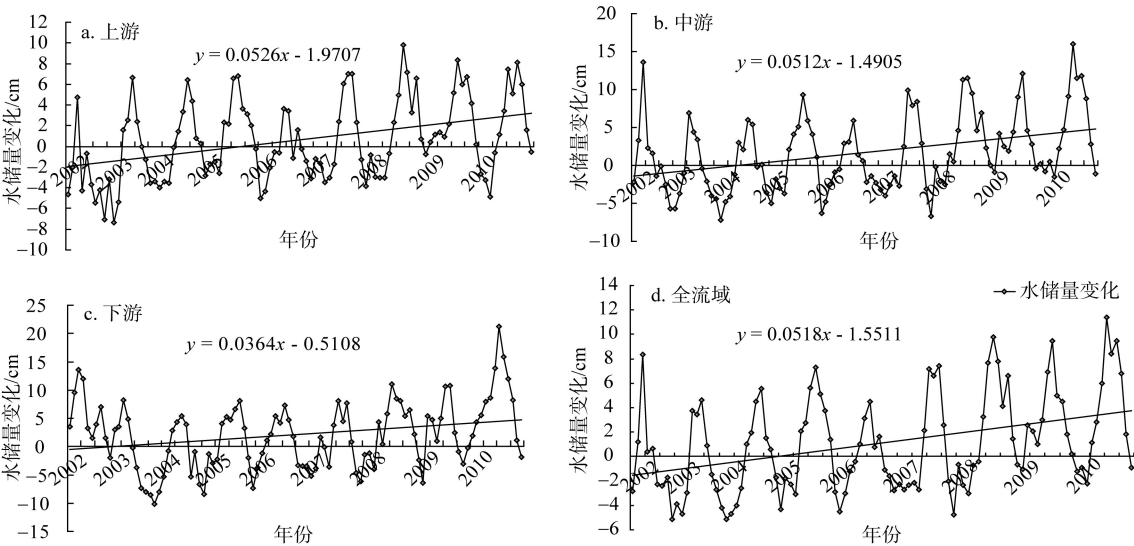


图5 2002-2010年长江流域水储量变化

Fig. 5 Monthly water storage changes in upstream, midstream, downstream and in the whole Yangtze river basin during 2002-2010

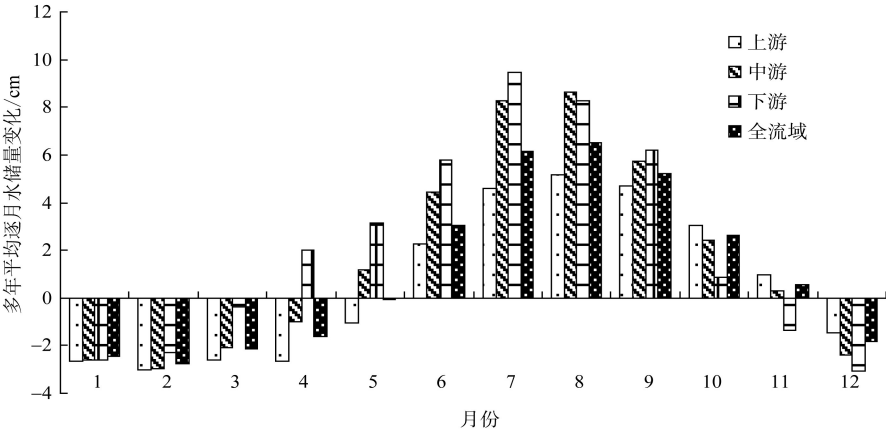


图6 2002-2010年长江流域水储量年内分布

Fig. 6 Monthly mean water storage in upstream, midstream, downstream and the whole Yangtze river basin during 2002-2010

游地区。

3.3 长江流域水储量增长速率及增加量的空间分布

为进一步研究长江流域近年来水储量的空间变化差异,分别计算了2002-2010年逐月水储量的变化速率(图7)。从空间分布来看,长江流域大部分区域逐月水储量均呈增加趋势,最大增长速率为1.5 cm/a。但在1月和8月,长江流域南部地区水储量呈现负增长;2、5、9、11、12月长江下游地区呈现负增长,增长速率约为-1.5~-0.75 cm/a。6月长江下游水储量增加速率较快;7月和12月长江源区水储量增长速率很快,这与该地区气温上升导致冻土层含水量增加有关;9月和10长江中游地区水储量增加迅速,这与三峡工程蓄水有关。

为计算长江流域水储量的总量,分别计算了上、中、下游逐月增长速率及水储量增加量(表1、2、3)。上游地区9月增长速率最大,达到1.37 cm/a,相当于14.37亿m³/a,1月增长速率最小,为0.19 cm/a,相当于1.97亿m³/a;中游地区7月增长速率最大,达到1.14 cm/a,相当于4.77亿m³/a,8月增长速率最小,为-0.23 cm/a,相当于-0.98亿m³/a;下游地区7月增长速率最大,达到1.62 cm/a,相当于3.45亿m³/a,1月和12月增长速率最小,均为-0.64 cm/a,相当于-1.37亿m³/a。上游地区2002-2010年水储量增长速率为69.13亿m³/a,水储量增加约571.25亿m³;

表1 长江上游水储量增加量

Tab. 1 Increase of water storage in the upstream of the Yangtze river basin

月份	增长速率 /(cm/a)	增长速率 /(亿m ³ /a)	增加水储量 /亿m ³
1	0.19	1.97	15.79
2	0.47	4.97	39.76
3	0.75	7.88	63.08
4	0.45	4.68	42.09
5	0.35	3.66	32.95
6	0.50	5.19	36.36
7	0.73	7.68	61.46
8	0.04	0.46	4.18
9	1.37	14.37	129.36
10	0.42	4.36	39.23
11	0.59	6.14	55.28
12	0.55	5.75	51.73
总量		67.13	571.25

表2 长江中游水储量增加量

Tab. 2 Increase of water storage in the midstream of the Yangtze river basin

月份	增长速率 /(cm/a)	增长速率 /(亿m ³ /a)	增加水储量 /亿m ³
1	0.21	0.90	7.20
2	0.78	3.25	25.97
3	0.52	2.19	17.50
4	0.49	2.07	18.60
5	0.15	0.64	5.79
6	0.87	3.62	25.37
7	1.14	4.77	38.20
8	-0.23	-0.98	-8.80
9	1.05	4.39	39.48
10	0.81	3.38	30.38
11	0.46	1.94	17.50
12	-0.10	-0.44	-3.94
总量		25.73	213.25

表3 长江下游水储量增加量

Tab. 3 Increase of water storage in the downstream of the Yangtze river basin

月份	增长速率 /(cm/a)	增长速率 /(亿m ³ /a)	增加水储量 /亿m ³
1	-0.64	-1.37	-10.95
2	0.34	0.73	5.86
3	0.93	1.98	15.86
4	0.48	1.02	9.19
5	-0.11	-0.23	-2.07
6	1.56	3.32	23.24
7	1.62	3.45	27.56
8	0.25	0.54	4.83
9	-0.004	-0.01	-0.08
10	0.54	1.16	10.40
11	-0.04	-0.08	-0.71
12	-0.64	-1.37	-12.30
总量		9.14	70.83

中游地区水储量增长速率为25.73亿m³/a,水储量增加约213.25亿m³;下游地区水储量增长速率为9.14亿m³/a,水储量增加约70.83亿m³;综上所述,长江流域2002-2010年间水储量共增加855.33亿m³。

4 结论与讨论

(1) 长江流域大部分地区 GRACE 反演结果和

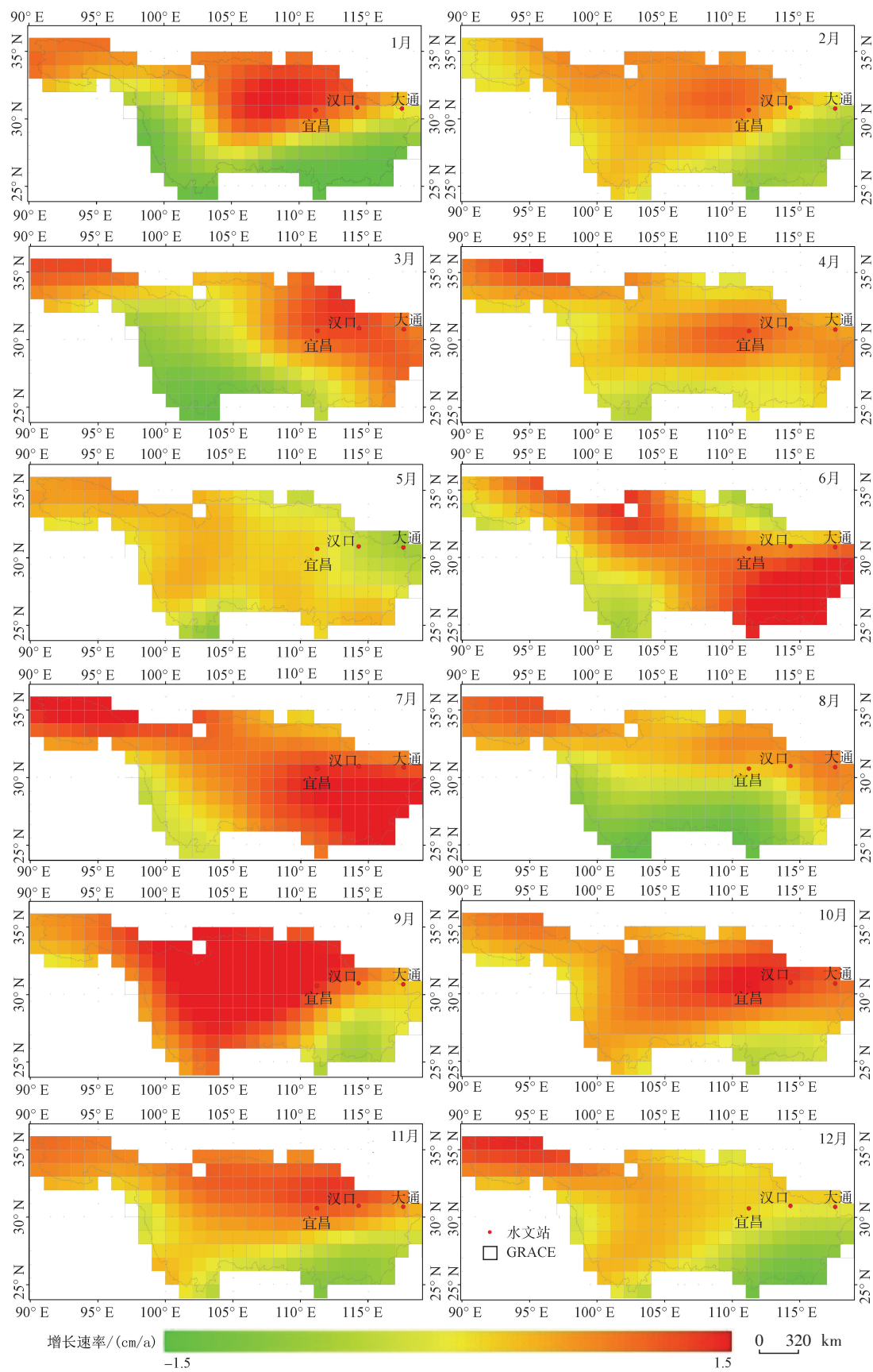


图7 2002-2010年长江流域水储量增长速率空间分布

Fig. 7 Liner trends of the distribution of water storage in the Yangtze river basin during 2002-2010

GLDAS 模拟结果都存在较高吻合度,尤其是在长江下游地区,整个流域水储量空间变化基本一致,两者的相关系数达到0.89($P<0.05$)。

(2) GRACE 反演的各月份水储量变化图可以明显地反映出季节性空间变化特征。主要表现在5月份长江下游降雨量逐渐增多,导致水储量增加较多;6-9月份整个流域基本均为盈余状态,这也和整个地区进入雨季相关;而10月-次年4月长江流域水储量由盈余状态逐渐向亏损状态转变。

(3) 长江上游、中游、下游及全流域水储量均呈正增长,增长速率分别为0.53、0.51、0.36和0.43 mm/月,各区都是5个月的亏损状态和7个月的盈余状态,下游地区水储量盈余状态要比其他流域提前一个月到来。

(4) 长江流域水储量的变化速率从空间分布来看,大部分区域逐月水储量均呈增加趋势,最大增长速率为1.5 cm/a。上游地区2002-2010年水储量增长速率为69.13亿 m^3 /年,水储量增加约571.25亿 m^3 ;中游地区水储量增长速率为25.73亿 m^3 /年,水储量增加约213.25亿 m^3 ;下游地区水储量增长速率为9.14亿 m^3 /年,水储量增加约70.83亿 m^3 ;长江流域2002-2010年水储量共增加855.33亿 m^3 。

本文基于GRACE数据反演的长江流域水储量变化能很好地反映该流域近年气候变化引起的下游旱情。最后应该指出,虽然GRACE反演结果和GLDAS模拟结果较为吻合,但两者在网格尺度上的差异也十分明显。这可能是由于模型不够完善,考虑影响因子不全,而未能正确反映水储量的变化所致。在缺乏对陆地水储量变化的真实而独立的观测资料的背景下,GRACE卫星数据不失为一种独特而高效的监测陆地储水量变化的技术手段。

参考文献(References)

- Adam D. 2002. Gravity measurement amazing GRACE. *Nature*, 416(6876): 523-525.
- Bettadpur S. 2003. Level-2 Gravity Field Product User Handbook. Austin, TX: Center for Space Research, the University of Texas at Austin.
- Cazenave A, Nerem R S. 2002. Redistributing earth mass. *Science*, 297: 783-784.
- Cox C M, Chao B F. 2002. Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297: 831-833.
- Hu X G, Chen J L, Z Y H, et al. 2006. Seasonal Water Storage Change of the Yangtze River Basin Detected by GRACE. *Science in China Ser. D: Earth Sciences*, 49(5): 483-491.
- Li J, Sheng Y, Chen J, et al. 2011. Characteristics of Ground Temperatures and Influencing Factors of Permafrost Development and Distribution in the Source Region of Datong River. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 827-836. [李静, 盛煜, 陈继, 等. 2011. 大通河源区多年冻土的地温特征及其影响因素分析. *地理科学进展*, 30(7): 827-836.]
- Luthcke S B, Zwally H J, Abdalati W, et al. 2006. Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations. *Science*, 314(5803): 1286-1289.
- Niu L, Ye B S, Li J, et al. 2010. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with varying permafrost coverage in Western China. *Science China: Earth Sciences*, 54(4): 615-624.
- Ramillien G, Cazenave A, Brunau O. 2004. Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry. *Geophysical Journal International*, 158(3): 813-826.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3): 381-394.
- Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683): 503-505.
- Velicogna I, Wahr J. 2006. Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, 311(5768): 1745-1756.
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research*, 103(B12): 30205-30229.
- Wang H S, Wang Z Y, Yuan X D, et al. 2007. Water storage changes in Three Gorges water systems area inferred from GRACE time-variable gravity data. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(3): 730-736. [汪汉胜, 王志勇, 袁旭东, 等. 2007. 基于GRACE时变重力场的三峡水库补给水系水储量变化. *地球物理学报*, 50(3): 730-736.]
- Yang Y D, E D C, Chao D B, et al. 2009. Seasonal and inter-annual change in land water storage from GRACE. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(12): 2987-2992. [杨元德, 鄂栋臣, 晁定波, 等. 2009. GRACE估算陆地水储量季节和年际变化. *地球物理学报*, 52(12): 2987-2992.]
- Zhai N, Wang Z M, E D C. 2009. Investigation on Antarctic mass balance with GRACE. *Chinese Journal of Polar Research*, 21(1): 43-47. [翟宁, 王泽民, 鄂栋臣. 2009. 基于GRACE反演南极物质平衡的研究. *极地研究*, 21(1):

43-47.]

Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. 2009. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observa-

tions. Chinese Science Bulletin, 54(5): 816-821. [钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 2009. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势. 科学通报, 54(9): 1290-1294.]

Temporal and spatial pattern of water storage changes over the Yangtze river basin during 2002–2010 based on GRACE satellite data

XU Min^{1,2}, YE Baisheng^{1,2}, ZHAO Qiudong²

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Science, Lanzhou 730000, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The large-scale change of the amount of water storage over the Yangtze River basin is obtained by using monthly gravity field data, derived from GRACE satellite data between April of 2002 and December of 2010 with Gaussian filter. The temporal and spatial variations of water storage over the Yangtze River basin are compared to the data from GLDAS (Global Land Data Assimilation System) model. The results indicate that: (1) The two sets of data, derived from GRACE satellite and GLDAS model, show the same trend of change in the majority of the areas with high level of consistency; the correlation coefficient is 0.89 ($P < 0.05$). (2) The amount of water storage over the Yangtze River Basin from 2002 to 2010 has an increasing trend. The average annual growth rate is 0.43 cm/month, equivalent to $95.04 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$, with an average annual growth rate of 0.53 cm/month ($67.13 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$) in the upstream area, 0.51 cm/month ($25.73 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$) in the midstream area, and 0.36 cm/month ($9.14 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$) in the downstream area. The increasing amount of water storage over the Yangtze River Basin during the time period of nearly nine years is estimated to be $855.33 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$. Judging from the spatial distribution of average annual water storage over the Yangtze River Basin, there is a shortage in January, February, March, and December, and a surplus in July, August, and September, with a clear transition from shortage to surplus in April, May and June from downstream to upstream, and a transition from surplus to shortage in October and November from upstream to downstream. The maximum increase rate of water storage over the whole basin, in the upstream and midstream areas is in September, with 1.01 cm/a, 1.37 cm/a, and 1.05 cm/a, respectively, whereas in the downstream area the maximum increase rate is in July, with 1.62 cm/a.

Key words: the Yangtze river basin; water storage; GRACE; GLDAS; temporal and spatial variations