

引用格式:Hao Jiansheng,Zhang Feiyun,Zhao Xin.*et al.*Spatiotemporal Change of Water Storage and Its Influencing Factors in the Ili-Balkhash Basin based on GRACE Data[J].Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(5):883-892.[郝建盛,张飞云,赵鑫,等.基于 GRACE 监测数据的伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化特征及影响因素[J].遥感技术与应用,2017,32(5):883-892.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.5.0883

基于 GRACE 监测数据的伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化特征及影响因素

郝建盛^{1,2},张飞云³,赵鑫¹,刘云霄⁴,李兰海¹

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.新疆农业大学,新疆 乌鲁木齐 830052;
4.新疆新源县农业局农业推广站,新疆 亲源 835800)

摘要:气候变化和人类活动对伊犁—巴尔喀什湖盆地自然生态环境的影响逐渐加剧,导致该盆地水资源问题日益突出。地处干旱区的伊犁—巴尔喀什湖盆地水资源的形成和耗散空间分离并且水文气象数据匮乏,使该地区的水资源研究和管理都相对欠缺。采用 2003 年 1 月至 2014 年 5 月 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ GRACE 重力卫星的 UTCSR-RL05 L-2 月数据反演得到伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化,并利用全球陆面同化数据(GLDAS)对比分析,结合水量平衡原理,分析该地区水储量时空变化特征及影响因素。结果表明:伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化呈现明显的年周期,该地区每年 11 月至次年 4 月水储量呈现增加趋势,水储量减少则出现在 5 月至 10 月;全年中 8 月份水储量减少最快,12 月份增加最快。在影响整个盆地水储量变化的影响因素中,降水蒸发差是整个盆地水储量变化的最重要的影响因子,其次是蒸发,降水相对最弱。伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化的影响因子具有明显的空间差异。水资源形成区水储量变化受降水影响最大,然而水储量耗散区水储量受降水蒸发差最明显。蒸发对耗散区的水储量变化的影响程度高于形成区。

关键词:水储量变化;时空变化;影响因素;伊犁—巴尔喀什湖盆地

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)05-0883-10

1 引言

区域水资源储量和质量变化,显著影响区内社会经济的发展和生态环境的可持续性。中国在推进“一带一路”建设过程中,亚洲中部地区的水资源问题是整个经济发展的一个重要的议题^[1-2]。区域水资源储量为土壤水、冰雪、地表水、地下水等各个水资源总量^[3-5]。气候变化和人类活动导致降水、蒸发、径流等改变对区域水储量的变化造成显著影

响^[4-6]。京津冀地区由于过度使用地下水,水储量急剧下降,而在青海、甘肃和四川交界地区由于气候变化等原因导致土壤水增加使水储量呈现增加状态^[4]。John 等研究刚果盆地水储量得出在极端降水发生后降水量是水储量增加量的 3 倍,则意味着 60%~70%降水由于蒸发和径流造成流失^[5]。孙桂燕等^[6]研究认为由于冰雪融化的影响,雪水当量的变化在冬春季节对天山南北坡的水储量变化有显著影响。位于中亚核心区的伊犁—巴尔喀什湖盆地,

收稿日期:2016-07-27;修订日期:2016-12-18

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室专项资金资助项目(2014KL015),中国科学院国际对外合作重点项目(121311KYSB201600051)。

作者简介:郝建盛(1991—),男,甘肃兰州人,博士研究生,主要从事水文学水资源研究。E-mail:1339006268@qq.com。

通讯作者:李兰海(1964—),男,江西信丰人,研究员,主要从事流域水文和生态系统研究。E-mail:lilh@ms.xjb.ac.cn。

贯通中国和哈萨克斯坦。由于盆地内实测数据缺乏并且很难获取高精度的区域水储量变化信息,这严重限制了该地区水资源变化机理的研究。目前对该地区水储量动态变化及受自然要素和社会经济发展的影响研究非常缺乏^[7-9]。

近年来,GRACE重力卫星数据为地面数据资料缺乏地区水储量变化研究提供了替代数据源,这些数据已被证明在研究地区水储量变化是切实可行的^[10-12]。GRACE重力卫星获得的水量数据为目标区内水循环过程中各部分变化的总和,很大程度上弥补了较难获得数据地区信息缺失和遥感卫星只能监测地表较浅信息的缺陷,为水储量时空变化趋势研究提供了崭新的途径^[13-15]。Wahr等^[11]在1998年首次提出利用GRACE重力卫星反演区域水储量变化的方法。基于这一方法,Velicogna等^[16]得出密西西比河等流域的陆地水储量变化可达1.0~1.5 cm等效水柱高。Syed等^[10]利用GRACE重力卫星的全球水储量变化数据,分析了水储量变化及其影响因素,总结出降水,蒸发和径流对不同纬度区域的影响。钟敏等^[17]利用近5年的GRACE重力卫星数据对近年中国陆地水量在不同空间尺度的变化趋势进行研究,指出青藏高原地区、华北京津冀地区的陆地水储量呈现明显的减少趋势。许民等^[18]对祁连山山区的研究发现在时间上水储量变化与降水变化过程基本一致,并推测在长江上游地区和黄河源地区水储量变化还受冻土影响^[15]。GRACE卫星使我们可以从宏观上了解陆地水储量变化,为分析水资源时空变化影响因素提供有效途径,促进我们对水循环更深入的了解。

伊犁—巴尔喀什湖盆地是中亚地区重要水库和气候调节中枢地区,该盆地水资源的形成和耗散空间分离,其水资源开发利用受到水储量变化的影响。目前由于盆地区气象水文数据缺乏,因此针对该区的水储量变化的研究还未深入展开,而GRACE重力卫星监测数据可为该区水资源储量变化研究提供可靠数据源。本文利用GRACE卫星反演2003~2014年该地区水储量变化,分析水储量的变化特征及其影响因素,筛选出主导因素。从而总结出该地区水储量的变化特征及影响机理,揭示该地区水资源变化规律,为评估该地区气候变化和人类活动对水储量和水安全的影响提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区域概况

伊犁—巴尔喀什湖盆地位于 $42.21^{\circ}\sim 49.14^{\circ}\text{N}$

和 $72.47^{\circ}\sim 85.02^{\circ}\text{E}$ 之间(图1,审图号GS(2015)2650号),总面积约为42万 km^2 ,其中86.4%位于哈萨克斯坦境内^[19-21]。该盆地从西北向东南逐渐抬升,形成包含亚寒带湿润气候区、寒温带湿润气候区和温带亚干旱气候区在内的多种气候类型区。位于盆地东南部的天山山脉,远离海洋,三面由天山支脉环绕,阻挡来自西伯利亚的寒流和周围沙漠的干热气流,向西开口。西风环流携带来自大西洋、地中海和黑海的水汽受到天山的阻挡导致盆地东南部形成丰富的降水;谷地年均降水量约300 mm,山地年均降水量约500~1 000 mm。独特的地理条件使该区域成为整个盆地水资源的形成区^[21-24]。盆地的中西部为水分耗散区,而西北部中心带为巴尔喀什湖区,为哈萨克斯坦的主要农业灌溉区^[21-23]。盆地中部和西北部存在季节性温差大,年最高、最低温度分别达到 45°C 和 -45°C ,年均降水量在135~150 mm之间,属于干旱区大陆性气候^[21-22]。

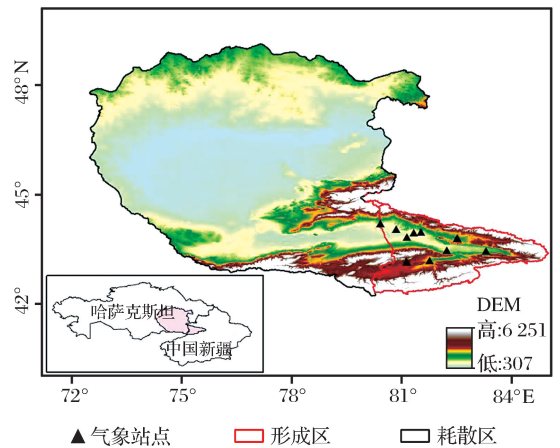


图1 研究区域示意图

Fig.1 Sketch of study area

2.2 数据来源及处理方法

2.2.1 水储量变化数据

本文利用CSR(Center for Space Research University of Texas at Austin)提供的2003年1月至2014年5月共120个月(中间缺失17个月,由于对缺失数据的插值补充存在难度且对实证结果存在较大的主观影响,因此在不影响实证分析结果的前提下,本文只对可获得数据进行分析)的GRACE Level2(Release-5)数据,并使用已有学者采用的处理方法^[25-27],对水储量变化进行反演和分析。本研究将水储量变化量定义为水储量球谐系数下月数据减去上月数据。如果相邻两月中,相减

的数值差结果为正值,则下月水储量多于上月,且数值正值越大,该区域下月水储量增加的越多;若数值为负值,则下月水储量少于上个月,且负值数值越大水储量减少的越多;若结果为 0,则水储量本月与上月相当。数据采用 Wahr 方法进行了去条带处理^[7]。高阶项可以反演精细的水储量变化,但会对大范围变化特点造成干扰,为了消除对高阶项的干扰,对重力卫星的数据采用 500 km 的平滑半径进行高斯平滑处理^[23],得到 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的水储量月变化的等效水柱高数据。对于区域边界不是整个单元格问题,采用面积比通过 ArcGIS 进行计算权重系数,完成区域提取,从而计算出空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 为该地区水储量变化量。区域水储量变化量计算公式如下^[24]:

$$H = \frac{A_i \times X_i \times \sum_{i=1}^m (\cos\theta_i)}{\sum_{i=1}^m A_i \times (\cos\theta_i)} \quad (1)$$

其中: H 为区域水储量变化量, m 为区域单元格个数, X_i 为第 i 个单元格水储量变化量, A_i 为第 i 个单元格面积占第 i 个 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点的比重, θ_i 为第 i 个单元格的纬度。GRACE 卫星数据可靠性验证,目前主要采用全球陆面数据同化系统(GLDAS)水文模型数据来进行^[25,30-32]。GLDAS 水文模型来自美国国家宇航署全球陆地资料同化系统,具有高时间分辨率并且是全球水文模式中模拟水储量变化精度最好的模型之一^[10]。其方法是将其 GLDAS 水文模型 Noah 模式数据中的土壤水、雪水当量、植物截留水数据相加^[33],将其转换为球谐系数^[34];之后将这些球谐系数截取至 60 阶次;并采用与 GRACE 数据处理相同的组合滤波方法估算出该区域的水储量变化数据,然后进行 GRACE 和 GLDAS 数据对比。本文参考这一方法,对 GRACE 卫星数据在研究区的可靠性进行验证。

2.2.2 气象数据

降水数据本文选用美国宇航局(NASA)所提供的 TRMM $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点月值数据。将 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ TRMM-3B43 格点数据重采样为 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点数据,并采用与其他学者相同的方法和结果^[35-38],即:应用研究区的气象站点(图 1)数据对 TRMM 数据经过验证和校正后得到可信度良好的降水数据作为降水数据。通过与 GRACE 计算区域水储量变化相同方法计算区域降水量。选取分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$

的 GLDAS 模型的蒸发数据作为蒸发数据源。由于 GLDAS 模型数据格网分布与重力卫星的数据不一致,将相邻 4 个 GLDAS 格网数据平均,重采样为以整数度为中心分布的格网数据,并采用与重力卫星数据相同的方法估算区域面蒸发。

3 结果与分析

3.1 GRACE 重力卫星数据的验证

在利用 GRACE 反演整个盆地水储量变化和分析该地区水储量变化的特征及主要因素之前,需要对 GRACE 重力卫星数据的可靠性进行验证。应用 GLDAS 水文模型的估算的水储量进行比较。图 2 结果表明重力卫星数据和 GLDAS 模型模拟的结果在时间尺度基本一致,但 GRACE 数据反演的水储量变化振幅比 GLDAS 数据反演的水储量变化幅度大,主要可能由于 GLDAS 水文模型中不包含地下水及地表水的变化,而 GRACE 反演的水储量变化包含土壤水、雪水当量、植物截留水数据、地表水和地下水等所有水组成部分的变化^[25-26]。对两组数据进行相关性分析,自由度 $n = 112$, r^2 为 0.596,相关系数为 0.77 ($p < 0.05$),表明两者的一致性具有统计学意义。

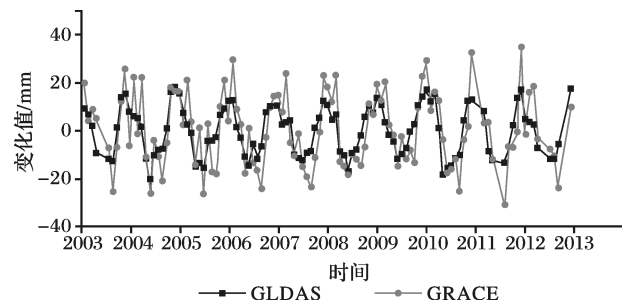


图 2 GRACE 重力卫星月变化数据与 GLDAS 模型数据对比
Fig.2 Monthly change of water storage based on GRACE and GLDAS data

3.2 伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量时空变化分析

利用 GRACE 月时变重力场数据反演伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化,将 2003~2014 年年内每个月的月差数据进行 12 年平均,得到该区域 12 个月的平均水储量变化空间分布图(图 3),正值代表本月水储量相对于上月是增加的,负值代表本月水储量相对于上月是减少的。由图 3 可见,盆地年内水储量变化量空间分布具有一定的差异性。1~3 月份盆地内水储量全部为盈余状态,1 月份水储量比上一年 12 月水储量增加约为 10 mm,该盆地的西北地区增加最快,其水储量增加多于形成区。2

月份水储量比一月份水储量增加更多,为 16 mm 左右。进入 3 月份水储量的增加速度有所减缓。4~6 月整个盆地大部分地区水储量呈现亏损状态。东南部水资源形成区水储量变化量依然增加,而西北部水资源耗散区水储量变化量呈现减少趋势,主要原因可能由于东南部水源形成区周围天山山区的季节性冻土融化,融化后的土壤隔水作用减弱,但储水能力增加,融雪水和降雨形成的地表水可更多地渗入土层和地下,导致土壤水和地下水储量增多,从而导致东南地区水储量变化量依然增加。由于地下水的储存和地势有很大关系,东南部水资源形成区海拔较高,地下水渗流到西北水资源耗散区,可部分补偿耗散区的水储量^[25]。7~10 月整个盆地水储量都呈现亏损状态,这期间在东南部水源形成区由于土壤含水饱和,该区的冰川积雪融化,融水汇流,通过径流流至耗散区^[39],这段期间温度较高,植被耗水量大,从而整个盆地蒸发量较大,导致水储量耗散严重,整个盆地水储量都呈现亏损。8 月份水储量比 7 月份减少最多,减少 20 mm 左右,中部和西北部水

资源耗散区和东南部水源形成区水储量变化量减少基本相等。11~12 月整个盆地水储量转亏为盈,北部地区水储量增加最多,增加 10 mm 左右。东南部水源形成区水储量增加少于西北部水资源耗散区。全年中,12 月份水储量增加最多,水资源耗散区增加 25 mm 左右,而水源形成区增加 15 mm 左右。这期间主要由于温度较低,降水基本以降雪形式出现,降雪形成的积雪,不会立即融化,从而增加区域的水储量。综上所述,整个盆地以 4 月和 10 月为分界点,其中在 11 月至次年 3 月为该区域的水储量积累期,该时间段北部的的水储量空间变化增加较快,12 月份尤为明显;5 月至 9 月为盆地的水储量消耗期,该时间段北部区域的水储量空间变化减少也较快,且西南部区域水储量在 9 月份减少速度最为明显。东南部水源形成区水储量变化幅度较小,相对稳定。中部和西北部水资源耗散区水储量变化幅度较大,主要由于农田灌溉等人类活动较多^[21],导致灌溉期耗水较大导致水储量迅速减少,而在非灌溉时期水储量增加明显。

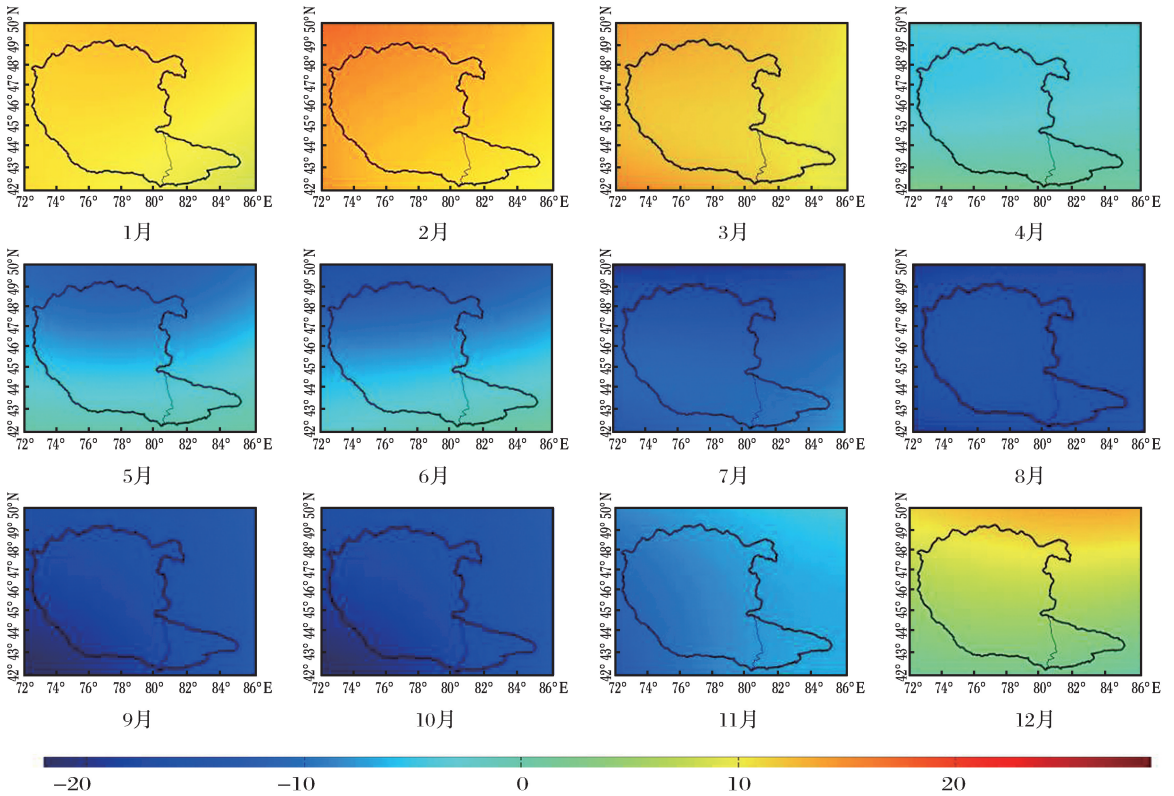


图 3 水储量平均年内时间变化

Fig.3 Spatial pattern of monthly-average change in water storage

图 4 表明该盆地水储量变化呈现一定的周期性,11 月到次年 4 月水储量变化呈现增长,这段时

间为该区域的水储量积累期,5 月至 10 月水储量变化呈现减少趋势,这段期间为水储量减少阶段。该

盆地 2003~2014 年水储量变化线性方程为 $y = 0.0133x - 0.006$, 水储量总体变化趋势不太明显, 基本保持稳定。

3.3 水储量变化影响因素分析

伊犁—巴尔喀什湖盆地内的水储量变化受多种因素共同影响。区域水储量变化受降水、冰雪融水、蒸发、地表径流和人类活动用水等影响^[40]。本文结合其他因素来详细分析降水和蒸发两个要素对 GRACE 估算的水储量变化的影响。

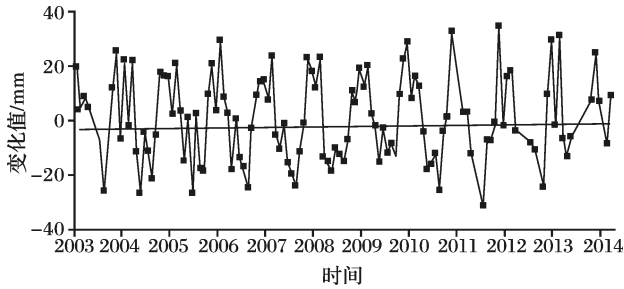


图 4 水储量年变化线性回归

Fig.4 linear regression of water storage changes

3.3.1 降水对水储量变化的影响

以往研究表明降水是内陆盆地水储量增加的主要来源^[41-42], 图 5 展示了该盆地 2003~2014 年逐月降水和水储量变化量趋势图。可以看出在整个盆地(图 5(a))水储量基本每年是 12 月份增加的最多, 这时期水储量的补给来自以降雪形式的降水^[43], 说明 12 月的降水要多于 11、1 和 2 月。图 5(a)展示每年的水储量减少最多的月份为 8 月或 9 月, 而不是蒸发量最大的 7 月, 这是由于 7 月份虽然是平均温度最高的月份, 其蒸发量最多, 但同时也是降水最多的月份, 降水充分补给了 7 月份由于高蒸发量造成的减少的水储量。而 8、9 月份降水量低于 7 月份, 8、9 月份温度高, 蒸发潜力也大, 因此水储量减少最多的往往是 8、9 月份。整个盆地降水和水储量变化达到极显著正相关($r = 0.140, P < 0.01$)。在盆地水储量的形成区, 其月平均降水量(32.56 mm)高于整个盆地的月平均降水量(29.39 mm)和耗散区月平均降水量(29.30 mm)(图 5(b)、5(c))。东南部水源形成区降水和水储量变化达到极显著负相关($r = -0.405, P < 0.01$), 该区域降水越强, 水储量的波动越小, 主要原因是水源形成区以径流的形式补给水资源耗散区, 当降水增强, 径流对该区域的水储量的波动影响越小。对于盆地的水储量耗散区, 降水和水储量变化达到极显著正相关($r = 0.243, P < 0.01$)。通过比较水储量形成区和耗散区降水和水

储量变化的相关关系, 得出降水对水源形成区水储量变化的影响强于水资源耗散区。

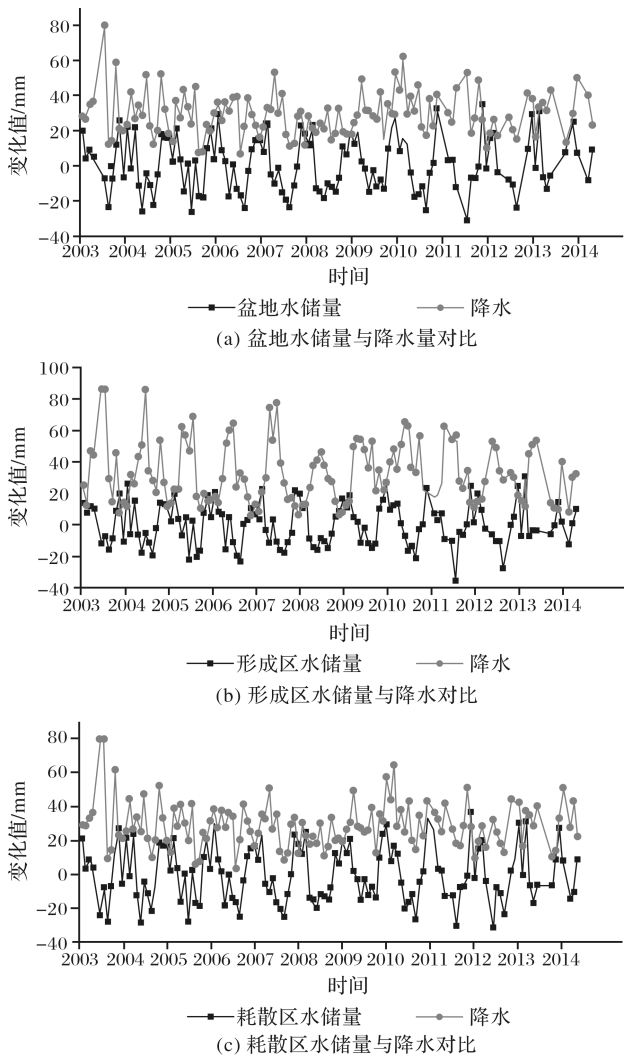


图 5 伊犁—巴尔喀什湖盆地、形成区、耗散区月水储量变化与降水量对比

Fig.5 Monthly changes of water storage and precipitation in the Ili-Balkhash Basin, formation region, dissipation region

3.3.2 蒸发对水储量变化的影响

蒸发作为水储量减少的重要部分, 对水储量变化具有一定的影响。由逐月变化整体趋势上来看(图 6(a)), 蒸发和盆地内水储量变化趋势一致性较好。整个盆地蒸发和水储量变化达到了极显著负相关($r = -0.469, P < 0.01$)。在 5 月至 8 月期间水储量变化与蒸发量变化的相关性最强, 说明这期间蒸发量对水储量变化影响最明显。在 4、5 月份往往出现水储量减少小高峰。主要是因为冬季积累的积雪, 大都集中到 3、4 月份融化, 融化后的积雪在 3、4 月份没有被及时蒸发掉, 4、5 月温度升高, 蒸发作用

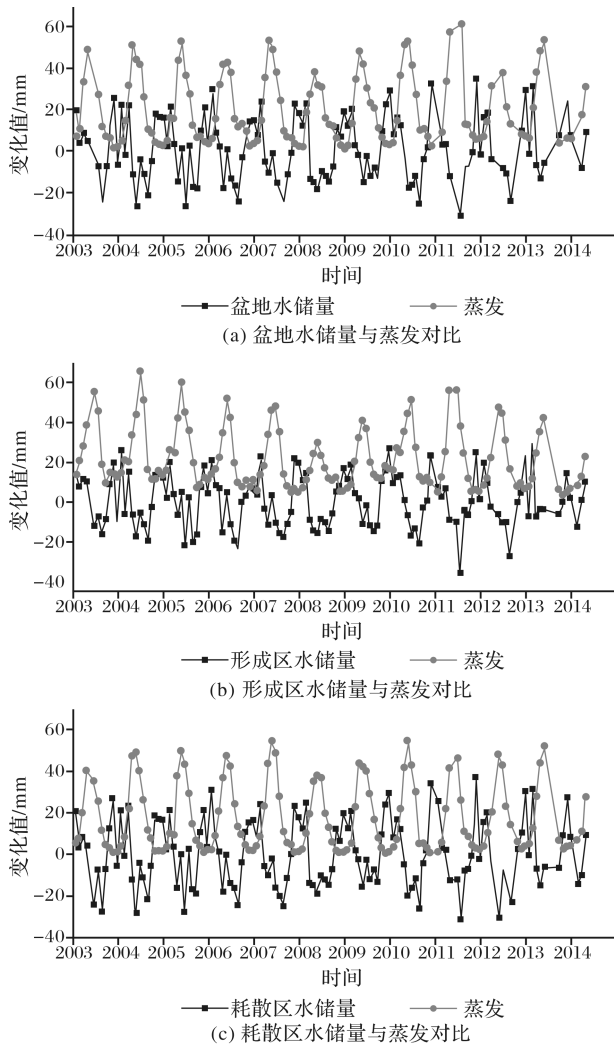


图6 伊犁—巴尔喀什湖盆地、形成区、耗散区月水储量变化与蒸发量对比

Fig.6 Monthly changes of water storage and evaporation in the Ili-Balkhash Basin, formation region, dissipation region

增强,融化后的积雪形成径流流动后蒸发又进一步加快,前几个月积累的雪水主要集中在4、5月份蒸发。在11月至次年3月水储量变化量与蒸发量变化相关性弱。这段期间蒸发量较小,尤其在11、12月和次年1月,蒸发对水储量变化几乎没有影响。在盆地的水源形成区,其月平均蒸发量(21.49 mm)与整个盆地的月平均蒸发量(19.86 mm)和水资源耗散区月平均蒸发量(19.38 mm)相差不明显(图6(b)、(c))。水源形成区蒸发和水储量变化达到极显著负相关($r = -0.359, P < 0.01$),盆地的水资源耗散区的降水和水储量变化达到极显著负相关($r = 0.560, P < 0.01$)。通过比较水资源形成区和水资源耗散区的蒸发量和水储量变化的相关关系,耗散区区域水储量变化与蒸发量变化相关性强于形成

区,说明耗散区域水储量变化受蒸发影响较大,尤其在5月至8月期间,蒸发对水储量变化起主导作用。

3.3.3 降水蒸发之差对水储量变化的影响

由区域水量平衡公式可知降水蒸发之差能很好的反映区域水储量的盈亏状态。从图7(a)可以看出,整个盆地水储量变化与降水蒸发之差的变化趋势基本一致,且每年都会有几个月份的区域水储量变化与降水蒸发差几乎是相等的。整个盆地降水蒸发差和水储量变化达到极显著正相关($r = 0.560, P < 0.01$)。盆地内水储量变化基本等于降水蒸发差,说明伊犁—巴尔喀什湖盆地是一个封闭性较强的区域。水源形成区降水减蒸发差和水储量变化达到极显著负相关($r = -0.219, P < 0.01$),对于盆地的水资源耗散区降水减蒸发差和水储量变化达到极显著正相关($r = 0.624, P < 0.01$)。通过比较水源形成区和水资源耗散区降水减蒸发差和水储量变化的相关关系,说明在这段时间内耗散区降水减蒸发差与水储量变化相关关系明显强于形成区,耗散区域水储量变化与降水蒸发差的变化趋势几乎同步。对于形成区(图7(b)),在4~7月降水减蒸发差呈现正值而水储量变化为负值。主要由于水储量形成区处于产流区,水资源以地表径流的形式流入耗散区。这时期气温升高,天山山区冰川和积雪冻土发生消融,消融后冰川和积雪融水增加地表径流量,导致形成区水储量减少。

由于气候条件及地形地貌的不同,该地区水储量变化的影响因子在空间上有显著的差异。根据降水、蒸发、降水蒸发差对整个盆地以及形成区和耗散区的影响对比分析得到,降水与形成区水储量变化相关密切程度最高,其次是耗散区,最后是整个盆地。造成这种现象的主要原因是水储量形成区水资源主要来源于降水,而在耗散区水资源来源中除降水外,还有一部分来自于形成区径流,导致降水对于水资源形成区的影响大于耗散区。蒸发与耗散区的水储量变化相关密切程度最高,其次是整个盆地,最后是形成区,主要因为耗散区水储量流失主要以蒸发为主,而在形成区除蒸发外径流也是水储量减少的关键因素,并且水资源形成区的地形和地势以及自然景观与耗散区差异明显,气温和蒸发量等都有很大差异。降水蒸发差与耗散区的水储量变化相关密切程度最高,其次整个盆地,并且降水蒸发差与耗散区和整个盆地的水储量变化相关密切程度远高于形成区,说明在整个盆地的水

资源形成区除降水和蒸发外,其他水文要素对水储量变化影响较大,尤其在冰雪消融期,冰雪融水对形成区水储量变化产生一定的影响。

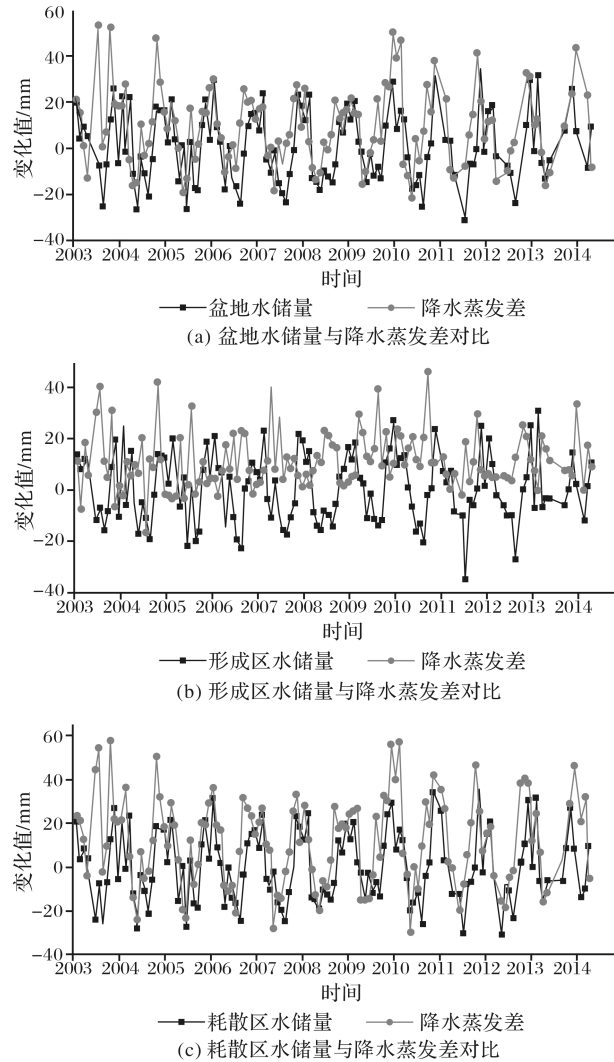


图 7 伊犁—巴尔喀什湖盆地、形成区、耗散区月水储量变化与降水减蒸发量对比

Fig.7 Monthly changes of water storage and the difference between precipitation and evaporation in the Ili-Balkhash Basin, formation region, dissipation region

4 结 语

本文利用 GRACE 重力卫星数据反演得到 2003 年 1 月至 2014 年 5 月伊犁—巴尔喀什湖盆地的陆地水储量变化,对比了 GRACE 反演的水储量的变化与 GLDAS 推算的水储量变化,分析了 GRACE 水储量的月时序变化及空间分布特征,以及降水、蒸发和降水蒸发差对该区域水储量变化的影响,得到如下结论:

(1)GRACE 反演的水储量变化数据在伊犁—

巴尔喀什湖盆地具有较好的可靠性,可作为该区域水储量变化特征及影响因素研究的数据源。

(2)伊犁—巴尔喀什湖盆地水资源储量变化呈现明显的年周期,水储量增加出现在 11 月至次年 4 月,水储量减少出现在 5 月至 10 月。全年中 8 月份水储量减少最快,12 月份增加最快。耗水区由于农业灌溉用水较多等原因导致耗水区水储量变化幅度大于形成区。

(3)在影响整个盆地水储量变化的影响因素中,降水蒸发差是整个盆地水储量变化的相关性最高的主导性因子,蒸发次之;降水相对于蒸发和降水蒸发差和该地区的相关密切程度较弱,但 11 月至次年 3 月水储量变化与降水相关性较好。降水是形成区水储量变化相关性最高的影响因子,蒸发次之,降水蒸发差最小。降水蒸发差是耗散区水储量变化相关性最高的影响因子,蒸发次之,降水最小。降水对形成区水储量变化的影响要高于耗散区,蒸发和降水蒸发差对形成区水储量变化的影响要高于耗散区。

GRACE 重力卫星数据在伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量动态变化研究对盆地内的自然资源开发和社会经济发展具有重要意义。由于该盆地水储量变化并非主要受某一个因素影响,而是由蒸发、降水、雪水当量、径流等多个水文气象因素共同影响,对于区域水储量变化仍需进一步探究。尤其是径流和雪水当量以及冻土冻融对流域水储量变化的影响将作为下一步研究重点。除自然因素外,人类活动对该流域水储量变化的影响也值得深入研究。

致谢:本研究在数据处理与分析等方面得到中国科学院伊犁河流域生态系统研究站的大力支持,特此致谢!

参考文献 (References):

- [1] Guo Yanjun. "The One Road, One Belt" Construction of China's Peripheral Water Diplomacy [J]. *Asia-Pacific Security and Maritime Affairs*, 2015, (4): 81-93. [郭延军. "一带一路"建设中的中国周边水外交 [J]. *亚非纵横*, 2015, (4): 81-93.]
- [2] Ding Jiangming. International Cooperation Problems on Transboundary Rivers in Kazakhstan [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(3): 365-376. [邓铭江. 哈萨克斯坦跨界河流国际合作问题 [J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 365-376.]
- [3] Crowley J W, Mitrovica J X, Bailey R C, et al. Land Water Storage within the Congo Basin Inferred from GRACE Satellite Gravity Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): 2-5.
- [4] Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. Trend of China Land Water

- Storage Redistribution at Medi-and Large-spatial Scales in Recent Five Years by Satellite Gravity Observations[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 816-821.
- [5] Zhou Y, Jin S, Tenzer R, *et al.* Water Storage Variations In the Poyang Lake Basin Estimated from GRACE and Satellite Altimetry[J]. Geodesy and Geodynamics, 2016, 7(2): 108-116.
- [6] Sun Guiyan, Guo Lingpeng, Li Lanhai, *et al.* Contrast and Analysis of Water Storage Changes in the North Slopes and South Slopes of the Central Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, (2): 254-264. [孙桂燕, 郭玲鹏, 常存, 赵鑫, 李兰海. 新疆天山中段南北坡水储量变化对比分析[J]. 干旱区地理, 2016, (2): 254-264.]
- [7] Wang Jiaoyan, Lu Jinxuan. Hydrological and Ecological Impacts of Water Resources Development in the Yili River Basin[J]. Natural Resource, 2009, (7): 1297-1307. [王姣妍, 路京选. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析[J]. 自然资源学报, 2009, (7): 1297-1307.]
- [8] Qiu Yue. Research on the Legal Issues of the Utilization of the Water Resources of China and Kazakhstan Border Crossing River[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013. [邱月. 中哈跨界河流水资源利用合作的法律问题研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.]
- [9] Bernauer T, Siegfried T. Climate Change and International Water Conflict in Central Asia[J]. Journal of Peace Research, 2012, 49(1): 227-239.
- [10] 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(2): W02433.
- [11] 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(B12): 30205-30229.
- [12] 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.
- [13] Cao Yanping, Nan Zhuotong. Applications of GRACE in Hydrology: A Review[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, (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, (5): 543-553.]
- [14] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, *et al.* GRACE Observations of Changes in Continental Water Storage[J]. Global and Planetary Change, 2006, 50(1): 112-126.
- [15] Xu Min, Ye Baisheng, Zhao Qidong. Temporal and Spatial Pattern of Water Storage Changes over the Yangtze River Basin during 2002-2010 based on GRACE Satellite Data[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 68-77. [许民, 叶柏生, 赵求东. 2002-2010 年长江流域 GRACE 水储量时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 68-77.]
- [16] Velococia I, Wahr J. Measurements of Time-variable Gravity Show Mass Loss in Antarctica[J]. Science, 2006, 311: 1745-1756.
- [17] Zhong Min, Duan Jianbin, Xu Houze, *et al.* Trend of China land Water Storage Redistribution at Medi-large Spatial Scales in Recent Five Years by Satellite Gravity Observations[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, (9): 1290-1294. [钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 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[J]. 科学通报, 2009, (9): 1290-1294.]
- [18] Xu Min, Zhang Shiqiang, 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, 2013, 37(3): 458-467. [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.]
- [19] Zhou Wenqian, Xia Ziqiang, Huang Feng, *et al.* Variation Characteristics of Precipitation and Its Annual Distribution in Balkhash Lank Basin[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6): 10-13. [周文婧, 夏自强, 黄峰, 等. 巴尔喀什湖流域降水量及其年内分配的变化特征[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 10-13.]
- [20] Song Yougui, Shi Zhengtao. Distribution and Composition of Loess Sediments in Yili, Central Asia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 267-272. [宋友桂, 史正涛. 伊犁盆地黄土分布与组成特征[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 267-272.]
- [21] Xuekelaiti Basitufo, Long Aihua, Deng Mingjiang, *et al.* Disquisition for Water Resources Development and Utilization in Middle-lower Reaches of Balkhash Basin on Google Earth[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 388-398. [巴斯托夫雪克来提, 龙爱华, 邓铭江, 等. 基于 Google Earth 的巴尔喀什湖流域中下游水资源开发利用研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 388-398.]
- [22] Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, *et al.* A Study of the Water Balance of Lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341-1352. [龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1341-1352.]
- [23] Li Jimei, Xu Hailiang, Song Yudong, *et al.* Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Ili River[J]. Journal of Arid land Resources and Environment, 2007, (3): 39-43. [李吉玫, 徐海量, 宋郁东, 等. 伊犁河流域水资源承载力的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2007, (3): 39-43.]
- [24] Zhang Junming. Study on Temporal and Spatial Distribution of Climate Resource in Yili river Basin[J]. Arid Meteorology, 2006, 24(2): 1-4. [张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 1-4.]
- [25] Cao Yanping, Nan Zhuotong. Monitoring Water Storage Variations in the Heihe River Basin by the GRACE Gravity Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 719-727. [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.]
- [26] Cao Yanping, Nan Zhuotong, Cheng Guodong. GRACE Gravity Satellite Monitoring of Drought Characteristics in Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(8): 89-92. [曹艳萍, 南卓铜, 程国栋. GRACE 重力卫星监测新疆干旱特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 89-92.]
- [27] Su Xiaoli, Ping Jinsong, Huang Qian, *et al.* The Subterranean Water Time Variation in Global Area by GRACE Mission [J]. *Annals Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences*, 2012, (6): 917-922. [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, (6): 917-922.]
- [28] 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: Solid Earth*, 2005, 110(B8): 1-8.
- [29] Guo Jun, Ren Guoyu. Recent Change of Pan Evaporation and Possible Climate Factors over the Huang-Huai Hai Watershed, China [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 666-672. [郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 666-672.]
- [30] Lal R, Sivakumar R M V K, Faiz S M A, *et al.* Climate Change and Food Security in South Asia [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2011: 69-83.
- [31] Li B L, Rodeblid M, Zaltchik B F, *et al.* Assimilation of GRACE Terrestrial Water Storage into a Land Surface Model: Evaluation and Potential Value for Drought Monitoring in Western and Central Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 110(B08): 1-13.
- [32] Fang H, Beaudoin H K, Teng W L, *et al.* Global Land Data Assimilation System (GLDAS) Products, Services and Application from NASA Hydrology Data and Information Services Center (HDISC) [EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090005038.pdf>, 2009: 1-8.
- [33] Rul Hualan, Beaudoin H. Readme Document for Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) Products [M]. *Earth Science Data and Information*, 2013: 1-22.
- [34] Wang H, Wu P, Wang Z. An Approach for Spherical Harmonic Analysis of Non-smooth Data [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(10): 1654-1668.
- [35] Yang Yanfeng, Luo Yi. Evaluation on Detective Ability of TRMN Remote Sensing Precipitation in Arid Region of Northwest China [J]. *Arid Land Geography*, 2013, (3): 371-382. [杨艳芬, 罗毅. 中国西北干旱区 TRMM 遥感降水探测能力初步评价[J]. *干旱区地理*, 2013, (3): 371-382.]
- [36] Wang Xiaojie, Liu Hailong, Bao Anming. Applicability Research on TRMM Precipitation Data in Tianshan Mountains [J]. *Hydrology*, 2014, (1): 58-64. [王晓杰, 刘海隆, 包安明. TRMM 降水产品在天山及周边地区的适用性研究[J]. *水文*, 2014, (1): 58-64.]
- [37] Wang Xiaojie. Downscaling Method and Spatial Variability of Precipitation in Tianshan Mountain based on TRMM Data [D]. Shihezi: Xinjian Shihezi University, 2013. [王晓杰. 基于 TRMM 的天山山区降水降尺度方法及其空间变异特征研究[D]. 石河子: 新疆石河子大学, 2013.]
- [38] Mu Zhengxia, Jiang Huifang. Research of Precipitation in the Western Tianshan Mountain based on TRMM/TMI [J]. *Journal Arid Land Resources and Environment*, 2010, (7): 115-119. [穆振侠, 姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, (7): 115-119.]
- [39] Moiwo J P, Yang Y H, Li H L, *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.
- [40] Yan Kai, Yu Pinglao, Xiong Shanshan. Principle of Water Balance in Natural Water Cycle and Drought Research [J]. *Hydrology*, 2011, 31(2): 38-41. [颜开, 余平佬, 熊珊珊. 自然界水循环中的水量平衡原理与干旱研究[J]. *水文*, 2011, 31(2): 38-41.]
- [41] Wang Jie, Huang Ying, Cao Yanping. Spatial and Temporal Variation of Water Storage in Recent Seven Years from GRACE in Yunnan Province [J]. *Water Saving Irrigation*, 2012, (5): 1-5, 15. [王杰, 黄英, 曹艳萍. 利用 GRACE 重力卫星观测研究近 7 年云南省水储量变化[J]. *节水灌溉*, 2012, (5): 1-5, 15.]
- [42] Xu Pengkun, Zhang Wanchang. Inversion of Terrestrial Water Storage Changes in Recent Years for Qinghai-Tibetan Plateau and Yarlung Zangbo River Basin by GRACE [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, (1): 23-29. [许朋琨, 张万昌. GRACE 反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, (1): 23-29.]
- [43] Bao Anming, Chen Xiaona, Li Lanhai. Theories and Methods of Snowmelt Runoff and Its Application in Arid Regions [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 684-691. [包安明, 陈晓娜, 李兰海. 融雪径流研究的理论与方法及其在干旱区的应用[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(5): 684-691.]

Spatiotemporal Change of Water Storage and Its Influencing Factors in the Ili-Balkhash Basin based on GRACE Data

Hao Jiansheng^{1,2}, Zhang Feiyun³, Zhao Xin¹, Liu Yunxiao⁴, Li Lanhai¹

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4.Agricultural Extension Center of Xinyuan County, Xinyuan 835800, China)

Abstract: Climate change and human activities significantly influence regional distribution of water resources and socio-economic and environmental sustainability. The separation of water formation and dissipation in the arid region leads to a challenge for regional water resources management. A clear insight view on regional water storage variation lacks due to the scarcity of ground observation data in the region. This study applied the satellite data to investigate regional water storage variation in the Ili-Balkhash Basin. The water storage variation data derived from UTCSR-RL05 L-2 data with $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ was compared with the data from GLDAS within a period from January 2003 to May 2014, then applied to investigate the temporal and spatial characteristics of water storage variation as well as their influencing factors in the Basin. The results indicated that water storage increased from every November to April of the next year, and decreased from May to October. Among the factors influencing water storage change in the basin, bias between precipitation and evaporation (BPE) is a most important factor to influence regional water storage change, followed by evaporation. Spatially, the factors influencing water storage change differ in water formation and dissipation region. Water storage change is most influenced by precipitation in the water formation region, but by BPE in the water dissipation region, and the impact of evaporation on water storage change in the water dissipation region is greater than that in the water formation region.

Key words: Water storage change; Temporal and spatial changes; Influencing factors; GRACE; Ili-Balkhash Basin