

DOI:10.13203/j.whugis20170402



文章编号:1671-8860(2020)02-0173-06

联合GRACE重力卫星与实测资料估计西辽河流域蒸散发量

钟玉龙^{1,2,3} 钟 敏^{2,3} 冯 伟² 闫昊明² 李成振⁴

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

2 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

3 中国科学院大学,北京,100049

4 中水东北勘测设计研究有限责任公司,吉林 长春,130061

摘要:西辽河流域是中国气候变化最敏感的区域之一,2000年以来,该区域水资源短缺日趋严重。基于水量平衡方程,联合重力卫星、降水资料和径流资料估计了西辽河流域的实际蒸散发量,并与遥感蒸散发产品和水文模式的蒸散发结果进行了对比分析。结果表明,在2005—2011年的干旱期,该流域平均年累计蒸散发量比同时期年降水量高了9.8 mm,多出的蒸散发主要来自于地下水亏损的贡献(约6.8 mm/a)。基于卫星重力的水量平衡方法可以有效估计干旱期由于地下水亏损导致的蒸散发增加。遥感蒸散发产品均明显低估了西辽河流域的实际蒸散发,而GLDAS-2.1 Noah模式明显高估了该区域的蒸散发量。基于卫星重力可以估计西辽河流域的蒸散发,并可用于评估不同的蒸散发产品。

关键词:GRACE;水量平衡方程;蒸散发;干旱;西辽河流域

中图分类号:P228

文献标志码:A

西辽河流域(the West Liaohe River Basin, WLRB)位于内蒙古东部,面积约为13.6万km²。2000年以来,西辽河流域处于持续干旱期,流域内降水量和地表径流量均较之前显著减少^[1-2]。在西辽河流域水资源持续减少的背景下,对该流域水循环中的重要组成部分之一的蒸散发开展定量评估,对于了解气候变化对水资源的影响具有重要意义。

目前广泛使用的流域尺度蒸散发估计结果包括基于遥感反演的蒸散发产品和陆面模式模拟的蒸散发产品。由遥感数据反演的蒸散发产品包括美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer) MOD16全球蒸散发产品^[3],荷兰阿姆斯特丹自由大学和比利时国立根特大学联合发布的GLEAM(global land evaporation Amsterdam model)蒸散发产品等^[4]。而陆面模式模拟的蒸散发产品中,NASA发布的全球陆面数据同化

系统(global land data assimilation system, GLDAS)利用多个陆面模式模拟的蒸散发输出^[5]具有一定的代表性。但上述蒸散发产品往往有各自的局限性,如MODIS并未对裸土和沙漠地区的蒸散发进行计算^[3]。文献[6]通过对我国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)8个站点的蒸散发监测结果与GLEAM产品进行比较,认为GLEAM在森林站点存在系统性高估。而GLDAS陆面模式模拟的蒸散发输出由于未能考虑灌溉和表面水蒸发的影响,往往只能模拟自然气候条件下的蒸散发^[7]。

随着2002年GRACE(gravity recovery and climate experiment)重力卫星的发射,可以获得全球和区域每月一值的陆地水储量结果。文献[8]探讨了在流域尺度上利用GRACE和其他观测来估计蒸散发的方法,认为基于卫星重力方法获得的蒸散发可以用来评估陆面模式模拟的蒸散发。此后,基于GRACE水量平衡方法估计实际蒸散发已成功应用于全球多个地区,如全球16个主要

收稿日期:2018-07-09

项目资助:国家自然科学基金(41774094,41674084,41431070,41474063);中科院战略性先导科技专项(XDB23030100)。

第一作者:钟玉龙,博士,讲师,主要从事卫星重力应用研究。zhongyl@cug.edu.cn

通讯作者:冯伟,博士,副研究员。fengwei@whigg.ac.cn

流域^[9]、非洲乍得湖流域^[10]等。

本文利用GRACE水量平衡方程,系统研究了西辽河流域2003—2013年的蒸散发量变化规律,并利用GRACE估计的蒸散发量对该区域的遥感蒸散发产品(MODIS、GLEAM)和GLDAS模式模拟的蒸散发产品进行了比较评估,探讨了遥感蒸散发产品在中国干旱地区的适用性。

1 研究数据与蒸散发估计方法

1.1 GRACE数据

本文采用的GRACE产品和方法包括:(1)美国得克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, CSR)提供的CSR Mascons数据(<http://www.csr.utexas.edu/grace>);(2)美国国家航空航天局喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提供的GRCTellus JPL-Mascons数据(<http://grace.jpl.nasa.gov>);(3)CSR提供的RL05球谐系数产品,基于无约束的正演模拟方法获得的陆地水储量估计^[11];(4)基于CSR的球谐系数产品,利用DDK3滤波获得的陆地水储量变化结果^[12]。本文利用以上4种不同后处理方法得到的算术平均值作为该区域陆地水储量变化的最终估计值,用于减少由于不同GRACE后处理策略带来的不确定性^[13]。

1.2 降水和径流数据

本文采用的降水数据是由国家气象科学数据共享服务平台提供的地面降水月值,即 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0)。该数据集是基于国家气象信息中心基础资料专项收集、整编的中国地面2 472个台站的降水月值资料并利用薄盘样条法进行空间插值生成(<http://data.cma.cn/>)。降水数据经过交叉验证质量、误差分析,数据质量状况良好。径流数据来自水利部松辽水利委员会西辽河郑家屯水文站的实测月径流量,其代表了整个西辽河流域的出境径流量(图1)。

1.3 遥感和陆面模式模拟蒸散发产品

MODIS地表蒸散发数据由美国蒙大拿大学提供(<http://www.ntsg.umt.edu/>),数据空间分辨率为规则等面积的 1 km^2 ,采用正弦等面积投影。

GLEAM地表蒸散发产品由荷兰阿姆斯特丹自由大学和比利时国立根特大学联合提供(<http://www.gleam.eu>),空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。对当月每天的蒸散发进行累加,作为该月的蒸散发估计。

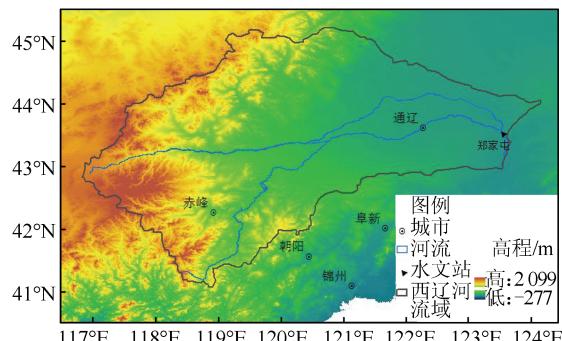


图1 西辽河流域示意图

Fig. 1 Map of the West Liaohe River Basin

此外,本文还使用了NASA的GLDAS Noah陆面模式输出的蒸散发结果,包括两个版本的数据产品,分别采用了GLDAS-1和GLDAS-2.1两种驱动数据。两种产品的时间分辨率为每月一值,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。以上蒸散发产品的空间分辨率不同,本文选取其在西辽河流域的平均值作为各自的最终估计值。

1.4 基于水量平衡方程计算蒸散发

在流域尺度上,真实蒸散发量(evapotranspiration, ET)可以由水量平衡方程计算得到^[8],即:

$$ET = P - Q - dS/dt \quad (1)$$

式中, P 为月降水量; Q 为月净出境径流; dS/dt 为给定时间段的陆地水通量(即陆地水储量变化时间序列在该时间段的斜率)。在GRACE重力卫星发射之前,由于缺少独立的 dS/dt 估计,通常忽略长时间尺度上的陆地水通量。但文献[14]强调了陆地水通量对水量平衡方法估计实际蒸散发量的重要性。

1.5 不确定性评估

GRACE估计陆地水储量变化的误差可以分为GRACE后处理误差和GRACE观测误差。对于单月的陆地水储量变化误差,取该月4组陆地水储量变化结果与平均值之间最大差异的绝对值作为当月的后处理误差估计。此外,取与西辽河流域同一纬度带的大西洋区域($41^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$)的海水质量变化均方根作为GRACE观测误差的估计^[15];取研究时间段内所有月份误差估计的平均值作为陆地水储量变化的平均误差估计。陆地水通量的误差估计为陆地水储量变化误差估计的 $\sqrt{2}$ 倍。考虑到站点的降水数据和径流数据都是正常维护的,降水和实测径流的不确定性通常分别估计为10%和5%^[7-8]。基于水量平衡方程的蒸散发误差估计中, P 、 Q 和 dS/dt (即 ΔS)均为相互独立观测,假设均为正态分布,则蒸散发

误差可由以下误差传播定律获得:

$$\sigma_{ET}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_Q^2 + \sigma_{\Delta S}^2 \quad (2)$$

式中, σ_P^2 、 σ_Q^2 和 $\sigma_{\Delta S}^2$ 分别是降水、径流和陆地水通量的方差。

2 结果分析与讨论

2.1 陆地水储量、陆地水通量、降水和径流变化

如图 2(a)所示,GRACE 监测结果表明,西辽河流域的陆地水储量呈现明显的年际变化特征。2005—2011 年陆地水储量以 $(-12.3 \pm 1.8) \text{ mm/a}$ 的速率持续下降,陆地水储量变化的时间序列从 2005—2012 年初下降了 140 mm 左右,主要是由于平原区的地下水储量减少导致^[16-17]。但随着 2012 年降水的增加(图 2(c)),西辽河流域的陆地水储量随之显著增加了约 110 mm。将图 2(a)中前后相邻月份的陆地水储量变化值相减,得到西辽河流域陆地水通量的时间序列(图 2(b))。

通过对该流域降水资料的分析表明,1999—2011 年 13 a 间的年平均降水量仅为 338.9 mm,远小于 1986—1998 年 13 a 间的 435.9 mm,两者相差近 100 mm。该结果与吴凯等^[2]的结论一致,即西辽河流域自 1999 年以来其降水呈显著减少趋势。西辽河流域自 1999 年以来的长期干旱也导致了流域的出境径流保持着一个极低的水平。如图 2(c)所示,作为控制整个流域的西辽河郑家屯水文站,其大部分时间观测的径流量都接近于零。在此期间,郑家屯水文站最大的月径流量仅为 2004 年 7 月的 0.7 mm。

2.2 基于 GRACE 估计的蒸散发与遥感和陆面模式产品的比较

图 3(a)给出了基于水量平衡方程获得的西辽河流域 2003—2013 年的实际蒸散发时间序列。如图 3(a)所示,蒸散发估计值在个别月份存在负值,这可能是由于 GRACE 卫星重力数据后处理误差和仪器测量误差导致的^[7]。根据式(2)计算得到每月蒸散发的不确定性估计,如图 3(a)阴影区域所示。

如图 3(b)所示,可以看出,MODIS 蒸散发结果在该流域存在对蒸散发低值区(小于 20 mm/月)高估而对高值区(大于 20 mm/月)低估的特点,这与文献[18]对 MODIS 蒸散发产品在中国主要流域的评估结论一致。GLEAM 蒸散发结果对大于 100 mm/月的蒸散发量估计不足,平均蒸散发量比基于 GRACE 的蒸散发低了 23%(斜率为 0.77)。

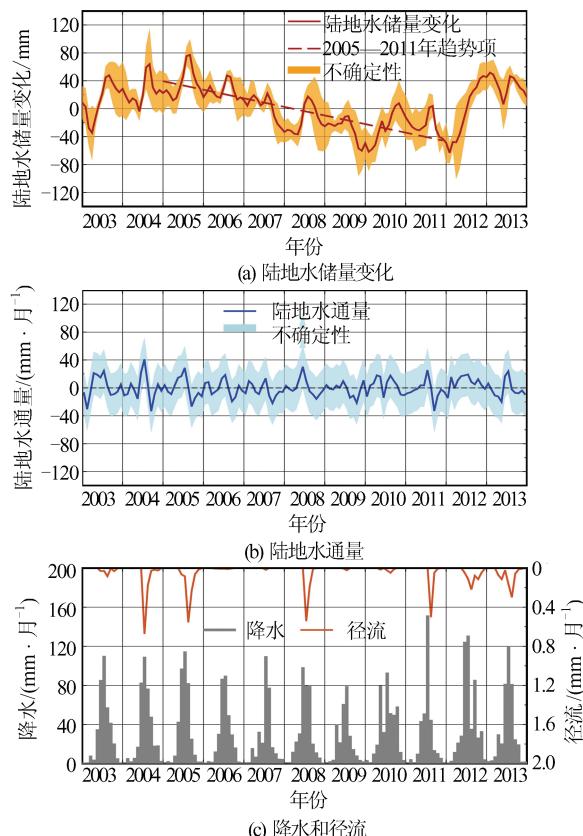


图 2 2003—2013 年西辽河流域水量平衡参数

Fig. 2 Water Balance Parameters over the WLRB for 2003—2013

如图 3(c)所示,GLDAS-1 Noah 的蒸散发结果与基于 GRACE 估计的蒸散发结果符合得最好,并且线性回归决定系数 R^2 也最大,为 0.76,表现出较好的一致性。GLDAS-2.1 Noah 的蒸散发结果与 GRACE 结果的 R^2 也达到了 0.75,但其蒸散发估计值相对偏大(斜率为 1.06)。特别是在 40~100 mm/月区间,GLDAS-2.1 Noah 的蒸散发结果存在较多高估的月份。

图 4(a)月平均蒸散发结果表明,除了 MODIS 外,其他蒸散发结果均在 1 月—7 月随着降水量的增多逐步增大,并在 7 月份达到最高峰,7 月—12 月蒸散发逐步减小。MODIS 在蒸散发较弱的 11 月到次年 3 月存在高估的现象。但在蒸散发较强的时期,MOD16 产品又明显低估了西辽河流域的实际蒸散发量。GLEAM 基于遥感的蒸散发结果在 1 月、11 月和 12 月为较小的负值,这主要来自裸地蒸发量和植物蒸腾量负值的贡献。

图 4(b)显示了不同数据源估计的年累计蒸散发量。表 1 列出了不同时间段的平均年累计蒸散发,其不确定性为多年年累计蒸散发之间的标准偏差。基于 GRACE 水量平衡法估计的 2003

—2013年的平均年累计蒸散发与同时期的降水量较为一致。但在2005—2011年干早期,平均年累计蒸散发量为(350.5 ± 34.6) mm,比同时期的降水量高了9.8 mm。由§2.1可知,同时期的陆地水储量下降速率为(-12.3 ± 1.8) mm/a。根据文献[17]的分析结果,西辽河流域的地下水亏损速率为 $-0.92 \text{ km}^3/\text{a}$ 。假设西辽河流域山区的地下水储量没有亏损,则可以估计地下水损耗对蒸散发量的贡献约为6.8 mm/a。由此可推断,干早期蒸散发量与降水量的差异(9.8 mm/a)大部分可由地下水超采导致的蒸发量增加来解释。

如图4(b)所示,GLDAS-2.1 Noah明显高估了该区域的蒸散发量,远大于GLDAS-1 Noah估计的蒸散发量和其他蒸散发量结果。比较GLDAS-1和GLDAS-2.1的降水驱动数据后发现,在西辽河流域,GLDAS-2.1驱动数据在2003—2013年间的平均年降水量比GLDAS-1驱动数据和气象数据中心降水资料的结果均偏大100 mm,导致其输出的年累计蒸散发结果也比GLDAS-1 Noah模式和GRACE的结果偏大约100 mm。前人研究也表明,虽然GLDAS-2.1驱动数

据有更好的时间连续性,但在某些区域却可能存在较大的偏差^[19]。

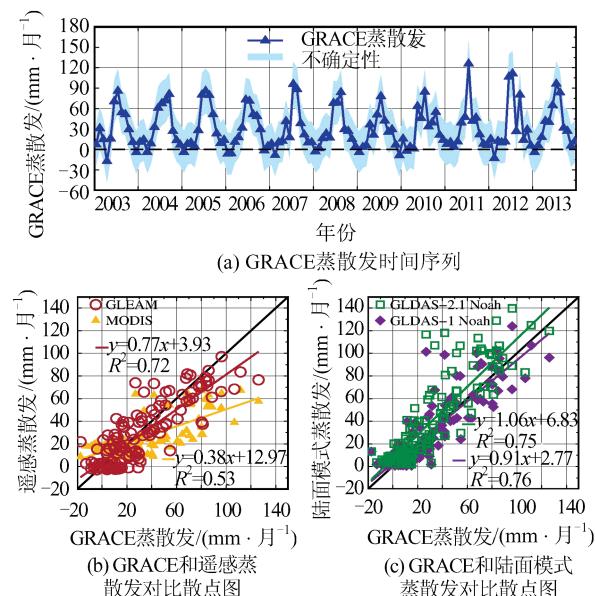


图3 西辽河流域GRACE蒸散发时间序列及与遥感和陆面模式蒸散发对比散点图

Fig. 3 Time Series of ET over the WLRB from GRACE and Scatter Plot with ET from Remote Sensing and Land Surface Model

表1 西辽河流域2003—2013年和2005—2011年的平均年累计降水量和平均年累计蒸散发估计/mm

Tab.1 Mean Annual Precipitation and ET Estimation over the WLRB for 2003—2013 and 2005—2011/mm

时间段	平均年累计降水量	平均年累计蒸散发				
		GRACE估计	GLDAS-2.1 Noah	GLEAM	MODIS	
2003—2013年	367.2 ± 63.6	366.1 ± 38.6	469.9 ± 57.5	367.2 ± 56.9	330.4 ± 36.1	293.1 ± 26.4
2005—2011年	340.7 ± 50.8	350.5 ± 34.6	453.6 ± 37.2	343.3 ± 40.9	321.8 ± 34.4	283.8 ± 27.3

基于遥感数据的蒸散发产品MODIS和GLEAM均未能较好地模拟该区域的蒸散发(图4(b))。特别是MODIS产品严重低估了实际的蒸散发,该产品在干旱区域的表现相对较差。根据遥感资料显示,西辽河流域土地利用中的裸土面积不断增加^[18],这可能是MODIS产品对西辽河流域总蒸散发量严重低估的原因。如图4(b)所示,2003—2013年GLEAM的年累计蒸散发结果比基于GRACE的结果平均偏小约30 mm。文献[6]通过分析2004—2005年ChinaFLUX位于西辽河流域西侧的内蒙古草地站的实测蒸散发,结果发现,GLEAM蒸散发产品结果与实际蒸散发观测结果在年平均值上的差异为27.3 mm,这一发现与本文的研究结果十分吻合。由此说明,除了通量塔实测蒸散发结果外,基于卫星重力也可以有效估计流域尺度的蒸散发,并可用于评估

不同的蒸散发产品。

3 结语

本文基于水量平衡方程,利用GRACE陆地水通量、降水和径流资料估计了西辽河流域的实际蒸散发,并比较和评估了遥感蒸散发产品和GLDAS陆面模式的蒸散发结果在西辽河流域的适用性。主要结论如下:

1) 基于GRACE和降水径流资料估计的西辽河流域2003—2013年的年平均蒸散发与同时期的年平均降水量相当,这说明该区域的降水主要以蒸散发的形式返回大气。在2005—2011年的干早期,基于水量平衡的年平均蒸散发为350.5 mm,比同时期的降水多了9.8 mm,这主要是由于干早期的灌溉活动导致地下水亏损,从而造成了流域内实际蒸散发的增加。

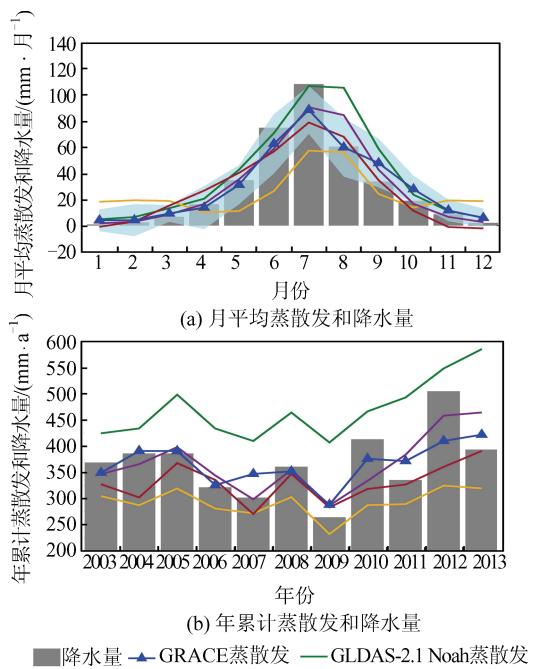


图 4 西辽河流域月平均以及年累计蒸散发和降水量

Fig. 4 Monthly and Annual ET and Precipitation over the WLRB

2) 在月平均尺度上, MODIS 产品在夏季降水高峰期估计的蒸散发显著偏小,在冬季估计的蒸散发则偏大。GLDAS-2.1 Noah 则显著高估了蒸散发的年内变化。GLDAS-1 Noah 模式模拟的蒸散发结果与基于 GRACE 结果在年内 1 月—7 月比较接近,而在 8 月—12 月则存在 5~20 mm 的偏差。

3) MODIS 和 GLEAM 均低估了西辽河流域的年平均累计蒸散发量。GLEAM 产品在降水偏少时期估计的蒸散发与 GRACE 水量平衡结果符合得较好,但在偏丰水年则差别相对较大。GLDAS-2.1 降水驱动数据的偏差导致其蒸散发输出结果被显著高估。

参 考 文 献

- [1] Li Chengzhen, Sun Wanguang. Analysis of Water Resources Supply-Demand Balance in the Plain of West Liaohe River[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(1): 56-61(李成振, 孙万光. 西辽河平原区水资源供需平衡分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 56-61)
- [2] Wu Kai, Wang Xiaolin, Wang Gaoxu, et al. Spatial-Temporal Variation of Precipitation in West Liao River Basin During 1961—2014[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(2): 22-28(吴凯, 王晓琳, 王高旭, 等. 1961—2014 年西辽河流域降水时空变异性诊断[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 22-28)
- [3] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1 781-1 800
- [4] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM V3: Satellite-Based Land Evaporation and Root-Zone Soil Moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1 903-1 925
- [5] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394
- [6] Yang X Q, Yong B, Ren L L, et al. Multi-scale Validation of GLEAM Evapotranspiration Products over China via ChinaFLUX ET Measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38 (20): 5 688-5 709
- [7] Pan Y, Zhang C, Gong H L, et al. Detection of Human-Induced Evapotranspiration Using GRACE Satellite Observations in the Haihe River Basin of China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (1): 190-199
- [8] 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(20): 1-4
- [9] Ramillien G, Frappart F, Guntner A, et al. Time Variations of the Regional Evapotranspiration Rate from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Gravimetry[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): 1-8
- [10] 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): 98-109
- [11] Chen J L, Wilson C R, Li J, et al. Reducing Leakage Error in GRACE-Observed Long-Term Ice Mass Change: A Case Study in West Antarctica[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(9): 925-940
- [12] 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
- [13] Sakumura C, Bettadpur S, Bruinsma S. Ensemble Prediction and Intercomparison Analysis of GRACE Time-Variable Gravity Field Models[J]. *Geophys-*

- cal Research Letters*, 2014, 41(5): 1 389-1 397
- [14] Mao Y N, Wang K C, Liu X M, et al. Water Storage in Reservoirs Built from 1997 to 2014 Significantly Altered the Calculated Evapotranspiration Trends over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(17): 10 097-10 112
- [15] 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: Solid Earth*, 2009, 114(B5): 1-9
- [16] Zhao Z Z, Lin A W, Feng J D, et al. Analysis of Water Resources in Horqin Sandy Land Using Multi-source Data from 2003 to 2010[J]. *Sustainability*, 2016, 8(4): 1-18
- [17] Zhong Y L, Zhong M, Feng W, et al. Groundwa- ter Depletion in the West Liaohe River Basin, China and Its Implications Revealed by GRACE and in Situ Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (4): 493
- [18] Jiang Yanyang, Wang Wen, Zhou Zhenghao. Evaluation of MODIS MOD16 Evapotranspiration Product in Chinese River Basins[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 517-528(姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 517-528)
- [19] Wang W, Cui W, Wang X J, et al. Evaluation of GLDAS-1 and GLDAS-2 Forcing Data and Noah Model Simulations over China at the Monthly Scale [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(11): 2 815-2 833

Evaluation of the Evapotranspiration in the West Liaohe River Basin Based on GRACE Satellite and in Situ Measurements

ZHONG Yulong^{1,2,3} ZHONG Min^{2,3} FENG Wei² YAN Haoming² LI Chengzhen⁴

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co. Ltd, Changchun 130061, China

Abstract: The West Liaohe River Basin (WLRB) is one of the most sensitive areas to climate change in China. Here we use the terrestrial water fluxes derived from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellites, precipitation dataset, and in situ runoff records, to calculate the actual evapotranspiration (ET) in the WLRB based on the water balance equation. We find that during the drought period of 2005—2011, the mean annual ET is 350.5 mm, which is 9.8 mm more than the mean annual precipitation during the same time period. This difference can be explained by the groundwater depletion in the WLRB (about 6.8 mm/a). We also find that the ET products from remote sensing both underestimate the actual ET in the WLRB, compared with the GRACE-based ET results. However, the ET simulated by the global land data assimilation system version 2.1 (GLDAS-2.1) Noah is overestimated. This paper highlights the capability of GRACE to monitor actual ET in the WLRB and to validate different ET products from remote sensing and models.

Key words: GRACE; water balance equation; evapotranspiration; drought; the West Liaohe River Basin

First author: ZHONG Yulong, PhD, lecturer, specializes in the application of satellite geodesy. E-mail:zhongyl@cug.edu.cn

Corresponding author: FENG Wei, PhD, associate researcher. E-mail:fengwei@whigg.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41774094, 41674084, 41431070, 41474063; the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDB23030100.

引文格式: ZHONG Yulong, ZHONG Min, FENG Wei, et al. Evaluation of the Evapotranspiration in the West Liaohe River Basin Based on GRACE Satellite and in Situ Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 173-178. DOI: 10.13203/j.whugis20170402(钟玉龙, 钟敏, 冯伟, 等. 联合 GRACE 重力卫星与实测资料估计西辽河流域蒸散发量[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(2): 173-178. DOI: 10.13203/j.whugis20170402)