

安琳莉, 黄建平, 任 钰, 等. 中国北方旱区陆地水储量变化特征及其归因分析[J]. 干旱气象, 2022, 40(2): 169–178, [AN Linli, HUANG Jian-ping, REN Yu, et al. Characteristic and cause analysis of terrestrial water storage change in drylands of northern China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(2): 169–178], DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-02-0169

中国北方旱区陆地水储量变化特征 及其归因分析

安琳莉, 黄建平, 任 钰, 张国龙

(兰州大学西部生态安全协同创新中心, 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于重力反演与气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 卫星观测数据分析中国北方旱区近 20 a 的陆地水储量变化, 并结合多种观测和模式数据分析其变化特征和原因。结果表明 2002—2020 年中国北方旱区陆地水储量以每年 17.80 ± 1.72 Gt 的净速率下降。地下水、根区土壤水和表层土壤水均不同程度减少。归因分析发现: 在中国北方旱区, 地表升温 and 人为耗水等因素造成蒸散大量增加。蒸散的负向贡献超过同期降水的正向贡献, 使得区域净水储量持续减少, 区域水资源压力攀升。因此, 需要在中国北方旱区采取更有效的节水措施和建立全面的水资源监测系统。

关键词: 陆地水储量; 中国北方旱区; 降水; 蒸散

文章编号: 1006-7639(2022)02-0169-10 DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-02-0169

中图分类号: P344

文献标志码: A

引 言

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)是地下水、土壤水、地表水、冰雪水和生物圈含水的总和^[1]。它不仅是地球上动植物赖以生存的生命之源, 而且关系着人类的生存发展、社会稳定以及生态系统的稳定和健康^[2]。作为地下到地上水资源的垂直聚合, TWS 的变化往往用于衡量区域综合水资源的变化情况。一般来说, 当没有强烈水文气候变化或重大人为压力时, TWS 的变化通常保持在正常范围内, 处于动态平衡状态^[1]。然而, 如果陆地水文系统遭受的自然或人为压力超过一定阈值, 这种平衡状态将会被打破, TWS 会出现明显的增加或减少趋势。而 TWS 的减少会带来一系列不良后果, 如区域水资源压力加剧、海平面上升潜在风险增大等^[2]。

随着气候变化和密集的人类活动, 全球的淡水供应正在发生改变, 冰川融化^[1, 3]、地下水不可持续枯竭^[4]、湖泊收缩^[5]等现象层出不穷。全球多个地区的 TWS 已经发生改变, 有些地区甚至出现显著的

净下降^[1], 如中国的华北平原^[6-7] 和印度西北部^[1, 8]。研究发现, 近 50 亿人生活的地区可能面临水安全威胁, 并且由于降水和河流流量益发多变, 2/3 的陆地水生物栖息地也面临枯竭威胁^[9]。全球水资源形势不容乐观, TWS 变化、水资源管理、水资源保护等问题的研究迫在眉睫。

中国水资源时空分布不均, 南方地区气候湿润、河网密集, 而北方地区气候干燥、生态脆弱^[10]。近年来, 中国 TWS 整体呈现波动变化, 2003—2004 年上升, 2004—2005 年变化较为平稳, 随后 TWS 逐渐减少, 直到 2008 年之后, TWS 处于相对稳定的波动变化中, 2010 年和 2013 年出现波峰, 2011 年和 2015 年出现波谷^[11]。然而, TWS 变化存在巨大的区域差异。例如, 2003—2016 年, 中国西部、南方地区和东北地区的 TWS 分别以每年 4.64、7.09、4.39 mm 的速率增加; 而中国西北部、青藏高原东南部和中国北部的 TWS 分别以每年 5.94、8.78、7.13 mm 的速率减少^[11-13]。这表明在我国生态脆弱的北方干旱半干旱区, 大部分地区为 TWS 下降的热点区域, 区域水资源正面临着减少威胁。

收稿日期: 2021-09-24; 改回日期: 2021-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991231、42041004)资助

作者简介: 安琳莉(1997—), 四川成都人, 硕士生, 主要从事气候变化研究。E-mail: anll15@lzu.edu.cn。

通信作者: 黄建平(1962—), 中国科学院院士, 主要从事气候变化研究。E-mail: hjp@lzu.edu.cn。

中国北方旱区位于我国内陆,占据中国超 30% 的国土面积,由于地域和环境因素的限制,这里是我国许多贫困人口聚集区域。该地区以草原、荒漠、戈壁、黄土高原、灌木、稀树草原等景观为主,生态环境脆弱且敏感,时常受到干旱和荒漠化威胁^[14-18]。在该区域,TWS 的下降会带来一系列的不利影响,如会加剧区域的缺水状况,破坏生态平衡,影响人类生存和工农业生产,制约经济增长和社会发展,严重的话甚至可能会造成社会动荡^[19-20]。同时,基于长期干旱气候条件和人类水资源管理之间的潜在联系,干旱半干旱区相比于湿润区更容易出现持续的 TWS 减少。并且,这种水资源枯竭可以通过水文循环、地气系统相互作用等机制影响更广大的区域^[21]。因此中国北方旱区的 TWS 变化及其归因分析对区域水资源保护、经济社会发展等具有重要意义。然而,TWS 变化时空对比强烈,是多种因素共同耦合作用的结果,归因复杂^[12 22-23]。同时,受限于资料的匮乏,目前 TWS 归因主要聚焦于一些热点地区,如青藏高原、新疆和华北地区^[1],对生态环境脆弱的中国北方旱区的 TWS 变化特征关注较少。

自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)联合开发的重力反演与气候实验卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)^[24]升空以来,TWS 的研究取得了突破性进展。本研究利用 GRACE 卫星产品研究 2002—2020 年中国北方旱区 TWS 的变化特征,分析观测资料同化得到的地下水、根区土壤水、表层土壤水的同期变化。通过分析降水、蒸散、径流和人为耗水等影响因子,探索中国北方旱区近期 TWS 变化的成因。以期对我国的水资源保护和适应性措施的制定提供帮助,并为区域可持续发展战略实施提供科学参考依据。

1 研究区、资料和方法

1.1 研究区的确立

干燥度指数(aridity index, AI)定义为降水与潜在蒸散的比值,表征一个地区的气候干旱程度^[25-26]。依据联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)的划分标准,干旱半干旱地区定义为 $AI < 0.65$ 的区域。AI 计算过程中的气温和降水资料来自美国气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC),空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ^[25]。基于 AI 的气候平均值(1961—1990 年)^[25-26],中国北方 $AI < 0.65$ 的区域被确定为本文的研究区域,即中国

北方旱区(图 1)。

文中附图涉及地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4618 号的标准地图制作,底图无修改。

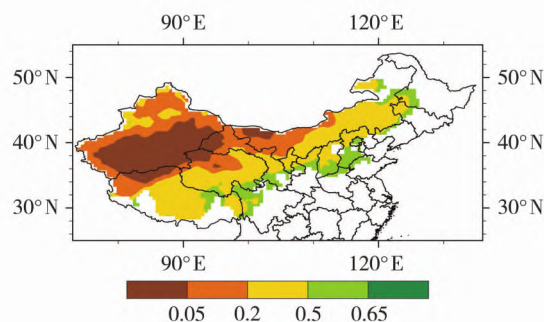


图 1 基于 1961—1990 年 $AI < 0.65$ 确定的中国北方旱区

Fig. 1 The categorized drylands in northern China based on the $AI < 0.65$ from 1961 to 1990

1.2 资料

1.2.1 GRACE 卫星 TWS 数据集

使用 4 种 GRACE 卫星 TWS 数据产品,分别来自不同的发行机构,采用不同数据处理方案得到。包括:(1) 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)处理和发行的质量浓度方案产品(JPL-M)^[27],版本 RL06 v02(https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/);(2) JPL 处理和发行的球谐函数方案产品(JPL-SH),版本 RL06 v03(<https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/>);(3) 美国德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, CSR)处理和发行的质量浓度方案产品(CSR-M)^[28],版本 RL06 v02(http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html);(4) CSR 处理和发行的球谐函数方案产品(CSR-SH),版本 RL06 v03(<https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/>)。4 种 GRACE 产品时间为 2002 年 4 月到 2020 年 7 月,部分月份数据缺失。为了保持一致,4 种 GRACE 产品都调整为相对于 2004—2009 年均值的距平。

1.2.2 地下水、根区土壤水和表层土壤水

地下水、根区土壤水、表层土壤水数据来自全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)中的 CLSM(catchment land surface model)模型。数据集的同化过程中使用了 GRACE 观测数据,版本为 GRACE-DA1 V2.2(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_CLSM025_DA1_D_2.2/summary?keywords=GLDAS2.2),其为 2003 年 2 月

到2020年7月全球的每日格点数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

1.2.3 降水和气温

降水和气温数据来自中国气象科学数据中心的每月地面降水、地面气温格点数据集,版本为v2.0,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。此数据是基于中国地面2472个台站的降水和气温观测资料,利用ANUSPLIN软件的薄盘样条法进行空间插值后生成的1961—2020的中国月降水量(http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_PRE_MON_GRID_0.5)和月平均气温(http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_TEM_MON_GRID_0.5.html)格点数据。

1.2.4 蒸散

蒸散数据(<https://www.gleam.eu/#downloads>)来自全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型(global land-surface evaporation: the Amsterdam methodology, GLEAM)。此数据基于卫星观测和再分析资料的实际蒸散估计。模型首先根据观测到的地表净辐射和近地表气温计算潜在蒸发,然后再基于微波植被光学深度(vegetation optical depth, VOD)观测值和根区土壤水分估算值,将裸露土壤、高冠层和矮冠层的潜在蒸发转换为实际蒸发。实际蒸散数据是基于卫星观测和ERA5再分析资料的v3.5a版本,包含从1980年1月到2020年12月共41a的蒸散数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

1.2.5 径流

径流数据基于机器学习算法获得的全球径流重建数据集(global runoff reconstruction, GRUN)^[29]。该算法用GSIM(global streamflow indices and metadata archive)数据集的现场径流观测进行训练,并将全球土壤湿度项目第三阶段(third global soil wetness project, GSWP3)气象强迫数据集的前期降水和温度数据作为输入,最终得到全球径流序列的网格化重建。该数据集(<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/324386>)为1902—2014年每月径流,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

1.2.6 人为耗水

人为耗水数据为水文模型WaterGAP2.2d^[30]的模拟输出,其空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,时间为1901—2016年。该耗水量包含工业、农业、畜牧和生活四大部门的人为耗水量(<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.918447>),它表示在考虑实际地表水可用性的情况下人为取水中蒸散或消耗掉的部分,即人为蒸散。

1.3 方法

1.3.1 区域均值和变化速率计算

在计算降水、蒸散、径流和人为耗水等变量的区域均值时,根据面积进行加权,公式如下:

$$F = \sum a_i f_i / \sum a_i \quad (1)$$

式中: F 为变量的区域均值; a_i 为第 i 个栅格的面积; f_i 为第 i 个栅格对应的变量数值。

TWS、地下水、根区土壤水和表层土壤水的区域总量,则是在区域均值的基础上考虑了区域总面积和水的密度得到。此外,通过对TWS、地下水、根区土壤水、表层土壤水的每月区域总量进行最小二乘线性回归,可得其在研究期间内的变化速率。

1.3.2 水分平衡方程

根据水分平衡方程^[31]可知,TWS的变化由多种变量共同决定:

$$\Delta TWS = P - E - R - HE \quad (2)$$

式中: ΔTWS 为TWS变化; P 为降水; E 为自然蒸散; R 为径流; HE 为人为耗水(人为蒸散)。在平衡状态下,TWS在较小范围内波动, $\Delta TWS = 0$,此时的降水和蒸散等变量可视作平衡值。当降水、蒸散、径流或人为耗水偏离平衡值出现异常变化时,就会出现水储量的变化,即 $\Delta TWS \neq 0$ 。根据RODELL等^[1]的方法,假设长期的降水和蒸散等变量的平均值为平衡值。根据降水、蒸散、径流和人为耗水在研究时间段内的平均值与平衡值的对比,可以计算出各个变量对于TWS变化的贡献。例如,当降水大于平衡值时,将使TWS产生增加的倾向(正向贡献);类似地,当蒸散、径流或人为耗水大于平衡值时,将使TWS产生减少的倾向(负向贡献)。为了探索中国北方旱区TWS变化成因,分析降水、蒸散、径流和人为耗水的近期均值相对于长期平衡值的变化。

2 结果与分析

2.1 中国北方旱区的TWS变化

从图2可以看出,2002年4月至2020年7月,除青藏高原北部和东北地区TWS显著增加外,中国北方旱区大部分地区TWS在减少。其中,显著减少中心主要位于青藏高原南部、华北平原和新疆地区,这与之前XU等^[12]研究结果基本一致。与整个中国大陆净TWS较为平缓的变化不同^[11,32],中国北方旱区TWS从2002年开始呈现显著的持续性波动下降。4种GRACE数据所显示的净下降速率为 $16.47 \sim 18.52 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ 。为增强结果的可靠性,将以上4个GRACE数据集的时间序列进行集合平均

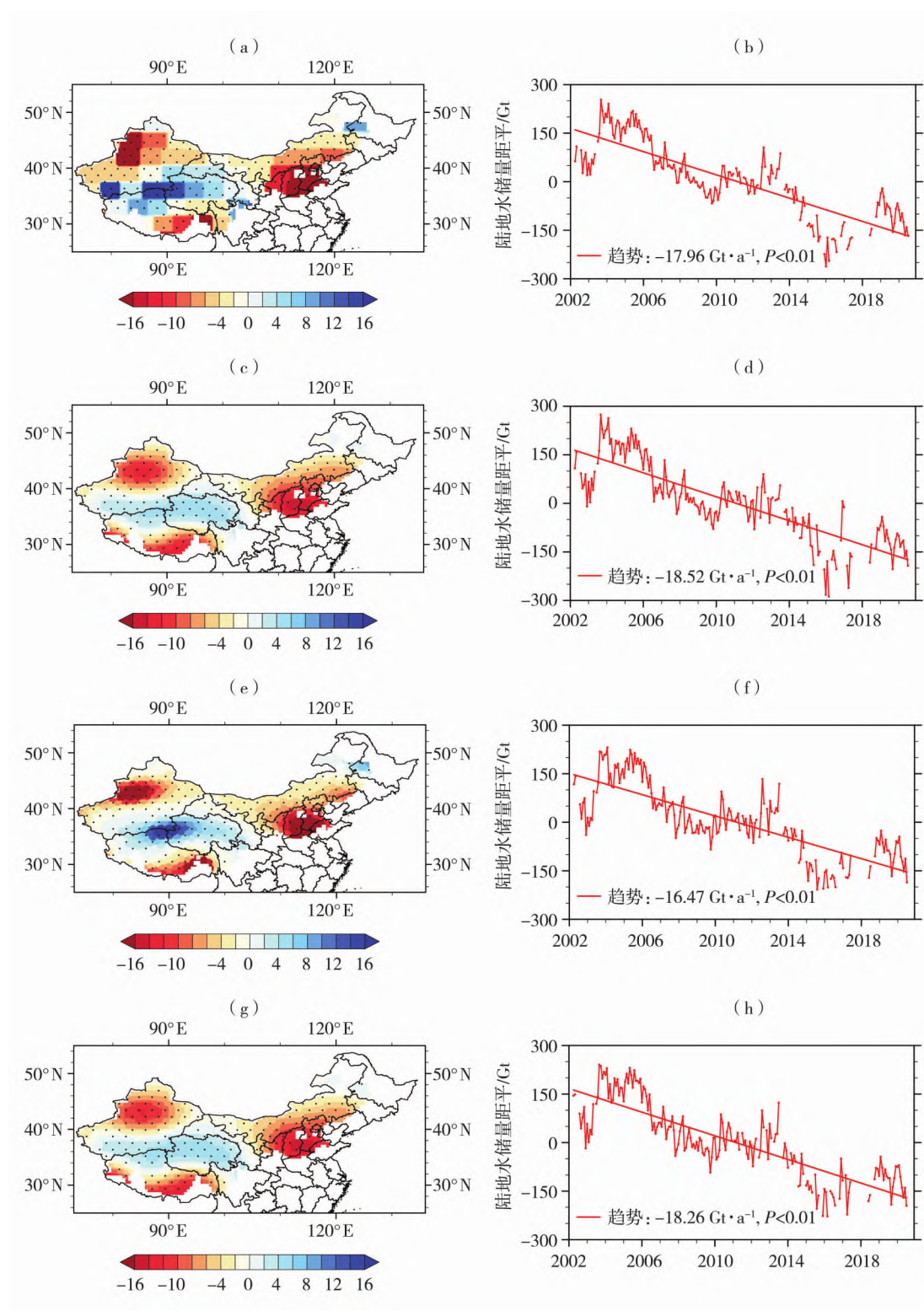


图2 基于 JPL-M (a,b)、JPL-SH (c,d)、CSR-M (e,f) 和 CSR-SH (g,h) 产品的
中国北方旱区 2002 年 4 月至 2020 年 7 月 TWS 气候倾向率空间分布 (a,c,e,g 单位: $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
和去除季节循环的 TWS 区域总量距平时间序列 (b,d,f,h)
[黑点表示该地气候倾向率通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验(下同)]

Fig. 2 Spatial distribution of climate tendency rate of TWS (Unit: $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
and time series of deseasonalized TWS regional total amount anomaly from April 2002 to July 2020
in drylands of northern China based on JPL-M (a,b), JPL-SH (c,d), CSR-M (e,f) and CSR-M (g,h) products
(Black dots in the maps denote the regions where the climate tendency rate
of TWS passed the 0.05 significance test (the same as below))

(图3)。集合平均后的结果表明,中国北方旱区的TWS以每年 $17.80 \pm 1.72 \text{ Gt}$ 的速率下降,单位面积的下降速率为 $3.1 \pm 0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

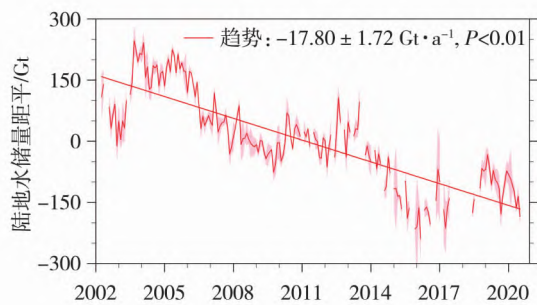


图3 4种GRACE产品去除季节循环的TWS区域总量距平的集合平均
(阴影代表两倍标准差)

Fig. 3 Ensemble mean of anomaly of deseasonalized TWS regional total amount of 4 GRACE products
(The shaded denotes the two standard deviation)

TWS整合了从地下到地上垂直方向所有水体的水量,其变化是所有水文分量变化(地下水、土壤水、地表水、雪水、生物圈含水变化)的综合体现^[1]。图4为2003年2月至2020年7月地下水、根区土壤水和表层土壤水水量的时空变化。可以看出,3种水文分量的时空变化与TWS的时空变化基本

一致。在空间分布上,3种水文分量也展示了3个主要的减少中心(青藏高原南部、华北平原和新疆地区)和2个增加中心(青藏高原北部、东北小部分地区)。从时间序列来看,地下水、根区土壤水和表层土壤水随时间呈现显著下降趋势。其中,地下水下降速率最快,为每年 8.26 Gt ,其次是根区土壤水(每年 1.69 Gt)和表层土壤水(每年 0.04 Gt)。随着水体所处深度加深,发生显著下降的范围和强度都越大。这可能是由于水体所处的深度越深,对气候变化的敏感性越弱,响应越慢。例如,表层土壤干旱可以在降水之后得到快速恢复;然而地下水深处地下,只能依靠河湖渗流和偶发短时强降水才能得到补充,因此损失后恢复缓慢。总的来说,中国北方旱区近年来的TWS下降伴随着不同程度的地下水、根区土壤水、表层土壤水的减少。

2.2 水平衡分析法

为进一步探索中国北方旱区TWS变化的成因,比较研究时间段内降水、蒸散、径流和人为耗水均值相对于长期均值的变化。这种比较可以初步了解研究时段内各变量对于TWS变化的贡献^[1]。

2.2.1 降水

从中国北方旱区2002—2020年与1980—2020年平均年降水量差值[图5(a)]看,中国北方旱区

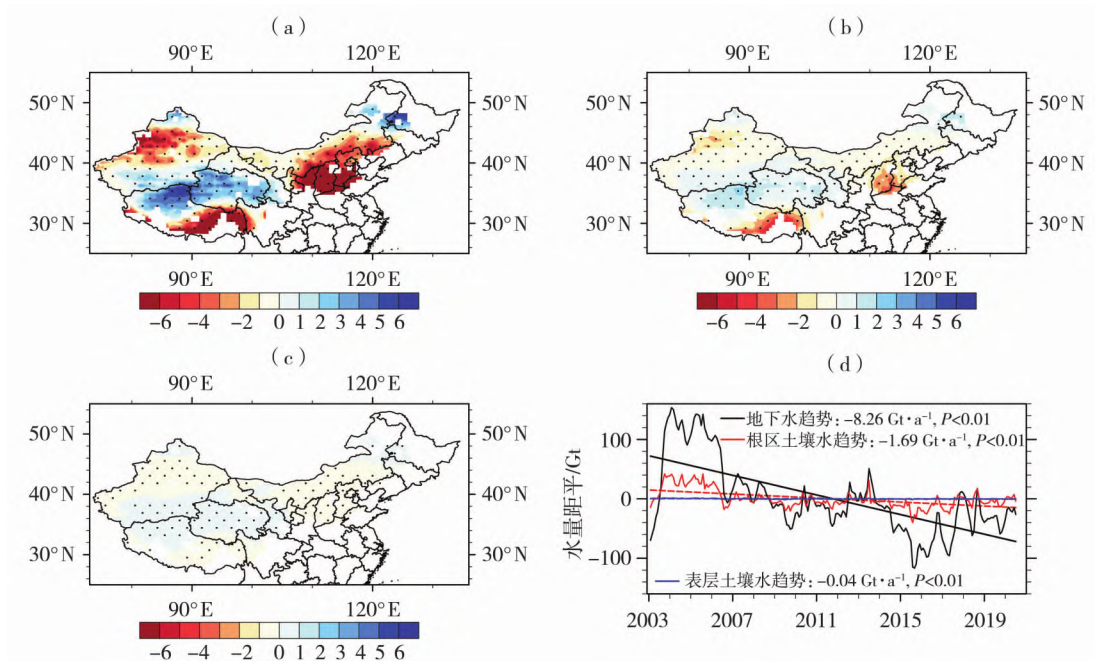


图4 2003年2月至2020年7月中国北方旱区地下水(a)、根区土壤水(b)、表层土壤水(c)气候倾向率(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 空间分布(a、b、c)及区域总量距平时间序列(d)

Fig. 4 Spatial distribution of climate tendency rate (Unit: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) of groundwater (a), root zone soil moisture (b) and surface soil moisture (c) from February 2003 to July 2020 in drylands of northern China and time series of regional total anomaly (d)

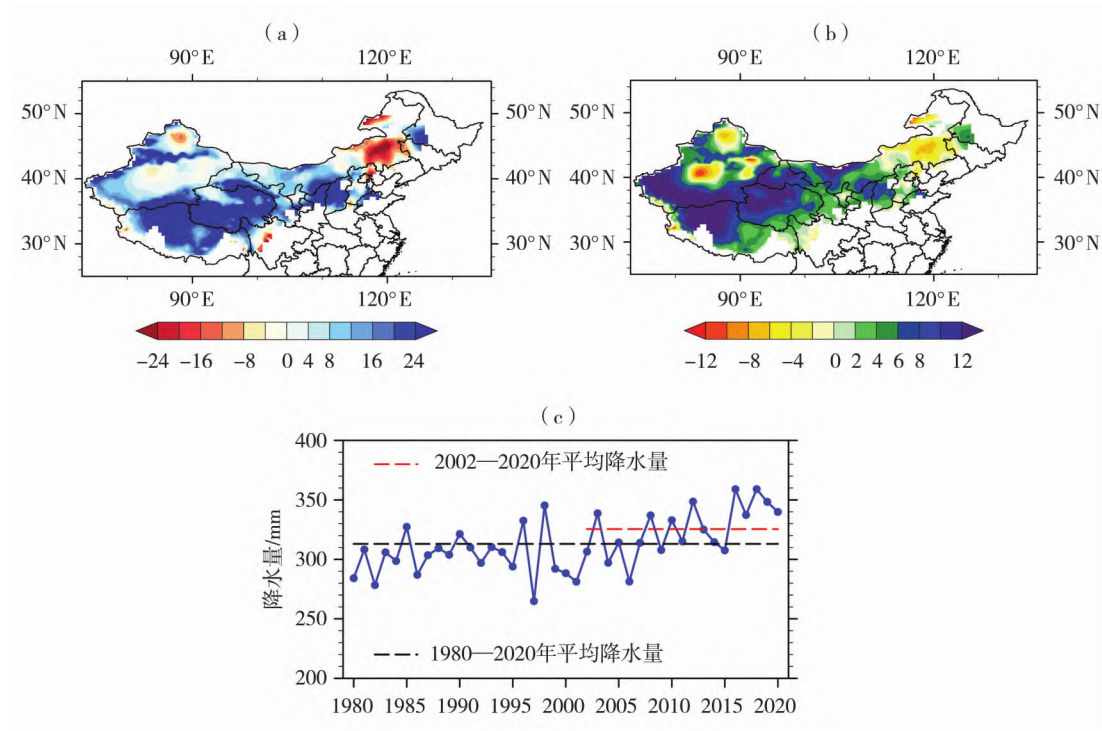


图5 中国北方旱区 2002—2020 年与 1980—2020 年平均年降水量差值 (a, 单位: mm)、差值占 1980—2020 年平均年降水量百分比 (b, 单位: %) 的空间分布和 1980—2020 年平均降水量年际变化 (c)

Fig. 5 The spatial distribution of difference in the average annual precipitation between the period of 2002–2020 and the period of 1980–2020 (a, Unit: mm), the difference as a percentage of the average annual precipitation during 1980–2020 (b, Unit: %) and the inter-annual variation of average precipitation during 1980–2020 (c) in drylands of northern China

大部分区域 2002—2020 年的平均年降水量都高于 1980—2020 年平均值, 呈正异常。显著的正异常中心主要位于青藏高原、华北平原、天山山脉附近以及东北小部分地区, 显著的负异常中心位于内蒙古东北部、新疆塔里木盆地和准噶尔盆地。可见, 青藏高原北部和东北小部分地区 TWS 增加与近期降水流入的显著增加有关, 这证实了先前的研究^[12]。相比于青藏高原北部, 青藏高原南部降水增大的占比偏小 [图 5 (b)], 气候变暖带来的冰川融化主导了 TWS 下降^[12]。此外, 内蒙古东北部、新疆塔里木盆地和准噶尔盆地的 TWS 减少可能与当地近年来的降水减少有关。在这些地区, 自然降水变化与 TWS 变化密切相关。然而, 华北平原、天山山脉附近显著的降水正异常却与其 TWS 下降形成了强烈对比, 暗示除降水外的其他因素对于这些地区 TWS 变化的影响巨大。整体来说, 1980—2000 年中国北方旱区的降水处于波动变化之中, 从 2000 年开始降水表现出较为明显的波动上升趋势, 2002—2020 年的平均年降水量大于 1980—2020 年平均值 [图 5 (c)]。这意味着 2002—2020 年内中国北方旱区的降水对

TWS 产生了正向贡献。

2.2.2 蒸散

蒸散包含地表蒸发和植物蒸腾, 是水循环中最大的流出项^[33]。其变化由多种因素共同驱动, 如气温、风速、人类活动等。研究表明, 地表升温主导了蒸散的趋势, 全球陆地蒸散在 2003—2019 年增加了近 10%^[34]。图 6 为中国北方旱区 2002—2020 年去除季节循环的月平均气温变化。可以看出, 在全球变

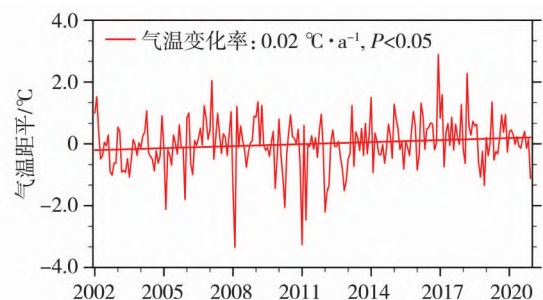


图6 中国北方旱区 2002—2020 年去除季节循环的月平均气温变化
Fig. 6 The variation of deseasonalized monthly average temperature during 2002–2020 in drylands of northern China

暖背景下^[35] 2002—2020 年中国北方旱区地表气温以每年 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率升高。暖化将会增大中国北方旱区的蒸散需求, 区域水流出逐渐攀升。

从中国北方旱区 2002—2020 年与 1980—2020 年平均年蒸散量差值 [图 7 (a)]、差值占 1980—2020 年平均年蒸散量的百分比 [图 7 (b)] 空间分布可以看出, 华北平原、天山山脉附近等大部分地区都出现了蒸散异常增加。1980 年以来, 中国北方旱区的年平均蒸散量持续增加, 2002—2020 年平均蒸散量明显大于 1980—2020 年的平均蒸散量 [图 7 (c)]。

这意味着近期中国北方旱区的蒸散很可能对 TWS 变化产生负向贡献。

2.2.3 径流

除蒸散外, 径流也是重要的流出项, 并且是人类生产生活用水的最重要来源之一。从图 8 可以看出, 1980—2014 年中国北方旱区, 平均径流无明显趋势。近期的平均径流量 (2002—2014) 与长期的平均径流量 (1980—2014 年) 差异很小。这意味着相对于降水和蒸散的贡献, 径流对近期 TWS 变化的贡献基本可以忽略。

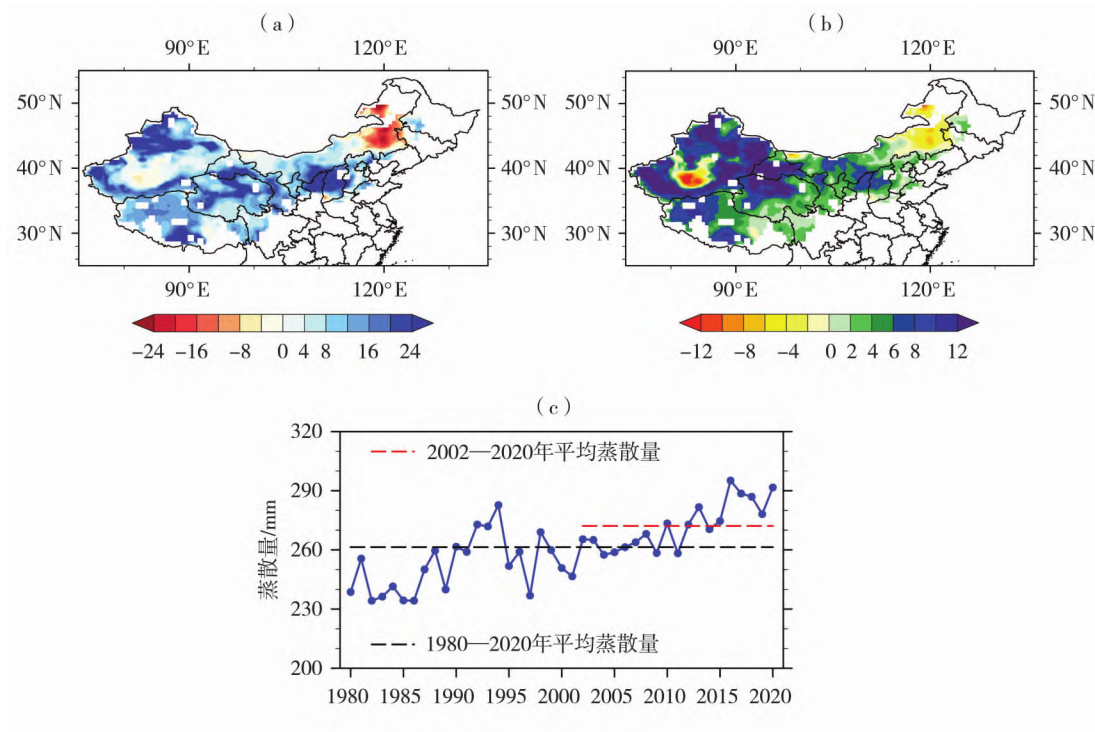


图 7 中国北方旱区 2002—2020 年与 1980—2020 年平均年蒸散量差值 (a, 单位: mm)、差值占 1980—2020 年平均年蒸散量的百分比 (b) 的空间分布和 1980—2020 年平均蒸散量年际变化 (c)

Fig. 7 The spatial distribution of difference of the average annual evapotranspiration between the period of 2002–2020 and the period of 1980–2020 (a, Unit: mm), the difference as a percentage of the average annual evapotranspiration during 1980–2020 (b) and the inter-annual variation of average evapotranspiration during 1980–2020 (c) in drylands of northern China

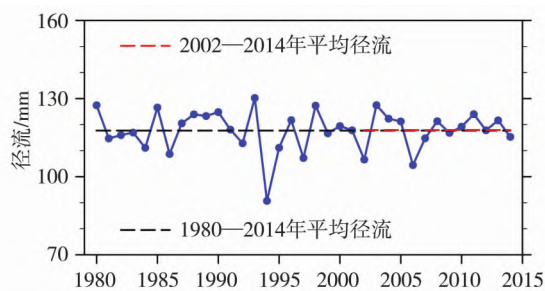


图 8 1980—2014 年中国北方旱区平均径流年际变化

Fig. 8 The inter-annual variation of average runoff during 1980–2014 in drylands of northern China

2.2.4 人为耗水

随着经济社会的快速发展, 人类用水需求在过去 100 a 间增长了近 6 倍, 并且预计这种增长会持续下去^[36]。为了满足工业、农业、畜牧和生活用水需求, 人们从地下水、河流、湖泊中大量取水, 造成大量的额外蒸散。经统计, 2002—2016 年, 平均年人为耗水量为 17.6 mm , 明显超过长期的人为耗水均值。新疆天山山脉的山前绿洲地区、黄河流域、华北平原和内蒙古东北部出现大量的人为耗水 [图 9 (a)]。1980—2016 年, 中国北方旱区的人为耗水从 11.9 mm 增长到 19.0 mm [图 9 (b)]。

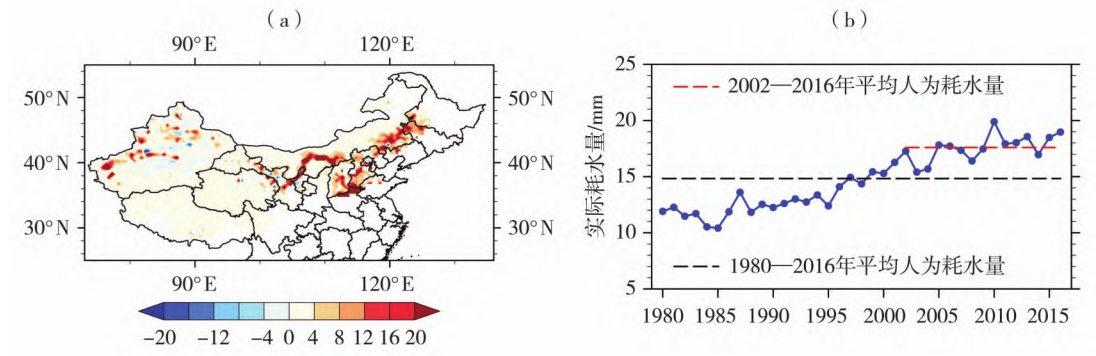


图9 中国北方旱区 2002—2016 年与 1980—2016 年平均年人为耗水量差值的
空间分布 (a, 单位: mm) 和 1980—2016 年平均人为耗水量年际变化 (b)

Fig. 9 The spatial distribution of difference of the average annual human water consumption between the period of 2002–2016 and the period of 1980–2016 (a, Unit: mm) and the inter-annual variation of average human water consumption during 1980–2016 (b) in drylands of northern China

3 讨论与结论

中国北方旱区 TWS 在 2002 年 4 月到 2020 年 7 月整体呈现快速下降趋势(每年 17.80 ± 1.72 Gt),主要的下降中心位于青藏高原南部、华北平原和新疆地区。这种普遍的下降趋势与中国南方湿润地区 TWS 的普遍增加趋势^[11]形成强烈的对比。在中国北方旱区显著的 TWS 下降中,地下水、根区土壤水和表层土壤水都呈现出不同程度的减少,并且,这 3 种水文分量减少带来的不利影响在中国北方旱区将被放大。在中国北方旱区,根区土壤和表层土壤干旱除了直接威胁植物和农作物生存外,还可能会影响生物多样性并增大干旱半干旱区土地退化和荒漠化风险^[37]。与中国降水充沛且河网密集的南方地区不同,地下水是中国北方旱区广大无河区的居民赖以生存的稳定水源,其下降会直接关系到当地人民的生存和发展,甚至关系到社会的稳定^[21]。然而,地下水深处地下,补充效率低,取水压力大,其下降更加倾向于不可持续^[38],因此,中国北方旱区的 TWS 下降及其伴随的水文分量变化需要更多的关注和研究。

TWS 的变化由降水、蒸散、径流和人为耗水共同决定。通过对比降水等变量近年情况相对于长期均值的变化,发现:研究期间降水对 TWS 产生了正向贡献,径流的贡献基本可以忽略。在气候变暖和人为耗水等因素影响下,中国北方旱区的蒸散持续增加,过量的蒸散对 TWS 产生了负向贡献。降水作为流入项,在其他因素处于正常状态情况下,其正向贡献必然会使 TWS 增加。然而,中国北方旱区 TWS 的净变化为负值,从 2002 年到 2020 年 TWS 共计下

降约 338 Gt。可见,近期中国北方旱区的蒸散异常增加主导了 TWS 的下降。蒸散的负向贡献超过了降水的正向贡献,导致研究区域内 TWS 的持续下降。

本研究揭示了在升温和人为耗水影响下的中国北方旱区的蒸散异常增加是 TWS 枯竭的最主要因素,同时,在干旱气候、全球变暖和人类活动共同作用下,即使降水增多也很难逆转中国北方旱区 TWS 的下降趋势。根据本文和其他研究结果^[12, 21]推测,西北暖湿化趋势下^[39],中国北方旱区 TWS 持续下降的原因可能是深层地下水的持续减少和青藏高原南部的显著冰川质量损失。一方面,气候变暖驱动着青藏高原南部冰川的加速融化^[40–41],另一方面,降水的增加主要补给地表水和浅层地下水,而干旱和半干旱气候下的深层地下水难以得到有效补充^[38]。同时,在干旱地区有限的地表水和干湿季分明的条件下,地下水是人类用水中唯一可靠的水资源。研究表明,全球干旱半干旱区人为造成的地下水损失,约占全球干旱半干旱区 TWS 下降的 70%^[21]。相应地,在中国北方旱区,巨大的地下水损失也很可能是西北暖湿化下 TWS 持续减少的主要原因之一,并且,干旱半干旱地区地下水的减少与农业灌溉有着密切关系^[21],需要采取其他有效措施,如合理的农业灌溉用水结构、有效的冰川保护等,来减缓和遏制中国北方旱区 TWS 的持续减少。

由于受径流和人为耗水数据集时间长度的限制和不同数据集之间巨大偏差的影响,目前的研究主要从定性角度分析了各影响因子对 TWS 变化的贡献。量化地评估各因子的相对贡献,从而准确把握中国北方旱区的 TWS 变化,还有待于日后在中国北方旱区建立完善的观测网从而获取不断完善的观

测数据进行进一步研究。

参考文献:

- [1] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, WIESE D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability [J]. *Nature*, 2018, 557 (7707): 651–659.
- [2] WANG J, SONG C, REAGER J T, et al. Recent global decline in endorheic basin water storages [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11 (12): 926–932.
- [3] ZEMP M, HUSS M, THIBERT E, et al. Global glacier mass changes and their contributions to sealevel rise from 1961 to 2016 [J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 382–386.
- [4] WADA Y, VAN BEEK L P H, VAN KEMPEN C M, et al. Global depletion of groundwater resources [J]. *Geophysical Research Letters* 2010, 37(20), L20402. DOI: 10.1029/2010GL044571.
- [5] PEKEL J-F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418–422.
- [6] ZHAO Q, ZHANG B, YAO Y, et al. Geodetic and hydrological measurements reveal the recent acceleration of groundwater depletion in North China Plain [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 1065–1072.
- [7] TANGDAMRONGSUB N, HAN S C, TIAN S Y, et al. Evaluation of groundwater storage variations estimated from GRACE data assimilation and state-of-the-art land surface models in Australia and the North China Plain [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 483. DOI: 10.3390/rs10030483
- [8] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India [J]. *Nature*, 2009, 460 (7258): 999–1002.
- [9] VOROSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555–561.
- [10] 张强, 赵映东, 张存杰, 等. 西北干旱区水循环与水资源问题 [J]. *干旱气象* 2008, 26(2): 1–8.
- [11] HUANG Q, ZHANG Q, XU C Y, et al. Terrestrial water storage in China: spatiotemporal pattern and driving factors [J]. *Sustainability*, 2019, 11(23): 6646.
- [12] XU L, CHEN N, ZHANG X, et al. Spatiotemporal changes in China's terrestrial water storage from GRACE satellites and its possible drivers [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11 976–11 993.
- [13] WANG X, XIAO X, ZOU Z, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989–2016 [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3471. DOI: 10.1038/s41467-020-17103-w.
- [14] 郭瑞霞, 管晓丹, 张艳婷. 我国荒漠化主要研究进展 [J]. *干旱气象* 2015, 33(3): 505–514.
- [15] LI Y, HUANG J, JI M, et al. Dryland expansion in northern China from 1948 to 2008 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(6): 870–876.
- [16] 柏庆顺, 颜鹏程, 蔡迪花, 等. 近 56 a 中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征 [J]. *干旱气象* 2019, 37(5): 722–728.
- [17] 金红梅, 乔梁, 颜鹏程, 等. 基于近似熵的中国西北地区干旱的非线性特征 [J]. *干旱气象* 2019, 37(5): 713–721.
- [18] 冯蜀青, 王海娥, 柳艳香, 等. 西北地区未来 10 a 气候变化趋势模拟预测研究 [J]. *干旱气象* 2019, 37(4): 557–564.
- [19] AESCHBACH-HERTIG W, GLEESON T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 853–861.
- [20] DALIN C, WADA Y, KASTNER T, et al. Groundwater depletion embedded in international food trade [J]. *Nature*, 2017, 543 (7647): 700–704.
- [21] AN L, WANG J, HUANG J, et al. Divergent causes of terrestrial water storage decline between drylands and humid regions globally [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(23), e2021GL095035. <https://doi.org/10.1029/2021GL095035>
- [22] MO X, WU J J, WANG Q, et al. Variations in water storage in China over recent decades from GRACE observations and GLDAS [J/OL]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16 (2): 469–482.
- [23] MENG F, SU F, LI Y, et al. Changes in terrestrial water storage during 2003–2014 and possible causes in Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(6): 2909–2931.
- [24] 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.
- [25] FENG S, FU Q. Expansion of global drylands under a warming climate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(19): 10 081–10 094.
- [26] HUANG J, YU H, GUAN X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166–171.
- [27] WIESE D N, LANDERER F W, WATKINS M M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7490–7502.
- [28] SAVE H, BETTADPUR S, TAPLEY B D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2016, 121(10): 7547–7569.
- [29] GHIGGI G, HUMPHREY V, SENEVIRATNESI, et al. GRUN: an observation-based global gridded runoff dataset from 1902 to 2014 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1655–1674.
- [30] SCHMIED H M, CÁCERES D, EISNER S, et al. The global water resources and use model WaterGAP v2. 2d: model description and evaluation [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14 (2): 1037–1079.
- [31] SCANLON B R, ZHANG Z, RATEB A, et al. Tracking seasonal fluctuations in land water storage using global models and GRACE Satellites [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5254–5264.
- [32] 陈坤, 蒋卫国, 何福红, 等. 基于 GRACE 数据的中国水储量变化特征分析 [J]. *自然资源学报* 2018, 33(2): 275–286.
- [33] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068–1072.
- [34] PASCOLINI-CAMPBELL M, REAGER J T, CHANDANPURKAR

- H A , et al. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019[J]. *Nature* ,2021 ,593(7860) : 543–547.
- [35] HUANG J , YU H , DAI A , et al. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target [J]. *Nature Climate Change* , 2017 ,7(6) :417–422.
- [36] WADA Y , FLORKE M , HANASAKI N , et al. Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches [J]. *Geoscientific Model Development* ,2016 ,9(1) : 175–222.
- [37] GRIEBLER C , AVRAMOV M. Groundwater ecosystem services: a review[J]. *Freshwater Science* ,2015 ,34(1) :355–367.
- [38] BIERKENS M F P , WADA Y. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review[J]. *Environmental Research Letters* ,2019 ,14(6) :43.
- [39] 李明 ,孙洪泉 ,苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展 [J]. *地理研究* 2021 ,40(4) :1180–1194.
- [40] BRUN F , BERTHIER E , WAGNON P , et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016 [J]. *Nature Geoscience* ,2017(10) :668–673.
- [41] HUGONNET R , MCNABB R , BERTHIER E , et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century [J]. *Nature* ,2021 ,592(7856) :726–731.

Characteristic and cause analysis of terrestrial water storage change in drylands of northern China

AN Linli , HUANG Jianping , REN Yu , ZHANG Guolong

(Collaborative Innovation Center for West Ecological Safety ,
College of Atmospheric Sciences , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China)

Abstract: Based on GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellite products , the TWS changes were calculated in drylands of northern China during the past two decades. And on this basis , the characteristics and causes of TWS changes were explored by using multi-source observations and model simulations. The results show that TWS in drylands of northern China decreased with a rate of 17.80 ± 1.72 Gt per year during 2002–2020 , which was also accompanied by various degrees of reduction in groundwater , root zone soil moisture and surface soil moisture. In drylands of northern China , the effects , such as climate warming and human water consumption , caused a substantial increase of evapotranspiration. The negative contributions of evapotranspiration overpassed the concurrently positive contributions of precipitation , and thus led to the decrease in TWS and increase in regional water stress.

Key words: TWS; drylands of northern China; precipitation; evapotranspiration

(责任编辑: 刘晓云; 校对: 王涓力)