

姜彤,孙赫敏,李修仓,等,2020. 气候变化对水文循环的影响[J]. 气象,46(3):289-300. Jiang T, Sun H M, Li X C, et al, 2020. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteor Mon, 46(3):289-300(in Chinese).

气候变化对水文循环的影响^{*}

姜 彤¹ 孙赫敏^{1,2} 李修仓³ 苏布达³

1 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 南京 210044

2 北京市气象探测中心, 北京 100089

3 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 水文循环是地球上海洋、陆地和大气之间相互作用中最活跃且最重要的枢纽, 受气候变化影响最为显著。本文回顾了气候变化对全球水文循环的影响, 并对 20 世纪 60 年代以来中国降水、蒸散发、地表径流及大气水汽含量等陆地水文循环要素变化进行了评估。气候变暖使得全球水文循环加强, 观测数据表明自 1970 年以来, 全球对流层和地表水汽含量呈现增加趋势, 但由于监测网络在空间覆盖和时间响应的限制, 热带水汽增加与环流减弱之间相互影响, 使得气候变化对区域水文循环的影响不确定性较大。在全球气候变化背景下, 中国水文循环符合全球水循环变化的特征, 又表现出更为复杂的区域特征, 各个流域间空间差异增大。大气水汽含量在 80 年代后呈现上升的趋势; 60 年代以来, 中国降水平均态虽然无明显变化但空间差异显著增加, 实际蒸散发平均值微弱增加, 空间差异增大, 地表径流空间差异增大, 某些流域呈现减少趋势。21 世纪以来, 由蒸散发再凝结形成的降水量增加, 大气内循环活跃程度加大。

关键词: 水文循环, 气候变化, 中国, 全球

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.001

Impact of Climate Change on Water Cycle

JIANG Tong¹ SUN Hemin^{1,2} LI Xiucang³ SU Buda³

1 Institute for Disaster Risk Management (iDRM)/School of Geographical Science,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100089

3 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Water cycle, which is significantly affected by climate change, is the most active and important part in the interaction among ocean, land and atmosphere. This paper reviews the impact of climate change on global water cycle, and evaluates the changes of water cycle elements including atmospheric water vapor, precipitation, evapotranspiration and surface runoff and water vapor in China since the 1960s. Climate warming has strengthened the global water cycle, showing that global near-surface and tropospheric specific humidity have increased since 1970s. However, due to the insufficient observation, the trend of various variables in the water cycle still remains considerably uncertain. Moreover, due to interaction between the increase of tropical water vapor and the weakening of the circulation, the influence of climate change on regional water cycle is more uncertain. Obvious changes of regional water cycle in China have been found since 1960s. The atmospheric water vapor and its budget show up an increasing trend after 1980s. No obvious changes in total precipitation, but largely spatial difference of regional precipitation can be found in China since 1960s. Moreover, average evapotranspiration increases slightly, while the mean surface runoff

^{*} 国家自然科学基金项目(41907398)和第四次气候变化国家评估报告共同资助

2020 年 2 月 11 日收稿; 2020 年 2 月 20 日收修定稿

第一作者: 姜彤, 主要从事气候变化对水资源影响和风险评估研究. Email: jiangtong@nuist.edu.cn

decreases. Since the 21st Century, the precipitation transformed from evapotranspiration has been increasing, and the internal water cycle is more active than before.

Key words: water cycle, climate change, China, global

引 言

水圈、大气圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈各个圈层之间的相互作用构成了地球系统的基本物理过程,水文循环是指水以液态、固态和气态的形式在气候系统中不断运动,并储存在海洋、冰川、陆地表面和大气中,是海洋、陆地和大气之间相互作用中一种最活跃且最重要的枢纽。水文循环包括两个主要分支,即大气分支和陆地分支。大气中水汽的输送不断改变着全球水汽的时空分布特征,在大气中产生水汽源区和汇区,并通过相变产生的潜热交换反过来影响大气环流的形态。陆地分支中地表径流、地下水动态等使得水分及其携带的热量在陆地上发生改变,调节着全球能量和水分的分布。而降水和蒸发,则将大气分支和陆地分支联系在一起,使得它们互为水分和热量的源汇,成为一个整体。近百年来全球气温呈不断上升的趋势,相对于工业革命前,2017 年全球温升已达 1.0°C ,21 世纪升温趋势仍将持续(IPCC,2018)。水文循环系统是气候系统的重要组成部分,气候变化必然引起全球和区域的水文循环时空变化。2020 年世界气象日的主题是“气候与水”,充分体现了认识气候变化对水文循环影响的重要性。

1 全球水文循环的研究进展

20 世纪 60 年代以来,在世界面临资源与环境等全球问题的背景下,联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)等国际机构,组织和实施了一系列重大国际科学计划。在这些科学计划中,水文循环在全球气候和生态环境变化中所起的作用,受到极大重视,成为各项科学计划共同关注的科学问题(陆桂华和何海,2006;储开凤和汪静萍,2007)。在国际上,世界气候计划(WCRP)于 1988 年实施一项集观测、试验、研究为一体的科学计划——全球能量与水文循环试验(GEWEX)计划,目的在于观测、理解、模拟大气、地表及表层海洋的水分循环和能量交换过程,并将研究成果用于指

导全球、区域和流域气候、水文预测和水资源管理(Stewart et al,1998;Trenberth and Asrar,2014)。Oki and Kanae(2006)和 Trenberth et al(2007)综合了多种观测资料,对全球水文循环过程进行了定量评估,形成了全球水文循环框架:地壳中的含水量最多,但地下深层水体和其他水体的交换相当缓慢,在地表水文循环中所起的作用十分微弱,海洋、冰川、大气、地下水、土壤、多年冻土、河湖储水量分别为 1 335 040 万亿、26 350 万亿、12.7 万亿、15 300 万亿、122 万亿、22 万亿、178 万亿 m^3 。海洋平均每年蒸发水汽量 413 万亿 m^3 ,其中有 373 万亿 m^3 用于海洋降水,40 万亿 m^3 输送到陆地,为陆地降水提供水汽。陆地平均每年降水 113 万亿 m^3 ,其中 73 万亿 m^3 用于植被蒸散,40 万亿 m^3 转变为地表径流(图 1)。

理论上,根据克拉珀龙-克劳修斯(C-C)方程,饱和水汽压会随气温的上升而增加,即大气中的水汽含量会随着温度的上升而增加,这会增加向下长波辐射,减小向外短波辐射,总体上改变地球表面的辐射通量,进而对全球水文循环产生影响(Boer,1993;Milly et al,2002)。近百年来随着气温升高,观测到的全球尺度降水、蒸散发、水汽及径流的分布、强度和极值都发生了变化,表明气候变暖确使全球水文循环加强(Milly et al,2002;IPCC,2013;Kramer et al,2015)。但由于较大的区域差异,并且由于监测网络在空间和时间覆盖范围方面的限制,水文循环各变量的趋势仍然存在相当大的不确定性(Huntington,2006;Huntington et al,2018;Rawlins et al,2010;Syed et al,2010;Durack et al,2012;Giorgi et al,2014;Kramer et al,2015;Good et al,2015)。

通过探空、GPS 及卫星等观测结果发现,1970 年以来,全球对流层和地表水汽含量呈增加趋势,大气的水汽含量的变化基本遵循 C-C 方程,近 40 年全球气温升高了约 0.5°C ,水汽含量上升了 3.5%左右,2000 年以后地表湿度增加趋势减缓。由于现有观测数据的限制,全球降水/蒸发对气候变暖的响应却有很大的不确定性(IPCC,2013)。观测站数据表明,1900 年以来,陆地降水变化不大,但表现为极大的区域差异。另外,通过海洋表面盐度的变化可以

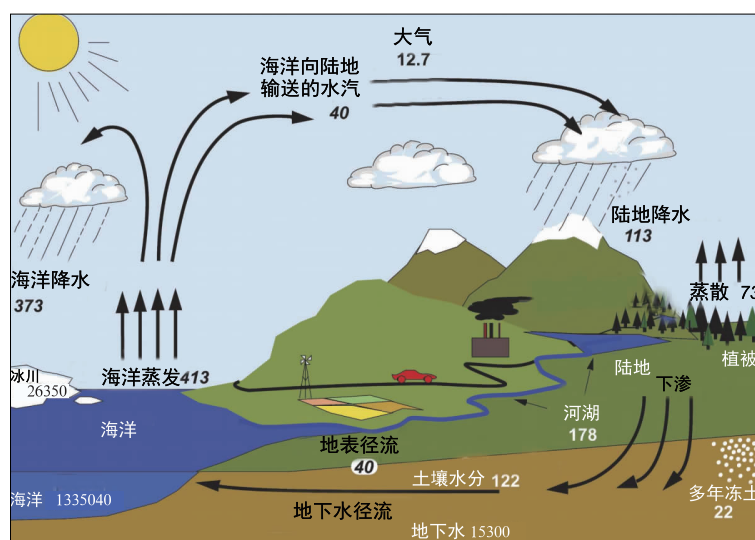


图1 全球水文循环平均状况(Trenberth et al, 2007)

(白体字单位为 10^3 km^3 , 黑体字单位为 $10^3 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 1 Global water cycle (Trenberth et al, 2007)

(The unit of white words is 10^3 km^3 , and the unit of black italics is $10^3 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

间接地表明降水/蒸发的变化,20世纪50年代以来全球海洋蒸发减去降水的值呈增加趋势(Held and Soden, 2006; Wentz et al, 2007; Stephens and Hu, 2010; Durack et al, 2012; Skliris et al, 2016)。

尽管降水/蒸发对气候变暖的响应有较大的不确定性,但有大部分研究表明气候变暖使得全球平均的极端降雨事件增加,主要出现在中高纬度;除部分区域外,干湿地区间和干湿季节间的降水差异将会增大,受干旱和洪水影响的人口都会有所增加(IPCC, 2013)。

水汽含量和降水变化率不一致的现象将导致大气总体的垂直质量输送减弱(Held and Soden, 2006)。由于辐射通量变化较小,导致全球水文循环增加的强度受到抑制,并且与对流层低层水汽的增加不同步,边界层与对流层中层水汽通量交换将会减少。并且大部分水汽交换发生在热带湿对流中,对流质量通量也会减少。在大尺度环流上,由于这种大气中水汽与层结发生的变化,会使得热带环流将会减慢,同时Hadley环流将向极扩张,热带辐合带也将产生飘移。热带水汽增加影响与环流减弱影响相互作用,使得未来的气候变化对区域水文循环的影响不确定性加大(Vecchi et al, 2006; Vecchi and Soden, 2007; Tokinaga et al, 2012; Ma et al, 2018)。

2 中国水文循环的时空分布特征

中国地处欧亚大陆东部,西倚青藏高原,东邻太平洋,地形多变,海陆分布复杂,南北纬跨度约为 50° ,跨越了热带、亚热带、温带以及寒带等多个气候带,属大陆性季风性气候。分松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、珠江以及东南诸河、西南诸河和西北诸河等10个一级水资源分区。在全球变暖情形下,最近几十年中国水文循环及其相关过程存在明显的趋势变化和年际变率特征(《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015; 丁一汇, 2016; 罗勇等, 2017)。

在任意给定的时域和空间内,水的运动(包括相变)是连续的,遵循物质守恒。一个地区的水文循环可分解为大气分支与陆地分支两个部分,其中,陆地分支由降水量、出入本区的径流量、蒸散发量及下垫面蓄水变量等组成,大气分支由输出及输入本区上空的水汽量、蒸散发量、降水量和本区上空水汽柱水汽含量的变化组成。

2.1 中国水文循环各要素空间分布特征

由于探空站点稀疏,目前较多研究也采用再分析数据来分析大气水汽含量的变化特征,不同数据

之间时空分辨率不同,存在一定的不确定性(Zhao et al, 2015)。不同数据计算得到的中国多年平均的整层大气水汽含量约为 0.13 万亿 m^3 ,折合平均水深约 14 mm。受到海陆分布与大气环流的影响,中国大气水汽含量空间差异较大。在 108°E 以东,整层大气的水汽含量等值线基本呈纬向分布,由东南部沿海的 40 mm 向西北递减,到蒙古边界只有不到 10 mm,青藏高原和西北地区东部为极小值区,约 5 mm 左右。受到青藏高原的影响,中国西南地区整层大气的水汽含量变化较为剧烈。在四川盆地,也存在一个相对高值区,整层大气的水汽含量等值线沿着云贵高原东侧的地势分布。在 $100^\circ\sim 108^\circ\text{E}$,整层大气的水汽含量等值线由纬向分布转换为经向分布,大致沿东偏南 45° 方向分布且较为密集,表明东西方向水汽含量梯度较大,反映出地形与海拔高度的变化对水汽含量的显著影响(图 2a)。中国为多年平均水汽汇区,1961—2018 年多年平均水汽输入、输出分别为 16.2 万亿、12.3 万亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,水汽收支为约 3.8 万亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。东边界的西风输出大于西边界的西风输入;南边界水汽输入量为最大,北边界为弱的水汽输入边界,但经向水汽输送量要小于纬向水汽输送量。

中国多年平均年降水量的空间分布极其不均,根据 1961—2018 年气象站观测数据,中国多年平均年降水量为 616.4 mm,年降水量由东南沿海向西北内陆逐渐减小,东部大致与纬圈平行,降水分布阶梯特征十分明显。降水最多的江南平原和东南沿海地区,年降水量大多在 1 500~2 000 mm;最少的西北内陆沙漠地区,年降水量多在 200 mm 以下,年降水量最少的塔里木地区则不足 25 mm(图 2b)。

由于很难通过仪器测定实际蒸发,目前多是依赖模型计算得到具有一定时空尺度的实际蒸散发量,包括基于有限点尺度观测的统计方法、陆面过程模式、遥感蒸散发模型、互补蒸散发模型以及数据同化等手段,但不同模型的计算结果存在一定的不确定性(Wang and Dickinson, 2012; Miralles et al, 2016; Bai and Liu, 2018)。不同产品得到的中国平均的年蒸散发气候态整体介于 350~600 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Li et al, 2014; Mo et al, 2015; Sun et al, 2017; 罗勇等, 2017; 苏布达等, 2018)。空间分布呈现从东南到西北递减的态势。蒸散发最大值出现在海南岛,可

达 1 200 mm 以上;最小值则出现在新疆南部的塔克拉玛干以及内蒙古西部地区,不足 100 mm。相对高值出现在中国东南部和南部沿海地区,年蒸散发普遍在 1 000 mm 以上;华南和西南部分地区,包括海南、福建、广东、贵州和云南,蒸散发可达 667~854 mm;长江中游和华北平原的年蒸散发为 400~650 mm;东北地区约为 350~500 mm;蒸散发低值主要分布在寒冷干燥的西北部 and 北部,年蒸散发低于 300 mm(Ma et al, 2019)(图 2c)。

气候变化对径流的影响主要体现在两方面:降水变化直接影响产汇流;气温升高导致冰川融雪的增加和蒸散发的变化,进而影响径流。中国 1961—2018 年多年平均流量为 26 340 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,径流深为 278 mm。十大水资源分区的径流差别较大,松花江区、辽河区、海河区、淮河区、黄河区、长江区、珠江区径流深分别为 117、118、65、210、76、590、917 mm,径流量分别为 1 296 亿、408 亿、216 亿、677 亿、607 亿、9 856 亿、4 708 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$;东南诸河、西南诸河、西北诸河径流深分别为 904、744、33 mm,径流量分别为 1 988 亿、5 775 亿、1 174 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (图 2d)。

1961—2018 年,中国多年平均整层大气水汽含量约为 0.13 万亿 m^3 ,折合水深 13.9 mm,水汽年总输入量为 1 681.8 mm,输出量为 1 283.5 mm,水汽收支为 398.3 mm;降水量为 616.4 mm,蒸散发量为 480.8 mm,地表水资源量为 273.7 mm。输入水汽约 32% 形成降水,68% 为过境水汽。可见,16% 的蒸散发通过内循环过程重新形成降水,84% 随气流输出;降水 87% 是由输入水汽形成,13% 是由区域内部蒸发的水汽形成(图 3)。这与刘国纬(1997)、刘国纬和汪静萍(1997)利用探空、降水和水文观测资料计算的中国大陆地区 1972—1982 年多年平均的水量平衡结果相近。

2.2 中国水文循环各要素时间变化特征

1961—2018 年,中国大陆地区的年平均水汽含量呈显著下降趋势。20 世纪 60、70 年代为正距平,但正距平百分率随时间明显减小,但 80 年代后,中国大部分区域由正距平百分率转向负距平百分率,90 年代后期逐渐增大,进入 21 世纪后,大气水汽含量显著增加(图 4a)。

水汽收支在 20 世纪 60、70 年代为正距平,70

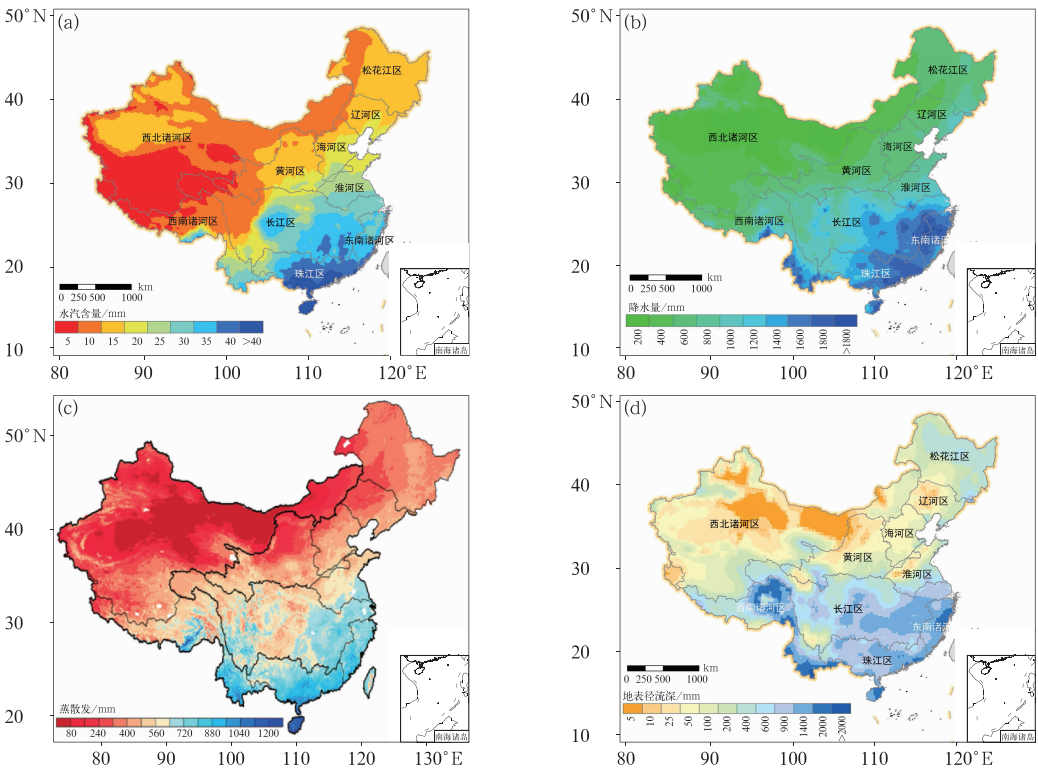


图 2 1961—2018 年中国多年平均整层大气水汽含量(a),降水量(b),
实际蒸散发(c)和地表径流深(d)的空间分布
(蒸散发空间分布引自 Ma et al, 2019)

Fig. 2 Spatial distribution of annual average atomospheric water vapor (a), precipitation (b),
actual evapotranspiration (c) and surface runoff depth (d) in China during 1961—2018
(evapotranspiration from Ma et al, 2019)

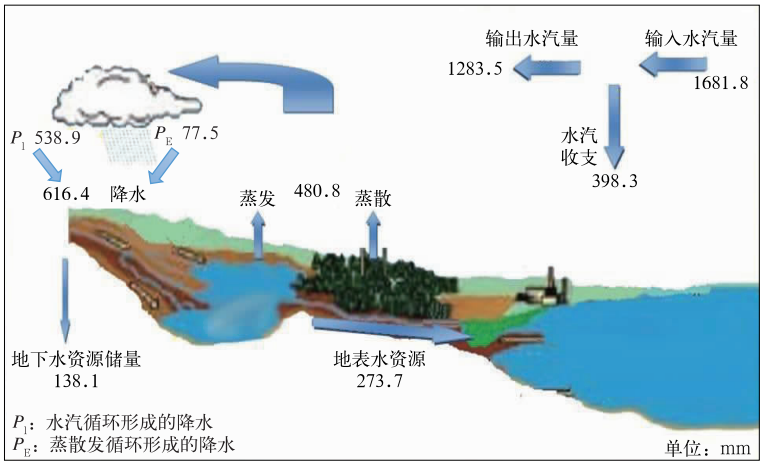


图 3 1961—2018 年中国大陆水文循环概念模型
Fig. 3 Conceptual model of water cycle in China during 1961—2018

年代后期至 90 年代变化不大,在 21 世纪后显著上升。水汽输入、输出在 1961—2018 年均呈显著的下降趋势,北边界自 1964 年开始由水汽净输出转变为

水汽净输入,并变化趋势并不显著。纬向水汽净收支(输出)的减小趋势主要决定于东边界水汽输出的显著减少;经向水汽净收支(输入)的下降趋势主要

决定于南边界水汽输入的显著减少(图 4b)。需要注意的是,由于 70 年代前探空站点稀疏且存在较多

缺测,不管是观测还是再分析资料对中国水汽含量和水汽收支的趋势都存在较大的不确定性。

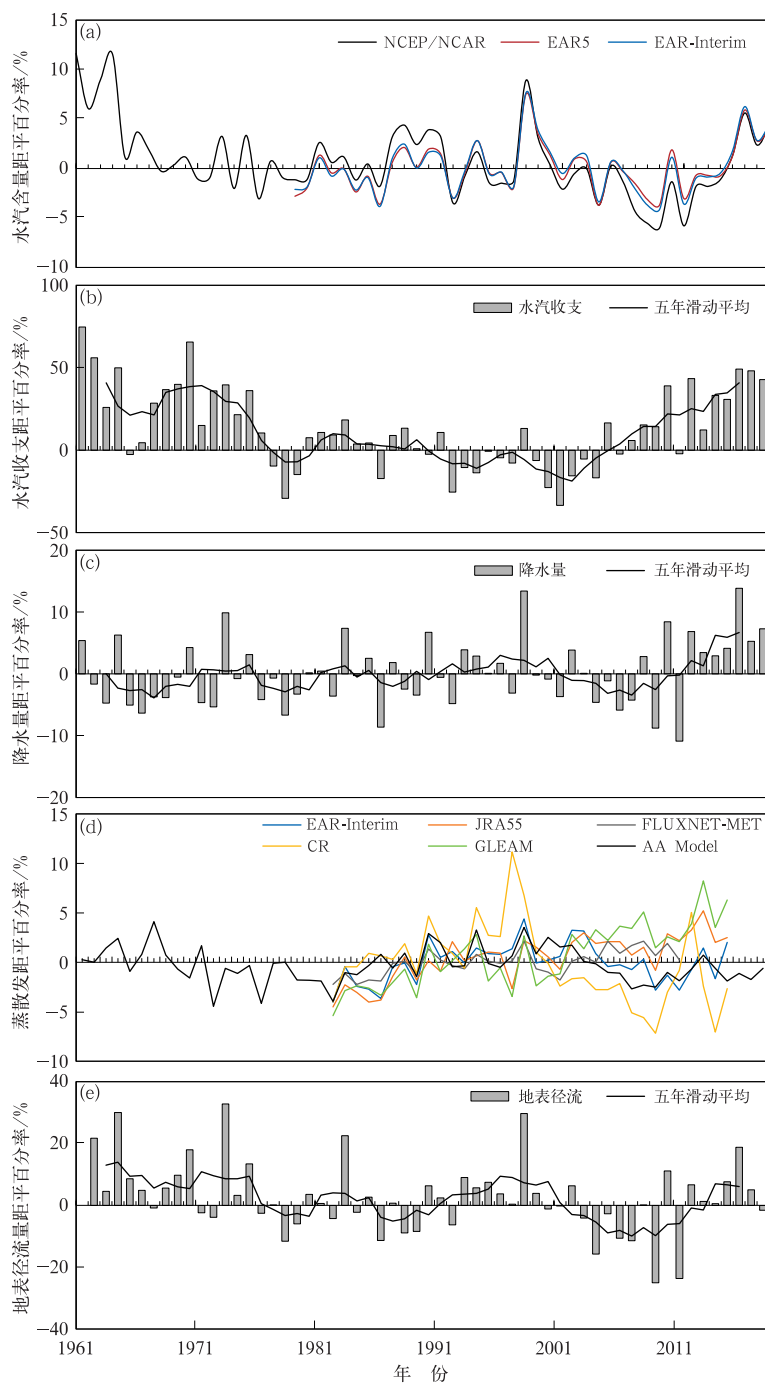


图 4 1961—2018 年中国整层大气水汽含量(a),水汽收支(b),降水量(c),蒸散发(d)和地表径流量(e)距平百分率时间变化
(气候平均:1981—2010 年)

Fig. 4 Time variation of atmospheric water vapor (a), water vapor budget (b), precipitation (c), evapotranspiration (d) and surface runoff (e) anomaly percentages in China during 1961–2018
(climate value: 1981–2010)

年降水量呈弱增加趋势,变化趋势不显著。但在年代际尺度上变化较大,20世纪60、70、80年代和21世纪前10年的年降水量较1961—2018年均值分别偏少10.8、6.2、4.8和14.8 mm,而20世纪90年代和近10年降水分别偏多11.2和27.1 mm(图4c)。

蒸散发量变化不明显,再分析资料的蒸散发明显高于其他产品。1961—2000年,不同蒸散发产品趋势比较一致,皆略有增大,21世纪以来,GLEAM和JRA-55的蒸散发继续增大,FLUXNET-MTE保持平稳,ERA-Interim、CR及AA模型估算的结果,中国地表蒸散发在2000年之后呈减小趋势(图4d)。

地表径流量在呈波动下降趋势。20世纪60年代至70年代初为正距平,但正距平百分率随时间明显减小,80、90年代变化不大,进入21世纪后,中国地表径流量呈现先下降后上升的趋势,2010年后中国大部分区域由负距平百分率转向正距平百分率(图4e)。

2.3 中国流域尺度水文循环各要素变化特征

1961—2018年,水汽含量除西南诸河的有弱上升趋势以外,其余流域都呈下降的趋势。20世纪60、70年代,除南方的西南诸河、东南诸河及珠江流域变化趋势不明显外,其余7个流域都呈显著的下降趋势;北部3个流域(松花江、辽河和海河)流域变化趋势较为一致,在90年代有弱增加趋势,2000年以后开始减少,但在2010年以后又略有增加;淮河、黄河和长江流域在1961—2018年均呈下降趋势,但下降速度逐渐变缓,2010年后转变为增加趋势;东南诸河和珠江流域在2000年前变化趋势不明显,在2000年后开始出现显著下降趋势,2010年后又转变为上升趋势;西北诸河在2000年前变化趋势不显著,在2010年后呈上升趋势(廖爱民等,2013;周杰等,2013;苏翠等,2014;罗勇等,2017;黄小燕等,2018;王凯等,2018;李湘瑞等,2019)。

水汽收支在北方松花江、辽河和海河流域均呈显著减少趋势。松花江和海河流域水汽收支在1980年前下降速度较快,1980年以后,下降趋势变缓,但水汽收支年际波动较大。松花江流域进入21世纪后多为水汽源区,而在21世纪前多为水汽汇区;海河流域20世纪60、70年代多为水汽汇区,70年代末至本世纪初多为水汽源区。辽河流域只有在60年代有少数年为水汽汇区,其余大多数年都为水

汽源区。黄河流域为多年平均水汽汇区,其水汽净入量呈显著减小的趋势,在1978年前下降速度较快,1978年以后趋势变缓。淮河流域为多年的水汽汇,仅在2000年左右有几年为水汽源地,且在2002年以后,与海河流域类似,流域的水汽净入量有增加的趋势,多年趋势略微下降但不显著。长江区为多年平均水汽汇区,1961—2018年水汽净收支量的趋势略有增加。西南诸河流域也为多年平均水汽汇区,21世纪后输入水汽量减少。珠江、东南诸河流域除在1961年为水汽汇之外,其余年份均为水汽源地,1985年以前流域内水汽输出迅速增加,1986年之后流域内输出水汽量减少。西北诸河流域为多年平均弱水汽源区,21世纪流域收支由水汽源区转变为水汽汇区(刘波等,2012;姚俊强等,2016;罗勇等,2017;赵光平等,2017;王凯等,2018)。

虽然近百年来中国年均降水量变化趋势不显著,但区域降水变化波动较大。1961—2018年中国降水变化趋势有明显的区域特征,西部降水普遍增加,其中西北诸河、西南诸河和长江和黄河上游,即新疆大部、内蒙古西部、甘肃中部以及青海西部部分地区显著增加,中国东部大部(105°E以东),除长江下游,松花江、淮河南部,珠江东部和东南诸河有所增加外,其他地区降水以减少为主,其中海河、黄河中下游、长江中游及珠江西部和西南诸河南部显著减少。长江及其以南地区极端降水事件的发生频率增大,强度增强,长江以北地区干旱事件的发生频率逐年增加,尤其以华北地区最为严重(罗勇等,2017;熊敏谔,2017)。

蒸散发在中国西部和东北主要以增加为主,华南大部呈现显著的减小趋势(Han et al,2014;Mo et al,2015;Ma et al,2019)。其中黄河流域及西南诸河的变化趋势存在不确定性,长江、海河、淮河、珠江流域和东南诸河实际蒸发量在过去50年间都呈现下降趋势(王艳君等,2010;李修仓等,2014;罗勇等,2017),松花江流域、辽河流域和塔里木河流域等在过去40~50年间都呈现增加趋势(温姗姗等,2014)。但淮河流域、西南诸河和西北诸河在21世纪以后发生了趋势转变,淮河流域由显著下降趋势转变为弱的上升趋势,西南诸河由上升趋势转变为下降趋势,西北诸河由显著上升趋势转变为明显下降趋势。值得注意的是,青藏高原地区蒸散发量的显著增加对中国整体蒸散发量增加起关键作用(Mo et al,2015)。

地表径流量除西北诸河外,在中国北方大部分

流域呈现减少的趋势,而位于南方的河流径流量变化趋势比较复杂。松花江流域年径流量呈波动下降趋势,20世纪80年代前为径流减少阶段,80、90年代径流则有较为明显的增加,随后迅速下降,21世纪以后又转变为上升趋势(汪雪格等,2017)。辽河流域年平均径流量也为下降趋势,80、90年代年际变动较大(胡海英等,2013;马龙等,2015;郭松,2016)。海河流域受人类活动和气候变化影响显著,地表径流量呈现出持续减少的趋势。黄河流域除源头区年径流变化趋势不显著以外,其余河段的径流呈现出显著的下降趋势,从上游到下游,河川径流下降幅度越来越大,趋势越来越显著,21世纪后有所回升(鲍振鑫等,2014;张利茹等,2017;赵建华等,2018;杨永辉等,2018)。淮河流域由于区域取调水情况复杂,就天然径流来看,淮河流域在20世纪60年代初径流值较大,但60年代中期径流迅速减少,其后又呈增加趋势,径流变化空间差异性较大,除上游表现不显著的上升趋势外,流域大部分地区呈现下降趋势(刘睿和夏军,2013)。长江流域范围广阔,以直门达水文站为代表的源头区年径流有显著上升趋势,干流径流量年际变化相对平稳(冯亚文等,2013;李姝蕾等,2015)。珠江流域大部径流呈减少趋势,空间差异性比较明显,中上游地区年径流呈下降趋势,而北江的三水站径流量在90年代后呈增加趋势(袁菲等,2017;李天生和夏军,2018)。东南诸河年径流变化与珠江流域类似,也表现出明显的区域差异性。其中,钱塘江和韩江年径流有增加趋势,南流江年径流量也呈下降趋势(王翠柏等,2013;郭晓英等,2016)。西北内陆河流域位于干旱区,气温升高加速了山区冰川的消融和退缩,使得地表径流的波动性增加,但平均年径流整体增加趋势显著(罗勇等,2017;刘静等,2019)。

3 结论与讨论

近百年来随着气温升高,辐射效应随之发生变化,全球尺度降水、蒸散发、水汽及土壤湿度和径流的分布、强度和极值都发生了变化,显示出气候变暖已对全球尺度水文循环产生了一定程度的影响,也即气候变暖使得全球水循环加强,并有持续增加的趋势。近40年全球气温升高了约 0.5°C ,大气水汽含量上升3.5%左右,虽然由于全球大气水文循环监测时空限制,水文循环各变量变化规律认识上存

在不足,但大气水汽含量和降水变化的不一致会导致大气环流的改变,而大气环流的变化会进一步改变球海表温度的空间分布特征,使得未来的气候变化对区域水文循环的影响不确定性加大(IPCC, 2013;Kramer et al, 2015)。在全球变暖情形下,近几十年中国水文循环及其相关过程存在明显的趋势变化和年际变率特征。大气水汽含量和水汽收支在20世纪80年代后为上升的趋势。1961—2018年,中国降水总量虽然没有出现明显变化,但是各个区域上降水量出现很大的差异;蒸散发平均值呈现微弱增加;地表径流总体上呈减少趋势,但西北和东南沿海流域径流出现波动上升趋势。相对于1961—2000年,21世纪以来,大气水汽总输入量偏小9%,总输出量偏小13%,水汽收支偏高3%。降水量总量变化不大,区域蒸散发转化形成的降水增加了9%,中国区域水文内循环较之前活跃。

同时,中国幅员辽阔,地形复杂,气候变化对中国水文循环的影响具有较明显的区域特征,使得各个流域间空间差异增大。相对于1961—1980年,1981—2000年东部季风区的松花江、长江和东南和西北诸河流域降水偏多,流域的外循环和内循环都比较活跃,蒸散发形成的降水的增加比重大于外界输入水汽形成的降水增加。辽河和珠江降水变化不大,虽然流域内循环较活跃,但外界输入水汽形成的降水略有减少。海河、黄河和淮河流域由蒸散发形成的降水增加,但输入流域的水汽及其转化的降水减少较多,外循环较弱,流域降水偏少。2000—2018年,辽河、海河、黄河、长江、珠江、西南诸河和西北诸河由蒸散发形成的降水增加,但输入流域的水汽及其转化的降水减少,流域外循环偏弱,导致总降水变化不大或略有减少;松花江、淮河和东南诸河流域降水增多,流域的外循环和内循环都比较活跃,由输入水汽形成和蒸散发形成的降水均较1961—1980年有所增加。

水文循环陆地分支的水量平衡各要素的变化直接与陆地水资源量的变化息息相关。同时也应注意到,与具有分水岭意义的流域边界不同,水文循环大气分支的水汽含量要素存在邻近流域间的交换。尽管中国各流域空中水汽含量的变化并不明显,但空中水汽的交换对陆地水文循环及整个区域水量平衡的影响作用仍不容忽视。研究表明,20世纪80年代前中国东部地区来自西北太平洋、南海和孟加拉湾的水汽输送偏强,80年代之后显著减弱,这与80年代中期以来东亚夏季风年代际减弱的变化特征一致。由于输送到中高纬地区的水汽大大减少,华北

地区降水偏少,南方降水偏多。2000年之后,松花江、辽河、海河、黄河和淮河流域的降水和径流相对于1981—2000年均有所增加或下降趋势减缓,水汽收支均较2000年前的下降趋势减缓或转为增加趋势;而长江、珠江、东南诸河和西南诸河的降水和径流则有所减少(丁一汇等,2013;苏涛等,2014;梁苏洁等,2014;罗勇等,2017;丁一汇,2016;邢峰等,2018)。

此外,温度不是影响实际蒸散发时空变异的唯一要素,各种气象要素的综合作用最终造成了实际蒸散发的时间变化和空间格局。以珠江、海河等流域作为中国湿润、半湿润半干旱等两个气候区的代表流域,1961—2010年间这两个区域日照时数(表征能量条件)是引起实际蒸散发变化的主要贡献量,其他气象要素的贡献量相对较低。降水(表征下垫面供水条件)的变化对实际蒸散发的变化在湿润地区贡献较低,在半湿润半干旱地区贡献相对较大,如海河流域降水的下降对实际蒸散发的下降趋势有较大的贡献(Li et al, 2014; Wang et al, 2010; Feng et al, 2018)。并且,蒸散发的时空格局还与植被覆盖类型紧密相关。

径流的变化不仅仅受气候变化影响,同时还与下垫面人类活动相关。气候变化主要影响到天然流量的变化,而观测到的径流减少,主要的原因是下垫面人类活动,如水库、堤防、土地利用改变等作用的结果。北部松花江流域气候变化对径流变化贡献率较大,而海河、黄河和辽河流域径流变化的主要驱动因素为人类活动(梁红等,2012;胡海英等,2013;张利茹等,2017;杨永辉等,2018;李二辉等,2014; Li et al, 2018)。淮河流域径流变化成因复杂,1986—1999年淮河上游径流减少的主要原因是人类活动影响,2000—2010年上游径流增加的主要原因是气候变化(李小雨等,2015)。长江、珠江和东南诸河流域多年径流量变化成因较为复杂。长江流域上游宜昌站和寸滩站径流总量下降主要受年降水下降影响,而人类活动和上游洞庭湖的调蓄作用是长江螺山站年径流下降的主要原因(李姝蕾等,2015;黄金龙等,2016)。且人类活动导致的土地利用变化在不同区域和不同时期变化趋势不同。长江上游地区土地利用变化导致径流减少,而其他地区土地利用变化导致径流增加(彭涛等,2018)。

中国历来是一个水资源矛盾极其突出的国家,虽然水资源总量居于全球各个国家中第六位,但人均水资源量仅居世界第110位,多年平均值约为 $2200\text{ m}^3\cdot\text{人}^{-1}$,是世界人均水资源量的四分之一左

右,被联合国列为13个贫水国家之一(秦大河等,2015)。同时,由于中国所处的特殊地理位置和独特的自然环境,水资源时空分布极为不均。在全球气候变化背景下,中国水文循环符合全球水循环变化的特征,又表现出更为复杂的区域特征,各个流域间空间差异增大。无论是在干旱区还是湿润区,中国极端降雨事件都显著增加,易造成同一个地区干湿交替出现的现象,使得受干旱和洪水影响的人口都会有所增加(《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会,2015;景丞等,2016;罗勇等,2017; Sun et al, 2019)。因此,研究气候变化与水的相关关系,掌握气候变化对水文循环影响的变化趋势,可为水资源管理,实现水资源的持续开发和永续利用,以及为应对气候变化和防灾减灾提供有力科学依据。

参考文献

- 鲍振鑫, 张建新, 严小林, 等, 2014. 环境变化背景下海河流域水文特征演变规律[J]. 水电能源科学, 32(10): 1-5. Bao Z X, Zhang J Y, Yan X L, et al, 2014. Evolution law of hydrologic elements under environmental change in Haihe River Basin[J]. Water Resour Power, 32(10): 1-5(in Chinese).
- 储开凤, 汪静萍, 2007. 中国水文循环与水体研究进展[J]. 水科学进展, 18(3): 468-474. Chu K F, Wang J P, 2007. Advances in the research on hydrological cycle and water in the China[J]. Adv Water Sci, 18(3): 468-474(in Chinese).
- 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015. 第三次气候变化国家评估报告: 第2版[M]. 北京: 科学出版社. The 3rd China's National Assessment Report on Climate Change Editorial Board, 2015. The 3rd China's National Assessment Report on Climate Change[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 丁一汇, 2016. 中国的气候变化及其预测[M]. 北京: 气象出版社. Ding Y H, 2016. Climate Change and Its Prediction in China[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等, 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学, 37(2): 253-280. Ding Y H, Sun Y, Liu Y Y, et al, 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2): 253-280(in Chinese).
- 冯亚文, 任国玉, 刘志雨, 等, 2013. 长江上游降水变化及其对径流的影响[J]. 资源科学, 35(6): 1268-1276. Feng Y W, Ren G Y, Liu Z Y, et al, 2013. Rainfall and runoff trends in the upper Yangtze River[J]. Resour Sci, 35(6): 1268-1276(in Chinese).
- 郭松, 2016. 辽河流域水文特性分析[J]. 水科学与工程技术, (3): 29-30. Guo S, 2016. Hydrological characteristics of Liaohe River Basin[J]. Water Sci Eng Technol, (3): 29-30(in Chinese).
- 郭晓英, 陈兴伟, 陈莹, 等, 2016. 气候变化与人类活动对闽江流域径流变化的影响[J]. 中国水土保持科学, 14(2): 88-94. Guo X Y, Chen X W, Chen Y, et al, 2016. Impacts of climate variability and human activities on runoff of Minjiang River Basin[J]. Sci Soil Water Conserv, 14(2): 88-94(in Chinese).

- 胡海英, 黄国如, 黄华茂, 2013. 辽河流域铁岭站径流变化及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 20(2): 98-102. Hu H Y, Huang G R, Huang H M, 2013. Variation of runoff at Tieling Station of Liaohe River basin and its influence factors[J]. Res Soil Water Conserv, 20(2): 98-102(in Chinese).
- 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等, 2016. RCP4. 5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. 气象, 42(5): 614-620. Huang J L, Wang Y J, Su B D, et al, 2016. Future climate change and its impact on runoff in the upper reaches of the Yangtze River under RCP4. 5 Scenario[J]. Meteor Mon, 42(5): 614-620.
- 黄小燕, 王圣杰, 王小平, 2018. 1960—2015 年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. 气象, 44(9): 1191-1199. Huang X Y, Wang S J, Wang X P, 2018. Variations of precipitable water in Northwest China during 1960—2015[J]. Meteor Mon, 44(9): 1191-1199(in Chinese).
- 景丞, 姜彤, 王艳君, 等, 2016. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. 气象学报, 74(4): 572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al, 2016. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China[J]. Acta Meteor Sin, 74(4): 572-582(in Chinese).
- 李二辉, 穆兴民, 赵广举, 2014. 1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 25(2): 155-163. Li E H, Mu X M, Zhao G J, 2014. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. Adv Water Sci, 25(2): 155-163(in Chinese).
- 李姝蕾, 鲁程鹏, 李伟, 等, 2015. 长江螺山站 50 年来基流演变趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 26(5): 128-131. Li S L, Lu C P, Li W, et al, 2015. Analysis of evolution trend of base flow in Luoshan hydrology station of Yangtze River in past 50 years[J]. J Water Resour Water Eng, 26(5): 128-131(in Chinese).
- 李天生, 夏军, 2018. 基于 Budyko 理论分析珠江流域中上游地区气候与植被变化对径流的影响[J]. 地球科学进展, 33(12): 1248-1258. Li T S, Xia J, 2018. Analysis of the influence of climate and vegetation change on runoff in the middle and upper reaches of the Pearl River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Adv Earth Sci, 33(12): 1248-1258(in Chinese).
- 李小雨, 余钟波, 杨传国, 等, 2015. 淮河流域历史覆被变化及其对水文过程的影响[J]. 水资源与水工程学报, 26(1): 37-42. Li X Y, Yu Z B, Yang C G, et al, 2015. Historical vegetation change and its impact on hydrological process in Huaihe River Basin[J]. J Water Resour Water Eng, 26(1): 37-42(in Chinese).
- 李湘瑞, 范可, 徐志清, 2019. 2000 年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征[J]. 大气科学, 43(5): 1109-1124. Li X R, Fan K, Xu Z Q, 2019. Decrease in extreme precipitation in summer over east northern China and the water-vapor transport characteristics after Year 2000[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 1109-1124(in Chinese).
- 李修仓, 姜彤, 温姗姗, 等, 2014. 珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析[J]. 热带气象学报, 30(3): 483-494. Li X C, Jiang T, Wen S S, et al, 2014. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration and its impact factors in the Pearl River Basin, China[J]. J Trop Meteor, 30(3): 483-494(in Chinese).
- 梁红, 孙风华, 隋东, 2012. 1961—2009 年辽河流域水文气象要素变化特征[J]. 气象与环境学报, 28(1): 59-64. Liang H, Sun F H, Sui D, 2012. Characteristics of hydrological and meteorological elements from 1961 to 2009 in the Liaohe River areas[J]. J Meteor Environ, 28(1): 59-64(in Chinese).
- 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等, 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 38(5): 974-992. Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al, 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960—2013[J]. Chin J Atmos Sci, 38(5): 974-992(in Chinese).
- 廖爱民, 刘九夫, 周国良, 2013. 1979—2010 年中国流域水汽含量变化[J]. 水科学进展, 24(5): 626-633. Liao A M, Liu J F, Zhou G L, 2013. Trends in moisture content for 1979—2010 in China river basins[J]. Adv Water Sci, 24(5): 626-633(in Chinese).
- 刘波, 翟建青, 高超, 等, 2012. 1960—2005 年长江上游水文循环变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 40(1): 95-99. Liu B, Zhai J Q, Gao C, et al, 2012. Variation of water cycle in upper reaches of Yangtze River from 1960 to 2005[J]. J Hohai Univ(Nat Sci), 40(1): 95-99(in Chinese).
- 刘国伟, 1997. 水文循环的大气过程[M]. 北京: 科学出版社. Liu G W, 1997. Atmosphere Processes in Hydrologic Cycle[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 刘国伟, 汪静萍, 1997. 中国陆地-大气系统水分循环研究[J]. 水科学进展, 8(2): 99-107. Liu G W, Wang J P, 1997. A study on hydrologic cycle of land-atmosphere system of China[J]. Adv Water Sci, 8(2): 99-107(in Chinese).
- 刘静, 龙爱华, 李江, 等, 2019. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 50(12): 10-17. Liu J, Long A H, Li J, et al, 2019. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years[J]. Water Resour Hydrop Eng, 50(12): 10-17(in Chinese).
- 刘睿, 夏军, 2013. 气候变化和人类活动对淮河流域上游径流影响分析[J]. 人民黄河, 35(9): 30-33. Liu R, Xia J, 2013. Influence analysis of climate change and human activities on runoff of the upper Huaihe River[J]. Yellow River, 35(9): 30-33(in Chinese).
- 陆桂华, 何海, 2006. 全球水循环研究进展[J]. 水科学进展, 17(3): 419-424. Lu G H, He H, 2006. View of global hydrological cycle[J]. Adv Water Sci, 17(3): 419-424(in Chinese).
- 罗勇, 姜彤, 夏军, 等, 2017. 中国陆地水循环演变与成因[M]. 北京: 科学出版社. Luo Y, Jiang T, Xia J, et al, 2017. Evolution and Causes of Land Water Cycle in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 马龙, 刘廷玺, 马丽, 等, 2015. 气候变化和人类活动对辽河中上游径流变化的贡献[J]. 冰川冻土, 37(2): 470-479. Ma L, Liu T X, Ma L, et al, 2015. The effect of climate change and human activities on the runoff in the upper and middle reaches of the Liaohe River, Inner Mongolia[J]. J Glaciol Geocryol, 37(2): 470-479(in Chinese).
- 彭涛, 田慧, 秦振雄, 等, 2018. 气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J]. 泥沙研究, 43(6): 54-60. Peng T, Tian H, Qin Z X, et al, 2018. Impacts of climate change and human activities on flow discharge and sediment load in the Yangtze River[J]. J Sediment Res, 43(6): 54-60(in Chinese).
- 秦大河, 张建业, 闪淳昌, 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. Qin D H,

- Zhang J Y, Shan C C, 2015. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 苏布达, 周建, 王艳君, 等, 2018. 全球升温 1.5℃ 和 2.0℃ 情景下中国实际蒸散发时空变化特征[J]. 中国农业气象, 39(5): 293-303.
- Su B D, Zhou J, Wang Y J, et al, 2018. Spatial and temporal variation of actual evapotranspiration in China under the 1.5℃ and 2.0℃ global warming scenarios[J]. Chin J Agrometeorol, 39(5): 293-303 (in Chinese).
- 苏翠, 陆桂华, 何海, 等, 2014. 珠江流域水汽输送特征分析[J]. 水电能源科学, 32(2): 1-6.
- Su C, Lu G H, He H, et al, 2014. Analysis of characteristics of water vapor transport in Pearl River Basin[J]. Water Resour Power, 32(2): 1-6 (in Chinese).
- 苏涛, 卢震宇, 周杰, 等, 2014. 全球水汽再循环率的空间分布及其季节变化特征[J]. 物理学报, 63(9): 099201.
- Su T, Lu Z Y, Zhou J, et al, 2014. Spatial distribution and seasonal variation characteristics of global atmospheric moisture recycling[J]. Acta Phys Sin, 63(9): 099201 (in Chinese).
- 王翠柏, 梁小俊, 楼章华, 等, 2013. 钱塘江上游径流时序变化的多时间尺度分析[J]. 人民黄河, 35(3): 30-32.
- Wang C B, Liang X J, Lou Z H, et al, 2013. Multiple time scales analysis of the time series variation of runoff in the upper Qiantang River[J]. Yellow River, 35(3): 30-32 (in Chinese).
- 王凯, 孙美平, 巩宁刚, 2018. 西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J]. 干旱区地理, 41(2): 290-297.
- Wang K, Sun M P, Gong N G, 2018. Spatial and temporal distribution and transportation of the water vapor in the northwestern China[J]. Arid Land Geogr, 41(2): 290-297 (in Chinese).
- 汪雪格, 胡俊, 吕军, 等, 2017. 松花江流域 1956—2014 年径流量变化特征分析[J]. 中国水土保持, (10): 61-65.
- Wang X G, Hu J, Lv J, et al, 2017. Variation characteristics of annual runoff in the Songhua River Basin from 1956 to 2014[J]. Soil Water Conserv China, (10): 61-65 (in Chinese).
- 王艳君, 姜彤, 刘波, 2010. 长江流域实际蒸发量的变化趋势[J]. 地理学报, 65(9): 1079-1088.
- Wang Y J, Jiang T, Liu B, 2010. Trends of estimated and simulated actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin[J]. Acta Geogr Sin, 65(9): 1079-1088 (in Chinese).
- 温姗姗, 姜彤, 李修仓, 等, 2014. 1961—2010 年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要素分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 79-86.
- Wen S S, Jiang T, Li X C, et al, 2014. Changes of actual evapotranspiration over the Songhua River Basin from 1961 to 2010[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 10(2): 79-86 (in Chinese).
- 邢峰, 韩荣青, 李维京, 2018. 夏季黄河流域降水气候特征及其与大气环流的关系[J]. 气象, 44(10): 1295-1305.
- Xing F, Han R Q, Li W J, 2018. Spatio-temporal variations of summer rainfall over Yellow River valley and its association with atmospheric circulation[J]. Meteor Mon, 44(10): 1295-1305 (in Chinese).
- 熊敏谔, 2017. 近 60 年中国日降水量分区及气候特征[J]. 大气科学, 41(5): 933-948.
- Xiong M Q, 2017. Climate regionalization and characteristics of daily precipitation in China in recent 60 years[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5): 933-948 (in Chinese).
- 杨永辉, 任丹丹, 杨艳敏, 等, 2018. 海河流域水资源演变与驱动机制[J]. 中国生态农业学报, 26(10): 1443-1453.
- Yang Y H, Ren D D, Yang Y M, et al, 2018. Advances in clarification of the driving forces of water shortage in Haihe River Catchment[J]. Chin J Eco-Agric, 26(10): 1443-1453 (in Chinese).
- 姚俊强, 杨青, 伍立坤, 等, 2016. 天山地区水汽再循环量化研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 10(5): 37-43.
- Yao J Q, Yang Q, Wu L K, et al, 2016. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of Tianshan Mountains[J]. Desert Oasis Meteor, 10(5): 37-43 (in Chinese).
- 袁菲, 卢陈, 何用, 等, 2017. 近 50 年来西、北江干流径流变化特征及其发展趋势预测[J]. 人民珠江, 38(4): 8-11.
- Yuan F, Lu C, He Y, et al, 2017. Variation characteristics and developing trend forecast of runoff in the west and north river network in recently 50 years[J]. Pearl River, 38(4): 8-11 (in Chinese).
- 张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等, 2017. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, (4): 59-66.
- Zhang L R, He Y H, Tang Y P, et al, 2017. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River Basin[J]. Hydro-Sci Eng, (4): 59-66 (in Chinese).
- 赵光平, 姜兵, 王勇, 等, 2017. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 40(2): 239-247.
- Zhao G P, Jiang B, Wang Y, et al, 2017. Characteristics of summer water vapor transport in the eastern Northwest China and their relationships with precipitation[J]. Arid Land Geogr, 40(2): 239-247 (in Chinese).
- 赵建华, 刘翠善, 王国庆, 等, 2018. 近 60 年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 39(3): 1-5, 12.
- Zhao J H, Liu C S, Wang G Q, et al, 2018. Evolution of stream flow in the Yellow River during the past 60 years and its response to climate change[J]. J North China Univ Water Resour Electric Power (Nat Sci Ed), 39(3): 1-5, 12 (in Chinese).
- 周杰, 吴永萍, 封国林, 等, 2013. ERA-Interim 中的中国地区水分循环要素的时空演变特征分析[J]. 物理学报, 62(19): 199202.
- Zhou J, Wu Y P, Feng G L, et al, 2013. Spatial and temporal characteristics of moisture cycle factors over China analyzed with ERA-Interim reanalysis data[J]. Acta Phys Sin, 62(19): 199202 (in Chinese).
- Bai P, Liu X M, 2018. Intercomparison and evaluation of three global high-resolution evapotranspiration products across China[J]. J Hydrol, 566: 743-755.
- Boer G J, 1993. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets[J]. Clim Dyn, 8(5): 225-239.
- Durack P J, Wijffels S E, Matear R J, 2012. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000[J]. Science, 336(6080): 455-458.
- Feng T C, Su T, Ji F, et al, 2018. Temporal characteristics of actual evapotranspiration over China under global warming[J]. J Geophys Res Atmos, 123(11): 5845-5858.
- Giorgi F, Coppola E, Raffaele F, 2014. A consistent picture of the hydroclimatic response to global warming from multiple indices: models and observations[J]. J Geophys Res Atmos, 119(20): 11695-11708.
- Good S P, Noone D, Bowen G, 2015. Hydrologic connectivity con-

- strains partitioning of global terrestrial water fluxes [J]. *Science*, 349(6244): 175-177.
- Han S J, Tian F Q, Hu H P, 2014. Positive or negative correlation between actual and potential evaporation? Evaluating using a nonlinear complementary relationship model[J]. *Water Resour Res*, 50(2): 1322-1336.
- Held I M, Soden B J, 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. *J Clim*, 19(21): 5686-5699.
- Huntington T G, 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis[J]. *J Hydrol*, 319(1-4): 83-95.
- Huntington T G, Weiskel P K, Wolock D M, et al, 2018. A new indicator framework for quantifying the intensity of the terrestrial water cycle[J]. *J Hydrol*, 559: 361-372.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, 2018. *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Kramer R J, Bounoua L, Zhang P, et al, 2015. Evapotranspiration trends over the eastern United States during the 20th Century [J]. *Hydrology*, 2(2): 93-111.
- Li B Q, Liang Z M, Zhang J Y, et al, 2018. Attribution analysis of runoff decline in a semiarid region of the Loess Plateau, China [J]. *Theor Appl Climatol*, 131(1-2): 845-855.
- Li X L, Liang S L, Yuan W P, et al, 2014. Estimation of evapotranspiration over the terrestrial ecosystems in China[J]. *Ecohydrology*, 7(1): 139-149.
- Ma J, Chadwick R, Seo K H, et al, 2018. Responses of the tropical atmospheric circulation to climate change and connection to the hydrological cycle[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46: 549-580.
- Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S, et al, 2019. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982–2012: validations and spatiotemporal analyses [J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(8): 4326-4351.
- Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al, 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 415(6871): 514-517.
- Miralles D G, Nieto R, McDowell N G, et al, 2016. Contribution of water-limited ecoregions to their own supply of rainfall[J]. *Environ Res Lett*, 11(12): 124007.
- Mo X, Liu S, Lin Z, et al, 2015. Trends in land surface evapotranspiration across China with remotely sensed NDVI and climatological data for 1981–2010[J]. *Hydrol Sci J*, 60(12): 2163-2177.
- Oki T, Kanae S, 2006. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 313(5790): 1068-1072.
- Rawlins M A, Steele M, Holland M M, et al, 2010. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: observations and expectations[J]. *J Clim*, 23(21): 5715-5737.
- Skliris N, Zika J D, Nurser G, et al, 2016. Global water cycle amplifying at less than the Clausius-Clapeyron rate[J]. *Sci Rep*, 6(1): 38752.
- Stephens G L, Hu Y X, 2010. Are climate-related changes to the character of global-mean precipitation predictable? [J]. *Environ Res Lett*, 5(2): 025209.
- Stewart R E, Leighton H G, Marsh P, et al, 1998. The Mackenzie GEWEX study: the water and energy cycles of a major North American River Basin[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(12): 2665-2684.
- Sun S B, Chen B Z, Shao Q Q, et al, 2017. Modeling evapotranspiration over China's landmass from 1979 to 2012 using multiple land surface models: evaluations and analyses[J]. *J Hydrometeorol*, 18(4): 1185-1203.
- Sun Y, Dong S Y, Zhang X B, et al, 2019. Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961 [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 100(1): S79-S83.
- Syed T H, Famiglietti J S, Chambers D P, et al, 2010. Satellite-based global-ocean mass balance estimates of interannual variability and emerging trends in continental freshwater discharge[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(42): 17916-17921.
- Tokina H, Xie S P, Deser C, et al, 2012. Slowdown of the Walker circulation driven by tropical Indo-Pacific warming[J]. *Nature*, 491(7424): 439-443.
- Trenberth K E, Asrar G R, 2014. Challenges and opportunities in water cycle research: WCRP contributions[J]. *Surv Geophys*, 35(3): 515-532.
- Trenberth K E, Smith L, Qian T T, et al, 2007. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data[J]. *J Hydrometeorol*, 8(4): 758-769.
- Vecchi G A, Soden B J, 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation[J]. *J Climate*, 20(17): 4316-4340.
- Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, et al, 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing[J]. *Nature*, 441(7089): 73-76.
- Wang K C, Dickinson R E, 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. *Rev Geophys*, 50(2): 1-54.
- Wang K C, Dickinson R E, Wild M, et al, 2010. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 2. Results [J]. *J Geophys Res Atmos*, 115 (D20): D20113, DOI:10.1029/2010JD013847.
- Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al, 2007. How much more rain will global warming bring? [J]. *Science*, 317(5835): 233-235.
- Zhao T B, Wang J H, Dai A G, 2015. Evaluation of atmospheric precipitable water from reanalysis products using homogenized radiosonde observations over China[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(20): 10703-10727.