

引用格式: 刘启航, 黄昌. 西北内陆区水量平衡要素时空分析[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1175-1187. [Liu Q H, Huang C. Spatiotemporal change of water balance components in the inland region of Northwest China, 1998-2017[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1175-1187.] DOI: 10.18402/resci.2020.06.14

西北内陆区水量平衡要素时空分析

刘启航, 黄昌

(西北大学, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要: 近几十年来, 气候变化和人类活动的加剧导致西北内陆区的水资源以及相关水量平衡要素的时空分布发生了显著的变化。本文借助 Google Earth Engine(GEE)遥感云计算平台, 基于该平台集成的多源遥感数据集, 从西北内陆区全流域和三级流域两个空间尺度, 对 1998—2017 年近 20 年西北内陆地区多个水量平衡要素的年际和年内变化进行时空分析, 进而揭示区域总蓄变量、降水量、土壤湿度、蒸散发、地表水等核心水量平衡要素的空间分布特征与时间演变规律。研究表明: ①在全流域尺度, 研究区整体的升温趋势导致高海拔地区冰雪消融加剧、下游低海拔平原及盆地水分补给增加, 使得总蓄变量呈现“高海拔减少低海拔增加”的趋势, 同时, 低海拔地区的地表水面积、土壤湿度和蒸散发亦相应地表现出一定的增加趋势; ②在时间尺度上, 各水量平衡要素除沙漠和荒漠地区外季节分异性明显, 一般在夏秋达到最大, 在春冬季时最小; ③在三级流域尺度, 不同的子流域由于水分补给来源的不同, 各水量平衡要素具有不同的协同演变关系, 以冰雪补给为主的流域, 各要素呈现与总蓄变量相似的变化趋势, 而以降水补给为主的流域, 各要素变化与降水的波动关系更为密切。总之, 西北内陆区各水量平衡要素在不同的时空尺度上呈现了明显的差异性, 本文为变化环境下进一步深入理解各要素协同演变特征提供重要参考。

关键词: 多源遥感数据; 水量平衡要素; 地表水; 水循环; 西北内陆区

DOI: 10.18402/resci.2020.06.14

1 引言

西北内陆干旱区是中国丝绸之路经济带建设的核心组成部分, 也是中国生态安全战略格局中的重点区域。同时, 该地区也是对气候变化响应最敏感的区域之一^[1]。水资源短缺是制约该地区经济社会发展及生态环境安全的核心问题。在全球气候变化的大背景下, 当地人类活动强度的增加导致社会经济发展对水资源的依赖日益严重, 并进一步影响了水资源的时空分布。水资源的短缺在对该地区人类生存环境和区域经济可持续发展造成严重影响的同时, 还给予脆弱敏感的生态环境带来了一系列问题^[2]。西北内陆区的水资源受多个对气候变化有不同响应的水量平衡要素的影响, 包括降水、

土壤湿度、蒸散发、地表水等^[3]。近几十年来, 由于全球气候变化导致的气温升高, 冰川积雪的范围不断减少, 加之当地日益剧烈的人类活动, 对该地区的水资源以及相关水量平衡要素的时空分布产生了较大影响。因此, 研究这些水量平衡要素的时空动态演变情况, 掌握其时空变化的特征, 对于区域社会经济发展, 生态文明建设以及深入理解区域水文水循环过程, 准确把握当地水文水资源状况等均具有一定意义。

目前, 已经有学者利用不同的遥感手段对总水量、降水、土壤湿度、蒸散发和地表水等影响西北内陆区水资源的关键水量平衡要素进行了一系列不同尺度的时空分析与研究。例如, 许民等^[4]利用重

收稿日期: 2019-09-17, 修订日期: 2019-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404302); 国家自然科学基金项目(41501460)。

作者简介: 刘启航, 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为遥感和 GIS 应用。E-mail: tttngliuqi@qq.com

通讯作者: 黄昌, 男, 江西宜春人, 博士, 副教授, 研究方向为遥感和 GIS 应用。E-mail: changh@nwu.edu.cn

力场恢复与气候试验重力卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)监测祁连山地区总水量的时空变化,发现由于冻土退化和养林建设的影响导致该地区的总蓄水量近年呈增加趋势。蔡晓慧等^[5]在西北内陆河流域对热带降雨测量卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)月降水产品进行适应性分析,发现TRMM月降水数据与实测数据有较好的线性相关性,能够反映降水的时空变化特征;张京等^[6]利用中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)数据研究格尔木河流域土壤湿度的时空变化,发现该地区的土壤湿度近年来总体呈现上升的趋势;贺添等^[7]基于MODIS蒸散发产品对我国蒸散发的年际趋势进行分析,发现西北地区的蒸散发在近10年来呈逐年减小趋势;艾克拜尔·买提尼牙孜^[8]基于陆地资源卫星Landsat以及MODIS数据等对新疆阿尔泰山地区的地表水时间变化趋势进行分析,发现该地区的地表水面积受益于当地的水资源保护政策而在近10年来呈增加趋势。这些研究从不同的角度、不同的时空尺度对西北地区的水量平衡要素进行了分析,为了解该地区的水资源变化特征提供了有力支持。但是现有研究均存在一定的限制,首先,研究方法方面,现有研究成果均基于传统的遥感数据分析方法,需全面收集相关的时间序列遥感影像,然后对其进行筛选、预处理、校正、分析等以便得到所需的结果,其处理过程繁复,效率较低。其次,在时空分析方面,这些研究在对各个水量平衡要素进行分析时,时空尺度相对单一,而且各不相同。时间上,有年尺度的多年长时序分析,也有月尺度的季节性研究;空间上,大多聚焦于特定的子流域,对于各要素在全流域尺度上的空间分异性研究不足。最后,在研究对象方面,现有研究都只针对某单一的水量平衡要素进行研究,缺乏对相互影响、相互作用的多个要素之间协同变化趋势的关注,因而难以反映西北内陆区整体水量平衡要素的时空变化规律。

为了克服以上不足,需要综合运用多源遥感数据,在统一的时空框架体系下,开展多要素时空演变特征协同分析。为满足多源遥感数据多尺度时空分析计算量大的需求,本文拟借助Google公司的遥感云计算平台Google Earth Engine(GEE)^[9],综合

利用重力卫星、降水卫星、光学卫星等多源遥感数据,开展长时序、多尺度的水量平衡要素时空动态分析。该平台一方面能够提供高效的遥感数据分析,另一方面还能快速实现遥感数据的镶嵌与融合,让遥感数据的使用更加充分^[10,11]。本文拟在GEE平台下,基于多源遥感数据研究西北内陆区总蓄变量、降水量、土壤湿度、蒸散发及地表水面积等5个关键水循环要素在1998—2017年间的时空变化,在时间尺度上,分别基于年尺度和月尺度分析其时间变化特征,在空间尺度上,分别在西北内陆流域及其子流域尺度上分析各要素时空演变特征的差异性以及协同性,以便于为当地水资源合理规划及可持续利用提供重要参考。

2 研究区与数据来源

2.1 研究区

西北内陆区位于中国的西北部,包括新疆全境、青海柴达木盆地、甘肃河西走廊以及内蒙古贺兰山以西地区(图1),总面积达230多万km²,约占全国国土面积的24.5%^[12]。该地区年平均降雨量不足200 mm,是典型的资源型缺水地区^[13],是全球同纬度最干旱的地区之一。其降水量、土壤湿度、地表水常年都处于较低水平且蒸散发量较大,夏季炎热、冬季严寒、风大沙多^[14]。该地区的地貌特点是山脉与盆地相间,区内分布着阿尔泰山、天山、喀喇昆仑山、昆仑山、祁连山等一系列大致东西走向的高大山脉。西北内陆区的地表径流主要来源于这些高大山脉的冰川融水和少量的降水,所以其稳定性较差且径流量普遍较小^[15]。这些山脉围绕着巨大内陆盆地,将西北内陆区分割为准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、河西内陆区等四大内陆河水系单元和无流区^[16]。国家重点研发计划项目“西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用”在全国水资源分区资料中的水资源三级区划基础上,结合三级河流和数字高程模型将整个西北内陆区进一步划分为25个三级流域(图1),这些三级流域相对于水资源二级区划具有更高的水文一致性,因此本文选择该三级流域尺度作为全流域之外的另一个空间研究尺度。同时,该项目针对“西北内陆区变化环境下水循环演变过程模拟”这一核心科学问题,根据冰雪融水补给比例的不同选取了石羊河流域、疏勒河流域和阿克苏河流域3个典型的三级流域作为

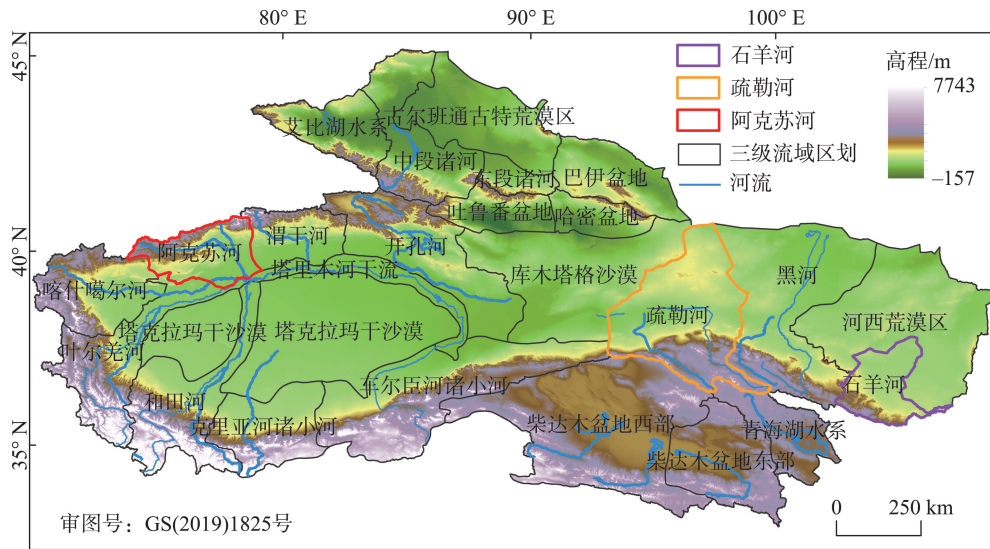


图1 西北内陆区概况及其三级流域区划

Figure 1 Inland arid region of Northwest China and its third-order basins

示范研究区。其中,阿克苏河以高山冰雪融水补给为主,疏勒河主要由高山冰雪融水和雨水混合补给,而石羊河由雨水补给为主,并有少量冰雪融水补给^[17]。本文亦以这3个流域作为典型流域具体分析各水量平衡要素的时空演变规律。

2.2 数据来源

针对总蓄变量、降水、土壤湿度、蒸散发、地表水这5个水量平衡要素,本文相应选取了5个遥感数据集,它们对应的名称、时空分辨率和时间跨度如表1所示。

以上数据集均已在GEE平台上发布,可通过编程脚本直接调用。它们均经过了相关的数据预处理及精度验证。其中,总蓄变量的时空分析是由GRACE重力卫星数据来完成的,该数据集的数据分别由3个单位提供:CSR(美国德克萨斯州/空间研究中心),GFZ(德国地球科学研究中心)和JPL(美

国宇航局喷气推进实验室)。由于每个中心计算时所用到的系数不同,因此结果可能略有不同^[18]。考虑到CSR数据的使用较为广泛,且具有较高的精度^[19,20],本文亦选择使用该数据。降水量的时空分析工作是由TRMM月降水数据集完成的。该数据集在原始降水反演算法上做了一定改进,对于卫星覆盖率较差地区的降水量估算精度有着较为可观的提高^[21]。经过在全球多个地区开展的调查研究表明,该数据集与地面观测降水存在较强的一致性^[22]。该数据集的时间分辨率是一个月,空间分辨率是0.25个弧度(约25 km),单位是毫米每小时(mm/hr)。本文所选用的土壤湿度数据集是通过使用一维整体卡尔曼滤波(EnKF)数据同化方法将土壤湿度与海洋盐度(Soil Moisture Ocean Salinity, SMOS)卫星反演的土壤湿度集成到改进的两层Palmer模型中得到^[23]。SMOS土壤水分观测值的同化有助于

表1 遥感数据源信息表

Table 1 Remote sensing data source information

水量平衡要素	遥感数据集名称	时间分辨率	空间分辨率	起止年份
总蓄变量	GRACE Monthly Mass Grids - Land	1月	1°	2002—2017
降水	TRMM 3B43: Monthly Precipitation Estimates	1月	0.25°	1998—2019
土壤湿度	NASA-USDA Global Soil Moisture Data	3天	0.25°	2010—2019
蒸散发	MOD16A2: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration 8-Day Global 1km	8天	1 km	2000—2014
地表水	JRC Monthly Water History, v1.0	1月	30 m	1984—2015

改善基于模型的土壤水分预测,特别是实地观测数据缺乏的地区。该数据集已在全球干旱多发地区进行了评估,结果表明标准化降水指数(SPI)和归一化植被指数(NDVI)与该数据集的根区土壤湿度异常值的一致性很高^[24],证明了该数据集的可靠性。本文所使用的MOD16A2蒸发蒸腾/潜热通量产品是基于Penman-Monteith方程获得的蒸散发遥感数据产品,时间分辨率为8天,空间分辨率为1 km^[25],单位是kg/m²。研究表明,该数据集的蒸散发数据与气象实测数据存在较强的相关性^[26]。GEE上的全球地表水监测数据集^[27]包含了1984—2015年地表水范围的空间分布。它基于300万幅以上Landsat影像的自动解译算法提取水/非水像元,并经过大量且精细的人工后期纠错过程^[28],本文选用了其月尺度地表水数据集,空间分辨率是30 m。由于该数据集1984—2000年的早期数据在西北内陆区的数据缺失严重,故本研究中只选用了2001—2015年之间的数据。

针对选定的以上5个遥感数据集,建立统一的多尺度时空分析架构,从多个时间和空间的角度对以上的多源遥感数据集进行时空分析,探究各个水量平衡要素在不同时空尺度下的演变特征。受所用遥感数据源限制,部分数据时间尺度并未覆盖整个20年的研究区间。不过,所有数据仍有10年以上的重叠期,总体上仍足以揭示各水量平衡要素在年际、月际尺度上的变化特征。

3 研究方法

通过构建统一的时空分析框架,在GEE平台上使用多源遥感数据,对西北内陆区各个水量平衡要素的时空动态变化特征进行分析,以便比较各要素之间的协同变化趋势。因此,首先需要通过时空聚合的手段统一各类数据的时空分辨率。然后,建立多尺度时空分析框架,即在空间尺度上分为西北内陆区全流域以及三级流域进行研究;在时间尺度上分为年尺度和月尺度进行分析。在全流域尺度,一方面关注各水量平衡要素1998—2017年间的年际变化趋势及其空间分异,另一方面关注这些水量平衡要素年内的季节分异规律。在三级流域尺度,基于全流域分析研究的基础进行分区统计,对比分析各水量平衡要素在各子流域时空变化特征的差异,并选择阿克苏河流域、石羊河流域以及疏勒河流域

3个典型的三级流域,阐明各要素在时间序列上变化的协同性和相关性。研究路线见图2。

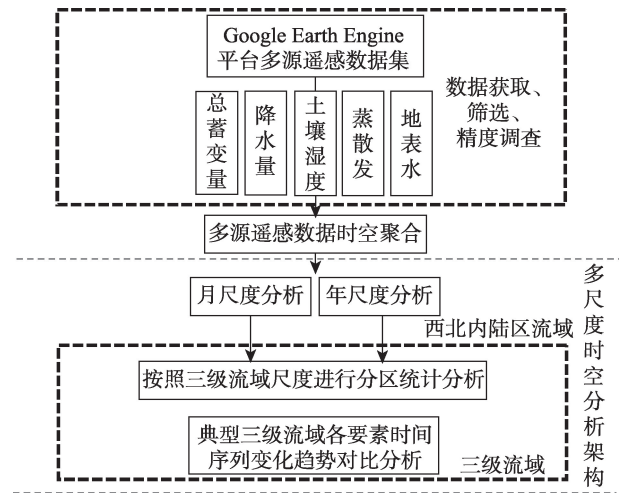


图2 研究路线图

Figure 2 Flowchart of methodology

3.1 数据时空聚合

由于所使用的遥感数据源时空分辨率均不一致,为了便于对比分析,需要将数据聚合到统一的时空分辨率。时间分辨率上,统一将原始数据整合到月尺度,对于土壤湿度和蒸散发数据,均采用取平均的方式将原始8天和3天分辨率的数据聚合为月数据。在空间分辨率上,将所有数据统一为25 km,其中,总蓄变量产品、降水以及土壤湿度产品使用最邻近重采样,蒸散发使用双线性插值,而地表水则统计每25 km格网内水体像元的个数,记录地表水在各格网内的面积值,并以格网内水域面积代表地表水的空间变化。在分析年际变化时,对统一时空分辨率的各类数据逐格网按年求平均值,得到年尺度数据。但对于地表水,其年尺度数据是逐格网按年取最大值得到。

3.2 建立多尺度时空分析架构

3.2.1 西北内陆区全流域尺度

对于整个西北内陆区流域,通过年和月两种时间尺度进行分析。在年尺度上,主要关注各要素1998—2017年的总体变化趋势和变化程度在空间上的分布特点。采用Mann-Kendall(MK)方法^[29]对上述各类要素数据集进行逐格网的年际趋势分析。该方法不需要样本遵循特定的分布,不受异常值的干扰,适合应用于水文、气象等非正态分布的数据。基于正态分布统计量Z对趋势分析结果进行

2020年6月

置信度检验。在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,即说明逐像元的时间序列数据存在明显的上升或下降趋势^[30]。通过MK方法得到各水量平衡要素逐像元的变化率(slope)图像以及Z检验值图像,通过设定Z的阈值筛选出通过置信度为90%显著性检验的像元。在月尺度上,将所选用的多年遥感数据按月取平均,得到各个月份的多年平均数据,然后逐格网统计各水量平衡要素最大值最小值出现的月份,通过各要素最大值和最小值发生的月份表达其年内波动以及空间分异规律。

3.2.2 三级流域尺度

采用分区统计的方法,对总蓄变量、降水量、土壤湿度、蒸散发以及地表水面积的全流域变化分析结果按三级流域进行均值统计,得到1998—2017年来各水量平衡要素在各三级流域的年尺度变化情况;同时,对各三级流域年内各水量平衡要素的最大最小值对应月份按众数进行统计,得到各水量平衡要素在各个三级流域的最大最小值月份,分析各三级流域的月尺度变化情况,并以阿克苏河流域、疏勒河流域和石羊河流域3个典型三级流域为例,进一步分析各水量平衡要素随时间协同变化的趋势。

4 结果与分析

4.1 西北内陆区全流域尺度时间序列分析

4.1.1 各水量平衡要素年尺度变化分析

通过MK方法对各水量平衡要素进行年际趋势分析,并对其趋势分析结果进行置信度检验,剔除了置信度在90%以下,即未通过置信度检验的像元(图3)。其中,由于总蓄变量变化通过“GRACE等效水高”来表达,故其变化率单位为cm/a;土壤湿度变化通过标准化土壤水分异常值表达,故其变化率单位为mm/a;地表水变化通过各格网单元水域面积表达,故其变化率单位为km²/a;降水和蒸散发的变化率单位分别是mm/a及(kg/m²)/a。

图3展示了各水量平衡要素变化率在西北内陆区流域的空间分布。总蓄变量在整个流域的中部和北部尤其是天山山脉呈明显的减少趋势,减少速率高达0.89 cm/a(图3);而在研究区的南部,即青藏高原北麓特别是柴达木盆地地区,总蓄变量则呈现出了明显的增加趋势,增加速率高达0.63 cm/a。总蓄变量的变化趋势在流域内呈现的这种空间差异,

主要是由于近些年西北内陆区流域内气温呈明显的变暖趋势^[4],导致流域上游地区的冰川融水过程加剧,冰川退缩加速、面积减少,使得高大山脉等冰川丰富地区的总蓄变量不断下降;而冰川融水的增加又导致其周边平原及盆地区域由于水分的大量补给而呈现总蓄变量增加的趋势。

降水量的变化在整个西北内陆区并不显著,但总体上还是呈现出缓慢增加的态势,尤其在研究区北部和东南部的少数地区零星出现了降水量变化趋势急剧上升的情况,增长率最高达到了61.3 mm/a(图3b),说明在这些地区近年来时常会出现一些强降水的极端天气情况,这与黄建平等发现的西北内陆区的极端强降水事件在近20年来明显增多的情况一致^[32]。

由图3c可以看出,西北内陆区流域的土壤湿度变化较为明显,呈增加趋势的区域主要集中在研究区中北部的吐鲁番盆地,塔克拉玛干沙漠外围的诸多流域以及研究区南部的青海湖水系和柴达木盆地地区,增加速率普遍在1 mm/a以上,最高达1.51 mm/a。这些地区大体与图3a中总蓄变量增加的区域重合,这可能是由于冰川补给量的上升,导致这些地区整体更加湿润,土壤湿度和总蓄变量均呈增加趋势。土壤湿度呈减少趋势的地区则比较分散,主要包括天山山脉,河西荒漠区的部分地区以及一些流域边缘地带,最大减少速率可达1.27 mm/a。

图3d中,实际蒸散发量呈增长趋势的区域主要集中在塔克拉玛干沙漠以西的多个子流域、青海湖地区以及中段诸河流域的北部地区,这些地区的实际蒸散发变化率值普遍较高,年均增加量最高可达2.02 (kg/m²)/a。而实际蒸散发量减少的地区主要集中在中北部的天山山脉一带,且年均减少速率可高达1.41 (kg/m²)/a,这主要是由于气温和冰川融水增多导致的地表径流变化,从而影响了实际蒸散发量的时空变化。

整个研究区的地表水变化情况在1998—2017年间普遍呈现出较为平稳的状态,变化率普遍不高,仅在部分子流域的下游,比如塔克拉玛干沙漠的西北部即塔里木河干流流域,出现了地表水面积增加的情况(图3e)。

4.1.2 月尺度分析

将5个水量平衡要素的多年遥感数据按月取均

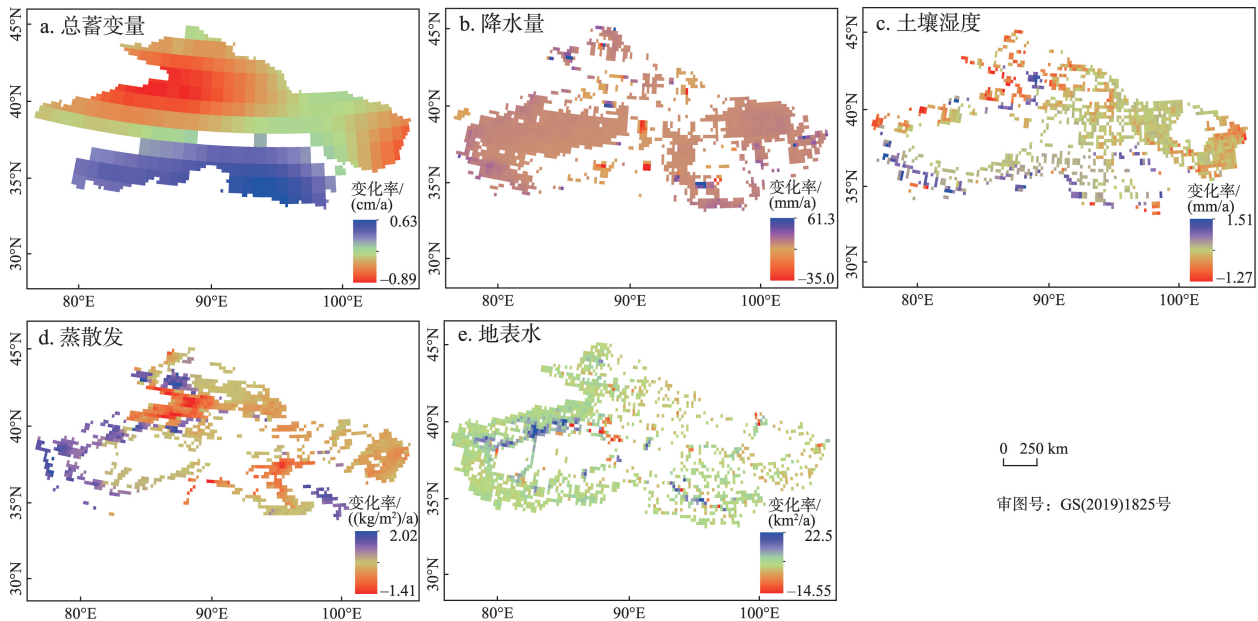


图3 1998—2017年西北内陆区各水量平衡要素年际变化率

Figure 3 Change rates of water balance components in the inland region of Northwest China, 1998-2017

值,得到各个月份的月尺度数据。以各要素最大值和最小值对应的月份(1—12月)表征水量平衡要素在整个西北内陆区流域的年内变化空间分异情况(图4),并使用不同的色系显示4个季节相应的月份。可以看到,总蓄变量的最大值一般发生在5月,6月以及7月。其中,西部地区总蓄变量最大值多集中在4月到5月份,中部以及西南部地区为6月份,东部地区为7月份。而总蓄变量最小值对应的月份分布则相对分散,绝大部分区域的最小值月份集中在秋冬季(9—2月),东部部分区域总蓄变量最小值则发生在春季(3—5月)。降水量方面,西部少部分地区的降水量最大值主要发生在春季,而中东部绝大多数区域都是在夏季时达到最大。区域内降水量的最小值一般集中在较为干旱的秋冬两季,部分地区的降水量最小值出现在3月份。在青海湖水系以及西北部的开孔河流域北部、渭干河流域、阿克苏河流域地区的土壤湿度最大值出现在夏季,最小值则出现在秋冬季。实际蒸散发方面(图4g,4h),除沙漠荒漠以及其边缘部分地区外的大多数地区极大值发生在5—8月之间,这与夏季气温较高有关。研究区内绝大部分地区的蒸散发都在春冬季时最小。实际蒸散发的大小与相应季节的降水、湿度、日照以及风速特点都有关系^[33],该结果一定程度上可以反映研究区内由这些因素导致的蒸散发空

间和季节差异。同时,通过分析地表水面积的季节性变化(图4i,4j)可以看出,地表水面积一般在夏秋两季气温较高时达到最大,这主要是由于流域内的地表水绝大部分来自于积雪融水,而地表水面积最小的时间段大多都集中在春季。

通过月尺度的分析发现,各个水量平衡要素在整个西北内陆区流域的年内季节分异性总体较为明显。夏季平均气温较高,各水量平衡要素包括降水、蒸散发等都较为活跃,水循环相对剧烈;而在冬季,平均气温较低,地表径流逐渐减缓,各水量平衡要素值在寒冷干燥的环境下逐渐变小,整体的水循环相对平缓。

同时,由于塔克拉玛干沙漠以及其他几个比较大的荒漠区被大量的沙漠和戈壁滩所覆盖,沙漠或戈壁下垫面等区域性问题导致了该区域的旱情严重,影响范围大,且逐年加剧^[34],因此,这些地区及其周边区域的各个水量平衡要素年内波动较小,长期维持在平稳较低的水平,甚至出现了土壤湿度最大值和最小值同时出现在冬季的现象。

4.2 三级流域尺度时间序列分析

4.2.1 各水量平衡要素时空变化特征分流域统计分析

为了反映各要素时空变化在三级流域的分异,分别在年尺度上对各水量平衡要素的趋势(变化率

2020年6月

值)在三级流域尺度上按均值进行分区统计(图5),以及在月尺度上对最大最小值所对应的月份分布情况按众数进行分区统计(图6)。总体上,各水量平衡要素的年际和年内变化在不同的三级流域内均呈现了较为明显的差异。

由图5可以看到,总蓄变量、土壤湿度和蒸散发的平均变化率仅在小部分三级流域内呈现为相对较小的正值,说明这3个要素在大部分三级流域内

呈明显的减少趋势,小部分流域呈增加趋势,且增加速率较为明显的低于其他流域的减少速率;而降水量和地表水面积的平均变化率在大部分三级流域中表现为正值,说明这两个要素在大部分流域以增加趋势为主,且增加的速率明显高于其他流域的减少速率。

图6展示了5个水量平衡要素的最大值和最小值在各三级流域内的大部分格网单元出现的月份

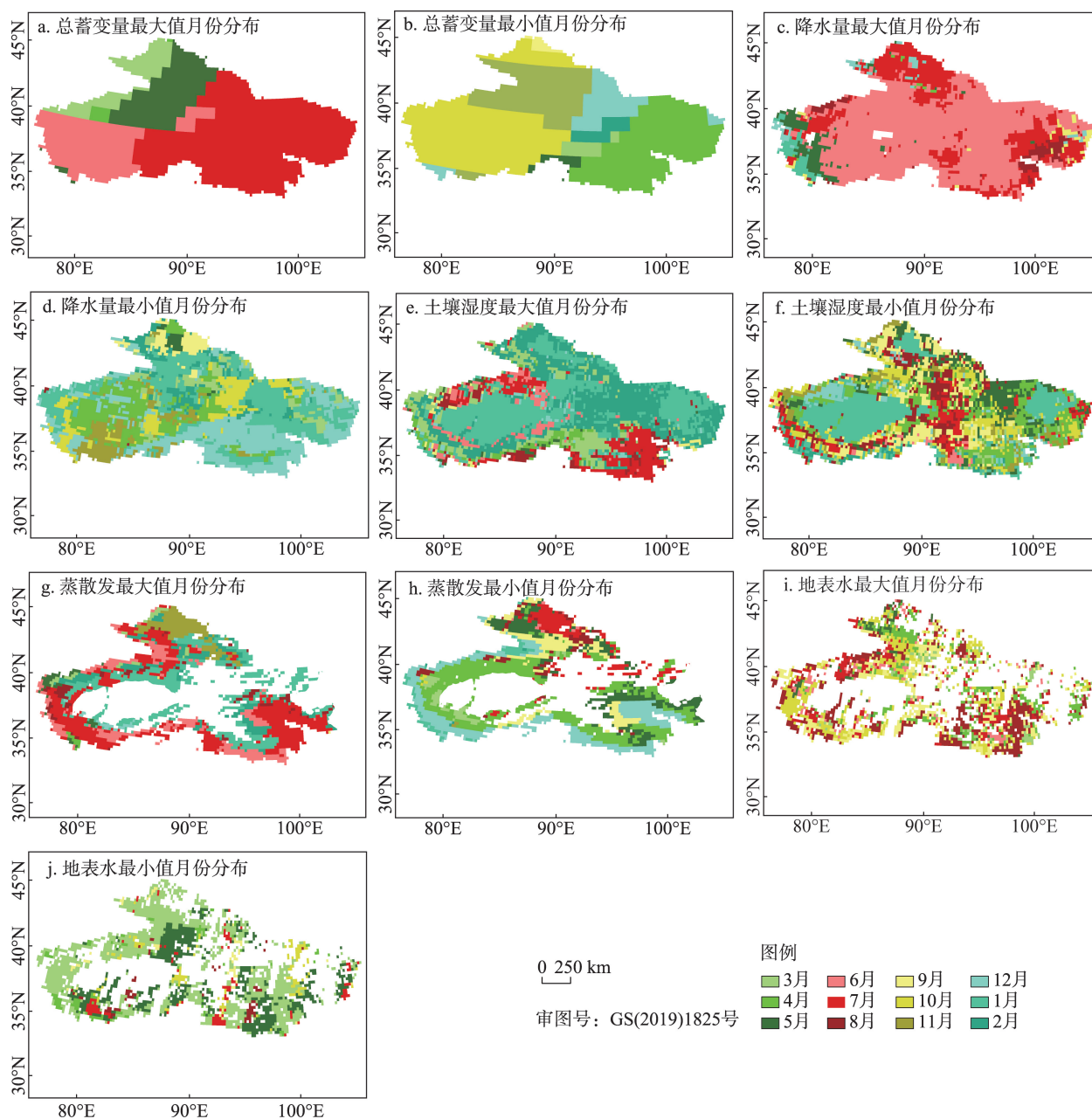


图4 西北内陆区各水量平衡要素最大值月份分布与最小值月份分布

Figure 4 Month of occurrence for maximum and minimum values of water balance components in the inland region of Northwest China

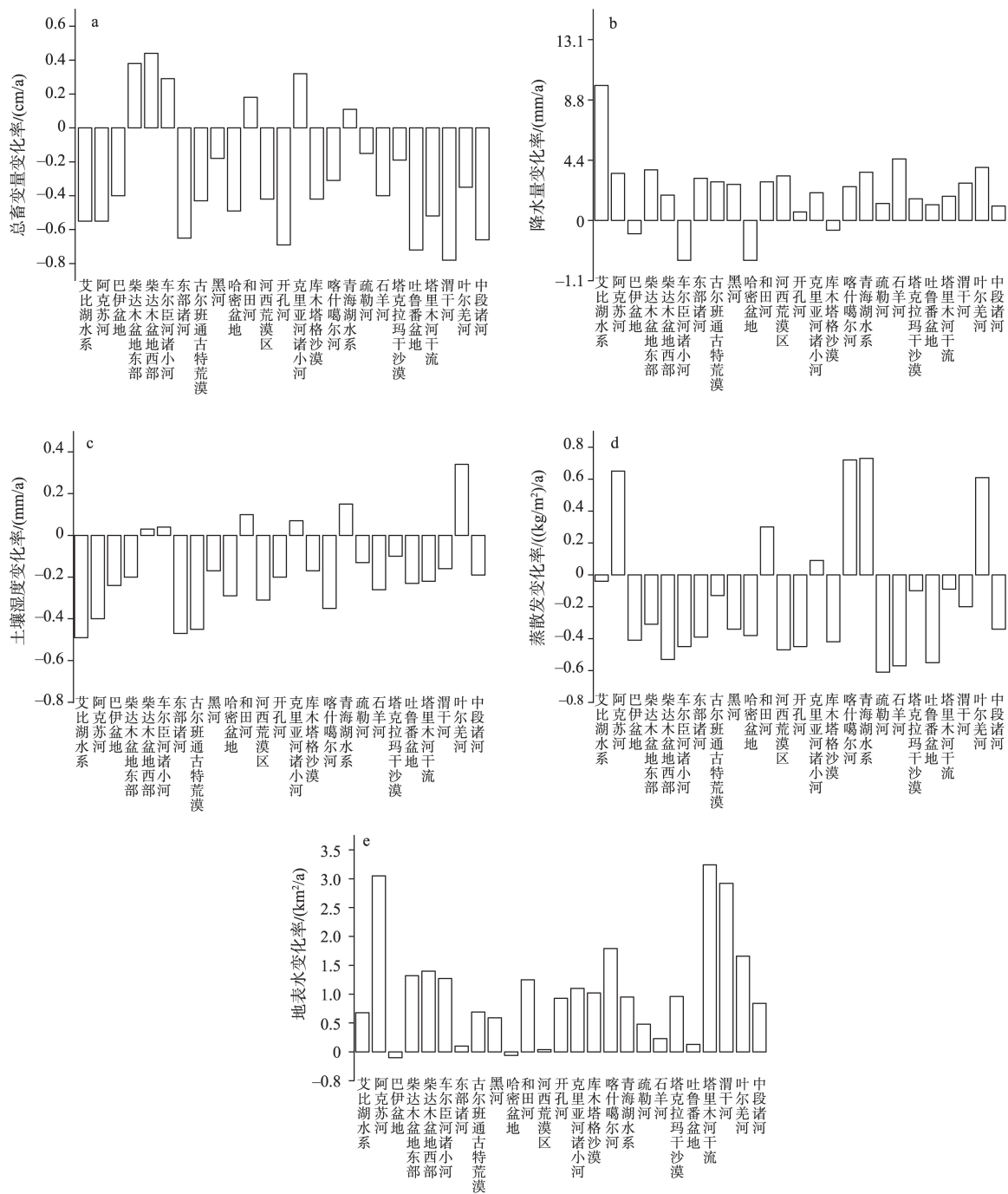


图5 三级流域各水量平衡要素变化率

Figure 5 Change rates of water balance components at third-order basins

(众数月份)。可以看到, 尽管各个三级流域之间存在一定的差异, 但是, 总体上, 在所有的三级流域, 总蓄变量最大值大多发生在4—7月份, 而最小值一般发生在10—12月份。降水主要集中在6—7月份, 土壤湿度和蒸散发则在各三级流域之间存在较大的差异, 这主要是由于在沙漠和荒漠的大面积区

域, 土壤湿度和蒸散发都很小, 很难探测出明显的季节性。地表水面积在大部分流域都于9—10月份达到最大, 而在3—5月份为最小。可见, 在除了沙漠和荒漠区之外的地区, 在三级流域尺度上的各个水量平衡要素都呈现出了明显的季节性, 即在夏秋季活跃, 在春冬季较为平缓。

2020年6月

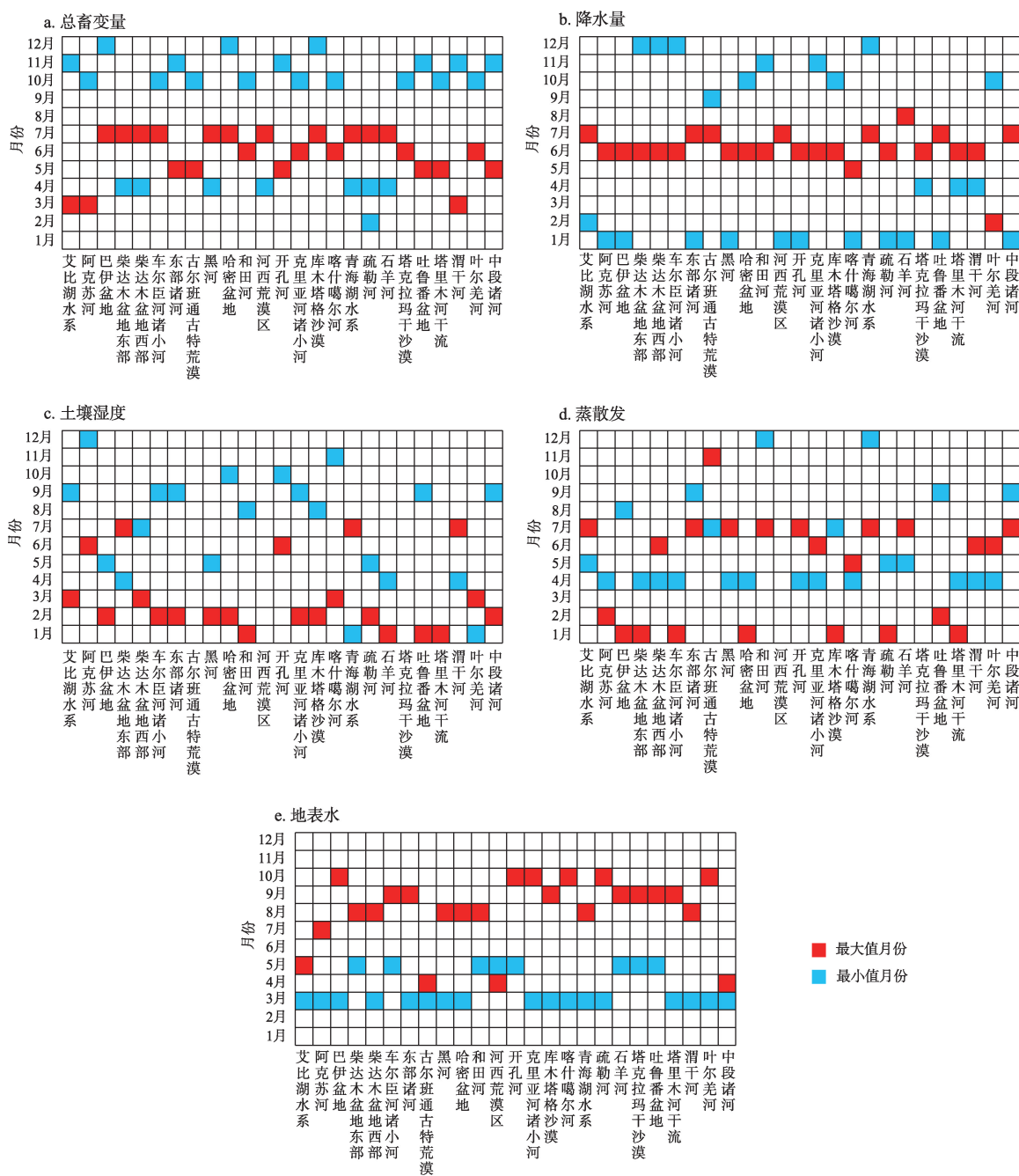


图6 三级流域各水量平衡要素最大最小值对应月份分布情况

Figure 6 Month of occurrence for maximum and minimum values of water balance components at third-order basins

4.2.2 各水量平衡要素在典型子流域的时间序列趋势对比分析

为了进一步揭示各要素在1998—2017年间的协同变化趋势,对各水量平衡要素进行年际尺度的时间序列对比分析。为了让各要素的时间序列变化对比更加明显,采用最大最小值归一化,将5个要素的相应数值统一到0~1之间,以便绘制在同一坐

标轴下(图7)。

由图7可以看出,在3个流域内,2010年的平均土壤湿度均显著高于其他年份。在阿克苏流域,其他4个水量平衡要素也在2010年出现峰值,反映了该流域在该年度相对较为剧烈的水文循环状态。在疏勒河流域,降水和蒸散发在2010年也有一个小高峰,但在石羊河流域,这两者的峰值相对于土壤

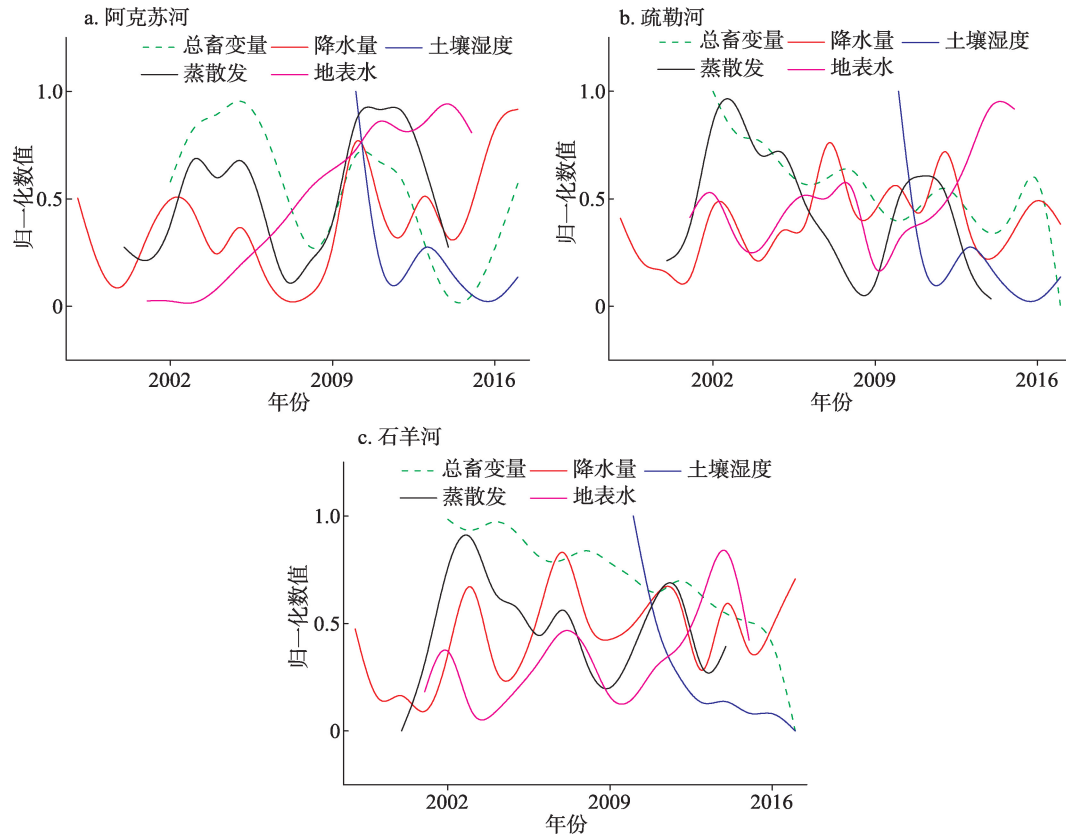


图7 典型流域水量平衡要素时间序列变化图

Figure 7 Time series of water balance components in (a) the Aksu River Basin, (b) the Shule River Basin, and (c) the Shiyang River Basin

湿度有一定的滞后。1998—2017年,总体上蒸散发、降水量和土壤湿度的年际变化在3个流域均表现出了一定程度的一致性。原因可能是降水增加导致土壤湿度相应增加,并进一步促使地表实际蒸散发增加,加剧流域内的水汽循环,进而又增加了降水的可能性^[35]。蒸散发和降水的协同变化趋势在以雨水补给为主的石羊河流域尤其显著,这主要是由于作为该流域主要水分补给的降水量的波动直接影响了流域的可蒸发量。而在以高山冰雪融水补给为主的阿克苏河,蒸散发除了表现出与降水一致的变化趋势,也表现出了和总蓄变量相似的趋势。同时,在石羊河流域,总蓄变量的变化趋势并未展现出与其他要素相似的特征,这主要是由于该流域只有小部分水分补给来源于冰雪融水,因此其总蓄变量受降水、蒸散和地下水消耗等多因素主导,与其中任一单个因素关联不够紧密。不过,在石羊河流域,地表水面积表现出了与降水较为一致的波动特征,疏勒河流域的地表水面积变化也有与降水接近的趋势,但在阿克苏河流域地表水面积的

变化与其他要素相似度不高。这主要和降水对3个流域不同的贡献度有关,降水贡献度最大的石羊河流域,水文水循环过程受降水主导作用最为强烈,疏勒河流域次之。因此,由于3个典型流域水分补给来源的差异,其各水量平衡要素在时空演变的协同性关系方面也各有不同,未来在对不同流域进行深入的水循环和水量平衡研究时,应当对流域的水分来源成分加以重点考虑,以建立合适的模型。

5 结论与讨论

本文在GEE平台下,基于多源遥感数据从不同时间和空间尺度对西北内陆区关键水量平衡要素1998—2017年的时空变化情况进行研究分析。得到如下结论:

(1)在全流域尺度上,西北内陆区高海拔地区的蓄变量总体呈减少趋势,而低海拔平原及盆地地区则呈增加趋势,这主要是由于当地气温的升高导致高海拔冰雪消融加剧,改变了流域的水资源分配,促使水资源由高山向下游平原及盆地地区转移,并同时导致这些下游地区土壤湿度、蒸散发和

2020年6月

地表水面积均呈现了一定的增加趋势。降水除局部地区有显著增加趋势外,总体呈缓慢增长态势。

(2)在时间尺度上,各水量平衡要素的月尺度波动差异显著,大部分要素均呈现出明显的季节分异规律,总体表现为夏季高位活跃,冬季低位平缓。

(3)西北内陆区子流域众多,不同子流域拥有不同的水分补给来源,通过对阿克苏河、疏勒河以及石羊河3个典型三级流域的长时序分析可以看出,各水量平衡要素在时间序列上的协同变化关系在不同的流域差异明显,水分补给来源占比的不同是导致这种差异的主要原因。

结合长时间序列的降雨和气温观测数据发现,西北内陆区近20年总体上处于年均降雨量与年均气温均相对较高的时期,因此,在解读本文成果并将其应用于西北内陆区长期水文、气候相关研究时,应注意本文时期内该地区总体上水文循环相对之前更长历史时期有一定程度的加剧。同时,需要注意的是,遥感数据本身以及水量平衡要素反演过程中均会引入不同程度的不确定性,导致本文揭示的时空变化规律也不可避免存在不准确的地方。此外,西北内陆区水资源补给大部分来源于青藏高原的冰雪融水,本文致力于对各水量平衡要素的时空变化状态进行分析,尚难以定量阐明引起这些变化的具体原因。下一步将在本文的基础上,针对各三级流域水文状况的差异,结合气温、降水等气候因子及土地利用转型、人口数等人类活动因子,研究导致其水资源变化的气候变化及人类活动驱动力。

致谢:感谢国家重点研发计划课题(2017YFC0404301)为本文提供的流域边界数据。感谢西北大学张世强教授对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References):

[1] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1304.[Chen Y N, Li Z, Fan Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on hydrology and water resources in the arid regions of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304.]

[2] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等.论中国干旱区湖泊研究的重要意义[J].干旱区研究,2007,24(2):137-140.[Hu R J, Jiang F Q,

Wang Y J, et al. On the importance of research on the lakes in arid land of China[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 137-140.]

[3] Wang W G, Peng S Z, Yang T, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration trends in the Haihe River Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(3): 239-252.

[4] 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.[Xu M, Zhang S Q, Wang J, et al. Temporal and spatial patterns of water storage change of Qilian Mountains in recent 8 years based on GRACE[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(3): 458-467.]

[5] 蔡晓慧,邹松兵,陆志翔,等. TRMM月降水产品在西北内陆河流域的适应性定量分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(3):291-298.[Cai X H, Zou S B, Lu Z X, et al. Evaluation of TRMM monthly precipitation data over the inland river basins of Northwest China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(3): 291-298.]

[6] 张京,金晓媚,张绪财,等.格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J].水文地质工程地质,2019,46(2):66-73.[Zhang J, Jin X M, Zhang X C, et al. Spatial and temporal changes of soil moisture and its influencing factors in the Golmud River Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(2): 66-73.]

[7] 贺添,邵全琴.基于MOD16产品的我国2001-2010年蒸散发时空格局变化分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):979-988.[He T, Shao Q Q. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products [J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(6): 979-988.]

[8] 艾克拜尔·买提尼牙孜,阿里木江·卡斯木.新疆阿勒泰地区2002-2011年地表水资源变化趋势[J].中国沙漠,2014,34(5):1393-1401.[Maitiniyaz E, Kasimu A. Change trend of surface water resources in Altai, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1393-1401.]

[9] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

[10] 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.

[11] Hird J N, DeLancey E, Mcdermid G, et al. Google earth engine, open-access satellite data, and machine learning in support of large-area probabilistic wetland mapping[J]. Remote Sensing, 2017, DOI: 10.3390/rs9121315.

[12] 张林源,苏桂武.中国西北干旱区的成因、特征与环境优化[J].干旱区资源与环境,1993,7(3-4):1-10.[Zhang L Y, Su G W. Geneses, characteristics and environmental optimization of northwestern China's arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1993, 7(3-4): 1-10.]

[13] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影

- 响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493. [Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 483-493.]
- [14] 焦伟, 陈亚宁, 李稚, 等. 基于多种回归分析方法的西北干旱区植被NPP遥感反演研究[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 545-556. [Jiao W, Chen Y N, Li Z, et al. Inversion of net primary productivity in the arid region of Northwest China based on various regressions[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 545-556.]
- [15] 韩宁. 西北内陆苏打湖流域冰川变化规律及对径流影响研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Han N. Research on Glacier Variation Law and Impact on Runoff in Suga Lake Basin of Northwest Inland[D]. Beijing: Chinese Academy of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]
- [16] 刘昌明, 周成虎, 于静洁, 等. 中国水文地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Liu C M, Zhou C H, Yu J J, et al. *Chinese Hydrogeography*[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [17] 耿雷华, 黄永基, 郗建强, 等. 西北内陆河流域水资源特点初析[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 496-501. [Geng L H, Huang Y J, Li J Q, et al. Analysis on water resources characters of endorheic drainage in Northwest China[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 496-501.]
- [18] Center for Space Research. GRACE Monthly Mass Grids—Land [EB/OL]. (2017-02-03) [2019-03-06]. <https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>.
- [19] 姜永涛, 高春春, 王丽美, 等. 中国西部区域GRACE卫星重力变化[J]. 测绘科学, 2019, 44(7): 82-87. [Jiang Y T, Gao C C, Wang L M, et al. Gravity secular trend in western China derived from GRACE data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(7): 82-87.]
- [20] 王洁, 张建梅, 宁少尉, 等. 基于GRACE重力卫星云南陆地水储量变化的降尺度分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 1-5. [Wang J, Zhang J M, Ning S W, et al. Downscaling analysis of GRACE terrestrial water storage changes in Yunnan Province[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(10): 1-5.]
- [21] NASA's Goddard Space Flight Center. TRMM 3B43: Monthly Precipitation Estimates[EB/OL]. (2017-12-31) [2019-03-07]. <https://trmm.gsfc.nasa.gov/3b43.html>.
- [22] Huffman G J, Adler R F, Rudolph B, et al. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite: Based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(5): 1284-1295.
- [23] NASA's Goddard Space Flight Center. NASA-USDA Global Soil Moisture Data[EB/OL]. (2017-12-31) [2019-03-07]. ftp://gimms.gsfc.nasa.gov/SMOS/SMAP/Surface_Soil_Moisture_SMAP.pdf.
- [24] Sazib N, Mladenova T E, Bolten J D. Leveraging the Google Earth Engine for drought assessment using global soil moisture data[J]. *Remote Sensing*, 2018, DOI: 10.3390/rs10081265.
- [25] Numerical Terradynamic Simulation Group, the University of Montana. MOD16A2: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration 8-Day Global 1km[EB/OL]. (2014-12-31) [2019-03-08]. <http://www.ntsg.umt.edu/project/modis/mod16.php>.
- [26] Mu Q Z, Zhao M S, Steven W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product MOD16A2 Collection 5[R]. Missoula: Running and Numerical Terradynamic Simulation Group, 2013.
- [27] European Commission's Joint Research Centre. JRC Monthly Water History, v1. 0[EB/OL]. (2015-10-18) [2019-03-09]. https://storage.googleapis.com/global-surface-water/downloads_ancillary/DataUsersGuidev2.pdf.
- [28] Jean-Francois P, Andrew C, Noel G, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540: 418-422.
- [29] 张燕, 隋传国, 张瑞瑾, 等. 基于Mann-Kendall法的中国海洋环境质量变化趋势分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(2): 201-205. [Zhang Y, Sui C G, Zhang R J, et al. Trend analysis of marine environmental quality in China based on Mann-Kendall method [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(2): 201-205.]
- [30] 刘蓉, 文军, 王欣. 黄河源区蒸散发量时空变化趋势及突变分析[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(5): 503-511. [Liu R, Wen J, Wang X. Spatial-temporal variation and abrupt analysis of evapotranspiration over the Yellow River source region[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21(5): 503-511.]
- [31] 卢飞, 游为, 范东明, 等. 由GRACE RL05数据反演近10年中国大陆水储量及海水质量变化[J]. 测绘学报, 2015, 44(2): 160-167. [Lu F, You W, Fan D M, et al. Chinese continental water storage and ocean water mass variations analysis in recent ten years based on GEACE RL05 data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2): 160-167.]
- [32] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1096-1107. [Huang J P, Ran J G, Ji M X. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(6): 1096-1107.]
- [33] 党素珍, 蒋晓辉, 董国涛, 等. 泾河上游流域实际蒸散发变化趋势及成因分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 143-147. [Dang S Z, Jiang X H, Dong G T, et al. Variation of actual evapotranspiration and its causes analysis in the upper reaches of the Jinghe River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 143-147.]
- [34] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 357-352. [Zhang Q, Hu Y Q, Cao X Y, et al. On some problems of arid climate system of Northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 357-362.]
- [35] 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 35-42. [Wang X R, Xu X D, Miao Q J. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 35-42.]

Spatiotemporal change of water balance components in the inland region of Northwest China, 1998–2017

LIU Qihang, HUANG Chang

(Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity,
Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In the recent decades, increased climate change and human activities have been affecting the spatial and temporal distribution of water resources and water balance components in the inland region of Northwest China. This study used a remote sensing cloud computing platform, Google Earth Engine (GEE), to explore the spatial and temporal dynamics of water balance components in this area at both basin and sub-basin scales with both interannual and intraannual analyses over the last two decades. Multi-source remote sensing datasets were employed to fulfill this purpose. The study tried to reveal the spatial distribution characteristics and temporal change of key water balance components, including terrestrial water storage, precipitation, soil moisture, evapotranspiration, and surface water. The results show that: (1) At the whole basin scale, due to the increasing trend of air temperature, glaciers and snow in high altitude areas were melting with an increasing speed, which provides more water supply to the low altitude basins. Therefore, the terrestrial water storage exhibit a pattern of “decreasing at high altitude and increasing at low altitude”. Meanwhile, surface water area, soil moisture and evapotranspiration also showed a certain increasing trend accordingly. (2) At temporal scale, except for the desert areas, different water balance components exhibited different seasonal variations. The value of each component generally reaches the maximum in the summer and the autumn, and becomes the lowest in the spring and the winter. (3) At sub-basin scale, due to the different combinations of water sources, the variation patterns between different water balance components differ from sub-basin to sub-basin. In the ice and snow water dominated sub-basins, each component showed a similar variation pattern as the terrestrial water storage, while in the precipitation dominated sub-basins, the variation of each component is more closely related to precipitation fluctuation. In conclusion, different water balance components exhibit different characteristics at different spatial and temporal scales in the inland area. This study provides valuable reference for further understanding the co-evolution pattern of these components.

Key words: multi-source remote sensing data; water balance components; surface water; water cycle; northwest inland area