

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.024

变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因

韩煜娜^{1,2}, 左德鹏^{1,2}, 王国庆^{3,4}, 徐宗学^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于1981—2015年全球陆面数据同化系统GLDAS和归一化植被指数GIMMS NDVI3g等多源数据, 采用Theil-Sen Median斜率估计和Mann-Kendall趋势检验法探究青藏高原多年陆地水储量(TWS)及其各组分时空演变特征, 采用水量平衡法、相关分析法和Hurst指数法识别水循环过程对TWS变化的影响机制。结果表明: 受气候变化影响, 1981—2015年青藏高原降水及冰川积雪消融增加, TWS以0.7 mm/a的速率增加, 青藏高原北部TWS增加趋势极其显著, 南部呈减少特征; 青藏高原绝大部分地区TWS以0~200 cm的土壤含水量为主, 不同深度土壤含水量具有显著空间异质性; 青藏高原北部及东部降水主要通过蒸散发过程损失, 南部地区径流系数较大。

关键词: 陆地水储量; 水循环过程; 气候变化; 下垫面特征; 水量平衡法; 青藏高原

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)02-0199-09

Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment // HAN Yu'na^{1,2}, ZUO Depeng^{1,2}, WANG Guoqing^{3,4}, XU Zongxue^{1,2} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Water Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 4. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the multi-source datasets, including GLDAS and GIMMS NDVI3g during the period of 1981 to 2015, the spatiotemporal pattern of terrestrial water storage (TWS) and its components in Tibetan Plateau were investigated with Theil-Sen Median slope estimator and Mann-Kendall trend test, and the influence mechanism of hydrological cycle process on the changing trend of TWS was identified using the water balance method, correlation analysis, and Hurst index method. The results showed that the precipitation and melting of glacier snow increased, and TWS increased at a rate of 0.7 mm per year due to climate change during the period of 1981 to 2015; TWS of Tibetan Plateau increased significantly in northern parts, while decreased in southern parts; in most areas of Tibetan Plateau, TWS mainly consisted of soil moisture at the depth of 0 to 200 cm, and the soil moisture of different layers had significant spatial heterogeneity; precipitation in northern and eastern Tibetan Plateau was mainly lost through evapotranspiration, and the runoff coefficient in southern parts was larger than that in other regions.

Key words: terrestrial water storage; hydrological cycle process; climate change; underlying surface characteristics; water balance method; Tibetan Plateau

我国是一个严重缺水的国家, 淡水资源仅占世界总量的7.7%, 却拥有全球18.5%的人口^[1]。20世纪80年代以来, 在气候变化加剧和经济高速增长

的大背景下, 我国生态环境和水资源面临严峻挑战^[2-3]。世界海拔最高的青藏高原素有“第三极”和“亚洲水塔”之称, 是长江、黄河、澜沧江-湄公河等

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3201104); 清华大学水沙科学水利水电工程国家重点实验室及宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放基金(sklhse-2022-Iow07); 水利部黄土高原水土保持重点实验室开放课题基金(WSCLP202102)

作者简介: 韩煜娜(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: hanyu@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 左德鹏(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事流域水文过程模拟研究。E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

亚洲十几条水系的发源地^[4], 蕴含丰富的水资源, 其独特的地理位置和生态环境使其对气候变化极为敏感^[5], 生态系统非常脆弱^[6]。气候变化和土地覆被变化通过降水、蒸散发和产汇流等水文过程直接影响水资源变化^[2,7-10], 进而影响居民生产生活。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《气候变化2021: 自然科学基础》^[11]评估报告与我国公布的《中国气候变化蓝皮书(2021)》^[12]同时指出, 目前全球仍呈升温趋势且升温速度极快, 海平面上升、北极海冰面积减少等问题依旧严峻。青藏高原正经历的多年冻土退化、永久性冰川积雪消融、湖泊扩张等现象显著改变了水循环过程^[5,13], 并对当地生态环境保护和水资源利用与综合管理提出了严峻挑战。

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)是包括积雪、冰川、土壤水及生物水等所有形式水的总和, 是水循环的重要组成部分^[13]。随着3S技术发展, 遥感已能定量估算大范围、长周期水循环变量数据, 促进了对水循环过程的理解^[14-16]。国内外学者就不同时空尺度下的TWS开展了一系列研究工作, 评估了全球水文模型(Water GAP global hydrology model, WGHM)、全球水量平衡模型(PC Raster global water balance model, PCR-GLOBWB)、全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)、可变下渗容量模型(variable infiltration capacity, VIC)等水文模型^[13-14]和重力恢复与气候试验卫星(gravity recovery and climate experiment, GRACE)等遥感产品^[13,16-18]在全球和区域陆地水循环过程及TWS变化研究^[13,16-20]中的适用性。Yang等^[21]采用同样的方法处理对比了GLDAS和GRACE的TWS数据, 二者计算结果在统计学意义上的相关系数为0.75。Weber等^[22]比较了多种数据集在缺乏资料的高寒流域的适用性, 认为GLDAS的降水、温度与积雪等数据在一定程度上与实测结果一致。综合现有研究表明, 各种模型及产品在表征TWS时空变异特征方面具有较好一致性, 且GLDAS产品弥补了当前TWS组分大尺度观测资料缺乏的现状^[14], 已被广泛应用于相关研究中。

本文基于青藏高原1981—2015年GLDAS、GIMMS NDVI3g(normalized difference vegetation index3g)、数字高程模型(DEM)和行政区划等数据, 采用Theil-Sen Median斜率估计和Mann-Kendall趋势检验法探究青藏高原多年TWS时空变异特征, 采用水量平衡法、相关分析法和Hurst指数法从TWS各组分及水循环过程两个方面识别其变化机制, 以

期为当地水资源开发利用与保护和区域协调发展提供参考。

1 研究区概况

青藏高原(26°00'12"~39°46'50"N, 73°18'52"~104°46'59"E)是世界上海拔最高的高原^[23], 有“世界屋脊”之称。青藏高原面积约250万km², 地形复杂, 盆地、山地、峡谷等交错分布, 为储存水资源提供了良好条件, 是长江、黄河和澜沧江-湄公河等大江大河的发源地^[4]。青藏高原属典型高原大陆性气候, 具有冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日照时间长、辐射强烈、无四季区分等特征。受地形影响, 青藏高原年平均降水量约400mm, 其中西北部仅30mm, 气温约-6℃; 而印度洋暖湿气流影响下的东南部年降水量达2000mm, 气温约20℃^[23]。高原植被类型丰富, 主要为高寒草甸、高寒草原和稀疏草地等, 总面积的74.79%为中度以上生态环境脆弱区^[24], 植被在当地的水源涵养中起关键作用。青藏高原南有喜马拉雅山脉, 西为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉, 北临昆仑山、阿尔金山和祁连山, 东与秦岭山脉和黄土高原相接。鉴于青藏高原幅员辽阔, 地形复杂, 气候和下垫面要素空间异质性显著, 本文综合考虑我国流域分区、省级行政区划和“一带一路”亚洲关键区域流域边界^[25], 将青藏高原划分为12个子区域(图1), 以期从整体和局部的不同视角对青藏高原近年来TWS的时空演变格局进行深入研究。

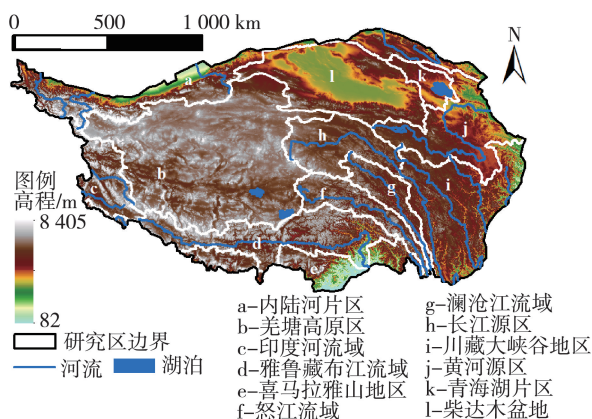


图1 青藏高原概况

Fig.1 Overview of Tibetan Plateau

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源及处理

本文采用中国科学院资源环境与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供的DEM、流域边界、行政区划和植被类型等数据表征研究区基本情况, 以国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc>

ac. cn) 提供的“一带一路”亚洲关键区域流域边界数据辅助进行研究区 12 个子区域的划分,从戈达德地球科学资料和信息服务中心 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) 获取 1981—2015 年 GLDAS 中 Noah 模型的土壤水分及雪水当量等各组数据并计算 TWS,采用美国航空航天局 (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>) 开发的 GIMMS NDVI3g 表征研究区植被生长情况,通过重采样将空间分辨率统一为 0.1°,将时间分辨率统一为 1 月,并统一地理坐标系为 GCS_WGS_1984。

2.2 研究方法

2.2.1 TWS 计算方法

TWS 指储存在地表及地下的全部水分,包括积雪、冰川、土壤水及生物水等。本文基于 GLDAS 中陆面过程 Noah 模型的数据,采用水量平衡法计算青藏高原 TWS 及其变化量,计算公式为

$$W = W_c + \sum_i W_{si} + W_{sn} \tag{1}$$

$$\Delta W = P - R - E \tag{2}$$

式中: W 为陆地水储量; ΔW 为陆地水储量的变化量; W_c 为植被冠层含水量; W_{si} 为第 i 层的土壤含水量; W_{sn} 为雪水当量; P 、 R 、 E 分别为降水量、径流深和蒸散量。量纲统一为 mm。

2.2.2 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验允许数据序列存在缺失值,且不需要数据符合特定分布,通常用于研究不遵循任何特定分布数据序列的趋势,目前已广泛用于水文、气象等研究中^[2]。本文利用 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势检验法对青藏高原 1981—2015 年长时间序列各要素的时空变化趋势进行分析,并进行显著性检验,计算公式为

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (\forall i < j) \tag{3}$$

式中: β 为 TWS 各要素的变化率; x_i 和 x_j 分别为各要素在第 i 年和第 j 年的数值。 $\beta > 0$ 表明有增加趋势, $\beta < 0$ 表明有减少趋势, $|\beta|$ 越大,表明增加(减少)程度越大。各要素变化趋势及显著性等级划分^[26-28]如表 1 所示。

2.2.3 相关分析法

相关性分析是统计学中常用的分析方法,相关系数能有效表达不同要素间的相关程度和方向。本文主要对 TWS 与表征下垫面特征的植被之间的相关性^[29]进行分析。

2.2.4 Hurst 指数法

基于重标极差(R/S)分析的 Hurst 指数法是定

表 1 各要素变化趋势及显著性等级划分

Table 1 Changing trends of different components and classification of their significance

变化趋势	p 检验值	显著性等级
$\beta > 0$	≤ 0.01	极显著增加
	$>0.01 \sim 0.05$	显著增加
	$>0.05 \sim 0.1$	弱显著增加
	> 0.1	不显著增加
$\beta < 0$	≤ 0.01	极显著减少
	$>0.05 \sim 0.1$	显著减少
	$>0.01 \sim 0.05$	弱显著减少
	> 0.1	不显著减少

量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法,常用于长序列水文观测研究。本文利用 Hurst 指数法探究青藏高原长时间序列 TWS 特征,Hurst 指数及相应持续性等级划分参照表 2^[30]。

表 2 Hurst 指数及其持续性等级划分

Table 2 Hurst index and classification of persistence levels

Hurst 指数	持续性等级
≤ 0.4	强反持续性
$>0.4 \sim 0.5$	弱反持续性
$>0.5 \sim 0.6$	弱持续性
>0.6	强持续性

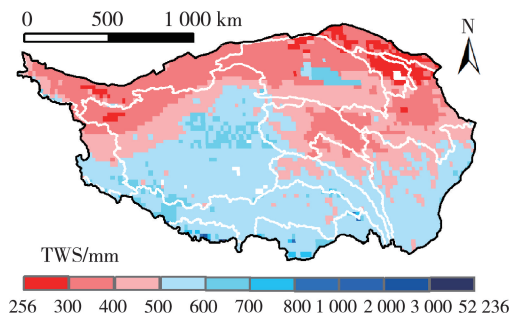
3 结果与分析

3.1 青藏高原 TWS 时空变异特征

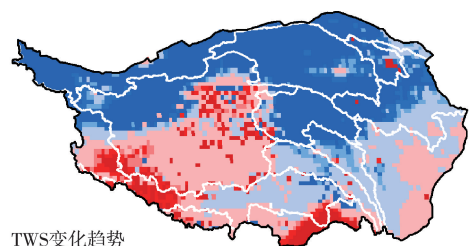
3.1.1 TWS 年际变化规律

1981—2015 年青藏高原多年平均 TWS 及其变化趋势的空间分布如图 2 所示,90% 以上区域年平均 TWS 分布在 300 ~ 600 mm 之间,仅南部喜马拉雅山地区约 0.6% 的区域高于 800 mm,整体基本呈自北向南逐渐增加的空间分布特征。高原北部的内陆河片区、柴达木盆地、青海湖片区、黄河源区和长江源区 TWS 相对较低,基本在 500 mm 以下,尤其高原东北部祁连山区和青海湖片区 TWS 最低,仅 300 mm 左右;高原西部的印度河流域、羌塘高原区及南部的雅鲁藏布江流域、怒江流域、澜沧江流域和川藏大峡谷地区 TWS 以 500 mm 以上的区域居多,尤以南部喜马拉雅山地区珠穆朗玛峰附近 TWS 最高,超过 5 万 mm。

采用 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势检验法探究青藏高原 TWS 变化趋势,并依据 TWS 变化率和显著性检验结果对其进行分级(表 1 和图 2)。青藏高原北部及东部 TWS 相对较低的地区近年来 TWS 呈极显著或显著增加趋势,其中西北部内陆河片区平均增速约 2.12 mm/a,主要表现为片区南部喀喇昆仑山脉 TWS 的增加,此外,长江及黄河源区 TWS 增速也相对较大;西部及



(a) TWS



(b) TWS 变化趋势

图2 青藏高原多年平均 TWS 及其变化趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of multi-year average TWS and its changing trend in Tibetan Plateau

南部 TWS 较高的地区 TWS 则以减少趋势为主,局部减少速率达 3.39 mm/a ,以印度河及雅鲁藏布江源区 TWS 减少趋势最为显著。TWS 基数较大的雅鲁藏布江流域东北部念青-唐古拉山脉及南部喜马拉雅山地区,TWS 波动性较强,受印度洋暖湿气流影响,水汽来源增加,积雪冰川的积累和土壤储水能力的增强等使得 TWS 显著增加,且珠穆朗玛峰附近增速最大达 1038.35 mm/a 。

图3为1981—2015年青藏高原12个子区域TWS随时间变化趋势。从图3可以看出,内陆河片区TWS在2010年以前标准差较小,波动性较低,TWS维持在325 mm左右,在2010—2011年出现急剧增加,波动性随之增大;羌塘高原区、柴达木盆地、雅鲁藏布江流域和青海湖片区TWS在2010年增加后,呈现出不同程度减少;印度河流域、长江源区、怒江流域、黄河源区及澜沧江流域1981—2015年TWS都呈现先减少后增加的趋势,在2015年处于高值状态;喜马拉雅山地区受TWS基数大及冰川消融影响,TWS标准差大于1000 mm。

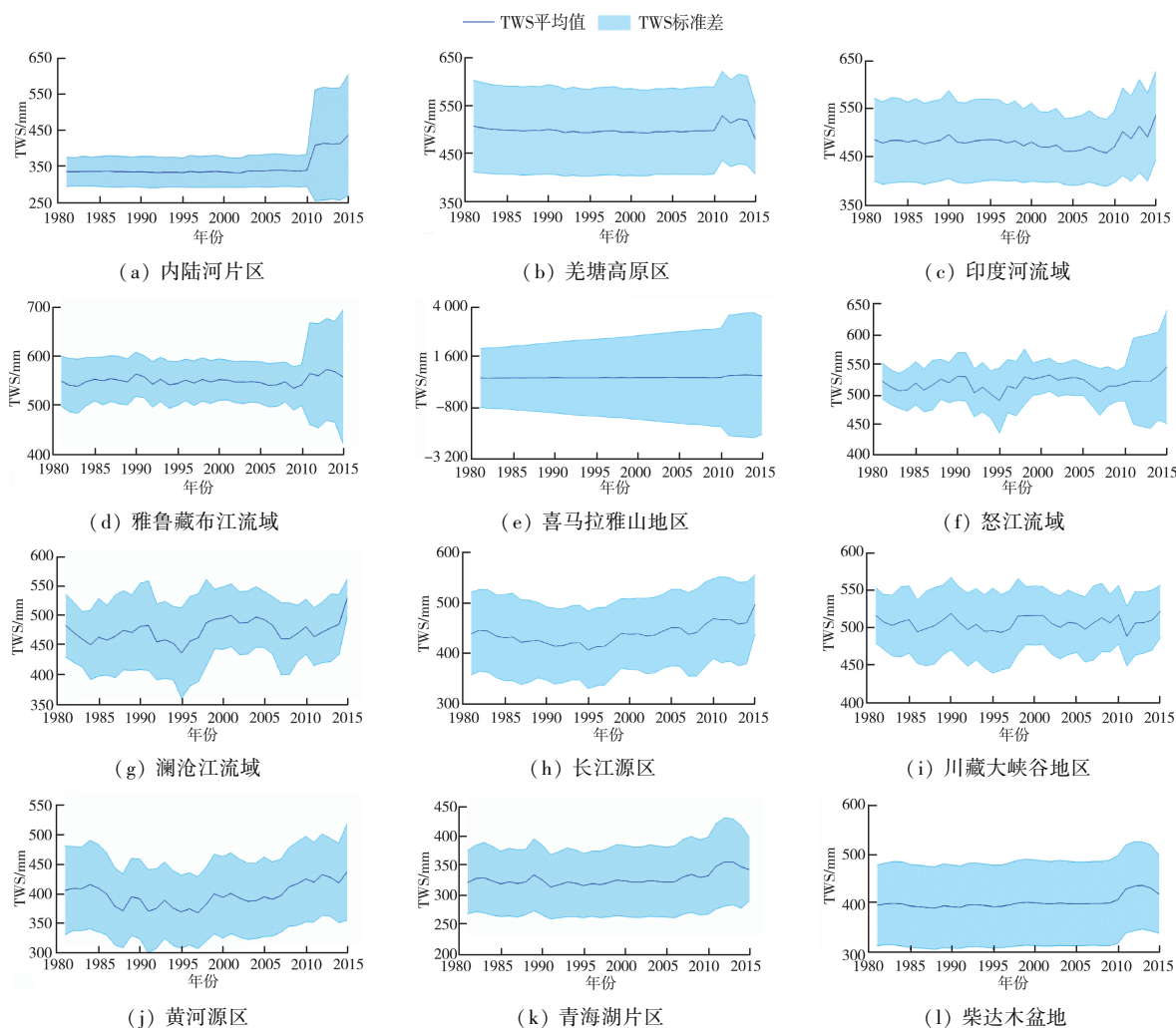


图3 青藏高原各子区域 TWS 随时间变化趋势

Fig.3 Temporal trend of TWS for each subregion in Tibetan Plateau

3.1.2 TWS 年内分配情况

青藏高原 TWS 年内呈明显周期性变化且具有显著空间异质性(图 4),冬春季相对维持在低值水平,夏秋季整体增加。1—8 月西部及南部的印度河流域、羌塘高原区、雅鲁藏布江流域、怒江流域、澜沧江流域、川藏大峡谷地区及喜马拉雅山地区 TWS 显著增加,7—9 月处于高值水平,8 月达最大值,9—12 月开始逐渐减少。北部及东部的内陆河片区、柴达木盆地、青海湖片区、黄河源区和长江源区等 TWS 较低的区域,TWS 年内基本保持稳定,波动幅度较小。青藏高原南部地区受季风气候影响,降水年内分配不均,冬春季降水较少,夏秋季降水占全年 70% 以上,使得 TWS 补给呈周期变化^[31]。北部在山脉阻隔下主要受西风系统的影响,年内气象条件差异不明显,TWS 维持基本稳定状态。

3.2 青藏高原 TWS 组分解析

3.2.1 TWS 各组分空间格局

基于 GLDAS 计算 1981—2015 年青藏高原的 TWS,其包含植被冠层含水量、土壤含水量(包含地下 0 ~ 10 cm、10 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm 共 4 层数据)和雪水当量,各组分在 TWS 中的占比情况见图 5。整体来看,土壤含水量是青藏高原 TWS 的主要成分,在绝大部分地区占比超过 TWS 总量的 90%,其中 100 ~ 200 cm 深的土壤含水量占比超过 70%。受地理位置及地形条件影响,青

藏高原生态环境脆弱,高寒草甸、草原和稀疏草地为主要植被类型,植被冠层含水量约占 TWS 的 0 ~ 0.04%,呈自西北向东南逐渐增加趋势,整体与植被长势一致,在东南部热带季风气候区的阔叶林地区占比略高于其他地区。不同深度土壤含水量的空间分布有显著差异,其中羌塘高原东北部地区 0 ~ 100 cm 深的土壤含水量极低,以 100 ~ 200 cm 深的土壤水为 TWS 的主要成分,部分区域 100 ~ 200 cm 深的土壤含水量占比超过 70%;东北部内陆河片区的疏勒河、黑河和石羊河流域及青海湖片区,表层 0 ~ 10 cm 和深层 100 ~ 200 cm 处土壤含水量较为丰富,中层 10 ~ 100 cm 处土壤含水量较低;黄河、长江、澜沧江所在的三江源地区则呈现在 0 ~ 40 cm 处土壤含水量占比相对较高,深层相对较低的特征,可能受不同地区不同植被类型根系固水能力差异的影响。雪水当量高值区出现在青藏高原西北部喀喇昆仑山脉、南部喜马拉雅山地区及印度河流域部分地区,尤其在珠穆朗玛峰附近,雪水当量在 TWS 中的占比可达 98.22%。

3.2.2 TWS 各组分时空演变

为从 TWS 组成成分时空变异特征中分析青藏高原 TWS 变化原因,采用趋势分析法对植被冠层含水量、0 ~ 200 cm 的 4 层土壤含水量和雪水当量数据进行分析,结果如图 6 所示。除西南部印度河及雅鲁藏布江流域源区和东南部热带季风气候区减少外,绝大部分地区植被冠层含水量呈增加

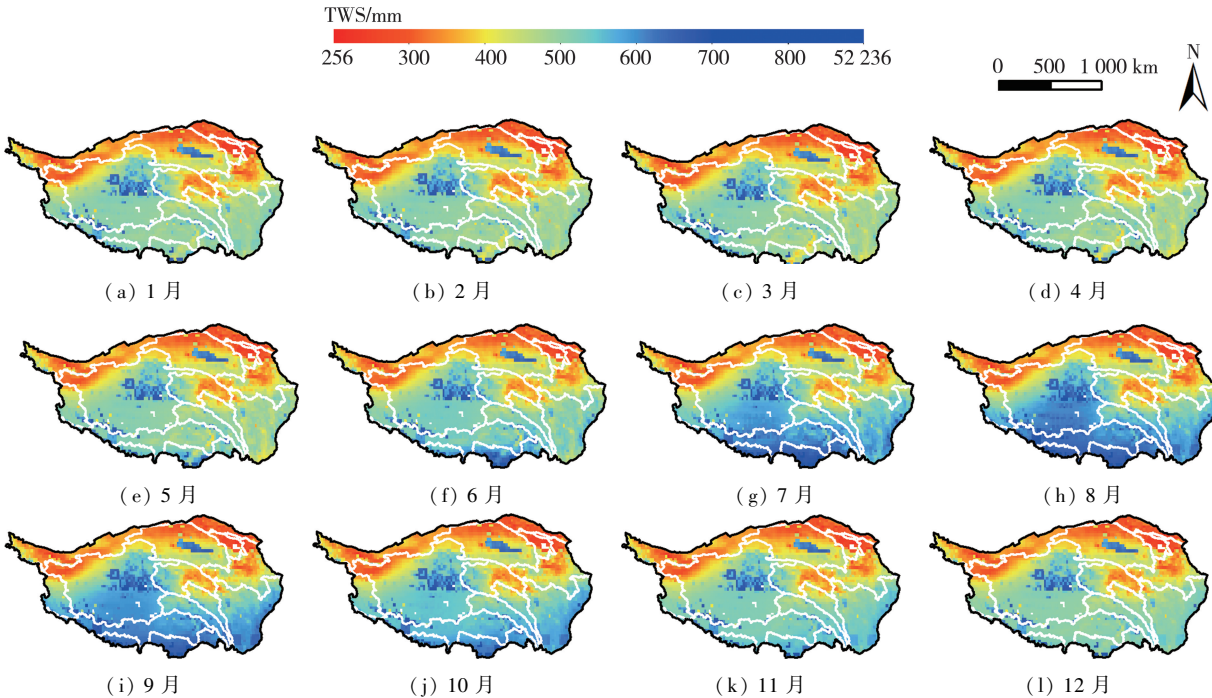


图 4 青藏高原 TWS 年内分配空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of intra-annual TWS in Tibetan Plateau

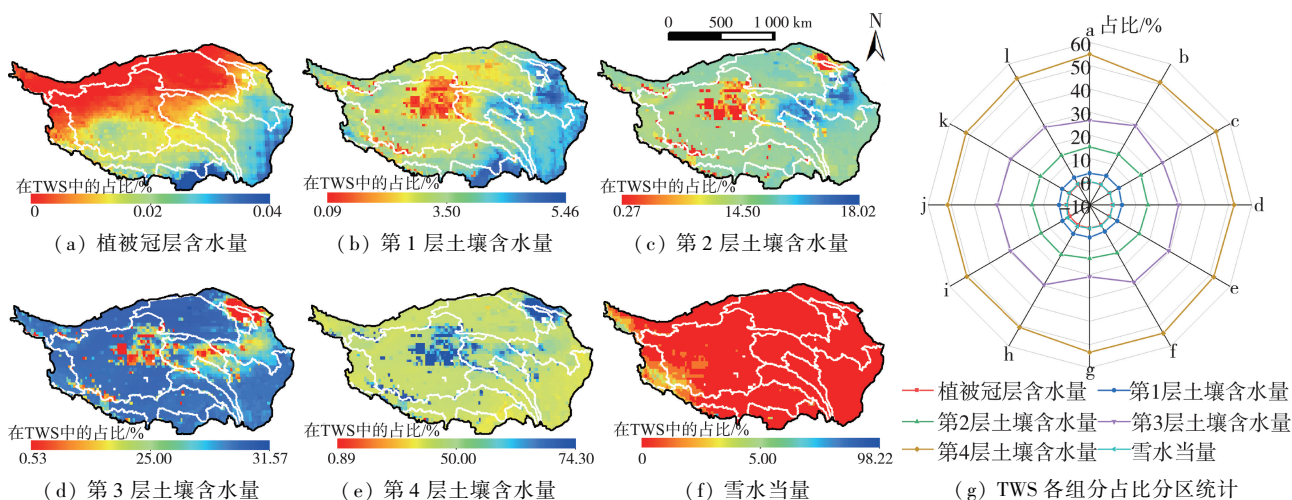


图5 青藏高原 TWS 各组分占比空间分布及分区统计

Fig. 5 Spatial distributions and regional statistics of proportions of TWS components in Tibetan Plateau

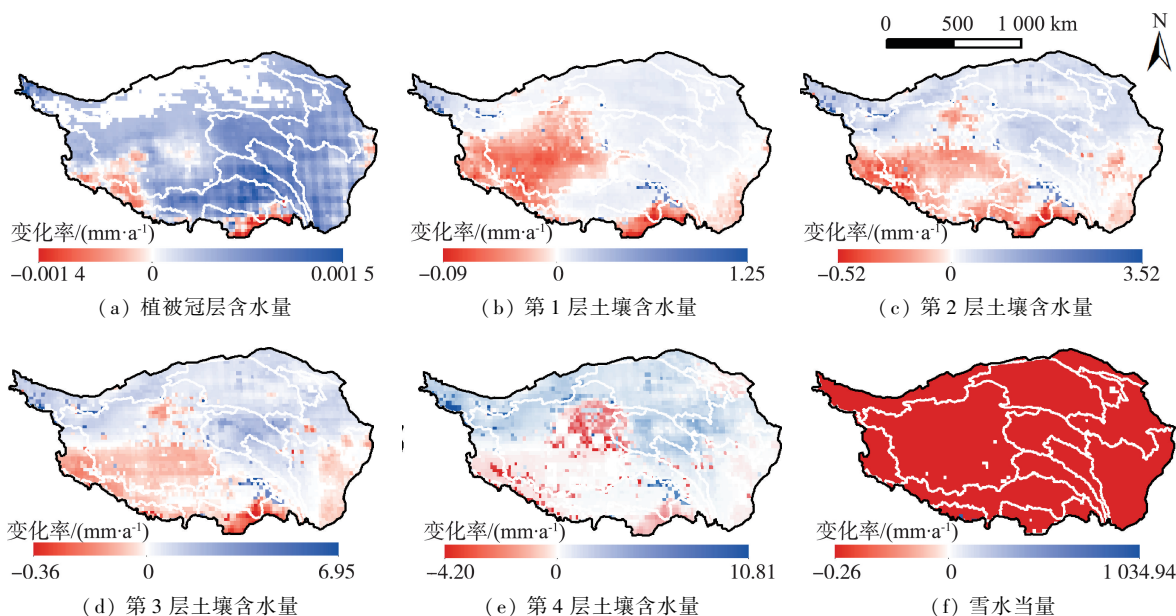


图6 青藏高原 TWS 各组分变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of changing trends of TWS components in Tibetan Plateau

趋势,且在雅鲁藏布江流域下游地区增加趋势最为明显,与植被覆盖状况整体不断改善有重要关系,这与前人研究结果一致^[32]。0~200 cm 内各层土壤含水量变化趋势基本一致,与青藏高原 TWS 在北部及东部地区增加、西部及南部地区减少的趋势相似,其中以北部喀喇昆仑山脉附近和雅鲁藏布江流域东北部念青-唐古拉山脉附近土壤含水量的增加趋势最为明显,而雅鲁藏布江流域下游和喜马拉雅山脉东部热带季风气候区不同深度的土壤含水量均呈减少趋势,以 0~100 cm 深土壤含水量减少最为明显。雪水当量变化趋势极具区域特性,南部珠穆朗玛峰地区有明显增加趋势,且因 TWS 基数较大,雪水当量增速达 1 034.94 mm/a。因此,对青藏高原 TWS 而言,土壤含水量因其极高

的占比起决定性作用,与当地的生态环境保护、植被根系固水保土作用密不可分。

3.3 水循环对青藏高原 TWS 的影响

3.3.1 水循环要素空间分布

全球气候和下垫面变化通过影响水文循环中的降水、蒸散发及产汇流等过程对水资源产生影响,降水量、蒸散发量、径流量等常被看作 TWS 变化的主导因素。本文计算青藏高原多年平均 TWS、降水量、蒸散发量、和径流量以分析水文循环过程及各要素特征(图 2 和图 7)。青藏高原降水、蒸散发和径流等要素空间分布不均,绝大部分地区降水量在 800 mm 以下,蒸散发量在 500 mm 以下,大致呈自北向南逐渐增加的空间分布特征,均在雅鲁藏布江流域下游及喜马拉雅山地区达最大值,降水量最大约

2000 mm,蒸散发量最大接近 1 000 mm,扣除蒸散发后的降水量绝大部分通过产汇流过程形成径流。受气候和地形地势影响,青藏高原南部地区降水丰富,河流主要为外流河,径流量相对较大;而北部地区受高山阻挡,暖湿气流难以到达,降水稀少,内陆河片区的河流补给主要依靠冰川或积雪融化,且内流河大多径流量较小、流程较短。

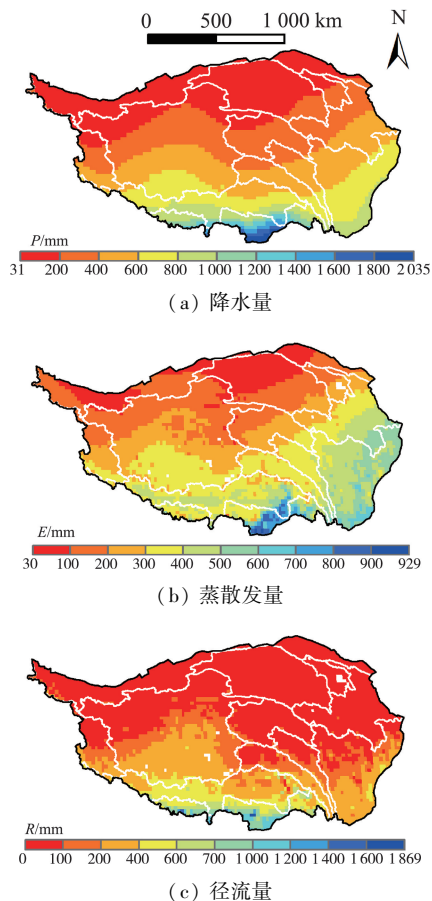


图 7 青藏高原水循环要素空间分布

3.3.2 水循环与 TWS 的关系探究

综合考虑降水、蒸散发和径流对青藏高原 TWS 的影响,计算径流系数并分别对 12 个子区域的蒸散量、径流量、TWS 变化量在相应的降水量中的占比进行统计,结果如图 8 所示。整体上青藏高原蒸散发量较大,降水主要通过蒸散发过程损失,尤其以黄河源区(94.25%)、柴达木盆地(93.02%)、内陆河片区(92.72%)、长江源区(87.22%)和青海湖片区(85.76%)居多,相应的青藏高原北部地区产流受限,径流系数较小,除西北部喀喇昆仑山脉附近外,其他地区径流系数基本在 0.2 以下。南部的澜沧江流域、川藏大峡谷地区、印度河流域、怒江流域等地蒸散量占比约 70%~80%;雅鲁藏布江流域和喜马拉雅山地区径流量在降水量中的占比约为 50%,径

流系数相对较大,且雅鲁藏布江流域东北部念青-唐古拉山脉和喜马拉雅山脉南部部分地区径流系数大于 1,融雪径流在其径流组成中占据了重要地位。

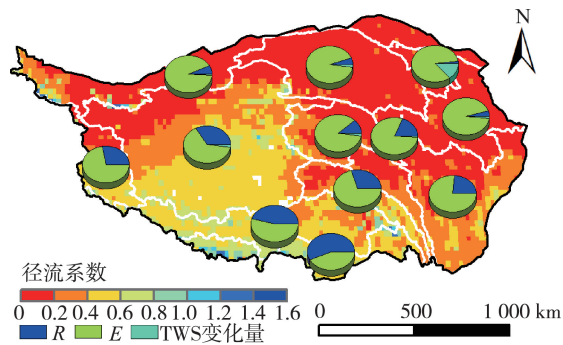


图 8 青藏高原水循环各要素在降水量中占比分区统计及径流系数分布

4 讨论

4.1 青藏高原 TWS 变化的持续性

通过计算 Hurst 指数对青藏高原 TWS 变化的持续性进行分析,结果如图 9 所示,Hurst 指数及其对应的分级见表 2。从图中可以看出,青藏高原 TWS 的 Hurst 指数具有一定的空间异质性。青藏高原北部地区 TWS 变化空间持续性较强,说明未来与过去变化趋势趋同概率较高,大概率仍以 TWS 显著增加的趋势为主;印度河流域源区、羌塘高原南部、雅鲁藏布江流域东南部、川藏大峡谷地区和喜马拉雅山地区等南部地区 TWS 变化呈较强的反持续性,未来 TWS 变化有从显著减少演变至开始增加趋势的可能性。

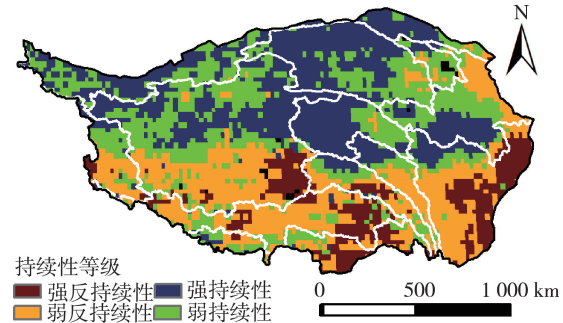


图 9 青藏高原 TWS 变化的持续性空间分布

4.2 下垫面变化对 TWS 的影响

以表征植被生长状态的 NDVI 表示下垫面状态,分析青藏高原 1981—2015 年 NDVI 的空间分

布、变化趋势特征及其与 TWS 的相关性,结果如图 10 所示。青藏高原植被变化呈西少东多、西增东减的特征,北部植被生长较差的区域状况正在不断改善,TWS 也不断增加,NDVI 与 TWS 的正相关关系相对较强;东南部尤其是热带季风气候区植被长势整体较好,但近年来有一定退化趋势,与 TWS 的关系相对较弱,同时表现出了一定的负相关关系。

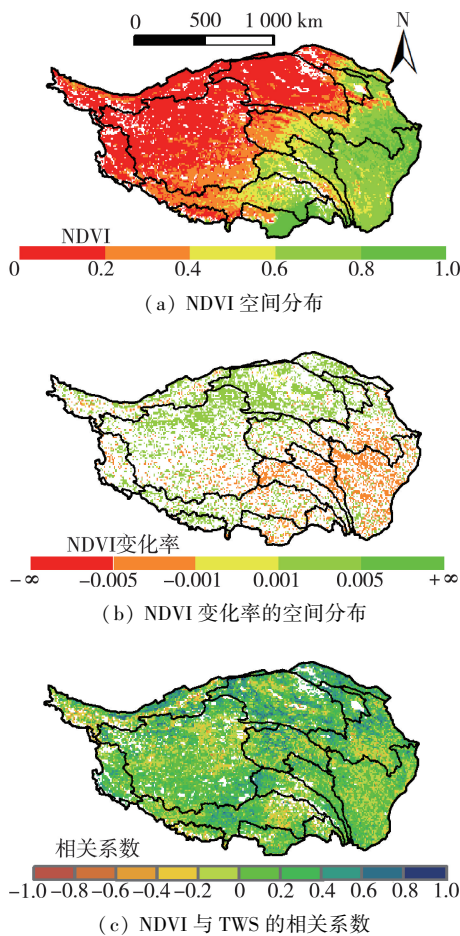


图 10 青藏高原下垫面变化特征及其与 TWS 的关系
Fig. 10 Characteristics of underlying surface change and its relationship with TWS in Tibetan Plateau

统计 1981—2015 年青藏高原 12 个子区域的 NDVI 和 TWS,并计算相关系数,结果如表 3 所示。整体来看,区域尺度上 NDVI 与 TWS 的相关系数在 0.18~0.62 之间。青藏高原北部的青海湖片区、内陆河片区、柴达木盆地和黄河源区相关系数略高于南部地区,且正向相关性较显著,说明在北部植被不断改善的过程中,水源涵养能力得到了一定程度提升,TWS 随之增加;青藏高原南部地区除印度河流域和雅鲁藏布江流域外,其他地区 NDVI 与 TWS 的相关系数相对较小,且喜马拉雅山地区、怒江流域、澜沧江流域和长江源区相关性在 95% 置信区间上显著,羌塘高原区和川藏大峡谷地区相关性不显著。

表 3 青藏高原 12 个子区域 NDVI 与 TWS 的相关性
Table 3 Correlation between NDVI and TWS in 12 subregions in Tibetan Plateau

子区域	相关系数	子区域	相关系数
内陆河片区	0.49 **	澜沧江流域	0.31 *
羌塘高原区	0.18	长江源区	0.30 *
印度河流域	0.45 **	川藏大峡谷地区	0.21
雅鲁藏布江流域	0.35 **	黄河源区	0.41 **
喜马拉雅山地区	0.30 *	青海湖片区	0.62 **
怒江流域	0.27 *	柴达木盆地	0.46 **

注: ** 表示相关性在 99% 的置信区间上显著, * 表示相关性在 95% 的置信区间上显著。

5 结 论

a. 青藏高原以 TWS 为 300~600 mm 之间的区域为主,且 TWS 大致呈自北向南逐渐增加的分布特征。受气候变化影响,1981—2015 年青藏高原降水及冰川积雪消融增加,TWS 以 0.7 mm/a 的速率增加,其中青藏高原北部及东部 TWS 增加趋势极其显著,西部及南部呈减少特征。

b. 青藏高原 TWS 年内呈明显周期性变化,1—8 月 TWS 逐渐增加至最大值,9—12 月逐渐减少。受地理位置和大尺度天气系统影响,青藏高原北部 TWS 较低区域 TWS 年内变幅较小,而南部地区呈明显波动特性。

c. 土壤含水量是青藏高原 TWS 的主要组成部分,不同深度土壤含水量具有显著空间异质性,土壤含水量的变化从整体上决定了 TWS 的时空变异规律。受植被状况整体不断改善的影响,青藏高原植被冠层含水量以增加趋势为主。

d. 整体上青藏高原蒸散量较大,降水主要通过蒸散发过程损失,北部及东部地区蒸散量在降水量中占比超过 85%,南部及东部地区径流系数相对较大,约为 0.5。青藏高原北部植被不断改善的过程中,水源涵养能力得到了一定程度提升,TWS 随之增加。

参考文献:

[1] TAO Shengli, FANG Jingyun, MA Suhui, et al. Changes in China's lakes: climate and human impacts [J]. National Science Review, 2020, 7(1): 132-140.

[2] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征 [J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018 [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))

[3] 孟丽红, 丁之勇, 李成阳, 等. 区域水资源代谢效率时空

- 变化及驱动因素[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 20-26. (MENG Lihong, DING Zhiyong, LI Chengyang, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of regional water resources metabolism efficiency [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 20-26. (in Chinese))
- [4] SUN Siao, BAO Chao, TANG Zhipeng. Tele-connecting water consumption in Tibet: patterns and socio-economic driving factors for virtual water trades [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1250-1258.
- [5] 温馨, 周纪, 刘绍民, 等. 基于多源产品的西南河流源区地表蒸散发时空特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 32-42. (WEN Xin, ZHOU Ji, LIU Shaomin, et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 32-42. (in Chinese))
- [6] 魏伊宁, 李勋贵, 李芳. 黄河上游径流丰枯空间分布特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 103-113. (WEI Yining, LI Xungui, LI Fang. Spatial distribution characteristics and influencing factors of wet and dry of runoff in upper reaches of the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 103-113. (in Chinese))
- [7] YANG Linshan, FENG Qi, YIN Zhenliang, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 1100-1112.
- [8] 班璇, 师崇文, 郭辉, 等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [9] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [10] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
- [11] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [12] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021) [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [13] MENG Fanchong, SU Fengge, LI Ying, 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.
- [14] HU Baoyi, WANG Lei, LI Xiuping, et al. Divergent changes in terrestrial water storage across global arid and humid basins [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(1): e2020GL091069.
- [15] 李晓英, 吴淑君, 王颖, 等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 80-85. (in Chinese))
- [16] 汤秋鸿, 张学君, 戚友存, 等. 遥感陆地水循环的进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1872-1884. (TANG Qiuhong, ZHANG Xuejun, QI Youcun, et al. Remote sensing of the terrestrial water cycle: progress and perspectives [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1872-1884. (in Chinese))
- [17] WANG Jida, SONG Chunqiao, REAGER J T, et al. Recent global decline in endorheic basin water storages [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(12): 926-932.
- [18] 文汉江, 黄振威, 王友雷, 等. 青藏高原及其周边地区水储量变化的独立成分分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(1): 9-15. (WEN Hanjiang, HUANG Zhenwei, WANG Youlei, et al. Independent component analysis of water storage changes interpretation over Tibetan Plateau and its surrounding areas [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(1): 9-15. (in Chinese))
- [19] LYU Meixia, MA Zhuguo, LI Mingxing, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(3): 1336-1351.
- [20] ZENG Zhenzhong, PIAO Shilong, LI L Z X, et al. Impact of earth greening on the terrestrial water cycle [J]. Journal of Climate, 2018, 31(7): 2633-2650.
- [21] YANG Peng, CHEN Yaning. An analysis of terrestrial water storage variations from GRACE and GLDAS: the Tianshan Mountains and its adjacent areas, central Asia [J]. Quaternary International, 2015, 358: 106-112.

- [13] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [14] 毕玮,汤育春,冒婷婷,等. 城市基础设施系统韧性管理综述[J]. 中国安全科学学报,2021, 31(6): 14-28. (BI Wei,TANG Yuchun,MAO Tingting,et al. Review on resilience management of urban infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28. (in Chinese))
- [15] 杨静,李大鹏,翟长海,等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. 中国科学基金,2019, 33(5): 525-532. (YANG Jing, LI Dapeng, ZHAI Changhai, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2019, 33(5):525-532. (in Chinese))
- [16] 陈陌,郭亚军,于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. 系统管理学报. 2011, 20(3): 352-355. (CHEN Mo, GUO Yajun, YU Zhenming. An improved method for rank correlation analysis and its application[J]. Journal of Systems Management, 2011, 20(3): 352-355. (in Chinese))
- [17] 王伟明,邓潇,徐海燕. 基于三维密度算子的群体 DEMATEL 指标权重确定方法[J]. 中国管理科学, 2021, 29(12): 179-190. (WANG Weiming, DENG Xiao, XU Haiyan. A new index weights calculation method of group DEMATEL based on three dimensional density operator[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021,29(12):179-190. (in Chinese))
- [18] 耿芳,董增川,徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护,2016, 32(6): 131-135. (GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model [J]. Water Resources Protection,2016, 32(6):131-135. (in Chinese))
- [19] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995(6): 15-20. (LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995 (6): 15-20. (in Chinese))
- [20] 龚艳冰,蒋亚东,梁雪春. 基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量[J]. 系统工程,2015, 33(9): 133-137. (GONG Yanbing, JIANG Yadong, LIANG Xuechun. Similarity measurement for normal cloud models based on fuzzy similarity measure [J]. Systems Engineering,2015, 33(9):133-137. (in Chinese))
- [21] 张劲松. 谋新篇开新局再创全省工程运行管理工作新业绩[J]. 江苏水利,2022(增刊1): 5-9. (ZHANG Jinsong. Seek a new chapter and start a new gamecreating new achievements in project operation management of the whole rovince [J]. Jiangsu Water Resources, 2022 (Supl):5-9. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-24 编辑:王芳)

(上接第 207 页)

- [22] WEBER M, KOCH F, BERNHARDT M, et al. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021,25(5):2869-2894.
- [23] 袁巧丽,杨建. 青藏高原草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 中国草地学报,2021,43(9): 32-43. (YUAN Qiaoli, YANG Jian. Phenological changes of grassland vegetation and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021,43(9):32-43. (in Chinese))
- [24] 于伯华,吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究,2011,30(12):2289-2295. (YU Bohua, LYU Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research,2011,30(12):2289-2295. (in Chinese))
- [25] 冉有华,王磊,曾甜,等. "一带一路"亚洲关键区域流域边界图[Z]. 西宁:国家青藏高原科学数据中心,2020.
- [26] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association,1968,63(324):1379-1389.
- [27] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica,1945,13(3):245-259.
- [28] KENDALL M, GIBBONS J D. Rank correlation methods [M]. London:Oxford University Press,1990.
- [29] PEARSON K. Notes on the history of correlation [J]. Biometrika,1920,13(1):25-45.
- [30] FUNAHASHI H, KIJIMA M. Does the Hurst index matter for option prices under fractional volatility? [J]. Annals of Finance,2017,13(1):55-74.
- [31] 王泓云. 气候变异和植被变化对中国陆地水储量的影响研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [32] ZUO Depeng, HAN Yuna, XU Zongxue, et al. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an Alpine river basin of the Tibet Plateau, China[J]. Journal of Hydrology,2021,600:126532.

(收稿日期:2022-02-07 编辑:施业)