

雅鲁藏布江流域水循环要素时空演变及径流驱动因素

姜瑶¹, 夏梓皓¹, 熊吕阳¹, 徐宗学²

(1. 南昌大学工程建设学院, 南昌 330031; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: [目的] 深入认识变化环境下高寒流域水循环演变机理, 为流域水资源管理提供理论依据。[方法] 以雅鲁藏布江流域为研究区, 基于地面观测、遥感及再分析等多源数据, 从水量平衡角度系统分析 1982—2015 年流域水循环要素(降水、径流深、蒸散发、积雪面积比例、积雪深度、雪水当量)的时空演变特征, 定量解析不同时段各区域水平衡动态变化及其对径流变化的驱动作用。[结果] 流域降水总体呈增加趋势, 蒸散发(ET)和径流变化与降水基本一致, 但存在明显区域差异, 其中中游中、西部地区响应明显, 而上游和中游东部地区响应较弱。年平均积雪面积比例(SC)、积雪深度(SD)和雪水当量(SWE)普遍呈减小趋势。分时段来看, 在 1982—1998 年降水增加, 但径流与径流系数变化不显著, 降水增加主要补偿 ET 增加和积雪消耗, 流域水循环维持相对平衡状态。该时期径流与降水相关系数超过 0.61, 降水是径流变化的主要驱动因素。1998 年后, 降水减少且气温增加, 径流与积雪指标(SC、SD 和 SWE)均普遍减小, 中游中部和西部地区 ET 同步减小, 径流系数变化显著, 流域水平衡状态发生明显改变。径流与积雪因子的相关性增强, 相关系数增加至 0.4 以上。[结论] 从流域上游至中游东部, 随着下垫面条件逐渐复杂, 植被调节作用和人类活动影响增强, 降水对径流的贡献降低, 同时气候变暖使得积雪影响增强, 径流形成从单一降水驱动转变为多因素共同作用。

关键词: 水循环要素; 演变规律; 径流; 水平衡; 雅鲁藏布江

中图分类号: P339.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0025-09

Spatiotemporal Evolution of Water Cycle Components and Runoff Driving Factors in Yarlung Zangbo River Basin

JIANG Yao¹, XIA Zihao¹, XIONG Lüyang¹, XU Zongxue²

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The better understanding of the water cycle evolution mechanisms in alpine river basins under changing environments provides a theoretical foundation for basin-scale water resources management. [Methods] The Yarlung Zangbo River basin was selected as the study area. Based on the multi-source data, including ground observations, remote sensing, and reanalysis, the spatiotemporal evolution characteristics of water cycle components from 1982 to 2015 were systematically analyzed from the perspective of basin water balance. The components included precipitation (P), runoff depth (R), evapotranspiration (ET), snow cover fraction (SC), snow depth (SD), and snow water equivalent (SWE). The dynamic variations of water balance across different periods and regions and their driving effects on runoff variations were quantitatively analyzed. [Results] Precipitation (P) in the basin showed an overall increasing trend. Variations in ET and R were generally consistent with P , but with distinct regional differences. The middle and western parts of the middle reaches responded markedly, whereas the upstream and eastern parts of the middle reaches responded more weakly. The annual average SC, SD, and SWE

收稿日期: 2025-05-16

修回日期: 2025-08-30

录用日期: 2025-09-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-24

资助项目: 江西省自然科学基金项目(20232BAB214084, 20243BCE51083); 国家自然科学基金项目(52269012)

第一作者: 姜瑶(1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事区域水文过程及用水调控研究。E-mail: jiangyao313@ncu.edu.cn

通信作者: 熊吕阳(1993—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事流域水文模型及模拟研究。E-mail: xionglvlyang@ncu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

generally exhibited decreasing trends. By time period, during 1982—1998, P increased, but runoff and the runoff coefficient did not change significantly. The increased P mainly offset the rise in ET and snow consumption, maintaining a relatively balanced water cycle in the basin. During this period, the correlation coefficient between R and P exceeded 0.61, indicating that P was the main driving factor of runoff variations. After 1998, P decreased, and temperature increased. Both R and snow indicators (SC, SD, and SWE) generally decreased, accompanied by synchronous decreases in ET in the middle and western parts of the middle reaches. The runoff coefficient changed significantly, and the basin water balance underwent a marked alteration. The correlation between R and snow indicators strengthened, with the coefficient exceeding 0.4. [Conclusion] From the upper reaches to the eastern part of the middle reaches, as underlying surface conditions gradually become more complex, the effects of vegetation regulation and human activities intensify, reducing the contribution of P to runoff. Meanwhile, climate warming amplifies the influence of snow, and runoff formation shifts from a single precipitation-driven mechanism to the combined action of multiple factors.

Keywords: water cycle components; evolution patterns; runoff; water balance; Yarlung Zangbo River

Received: 2025-05-16

Revised: 2025-08-30

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-10-24

水循环是地球系统的重要组成部分,其研究对理解全球气候变化和水资源管理具有重要意义。青藏高原作为“世界水塔”,在全球水循环中发挥着重要作用。位于青藏高原腹地的雅鲁藏布江(以下简称雅江)流域是青藏高原重要的水循环区^[1],其水循环与陆地表层系统特点鲜明,机理复杂,对气候变化响应敏感,深刻影响着区域及下游水资源安全^[2]。因此,研究雅江流域关键水循环要素时空变化规律,探究各水循环要素演变动态及其对径流的驱动作用,对于认识和把握变化环境下高寒地区水循环演变机理、应对全球变化具有重要意义。

国内外学者主要基于统计分析对雅江流域水循环要素的演变规律及驱动要素进行研究,但仍存在显著争议。在径流变化方面,部分研究^[3-8]表明,雅江流域年径流量总体呈下降趋势但不显著,并存在周期性波动,但得出的径流变化规律及驱动机制存在差异。降水被认为是雅江流域径流变化的主要驱动因素,但其影响的空间异质性显著^[9-10],同时,下垫面变化(如植被、积雪等)也对径流年内分配产生重要调节作用^[4]。在降水变化方面,部分研究^[11-12]指出,流域年降水量整体呈减小趋势,主要与雨季降水减少有关,而另一些研究^[13-16]则发现,降水量、径流量及实际蒸散发量均呈增加趋势。水文模型(如VIC、SWAT等)的广泛应用进一步推动相关研究,但不同模型模拟结果仍存在分歧。如LIU等^[17]模拟发现,雅江流域径流和蒸散发量显著增加;DENG等^[18]则模拟出径流减少趋势。总体而言,由于现有研究在数据来源(长度、质量)、研究区域(局部或全流域)及研究方法(统计方法、模型模

拟方法)上的差异,雅江流域水循环要素的时空演变规律及其驱动机制尚未形成统一认识,水文过程对气候变化的响应也存在较大不确定性。因此,有必要对雅江流域水循环要素演变规律及其驱动因素进行深入研究。

本研究收集 1982—2015 年雅江流域地面观测、遥感、再分析等多源数据,从水平衡角度系统分析雅江流域水循环要素(降水、径流、蒸散发、积雪)的长期时空演变特征,定量解析不同时段不同区域内水平衡动态变化及其对径流变化的驱动作用,以期气候变化背景下雅江流域水循环演变机理的深入认识和水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

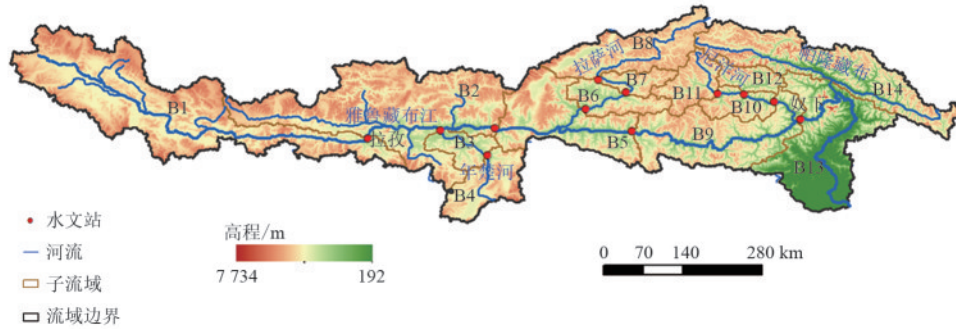
1.1 研究区概况

雅江流域位于青藏高原南部(28°00′~31°16′N, 82°00′~97°07′E),面积 24.2 万 km²,海拔从西部向东部峡谷递减,平均海拔超过 4 000 m(图 1)。拉孜水文站和奴下水文站将流域划分为上游、中游和下游。年径流量从拉孜站的 99 mm/a 变化至奴下站 620 mm/a。由于流域内地形差异很大,降水和气温从下游向上游递减,上下游气候和水文条件差异很大^[19]。上游地处寒带,以高寒草甸为主,年降水量 < 300 mm,年平均气温 0~3 °C。中游地区以高原草地为主,年降水量 300~600 mm,年平均气温 4~6 °C。下游地处亚热带湿润区,主要为高寒森林覆盖,年降水量在 1 000 mm 以上,年平均气温 8~9 °C。同时,降水季节分布不均,分为旱季(每年 11 月至翌年 4 月)和雨季(每年 5—10 月),约 70% 的降水出现在雨季^[9]。

流域中上游的干流及主要支流上共有 12 个水文

站(图 1)。根据支流集水区及 12 个水文站控制区,将雅江流域划分为 14 个子流域(图 1),其中拉孜子流域(B1)代表流域上游,中游包括 11 个子流域(B2-

B12),分别代表中游西部(B2-B4)、中部(B5-B8)和东部(B9-B12),下游分为墨脱(B13)和帕隆(B14) 2 个子流域(表 1)。



注: B1~B14 分别为拉孜、奴各沙、日喀则、江孜、羊村、拉萨、唐加、旁多、奴下、更张、工布江达、巴河、墨脱、帕隆。

图 1 雅鲁藏布江流域

Fig. 1 Yarlung Zangbo River basin

表 1 雅鲁藏布江流域 14 个子流域基本信息

Table 1 Basic information of 14 sub-basins in Yarlung Zangbo River basin

流域分区	子流域	名称(同水文站)	河流	平均海拔/m	面积/km ²
上游	B1	拉孜	雅鲁藏布江	5 071	49 759
	B2	奴各沙	雅鲁藏布江	4 989	44 029
中游西部	B3	日喀则	年楚河	4 422	4 860
	B4	江孜	年楚河	4 909	9 548
中游中部	B5	羊村	雅鲁藏布江	4 687	19 925
	B6	拉萨	拉萨河	4 585	6 292
	B7	唐加	拉萨河	4 839	3 683
	B8	旁多	拉萨河	5 023	15 501
中游东部	B9	奴下	雅鲁藏布江	4 478	22 201
	B10	更张	尼洋河	4 609	5 145
	B11	工布江达	尼洋河	4 861	6 481
	B12	巴河	尼洋河	4 662	4 131
下游	B13	墨脱	雅鲁藏布江	2 717	25 349
	B14	帕隆	帕隆藏布江	4 617	25 391

1.2 数据和方法

1.2.1 数据描述 径流(R)数据根据雅江流域 12 个水文站的流量观测值及其控制面积计算得到,时间长度为 1961—2015 年,其中缺少下游 B13(墨脱)和 B14(帕隆)的径流数据。降水和气温数据主要采用中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)^[20],时空分辨率分别为 3 h 和 0.1°,收集自国家青藏高原科学数据中心(TPDC, <http://data.tpdc.ac.cn>)。蒸散发数据采用中国陆地实际蒸散发数据集^[21],该数据集基于蒸散发互补关系得到,时空分辨率分别为逐月和 0.1°,收集自 TPDC。

冰川积雪变化对雅江流域水循环变化有显著影响。本文采用多种积雪指标数据进行分析,包括积雪面积比例(SC)、积雪深度(SD)和雪水当量(SWE)。SC 数据采用青藏高原逐日无云 MODIS 积雪面积比例数据集^[22],为 500 m 空间分辨率的逐日数据,数据长度为 2000—2015 年。SD 数据采用中国雪深长时间序列数据集(1982—2015 年)^[23],该数据为日积雪厚度分布数据,空间分辨率为 25 km。SC 和 SD 数据均来自 TPDC。SWE 数据来自 VIC-IGSNRR 模拟结果^[24],为 1982—2012 年逐日数据,空间分辨率为 0.25° (http://hydro.igsnr.ac.cn/public/vic_outputs.html)。

归一化植被指数(NDVI)数据采用全球库存建模与绘图研究第三代 NDVI 数据集(GIMMS 3 g+NDVI),时空分辨率分别为 15 d 和 1/12°(约 0.083°) (<https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides>)^[25]。叶面积指数(LAI)数据采用全球地面卫星(GLASS)产品^[26],时空分辨率分别为 8 d 和 0.05°,由国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供。

根据各数据长度,本研究分析时段统一为 1982—2015 年,水循环要素数据处理为逐月值,单位统一为 mm。气温和 NDVI 处理为逐月平均值,LAI 选择逐月最大值。各数据空间分辨率为原始分辨率。

1.2.2 分析方法 Mann-Kendall 检验方法(MK 检验)是一种广泛使用的非参数统计方法,用于分析时间序列中是否存在显著的单调趋势。由于它对数据分布没有特定要求,同时不受极端值的强烈影响,所以特别适用于气象、水文等数据的趋势检测。其计算原理可见文献[6]。

Sen's 斜率估计是一种用于计算时间序列中趋势斜率β的非参数方法,该方法计算效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,常用于长时间序列数据

的趋势分析。当 $\beta > 0$ 时,序列呈上升趋势; $\beta = 0$ 时,序列趋势不明显; $\beta < 0$ 时,序列呈下降趋势。其计算原理可见文献[6]。

偏相关分析指剔除(控制)一个或多个其他变量影响的条件下分析2个变量间的相关性。它是一种更深入的相关性分析方法,能够揭示真实的变量关系,而不是受第三方变量干扰的表面关系。对于3个变量 x 、 y 、 z ,偏相关系数 R_{xy-z} 为 x 和 y 间的相关性,同时控制 z 的影响,其计算公式为:

$$R_{xy-z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} - R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (1)$$

式中: R_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; R_{xz} 为变量 x 和 z 的相关系数; R_{yz} 为变量 y 和 z 的相关系数。本研究主要采用偏相关分析方法,分别计算径流(R)、径流系数(R/P)与其他水循环要素(P 、 ET 、 SD 和 SWE)变化的相关性,以期探讨径流变化的驱动因素。当分析 R 或 R/P 与某一因素(如 P)相关性时,其他因素(如 ET 、 SD 和 SWE)为控制因素。

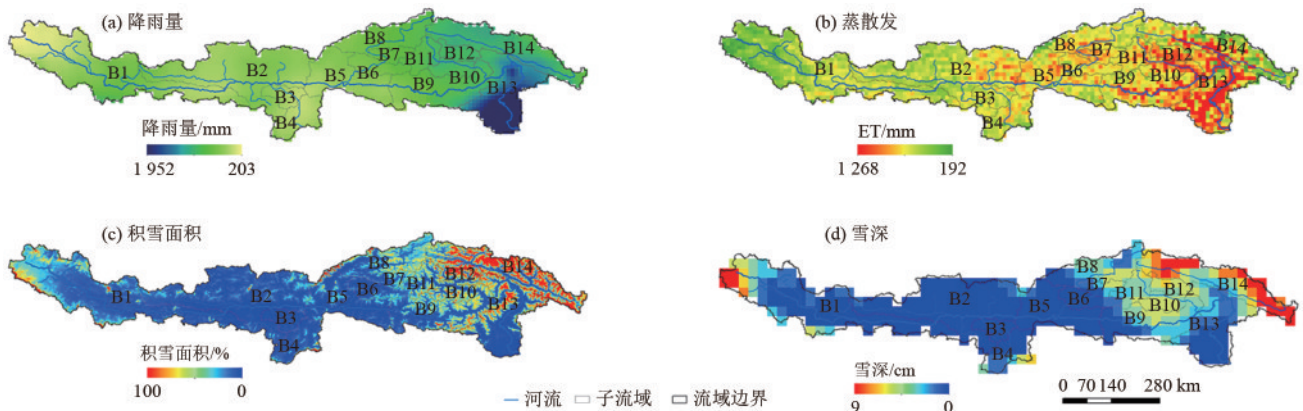


图2 1982—2015年雅鲁藏布江流域水循环要素空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water cycle components in Yarlung Zangbo River basin from 1982 to 2015

基于各水循环要素年值,利用MK检验方法分别计算每个格网内变量的变化趋势,得到各要素的长期(1982—2015年)变化趋势及其空间分布(图3)。P在全流域范围内呈增加趋势,增加面积约为流域面积的80%,其中显著增加($\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$)面积为54%,主要分布在中游的拉萨河流域(B6-B8)和东部地区(B10~B12和B9)(图3a)。ET在雅江中游地区呈增加趋势,在雅江上游和下游地区则呈减小趋势,显著增加($\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$)和减小的面积分别为14%和26%(图3b)。年径流(R)在雅江上游(B1)、年楚河下游(B3)、拉萨河下游(B7)和中游下段(B9)呈不显著减小趋势,在其余子流域内呈增加趋势,其中在更张(B10)和羊村段(B5)呈极显著增加($\alpha = 0.01$)(图3c)。

2 结果与分析

2.1 水循环要素时空变化规律

各水循环要素多年平均值空间分布见图2。流域内降水(P)和蒸散发(ET)由下游(东部)至上游(西部)逐渐减小(图2a、图2b),东部(B9-B14)、中部(B5-B8)和西部(B1-B4)地区的平均 P 分别为768、435、347 mm,平均 ET 分别为626、562、495 mm。雅江流域水文气象受印度季风影响,来自印度洋的暖湿气流自青藏高原东南部登陆,并由东向西逐渐减弱,使得 P 与 ET 呈明显的空间差异和海拔梯度。积雪主要分布在流域东部和西部的海拔地区,包括上游源头区(B1)、帕隆(B14)、拉萨河上游(B8)和尼洋河流域北部(B11),其中帕隆的积雪面积比例(SC)最大,平均为43.5%。雅江中游 SC 相对较小,多为季节性积雪,多年平均 $SC < 10\%$ (图2c)。流域多年平均积雪深度(SD)的空间分布规律与 SC 一致,多年平均最大 SD 约90 mm,主要分布在帕隆(B14)和雅江上游(B1)。拉萨河上游(B8)和尼洋河上游(B11)的 SD 分别在15、35 mm左右(图2d)。

年平均 SC 、 SD 和 SWE 在全流域范围内主要呈减小趋势,其面积分别占流域面积的55%、67%、75%,其中,分别有7.4%、15.5%、30.1%的面积呈显著减小($\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$)(图3d~图3f)。 SC 显著减小的区域集中在中游北部(B8和B11)。 SD 和 SWE 显著减小的区域主要分布在流域东北部(B14和B12)。

2.2 水循环要素年内分布特征

4个代表子流域的水循环要素年内分布见图4。 R 和 P 在时间上变化基本一致,但 R 峰值出现较 P 滞后1个月。在空间上,自流域上游至下游,随着 P 的年内分布逐渐均匀, R 峰值持续时间相对变长,呈现出较好的相关性。 ET 年内变化的空间差异相对较小,最大 ET 均出现在7—8月,在9月之后开始明显减小(图4a~图4d)。 SC 和 SD 在流域中部(B5)相对较小,其变化分

别为0~10%和0~13 mm。在中游东部(B9)和下游地区(B14),SC和SD的年内变化较大,如帕隆子流域(B14)内SC和SD最大分别为68%和141 mm,与最小

值分别相差40%和130 mm。SWE在上游和下游一般大于中游,最大值主要出现在4月,但总体上,空间差异较大,可能与SWE的不确定性较大有关(图4e~图4h)。

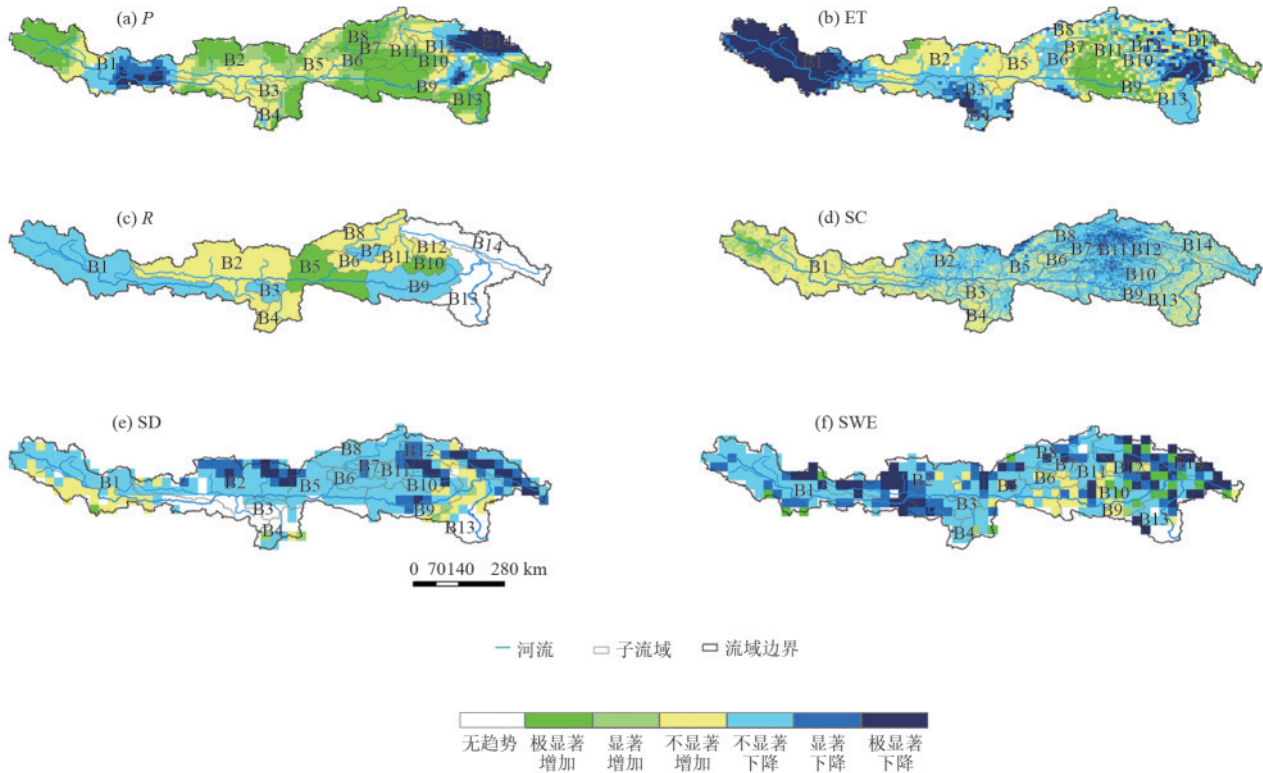
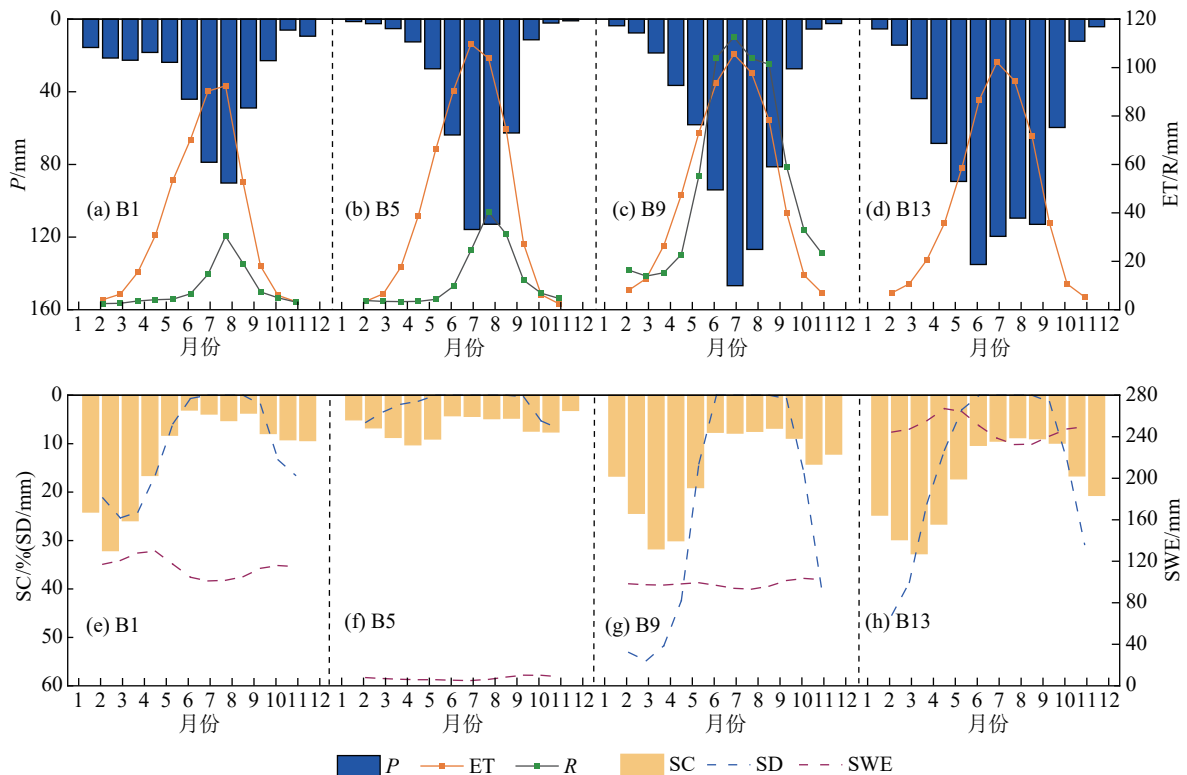


图 3 1982—2015年流域水循环要素变化趋势及其空间分布

Fig. 3 Trends and spatial distribution of water cycle components in Yarlung Zangbo River basin from 1982 to 2015



注:P、ET、R、SC、SD和SWE分别为月平均降雨量、蒸散发、径流深、积雪面积比例、积雪深度和雪水当量。

图 4 1982—2015年流域水循环要素年内分配规律

Fig. 4 Intra-annual distribution patterns of water cycle components in basin from 1982 to 2015

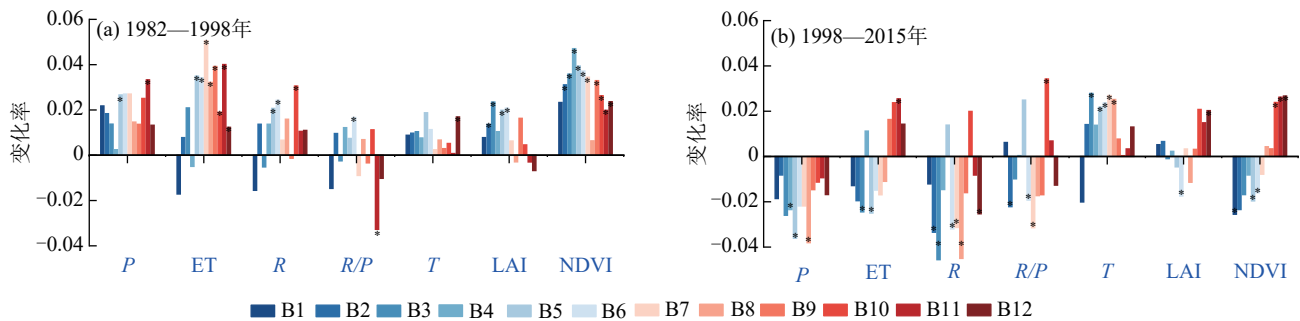
2.3 水平衡动态变化分析

根据雅江流域降水、径流的非单调变化特征^[6],分2个时段分析各子流域水平衡动态变化,即1982—1998年和1998—2015年,分别计算2个时段内各子流域平均水循环要素的年平均变化率(Sen'斜率)。由于植被直接影响ET,气温(T)直接影响积雪变化,为更好地分析各要素动态变化关系,此处进一步加入植被因素(NDVI和LAI)与 T 的变化率。

1982—1998年,随着流域 P 和 T 的普遍增加,流域中下游ET增加,尤其在拉萨河上游(B6、B7)、尼洋河子流域(B10、B11)、中游东部(B5、B9)显著增加(图5a和图6a)。与此同时,该区域 R 也表现为增加,但整体上变化不显著,仅在羊村(B5)、拉萨(B6)和更张(B10)3个子流域内通过显著性检验。在积雪覆盖面积较大的上游地区(如B1、B8、B7、B11等),SD和

SWE有所增加。进一步分析年径流系数(R/P)发现, R/P 在多数地区变化不明显,仅在拉萨河下游(B6)与尼洋河上游(B11)变化显著,说明各子流域水循环维持动态平衡,径流形成基本稳定,降水主要贡献积雪增加和ET增加。

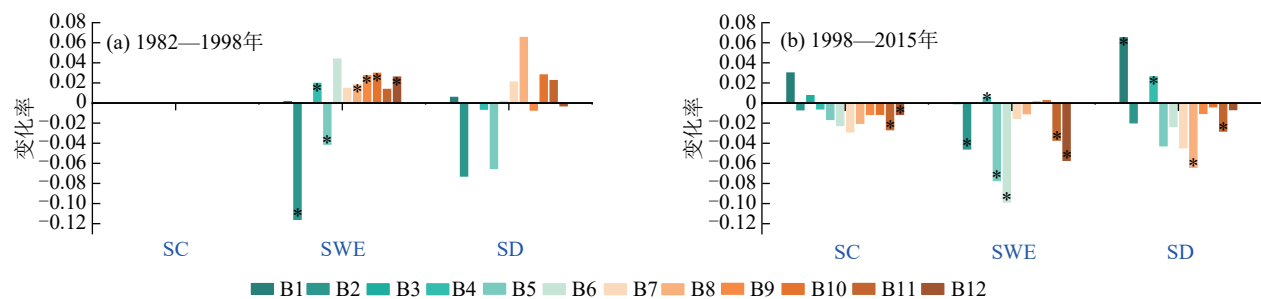
1998—2015年,流域 P 普遍下降,而中游地区 T 仍显著增加。受此影响,积雪指标(SC、SD和SWE)在中游大部分地区表现为减小, R 也呈减小趋势(图5b和图6b)。同时,在中游中、西部地区,植被生长对水分敏感, P 减少导致NDVI和LAI多由增大转变为减小或增加趋势变小,ET在该区域减小。与上个时段相比, R/P 变化明显,并在多个子流域呈显著变化(如B6、B7和B10)。说明该时段内水循环特征较不稳定,部分子流域的水平衡发生改变。



注: P 、 ET 和 R 的变化率基于标准化序列计算得到,实际变化率为图中数值乘以其区域平均值;*表示变化显著;缺少2000年之前的SC数据。下同。

图5 1982—2015年不同子流域内水循环要素与植被参数平均变化率

Fig. 5 Average change rates of water cycle components and vegetation parameters across different sub-basins from 1982 to 2015



注:SC数据为2000—2015年;SWE数据为1998—2012年。

图6 1982—2015年不同子流域内积雪指标平均变化率

Fig. 6 Average change rates of snow indicators across different sub-basins from 1982 to 2015

2.4 径流变化驱动因素分析

进一步基于偏相关分析计算 R , R/P 与其他水循环要素(P 、 ET 、 SD 和 SWE)变化的相关性。由图7、图8可知,1982—1998年,多数子流域内径流主要与降水相关,相关系数达到0.61~0.87,仅在雅江上游(B1)、年楚河上游(B4)和雅江中游东部(B9)的相关性较小(图7a)。在中游东部(B7~B12), R 与 ET 呈一定负相关,相关系数为0.40左右,主要是由于该区域植被丰富,植被耗水、截留等影响径流形成。积雪变化(SWE、SD)与径流的相

关性在此时段内相对较弱,说明流域降水是径流变化的主要驱动因素。1998—2015年,在拉萨河流域(B6~B8)、尼洋河流域(B10~B12)、年楚河上游(B4)及奴各沙子流域(B2), R 与积雪因子的相关性明显增大(图7b),系数达到0.40以上(图7b),表明积雪融水对径流的贡献增强,与该时段显著的升温导致积雪消融提前、冻土活动加深^[27-28]相吻合。

R/P 与 P 的偏相关系数从流域西部至东部(B1~B12)逐渐减弱,呈明显空间分异特征。1982—

1998年, R/P 与 P 的相关系数在流域西部(B1~B4)为 0.70 以上, 在流域中部(B5~B8)为 0.41~0.54, 在流域东部仅为 0.20 左右(图 8a)。1998—2015 年, 多数子流域内 R/P 与积雪因子(SD 和 SWE)变化的相关性明显增加(图 8b)。该变化表明中游中、西部地区的降水-径

流转化过程较为直接, 而东部地区由于下垫面条件复杂, 植被调节作用和人类活动影响增强, 降低降水对径流的贡献。同时, 随着气候变暖, 积雪的水文效应增强, 降水的直接贡献下降, 径流形成从单一降水驱动逐渐转变为多因素共同作用。

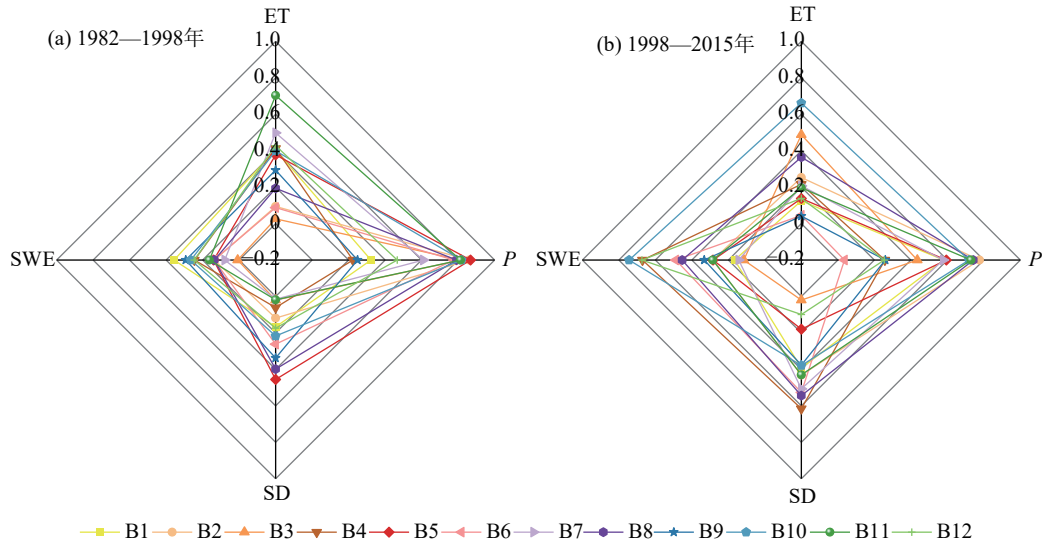


图 7 1982—2015 年不同子流域内径流 (R) 与降水 (P)、蒸散发 (ET)、积雪深度 (SD)、雪水当量 (SWE) 变化的偏相关系数
 Fig. 7 Partial correlation coefficients between runoff (R) and precipitation (P), evapotranspiration (ET), snow depth (SD), and snow water equivalent (SWE) across different sub-basins from 1982 to 2015

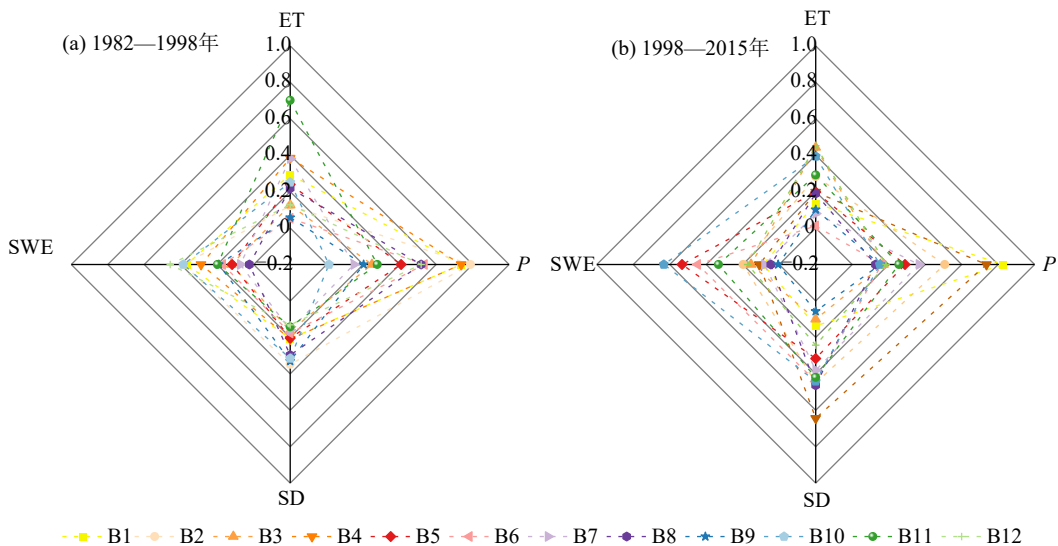


图 8 1982—2015 年不同子流域内径流系数与降水 (P)、蒸散发 (ET)、积雪深度 (SD)、雪水当量 (SWE) 变化的偏相关系数
 Fig. 8 Partial correlation coefficients between runoff coefficients and precipitation (P), evapotranspiration (ET), snow depth (SD), and snow water equivalent (SWE) across different sub-basins from 1982 to 2015

3 讨论

本研究系统分析雅江流域 1982—2015 年水循环要素的时空演变规律及其对径流变化的驱动作用, 深入揭示气候变化背景下流域水循环的差异性响应特征。结果表明, 雅江流域水循环演变具有显著的空间异质性和时间变异性。从空间来看, 流域降水整体呈增加趋势, 蒸散发和径流变化趋势与降水基本一致, 但存在明显的区域差异, 中游中、西部地区响应明显, 上游和中游东部

地区响应较弱。该空间异质性主要与径流驱动机制的区域差异有关。降水虽为流域径流的主导因子, 但其贡献存在空间差异, 中游中、西部地区降水-径流转化过程较为直接, 而东部地区由于下垫面条件复杂, 植被调节作用和人类活动影响增强, 降低降水对径流的贡献。上游高寒区冰川积雪和冻土的影响也削弱降水的主导作用, 与徐宗学等^[4]的研究结论相一致。分时段来看, 1982—2015 年流域水循环经历显著转变。1982—1998

年降水和气温的协同增加导致流域中游地区蒸散发显著增加,与近年报道的青藏高原“变湿变绿”现象相吻合^[9,29]。值得注意的是,该时期大部分地区径流变化不显著,表明降水增加主要补偿蒸散发增加和积雪损耗,维持流域水平衡的相对稳定。然而,1998年后,随着气候变暖加剧,流域水平衡发生显著改变。积雪指标普遍下降,径流及径流系数与积雪指标的相关性增强,表明积雪消融对径流的贡献增加,径流驱动因素由单一降水主导逐渐转变为多因素共同调控。该发现不仅支持气候变化下青藏高原水循环加速^[30]和降水-径流关系改变^[31]的相关研究也表明,气候变化正改变高寒流域水循环特征。研究进一步为理解气候变化下高寒流域水文过程响应提供科学参考,但仍存在数据长度受限等局限性。未来研究可通过结合水文模型和多源遥感数据,进一步深化对流域水循环过程的机理认识。

4 结论

1)空间分布上,全流域降水呈增加趋势,蒸散发和径流变化与降水基本一致,但中游中、西部地区响应明显,而中游东部地区响应较弱。年平均积雪面积比例(SC)、积雪深度(SD)和雪水当量(SWE)均主要呈减小趋势。

2)时间变化上,1982—1998年流域降水增加,但径流增加不显著,径流系数变化不明显,表明降水增加主要补偿蒸散发增加和积雪损耗,流域水平衡维持相对稳定。1998—2015年受降水减少且气温升高影响,径流与积雪指标(SC、SD、SWE)主要呈下降趋势,在对降水敏感的中游中部和西部地区ET同步减小,径流系数变化显著,流域水平衡出现明显改变。

3)相关性分析表明,1982—1998年流域大部分地区径流与降水的相关系数超过0.61,降水是径流形成的主要驱动因素,同时中游东部ET对径流有一定调节作用。1998年后,径流与积雪因子的相关性增强,相关系数增加至0.4以上,表明气候变化背景下积雪融水对径流的贡献增大。

4)从流域上游至中游东部,随着下垫面条件逐渐复杂,植被调节作用和人类活动影响增强,降水对径流的贡献有所降低。同时,气候变暖使得积雪水文效应增强,径流形成从单一降水驱动逐渐转变为多因素共同作用。

参考文献:

- [1] LIU J P, ZHANG W C. Climate changes and associated multiscale impacts on watershed discharge over the upper reach of Yarlung Zangbo River basin, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2018: e4851645.
- [2] 刘浏,王宣宣,牛乾坤,等.雅鲁藏布江流域陆地水储量变化特征及归因[J].*农业工程学报*, 2021, 37(14): 135-144.

- LIU L, WANG X X, NIU Q K, et al. Evolution characteristic of terrestrial water storage change and its attribution analysis over the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(14): 135-144.
- [3] 李浩,牛乾坤,王宣宣,等.1961—2015年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J].*水土保持学报*, 2021, 35(1): 110-115.
- LI H, NIU Q K, WANG X X, et al. Variation characteristics of runoff in the Yarlung Zangbo River basin from 1961 to 2015 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 110-115.
- [4] 徐宗学,班春广,张瑞.雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J].*水科学进展*, 2022, 33(4): 519-530.
- XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 519-530.
- [5] 徐宗学,周祖昊,姜瑶,等.西南河流域径流量变化规律及其未来演变趋势[J].*水科学进展*, 2022, 33(3): 360-374.
- XU Z X, ZHOU Z H, JIANG Y, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of southwestern rivers [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 360-374.
- [6] JIANG Y, XU Z X, XIONG L Y. Runoff variation and response to precipitation on multi-spatial and temporal scales in the southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 42: e101157.
- [7] 汤秋鸿,兰措,苏凤阁,等.青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J].*科学通报*, 2019, 64(27): 2807-2821.
- TANG Q H, LAN C, SU F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807-2821.
- [8] 刘剑,姚治君,陈传友.雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J].*自然资源学报*, 2007, 22(3): 471-477.
- LIU J, YAO Z J, CHEN C Y. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(3): 471-477.
- [9] YANG K, WU H, QIN J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [10] 杨大文,王宇涵,唐莉华,等.雅鲁藏布江上游径流变化及影响因素分析[J].*水力发电学报*, 2023, 42(3): 41-49.
- YANG D W, WANG Y H, TANG L H, et al. Analysis of runoff changes and their causes under climate changes in upper Yarlung Zangbo River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(3): 41-49.
- [11] TONG K, SU F G, YANG D Q, et al. Tibetan Plateau precipitation as depicted by gauge observations, reanalyses and satellite retrievals [J]. *International Journal of Cli-*

- matology, 2014, 34(2):265-285.
- [12] SANG Y F, SINGH V P, GONG T L, et al. Precipitation variability and response to changing climatic condition in the Yarlung Tsangpo River basin, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(15):8820-8831.
- [13] LIU W B, SUN F B, LI Y Z, et al. Investigating water budget dynamics in 18 river basins across the Tibetan Plateau through multiple datasets[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(1):351-371.
- [14] LIU Z, YAO Z, HUANG H, et al. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the Yarlung Zangbo River basin, China[J]. *Land Degradation and Development*, 2014, 25(3):203-215.
- [15] NIE N, ZHANG W C, DENG C. Responses of water resource of the Yarlung Zangbo River basin to climate changes and glacier-snow fluctuations in recent years[J]. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 46:e012042.
- [16] ZHANG H, ZHANG L, LI J, et al. Climate and hydrological change characteristics and applicability of GLDAS data in the Yarlung Zangbo River basin, China[J]. *Water*, 2018, 10(3):e254.
- [17] LIU W F, XU Z X, LI F P, et al. Impacts of climate change on hydrological processes in the Tibetan Plateau: A case study in the Lhasa River basin[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(7):1809-1822.
- [18] DENG Y K, YAO Y Y, ZHAO Y F, et al. Impact of climate change on the long-term water balance in the Yarlung Zangbo basin[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11:e1107809.
- [19] LI F P, ZHANG Y Q, XU Z X, et al. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505:188-201.
- [20] 阳坤, 何杰, 唐文君, 等. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file>.
- YANG K, HE J, TANG W J, et al. China meteorological forcing dataset(1979—2018)[DB/OL]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center. 2019. <https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file>.
- [21] 马宁, JOZSEF S, 张寅生, 等. 中国陆地实际蒸散发数据集(1982—2017)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/AtmosPhys.tpe.249493.file>.
- MA N, JOZSEF S, ZHANG Y S, et al. Terrestrial evapotranspiration dataset across China (1982—2017)[DB/OL]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2019. <https://doi.org/10.11888/AtmosPhys.tpe.249493.file>.
- [22] 唐志光, 王建. 青藏高原逐日无云 MODIS 积雪面积比例数据集(2000—2015)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, 2019. <https://doi.org/10.3972/westdc.024.2013.db>.
- TANG Z G, WANG J. Daily cloudless MODIS Snow area ratio data set of the QTP(2000—2015)[DB/OL]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2019. <https://doi.org/10.3972/westdc.024.2013.db>.
- [23] 车涛, 戴礼云, 李新. 中国雪深长时间序列数据集(1979—2024)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, 2015. <https://doi.org/10.11888/Geogra.tpd.270194>.
- CHE T, DAI L Y, LI X. Long-term series of daily snow depth dataset in China (1979—2024)[DB/OL]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2015. <https://doi.org/10.11888/Geogra.tpd.270194>.
- [24] ZHANG X J, TANG Q H, PAN M, et al. A long-term land surface hydrologic fluxes and states dataset for China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2022, 15(5):2067-2084.
- [25] PINZON J, PAK E, TUCKER C, et al. Global vegetation greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3 G+, 1981—2022[DB/OL]. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2023. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2187>.
- [26] XIAO Z Q, LIANG S L, WANG J D, et al. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9):5301-5318.
- [27] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(27):2783-2795.
- CHENG G D, ZHAO L, LI R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27):2783-2795.
- [28] 许朋琨. 雅鲁藏布江流域近年冰川地下水资源量变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- XU P K. Study on glacier and groundwater mass changes of Yarlung Zangbo River basin in the recent years[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [29] LI H, LIU L, KOPPA A, et al. Vegetation greening concurs with increases in dry season water yield over the Upper Brahmaputra River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603:e126981.
- [30] WANG Y B, XIE X H, SHI J C, et al. Accelerated hydrological cycle on the Tibetan Plateau evidenced by ensemble modeling of Long-term water budgets[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615:e128710.
- [31] WANG J R, CHEN X, LIU J T, et al. Changes of precipitation-runoff relationship induced by climate variation in a large glaciated basin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126:e2020JD034367.