DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2022. 04. 001

# 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析

徐宗学<sup>1,2</sup>,班春广<sup>1,2</sup>,张 瑞<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院,北京 100875; 2. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875)

摘要: 气候变化驱动下的水循环与水资源演变规律研究是重要的科学问题,也是国际社会普遍关注的全球性问题。 以雅鲁藏布江流域为研究区,利用线性倾向估计、多元线性回归等方法检验气象要素变化特征,揭示下垫面演变 规律;基于 Budyko 假设的弹性系数法,揭示径流演变规律,并进行归因分析。结果表明:1961—2014年,雅鲁藏 布江流域气温呈升高趋势,降水整体呈增加趋势,气候向暖湿化方向发展;植被整体改善,上游西北部和下游植 被存在退化现象;年径流序列具有 3~4 a、12 a、20 a 和 32 a 左右的周期;降水变化、潜在蒸散发量变化、下垫面 变化和冰川变化对径流量增加的贡献率分别为 39.62%、-2.74%、32.32%和 30.94%。相关结果对理解气候变化 和下垫面变化下雅鲁藏布江径流演变规律,具有重要的参考价值。

全球气候和下垫面变化是影响流域水循环的2个重要因素。目前,在下垫面变化和不同气候条件的共同 影响下,全球生态水文过程正在逐渐发生变化,成为当前水文学研究的热点领域之一<sup>[1]</sup>。青藏高原是世界 上海拔最高、面积最大的高原,面积为250万km<sup>2</sup>,有"世界屋脊"之称<sup>[2]</sup>。青藏高原是亚洲许多河流的发源 地及重要水源地,其水循环状况直接关系着周边及下游地区的水资源配置与防洪安全<sup>[3]</sup>。在气候变化背景 下,降水<sup>[4]</sup>、潜在蒸散发、冰川及下垫面均发生了不同程度的变化<sup>[5]</sup>,最终导致流域径流发生变化。因此, 研究气候变化影响下青藏高原高山区流域水循环演变机理,揭示下垫面和径流演变规律,对区域水资源合理 利用和规划管理具有十分重要的现实意义。雅鲁藏布江发源于青藏高原东南部,是一条重要的国际性河 流<sup>[6]</sup>。近 50 a 来,雅鲁藏布江流域下垫面发生了一系列变化,如冰川加速退缩、冻土退化<sup>[7]</sup>,对水循环过 程和机制产生了深刻影响。

当前,国内外学者定量识别径流归因的方法主要包括水文模型模拟法、基于 Budyko 假设的弹性系数法和双累计曲线法<sup>[8]</sup>。近年来,基于 Budyko 假设的弹性系数法被广泛应用于国内外各大流域,如 MOPEX 流域<sup>[9]</sup>、长江流域<sup>[8]</sup>和汉江上游流域<sup>[4]</sup>。目前,针对雅鲁藏布江流域径流变化和径流归因分析等方面已开展大量研究<sup>[10-13]</sup>,但在全面揭示径流演变规律、定量厘清气候变化和下垫面变化对径流变化的影响方面仍存在不足。

雅鲁藏布江作为中国重要的国际性河流,蕴含丰富的淡水资源,该流域也是中国重要的生态安全屏障和 生物多样性重点保护区域,其生态系统结构相对简单,生态环境脆弱,对气候变化尤为敏感。近 50 a 来,雅鲁 藏布江流域水文气象要素发生了一系列变化。有研究表明,雅鲁藏布江流域降水以 6.32 mm/(10 a)的速率呈不 显著增加,气温以 0.32 ℃/(10 a)的速率呈显著增加<sup>[14-15]</sup>。流域中游年、季节平均气温显著增高,年降水呈 现先减少后增加的趋势<sup>[16-17]</sup>。Li 等<sup>[18]</sup>基于 MODIS NDVI 数据分析了雅鲁藏布江流域的植被覆盖情况,发现 该区域在 2000 年后的显著变绿过程是由气候-下垫面-水文过程之间的耦合关系所驱动。本文在分析气象要

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91647202)

收稿日期: 2022-01-05; 网络出版日期: 2022-05-12

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220511.1722.002.html

作者简介:徐宗学(1962—),男,山东淄博人,教授,博士研究生导师,主要从事水文与水资源研究。

E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

第 33 卷

素和下垫面演变特征的基础上,研究变化环境下雅鲁藏布江流域的径流变化规律及其归因分析,相关研究结论可为高寒山区水资源管理、生态环境保护等工作提供科技支撑。

# 1 研究区概况

雅鲁藏布江发源于杰玛央宗冰川,在巴昔卡出境,进入印度阿萨姆邦改称布拉马普特拉河(Brahmaputra River),流域范围为28°N—31°N,82°E—97°E(图1)。雅鲁藏布江从杰玛央宗冰川的末端至拉孜为上游段,从 拉孜到奴下为中游段,奴下到巴昔卡附近为下游段<sup>[12]</sup>,干流全长2057 km,流域面积约为24万 km<sup>2</sup>。雅鲁藏 布江水量非常丰沛,年径流总量为1395.1亿 m<sup>3</sup>,年平均流量为4425 m<sup>3</sup>/s<sup>[2]</sup>。流域平均海拔为4000 m, 地势西高东低。由于复杂的地理条件,各地气温条件差异较大,年降水量存在显著的空间差异,由东南部向 西北部从4000 mm以上降至500 mm 左右<sup>[19]</sup>;降水的垂直分布规律明显,从非冰川区过渡到冰川区年降水 量随高程增加的递减率为10~30 mm/(100 m)<sup>[20]</sup>;同时降水季节分配不均匀,雨季旱季分明,雨季为每年 的5—10月,旱季为11月至次年的4月。雅鲁藏布江蕴含丰富的淡水资源,对西藏经济社会和下游国家发 展具有十分重要的作用。



Fig. 1 Distribution of meteorological stations and DEM in the Yarlung Zangbo River basin

# 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

### 2.1.1 气象要素数据

选取中国气象局通过拟合数据序列计算并优化薄盘平滑样条函数、最终利用样条函数插值得到的 1961—2014 年气温和降水数据,该数据时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.25°×0.25°。

# 2.1.2 下垫面数据

植被覆盖数据采用美国航天局开发的 GIMMS NDVI 第三代数据集(1982—2014 年),空间分辨率为 8 km×8 km,时间分辨率为15 d,该数据集已被证明是描述植被生长动态变化最好的数据集之一<sup>[21]</sup>;积雪数据采用 MODIS 网站提供的 2000—2016 年时间分辨率为 8 d、空间分辨率为 500 m 的数据;雪深数据采用 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提供的 1982—2016 年中国雪深长时间序列数据集<sup>[22]</sup>,空间分辨率为

0.25°,时间分辨率为1d;冰川数据采用国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)提供的1976年、2001年、2013年和2017年4期数据<sup>[23]</sup>;冻土数据采用Zou等<sup>[24]</sup>提供的青藏高原新绘制的冻土分布图(2017)。

2.1.3 径流数据

径流数据采用中国气象局国家气候中心提供的20个国家气象站数据和西藏水文水资源勘测局提供的雅 鲁藏布江干支流上的12个水文站(拉孜、日喀则、江孜、奴各沙、唐加、旁多、拉萨、羊村、工布江达、巴 河桥、更张、奴下,见图1)1961—2015年实测月流量数据。

2.2 研究方法

2.2.1 统计分析方法

本文采用线性倾向估计方法,通过计算 Slope 值<sup>[21]</sup>研究气温、降水、植被、积雪面积、雪深等要素的变 化趋势。利用多元线性回归方法,研究冻土区域气温变化特征。

2.2.2 径流变化及归因分析方法

为深入认识雅鲁藏布江流域径流演变规律并进行归因分析,采用集中度和集中期指标分析月径流量的年内分布规律,采用 Pettitt 检验、滑动 t 检验和 Mann-Kendall 检验方法检验年径流量突变点<sup>[25]</sup>,利用去趋势波动分析方法、小波分析方法探讨各站年径流量序列的尺度行为和周期变化。

考虑到雅鲁藏布江流域水文气象数据稀缺,径流产生的物理机制复杂等特点,本文采用 Budyko 框架<sup>[26]</sup> 对雅鲁藏布江流域径流变化进行归因分析。由于流域径流产生机制独特,冰川径流在流域径流中占有不可忽 略的比例,所以冰川径流变化在径流归因中单独考虑。下垫面变化主要受地形、土壤、植被和人类活动变化 影响,长期而言地形和土壤可看作固定不变,同时由于该流域人类活动较弱,考虑忽略人类活动。因此,该 流域下垫面变化主要由植被覆盖变化引起<sup>[25]</sup>。

Schaake<sup>[27]</sup>研究表明,可以通过弹性系数来量化特定变量对径流的敏感性,其定义如下:

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{\partial R_i}{\partial y_i} \times \frac{y_i}{R_i} \tag{1}$$

式中: $\varepsilon_{y_i}$ 为弹性系数; $R_i$ 为水文站观测的年平均总径流深, mm; $y_i$ 代表特定的影响因素,即年平均降水量(P)、年平均实际蒸散发量 $(E_m)$ 、冰川径流占总径流的比例(r)以及流域下垫面特征的参数(n)。

假设 $\phi = E_m/P$ , 弹性系数可以分别表示如下:

1

$$\varepsilon_{P} = \frac{(1+\phi^{n})^{\frac{1}{n+1}} - \phi^{n+1}}{(1+\phi^{n})[(1+\phi^{n})^{\frac{1}{n}} - \phi]}$$
(2)

$$\varepsilon_{E_{T0}} = \frac{1}{(1+\phi^n) \left[1-(1+\phi^{-n})^{\frac{1}{n}}\right]}$$
(3)

$$\varepsilon_{n} = \frac{\ln(1+\phi^{n}) + \phi^{n}\ln(1+\phi^{-n})}{n(1+\phi^{n})\left[1 - (1+\phi^{-n})^{\frac{1}{n}}\right]}$$
(4)

$$\varepsilon_{r} = \frac{r\left(P - \frac{E_{\text{TO}}}{(1 + \phi^{n})^{\frac{1}{n}}}\right)}{(1 - r)\left(P - \frac{P \times E_{\text{TO}}}{(P^{n} + E_{\text{TO}}^{n})^{\frac{1}{n}}}\right)}$$
(5)

一旦确定了总径流量的突变点,就可以通过比较突变点前后2个时期的冰川径流量,并由 Budyko 框架 中的公式(5)来计算冰川径流量对2个时期总径流变化的贡献。

根据弹性系数的定义,可以通过将每个变量的变化引起的径流变化相加得出总径流变化,如下所示:

$$D(R_{t}) = C(P) + C(E_{m}) + C(n) + C(r) + \delta$$
(6)

式中: $O(R_t)$ 为观测到的径流变化, mm; $C(P) \ C(E_{m}) \ C(n) \ P(r)$ 分别表示  $P \ E_{m} \ n \ n \ r \ F导致的$ 径流变化, mm; $\delta$ 为观测和计算的径流变化之间的偏差, mm。

每个变量对径流变化的相对贡献可以表示如下:

$$R_{Cy_i} = \frac{C(y_i)}{O(R_i)} \times 100\%$$
<sup>(7)</sup>

式中:  $R_{cy}$ 为  $y_i$ 的相对贡献。

# 3 结果分析与讨论

#### 3.1 气象要素演变特征

3.1.1 气温演变趋势

在全球变暖的大背景下,青藏高原地区存在明显的温度上升趋势。图 2 给出了 1961—2014 年最高气温、 平均气温、最低气温在年尺度和季节尺度上的线性趋势变化空间分布。整个流域的气温是一致升高的,升温 率在 0.20 ~ 0.60 ℃/(10 a)之间变化,流域上游和拉萨河流域升温最快。最高气温的升温率最小,平均气温 次之,最低气温的升温幅度最大。



图 2 1961—2014 年最高气温、平均气温、最低气温的年和季节趋势空间分布

Fig. 2 Distribution of the maximum temperature, mean temperature, minimum temperature and seasonal trends in 1961-2014

#### 3.1.2 降水演变特征

图 3 为雅鲁藏布江流域 1961—2014 年降水在年尺度和季节尺度上线性趋势的空间分布。由图 3 可知, 降水整体呈增加趋势,但上游部分区域降水呈减少趋势。春季除上游外,整个流域降水都是增加的,尤其是 下游地区;夏季下游地区降水减少,与该流域冰川退缩存在较好的对应关系<sup>[28]</sup>;秋季的空间分布与年尺度 类似;冬季时整个流域一致增加。



Fig. 3 Distribution of annual and seasonal trends of precipitation in 1961-2014

#### 3.2 下垫面演变规律

#### 3.2.1 植被时空变化特征

图 4 为 1982—2014 年雅鲁藏布江流域归一化植被指数(*I*<sub>NDV</sub>)的变化趋势。由图 4 可知, 1982—2014 年 *I*<sub>NDV</sub>变化范围为 0.25~0.28, *I*<sub>NDV</sub>呈不显著波动上升趋势,上升速率为 0.002/(10 a),表明近 33 a 间雅鲁藏 布江流域植被整体不断改善,植被覆盖度逐步提高。





图 5(a)为雅鲁藏布江流域归一化植被指数多年平均分布图,由图 5 可知,下游植被生长状况较中上游 好(下游 I<sub>NDV</sub>高于中上游), I<sub>NDV</sub>最大值可达 0.90,而中上游 I<sub>NDV</sub>值整体分布在 0~0.46 之间。图 5(b)反映了 流域年尺度 I<sub>NDV</sub>的变化情况,统计得到 Slope 大于 0 的网格占比为 63.7%,表明整体上流域归一化植被指数 得到改善,植被覆盖率不断提高。图 5(c)统计了通过 0.05 显著性检验的 I<sub>NDV</sub>趋势值,中游流域 I<sub>NDV</sub>呈显著 上升趋势,上游流域西北部和下游流域 I<sub>NDV</sub>呈显著下降趋势,表明中游流域植被得到改善,上游流域西北部 和下游流域植被存在退化现象。这与刘浏等<sup>[21]</sup>对雅鲁藏布江流域归一化植被指数研究的成果较为一致。



Fig. 5 Distribution of I<sub>NDV</sub> in Yarlung Zangbo River basin during the period of 1982-2014

3.2.2 积雪时空变化特征



对 2000—2016 年雅鲁藏布江流域积雪覆盖率年内变化进行统计 平均积雪覆盖率 资析。如图 6 所示, 5—9 月流域积雪覆盖率较小, 1—3 月流域积雪 覆盖率较大。2000—2016 年流域年内变化呈现出夏季小、冬春大的 特点。最大积雪覆盖率、平均积雪覆盖率、最小积雪覆盖率年内分 布均值分别为 49.12%、28.70% 和 12.41%。最小积雪覆盖率最小 值为 3.12%,出现在 7 月;最大积雪覆盖率最大值为 65.29%,出 现在 3 月。

 图7(a)为雅鲁藏布江流域积雪覆盖率分布。由图7(a)可知,
 10 11 12下游北部嘉黎附近积雪覆盖率较大,均值达到70%左右;下游河谷 至流域中游北部山区积雪覆盖率均值逐步减小,均值为10%~
 20%;中游雅鲁藏布江干流沿线积雪覆盖率最小,在3%以内。这
 bBan 等<sup>[29]</sup>研究得到积雪覆盖率在雅鲁藏布江流域的东北部相对高 于中部和南部区域的研究成果一致。







图 7(b)为雅鲁藏布江流域雪深变化率分布。上游雪深整体以增加为主,部分区域雪深变幅为-1.2~-0.5 m/(10 a);中下游雪深变化率较上游大,变幅为-1.2~0.8 m/(10 a),中游北部和下游东北部雪深 以减少趋势为主,最大可达-1.2 m/(10 a)。

### 3.2.3 冰川、冻土的演变特征

通过收集雅鲁藏布江流域 1976 年、2001 年、2013 年和 2017 年冰川数据研究流域近 40 a 冰川变化。结

果显示,近40 a 随着气温升高,冰川呈现快速退缩的趋势,变幅为-422.9 km<sup>2</sup>/(10 a),尤其是2013—2017 年冰川面积锐减了1 600 km<sup>2</sup>。随着冰川面积的加速退缩,在未来一段时间内冰川将不断减少乃至消失,这 将给流域水资源的开发、利用和配置带来巨大挑战。

为了探究雅鲁藏布江流域等温线与冻土分布的关系,同时由于流域内气象站点稀少,本文参考焦世晖 等<sup>[30]</sup>在青藏高原的研究方法,基于流域及周围 20 个国家气象站 1980—2017 年逐日气温数据,采用 Excel 对 流域 20 个气象站点 38 a 的年平均气温与海拔、纬度之间的关系进行多元线性回归分析,得到

$$Y = 39.87559 - 0.0052e - 0.48971l$$
(8)

式中:Y为多年平均气温, ℃;e为海拔,m;l为纬度, °N。

多元线性回归结果的  $R^2$  =0.7,且该结果通过 α 为 0.05 的 F 值检验,结果较为可信。因此,根据海拔和纬度数值便可利用式(1)计算出某点的平均温度。采用此公式,在流域上游及中游站点稀少的位置进行补点。基于补点和站点气温数据,利用地理分析软件的自然邻域法进行空间插值,计算得到流域年平均气温分布,见图 8。由图 8 可知,季节冻土分布较广,在流域的上中游均有分布,多年冻土主要分布在流域的上游前端和流域的东北部,非冻土主要分布在流域的东南部。流域上游前端的多年冻土年平均气温约 – 2 °C,流域东北部的多年冻土年平均气温约为 – 2 ~4 °C,这一研究结果与前人研究结论一致<sup>[30]</sup>。



图 8 雅鲁藏布江流域冻土分布及绘制的多年平均气温等温线



### 3.3 径流变化及其归因分析

#### 3.3.1 径流变化特征

(1)年内变化特征。雅鲁藏布江流域奴下、羊村等12个水文站径流的年内分布规律结果表明,月平均 径流的集中度值为0.18~0.72(图9(a)),主要集中在7—9月(图9(b)),且在空间上存在一定差异。一般 来说,5—9月是雅鲁藏布江流域的雨季,可以看出干流的雨季径流量占年径流总量的73%左右,空间差异 不大。黄俊雄等<sup>[31]</sup>基于雅鲁藏布江奴各沙、羊村、奴下3个水文站1956—1995年逐月流量数据,研究得到 雅鲁藏布江流域6—9月径流分配最丰,径流量占年径流总量的65%以上,本文研究结果与其较为一致。流 域内3个子流域(尼洋河、拉萨河和年楚河)的雨季径流总量占其年径流总量的比例分别为68%、79%和 83%,具有一定的空间差异。

整体上流域径流具有相似的年内分布规律,即主要集中在雨季。然而,从下游到上游,径流高值在流域 西部仅集中在8月份,在中部则主要在7—8月,而在东部地区多为6—9月,最大径流出现的月份逐渐延后 且持续时间变短。

(2)年际变化特征。通过对径流进行周期分析,得到干流年径流量存在 3~4 a 和 12~15 a 左右的不显著周期 变化,部分支流(拉萨、工布江达和日喀则水文站)为20 a 左右周期,同时各站均存在一个约30~33 a 的长周期且 通过了显著性检验。利用去趋势波动分析(DFA)方法分析了 12 个水文站年径流序列的尺度行为,除工布江 达和唐加水文站的 α<0.53 外,其余 10 个站点的 α 最小值为更张站年径流序列的 0.745,最大值为江孜站 的 0.963, 表明雅鲁藏布江干流及其主要支流的年径流过程具有明显的长程相关性, 并在 95% 置信水平下表现为正相关性。



Fig. 9 Monthly runoff series of each hydrological station

利用小波分析定义的各站年平均径流序列与降水序列的平均周期变化显示:降水序列具有 3~4 a、16 a 和 32 a 的周期,年径流序列相应具有 3~4 a、12 a、20 a 和 32 a 左右的周期,进一步表明径流的年际变化规律与降水变化具有相似性。

3.3.2 径流变化的量化归因分析

根据雅鲁藏布江干流上设置的3座水文站(奴各沙、羊村、奴下)的地理位置对雅鲁藏布江流域进行子流域划分,由此得到了4个子流域。但由于奴下站以东的区域缺少相关水文数据,无法准确有效地进行径流归因分析,因此本文只选取奴下站以西的3个子流域作为研究区域,这3个子流域由西至东依次被视为雅鲁藏布江流域的上游、中游以及下游(图10)。每个子流域中的径流量均由该子流域上下游两端的控制水文站决定:上游的径流量为奴各沙站实测径流量,中游的径流量为羊村站与奴各沙站径流量的差值,下游的径流量则为奴下站与羊村站径流量的差值。





结合中上游地区径流量的突变检验结果(表1),为了统一雅鲁藏布江流域3个分区的气候变化和下垫面 变化对径流变化的影响时期,选择1997年作为突变点,以确定本文的基准期和变化期,即基准期(I期)为 1966—1997年,变化期(II期)为1998—2015年。本文与张建云等<sup>[32]</sup>研究雅鲁藏布江奴下站实测年径流得 到的突变点分别发生在1966年和1998年一致。

Table 1 Change points detected by three statistical methods			
子流域	Pettitt 检验	滑动 t 检验	Mann-Kendall 检验
上游	1997 年 *	1997 年 * *	1997 年 * *
中游	1995 年 * *	1997 年 * *	1995 年 * *
下游	—	2000年*	—
雅鲁藏布江流域	1997年*	1997 年 * *	1996年**

表 1 通过 3 种统计方法检测到的变化点 Table 1 Change points detected by three statistical methor

注: \* 表示显著性水平为0.5; \*\* 表示显著性水平为0.05。

图 11 表明,气候、冰川径流和下垫面的变化对上游、中游和下游的径流变化表现出不同影响。与 I 期 相比, II 期上游、中游、下游的径流深分别增加了 29.08 mm、85.80 mm 和 20.67 mm。为了评估调整后的 Budyko 框架在雅鲁藏布江流域的适用性,本文对计算的径流量变化( $C(R_i)$ )与观测的径流量变化( $O(R_i)$ ) 之间的相对误差进行了计算,从图 11 中可以看到,所有 3 个子流域相对误差均低于 0.4%,表明本文所提出 的归因分析方法对于量化各因素对径流变化的影响是有效和可信的<sup>[25]</sup>。在上游,由降水变化( $\Delta P$ )、潜在蒸 散量变化( $\Delta E_m$ )、下垫面变化( $\Delta n$ )和冰川径流变化( $\Delta r$ )引起的径流增加的贡献分别为 – 0.81 mm、 – 1.54 mm、14.34 mm和 14.30 mm,对应的贡献率分别为 – 2.78%、– 5.30%、59.61%和 49.18%;以上 影响因素对中游径流增加的相应贡献分别为 33.77 mm、– 1.16 mm、31.24 mm 和 22.34 mm,对应的贡献率 分别为 39.36%、–1.36%、36.4%和 26.04%;而在下游, $\Delta P$ 、 $\Delta E_{T0}$ 、 $\Delta n$ 和  $\Delta r$ 对径流增加的贡献分别为 26.71 mm、–0.04 mm、–12.14 mm 和 6.16 mm,对应贡献率分别为 129.21%、–0.17%、–55.74%和 29.8%。





以上结果表明,以 n 表示的下垫面变化以及以 r 为代表的冰川径流变化对上游径流的增加起着主导作用; 而降水量的变化对中下游径流的增加影响最大,同时冰川径流也有着超过 25% 的不可忽略的贡献率。此外,本 文还对全流域径流量进行了归因分析, ΔP、ΔE<sub>m</sub>、Δn 和 Δr 对整个流域径流量增加的贡献率分别为 39.62%、 -2.74%、32.32% 和 30.94%,进一步说明了研究下垫面变化和冰川径流变化对径流变化的重要性。

目前,在雅鲁藏布江流域已开展许多径流归因分析工作,本文与以往研究的不同之处在于以往研究多集 中在中游和奴下站集水范围内,且作为一个整体进行考虑<sup>[33]</sup>;本文则尝试把奴下站集水区域划分为上游、 中游、下游3个子流域,深入分析了各子流域径流变化的原因,并量化降水变化、潜在蒸散量变化、下垫面 变化和冰川变化对径流变化的贡献。本文与 Wang 等<sup>[13]</sup>采用 Budyko 方法进行径流归因得到的结果偏差较大 的原因可能是:① 所采取得 Budyko 方法不同,例如在计算冰川径流时本文采用流域水量平衡计算,Wang 等<sup>[13]</sup>采用度日因子模型;② 采取的数据不同,不同数据由于融合或插值方法的不同,也会引起数据质量具 有一定的差异,最终也会使研究结果出现偏差。

# 4 结 论

本文在分析气象要素和下垫面演变特征的基础上,研究变化环境下雅鲁藏布江流域的径流变化规律及其 归因分析,得到以下几点结论:

(1) 1961—2014 年,整个流域的气温是一致升高的,升温率在0.20~0.60 ℃/(10 a)之间变化,降水整体呈增加趋势,但上游降水呈减少趋势。过去 50 a 来,流域气候向暖湿化方向发展。

(2)流域植被整体不断改善,植被覆盖度逐步提高。中游流域植被得到改善,上游流域西北部和下游流 域植被存在退化现象。上游雪深整体以增加为主,中游北部和下游东北部雪深以减少趋势为主。冰川呈快速 退缩的趋势,变幅为-422.9 km²/(10 a)。季节冻土在上中游均有分布,多年冻土主要分布在上游前端和流 域的东北部,非冻土主要分布在流域的东南部。上游前端的多年冻土年平均气温约-2℃,流域东北部的多 年冻土年平均气温约为-2~4℃。

(3)整体上流域径流具有相似的年内分布规律,主要集中在雨季。降水序列具有3~4a、16a和32a的 周期,年径流序列相应具有3~4a、12a、20a和32a左右的周期,径流的年际变化规律与降水变化具有相 似性。奴下站集水范围内降水变化、潜在蒸散量变化、下垫面变化和冰川变化对径流量增加的贡献率分别为 39.62%、-2.74%、32.32%和30.94%。

未来在高寒流域开展相关研究中,应加强以下几个方面的探索:① 加强气温、降水、冰川径流、融雪径流、 冻土水文等实测数据的观测工作,创新数据融合算法,提高融合数据的质量;② 加强流域尺度冰冻圈全要素各过 程的综合模拟,深入理解各要素在流域径流变化中的影响,深化对冰冻圈变化机理与过程的科学认识。 **致谢:**本文主要成果来源于项目研究报告,作者对所有项目参加人员表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- XUAN W D, XU Y P, FU Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China
   Journal of Hydrology, 2021, 597: 125761.
- [2] 杨志刚,卓玛,路红亚,等. 1961—2010 年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J].冰川冻土, 2014,36(1):166-172. (YANG Z G, ZHUO M, LU H Y, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on run-off in the Yarlung Zangbo River basin during 1961—2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 166-172. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1):
   1-6. (XIA J, MA X Y, ZOU L, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. "亚洲水塔"变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209. (YAO T D, WU G J, XU B Q, et al. Asian water tower change and its impacts [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209. (in Chinese))
- [6] SHI Y, GAO X J, ZHANG D F, et al. Climate change over the Yarlung Zangbo-Brahmaputra River basin in the 21st century as

simulated by a high resolution regional climate model [J]. Quaternary International, 2011, 244(2): 159-168.

- [7] 赵林,胡国杰,邹德富,等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233-1246. (ZHAO L, HU G J, ZOU D F, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1233-1246. (in Chinese))
- [8] 杜嘉妮, 蔡宜晴, 王岗. 长江源区径流变化归因分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 73-78. (DU J N, CAI Y Q, WANG G. Attribution analysis of runoff in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 73-78. (in Chinese))
- [9] KONAPALA G, MISHRA A K. Three-parameter-based streamflow elasticity model: application to MOPEX basins in the USA at annual and seasonal scales[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(6): 2545-2556.
- [10] 白君瑞,徐宗学,班春广,等. 基于 Z 指数的雅鲁藏布江流域径流丰枯变化及其特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 715-723. (BAI J R, XU Z X, BAN C G, et al. Runoff variation and characteristics in Yarlung Zangbo River by Z-index [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(6): 715-723. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 田富强,徐冉,南熠,等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. 水科学进展,2020,31(3):324-336. (TIAN F Q, XU R, NAN Y, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 324-336. (in Chinese))
- [13] 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(21): e2020JD034367.
- [14] CAI M Y, YANG S T, ZHAO C S, et al. Insight into runoff characteristics using hydrological modeling in the data-scarce Southern Tibetan Plateau: past, present, and future[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0176813.
- [15] LI B Q, ZHOU W, ZHAO Y Y, et al. Using the SPEI to assess recent climate change in the Yarlung Zangbo River basin, South Tibet[J]. Water, 2015, 7(10): 5474-5486.
- [16] HOERLING M, HURRELL J, EISCHEID J, et al. Detection and attribution of twentieth-century Northern and Southern African rainfall change[J]. Journal of Climate, 2006, 19(16): 3989-4008.
- [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] LI H, LIU L, LIU X C, et al. Greening implication inferred from vegetation dynamics interacted with climate change and human activities over the Southeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2421.
- [19] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征[J]. 地理学报, 1999, 54(S1): 157-164. (LIU T C. Hydrological characteristics of Yarlung Zangbo River[J]. Acta Geographica Sinica. 1999, 54(S1): 157-164. (in Chinese))
- [20] 黄浠, 王中根, 桑燕芳, 等. 雅鲁藏布江流域不同源降水数据质量对比研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 339-348. (HUANG X, WANG Z G, SANG Y F, et al. Precision of data in three precipitation datasets of the Yarlung Zangbo River basin[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 339-348. (in Chinese))
- [21] 刘浏,牛乾坤,衡静霞,等.雅鲁藏布江流域干湿转换特征及植被动态响应[J].农业工程学报,2020,36(2):175-184.
   (LIU L, NIU Q K, HENG J X, et al. Characteristics of dry and wet conversion and dynamic vegetation response in Yarlung Zangbo River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 175-184. (in Chinese))
- [22] CHE T, LI X, JIN R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [23] YE Q H, ZONG J B, TIAN L D, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: mid-1970s-2000-13[J]. Journal of Glaciology, 2017, 63(238): 273-287.
- [24] ZOU D F, ZHAO L, SHENG Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [25] XIN J L, SUN X Y, LIU L, et al. Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14069.
- [26] BUDYKO M I. Climate and life [M]. New York: Academic Press, 1974.

- [27] SCHAAKE J C. From climate to flow [M] // WAGGONER P E. Climate Change and US. New York: John Wiley, 1990: 177-206.
- [28] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.
- [29] BAN C G, XU Z X, ZUO D P, et al. Vertical influence of temperature and precipitation on snow cover variability in the Yarlung Zangbo River basin, China[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2): 1148-1161.
- [30] 焦世晖,王凌越,刘耕年.全球变暖背景下青藏高原多年冻土分布变化预测[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(2):249-256. (JIAO S H, WANG L Y, LIU G N. Prediction of Tibetan Plateau permafrost distribution in global warming [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(2):249-256. (in Chinese))
- [31] 黄俊雄, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析[J]. 水文, 2007, 27(5): 31-35. (HUANG J X, XU Z X, GONG T L. Characteristics and driving factors of the runoff variations in the Yarlung Zangbo River[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(5): 31-35. (in Chinese))
- [32] 张建云,刘九夫,金君良,等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273. (ZHANG J Y, LIU J F, JIN J L, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1264-1273. (in Chinese))
- [33] 刘金平,任艳群,张万昌,等.雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J].冰川冻土,2022,44(1):275-287. (LIU J P, REN Y Q, ZHANG W C, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 275-287. (in Chinese))

# Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin<sup>\*</sup>

XU Zongxue<sup>1,2</sup>, BAN Chunguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Study on the evolution law of hydrological cycle and water resources driven by climate change is not only an important scientific issue, but also a global issue of concern to the international community. The Yarlung Zangbo River basin was selected as the study area. Linear trend estimation and multiple linear regression methods were applied to test the change characteristics of meteorological factors, and to reveal the evolution law of underlying surface. The elastic coefficient method based on Budyko framework was applied to analyze the runoff changes and make attribution analysis. Results showed that from 1961 to 2014, the temperature in the entire Yarlung Zangbo River basin showed an upward trend, and the precipitation showed an increasing trend, indicating that the Yarlung Zangbo River basin was experiencing climate warming and wetting. The vegetation showed a greening trend, while there was a certain degradation in the northwest and downstream. The annual runoff series showed the cyclic periods of 3-4 years, 12 years, 20 years and 32 years. The contribution of precipitation, potential evapotranspiration, underlying surface and glacier changes to the increase of runoff accounted on 39.62%, -2.74%, 32.32% and 30.94%, respectively. The results have significant reference for understanding the runoff evolution law of the Yarlung Zangbo River basin under the condition of climate changing and underlying surface changing.

Key words: runoff; attribution analysis; climate change; underlying surface; Yarlung Zangbo River

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 91647202).