

1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析

李浩^{1,2}, 牛乾坤^{1,2}, 王宣宣^{1,2}, 刘浏^{1,2}, 徐宗学^{3,4}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083;
3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 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: 基于雅鲁藏布江流域奴下水文站 1961—2015 年逐月径流量资料, 采用启发式分割算法识别径流突变年份, 继而采用 Mann-Kendall 非参数检验分析径流的长期变化趋势, 应用集中度和集中期研究径流的年内变化规律。结果表明: (1) 年径流量呈现先减少后增加的变化趋势, 且转折点为 1992 年, 即年径流量在转折点前以 2.715 mm/a 的速率呈现显著的下降趋势, 但在转折点后呈现不显著的上升趋势; (2) 湿润季径流量占全年径流量的 71.6%±4.4%, 主导着雅鲁藏布江流域的年径流量变化过程, 而在转折点后干旱季径流的变化是年径流呈现增加趋势的另一个重要原因; (3) 雅鲁藏布江流域的径流年内分配规律呈“坦化现象”, 即径流量最大值出现时间推迟且年内分配更加均匀, 这可能归因于该地区植被覆盖状况的恢复和改善。研究结果可以进一步识别气候变化和下垫面在径流变化过程中的作用奠定良好的基础, 为区域生态环境可持续发展提供建议和指导。

关键词: 径流; 年内分配; 启发式分割算法; 归因分析; 雅鲁藏布江流域

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)01-0110-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.016

Variation Characteristics of Runoff in the Yarlung Zangbo River Basin from 1961 to 2015

LI Hao^{1,2}, NIU Qiankun^{1,2}, WANG Xuanxuan^{1,2}, LIU Liu^{1,2}, XU Zongxue^{3,4}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083; 2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875)

Abstract: Based on the monthly runoff data of Nuxia hydrological station in the Yarlung Zangbo River Basin from 1961 to 2015, the heuristic segmentation method was used to identify the year of abrupt runoff, and Mann-Kendall nonparametric test was used to analyze the long-term variation trend of runoff, and the concentration degree and concentration period were used to study the inner-annual changing patterns of runoff. The results indicated that: (1) The annual runoff showed a significant decrease trend first with the decreasing rate of 2.715 mm/year before 1992, and then an increase trend after 1992. (2) The runoff in the humid season accounted for 71.6%±4.4% of the annual runoff, which dominated the runoff dynamic change of the Yarlung Zangbo River Basin. After the turning point, the increasing of runoff in the dry season was another important reason for the increasing trend of annual runoff. (3) The annual runoff distribution in the Yarlung Zangbo River Basin presented a “smoothing phenomenon”, that was, the occurrence time of the maximum runoff was delayed and the annual distribution was more uniform, which might be attributed to the restoration and improvement of vegetation coverage in the region. The results obtained in this study could lay a good foundation for further identifying the role of climate change and underlying surface in runoff change process, and provide practical suggestions and guidance for the sustainable development of regional ecological environment.

Keywords: runoff; intra-annual distribution; heuristic segmentation method; attribution analysis; Yarlung Zangbo River Basin

以全球变暖为主要特征的气候变化显著改变了水文循环过程,这对自然生态系统和人类社会产生了非常深刻的影响。例如,水文循环过程的改变将增加极端水文事件的发生频率,改变水资源的时空分布,破坏生态环境,并加剧地区发展不平衡、不充分的现状^[1]。同时,2020 年第 28 届世界水日的主题为“Water and Climate Change”,呼吁将应对全球气候变化摆在解决水资源问题的首要位置,这进一步强调了气候变化对水资源的重要影响。此外,工业革命以来人类活动对流域水文过程的干预强度日益增大,在时间和空间、数量和质量上都显著地改变了水文循环要素^[2]。由中国政府主导的生态恢复工程如植树造林和退耕还草等改变了流域下垫面特征,影响了能量平衡,进而改变水文循环过程^[3]。城镇化措施如路面硬化等工程会减少降水的下渗量,从而增大地表产水量,最终对城市防洪体系带来巨大的压力^[4]。河川径流作为水量平衡(water balance)中的重要组成部分,是关系自然环境变化和人类社会进步的重要资源,直接影响着农业灌溉和生产、生态保护和修复以及经济发展和稳定^[5-6]。因此,明晰和理解变化环境下的径流演变规律可以为进一步识别气候变化和下垫面在径流变化过程中的调节和控制作用打下良好的基础,从而为区域生态环境发展和人类生产活动提供建议和指导。

青藏高原作为“世界屋脊”“亚洲水塔”和“世界第三极”^[7],是亚洲地区主要河流(黄河、长江、怒江、印度河、雅鲁藏布江和澜沧江等)的发源地^[8],也是亚洲地区和全球的生态安全屏障^[9]。雅鲁藏布江流域位于青藏高原南部,平均海拔在 4 000 m 以上,是印度洋暖湿气流进入青藏高原腹地的重要水汽通道^[10]。流域源头的国家级生态功能保护区为西藏经济中心带和下游大峡谷地区提供了重要的生态安全屏障,流域中游的一江两河区域(雅鲁藏布江、年楚河和拉萨河)则是西藏地区重要的商品粮基地和人口聚集地^[11]。此外,雅鲁藏布江是一条重要的国际河流,其水资源变化关系着下游东南亚国家的经济发展和社会稳定。但是,相关研究指出近年来雅鲁藏布江流域的气候和下垫面状况发生了明显的变化,这可能会改变径流过程。Hoerling 等^[12]研究表明,流域中游年、季节平均气温显著增高,年降水却呈现先减少后增加的趋势,从而导致流域呈现先变干后变湿的状况。周顺武等^[13]研究表明,流域中游地区呈现暖干化的趋势,具体表现为气温显著增加但降水减少。Li 等^[14]基于 MODIS NDVI 数据分析了雅鲁藏布江流域的植被覆盖状况,结果表明气候—下垫面—水文间的耦合关系促进了该区域在 2000 年后呈现显著的变绿过程。所

以,研究变化环境下雅鲁藏布江流域的径流演变规律不仅是径流变化归因的基础工作,而且可以为高寒山区水资源利用、生态环境保护、社会经济可持续发展提供科技支撑和决策依据。

因此,本研究收集了雅鲁藏布江流域奴下水文站 1961—2015 年的月平均径流资料,采用启发式分割算法识别径流突变年份,继而基于 Mann-Kendall 趋势检验分析径流的长期变化趋势,最后应用集中度和集中期研究径流年内变化规律。研究结果旨在明晰雅鲁藏布江流域径流演变规律,为进一步识别和判断径流量变化的驱动因子奠定良好的基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江流域位于“世界第三极”青藏高原的南部,流域面积约为 240 000 km²,流域海拔跨度大(210~7 026 m),气候复杂多样,在空间上呈东西向的狭长柳叶状(图 1)。作为地球上海拔最高的河流,雅鲁藏布江发源于流域西部的杰马央宗冰川,自西向东贯穿青藏高原南部,流经西藏自治区众多县市,并在南迦巴瓦峰附件形成独特的大拐弯。其流出中国国境后,在印度阿萨姆邦境内与其他 2 条河流汇合后称为布拉马普特拉河,在孟加拉国境内与恒河汇合并形成恒河三角洲,最后注入孟加拉湾。

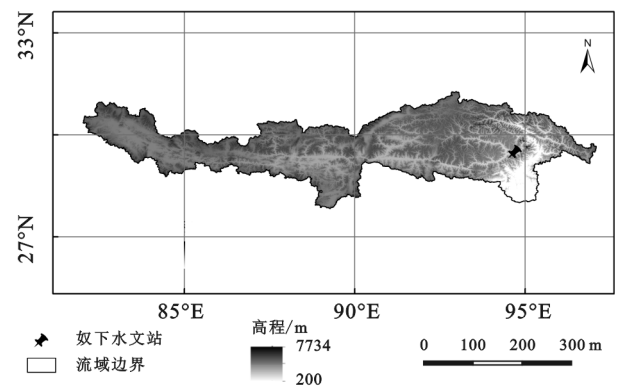


图 1 雅鲁藏布江流域

由于高程对水文气候的再分配效应,雅鲁藏布江流域在空间上呈现下游暖湿、上游干冷的地理格局^[15]。具体而言,流域上游的高海拔地区寒冷少雨,年平均降水量不足 300 mm;中游地区温暖多雨,年降水量 300~600 mm;下游地区暖湿多雨,年平均降水量普遍在 4 000 mm 以上。此外,年内降水表现为干、湿交替的规律,即湿润季(6—9 月)降水量占全年降水量的 65%~80%,而干旱季(10 月至翌年 4 月)降水量稀少。

1.2 研究数据

奴下水文站位于雅鲁藏布江流域干流,控制了该流域 80% 以上的流域面积^[16],是青藏高原地区重要

的水文站点之一。因此本研究收集并分析了奴下水文站 1961—2015 年的逐月径流量资料,以期揭示该地区长时间尺度的径流演变规律。另外,本研究使用径流量和径流深时不加以区分。

1.3 研究方法

本研究首先采用启发式分割算法识别径流变化过程中的突变年份,然后基于 Mann-Kendall 非参数检验诊断径流变化趋势,最后应用集中度和集中期描述径流年内变化规律。

1.3.1 启发式分割算法 给定一个时间 i ,依顺序滑动并分割长度为 N 的时间序列 X_t ,分割点 i 左边和右边部分的平均值为 $\mu_1(i)$ 和 $\mu_2(i)$,标准差为 $s_1(i)$ 和 $s_2(i)$,长度分别为 N_1 和 N_2 ,因此分割点 i 的合并偏差 $S_D(i)$ 计算公式^[16]为:

$$S_D(i) = \left(\frac{(N_1-1)s_1^2 + (N_2-1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \right) \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right) \quad (1)$$

此外,使用 T 检验衡量分割点 i 左右两边子序列间的均值差异显著性,统计量 $T(i)$ 计算公式为:

$$T(i) = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{S_D} \right| \quad (2)$$

T 检验统计量的最大值 ($T_{\max}$) 表明在该时间点 t 左右两边的子序列的均值差异达到最大,因此,最大值 $T_{\max}$ 对应的显著性概率 $P(T_{\max})$ 计算公式^[17]为:

$$P(T_{\max}) \approx (1 - I_x(v(v + t_{\max}^2)))(\delta_v, \delta_t)^\eta \quad (3)$$

式中: $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$, $v = N - 2$, $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数。

对新得到的 2 个子序列分别重复上述操作,当子序列与其左、右相邻的子序列间均值的差异程度有 $P(T_{\max}) \geq P_0$ 时,则对子序列进行分割,否则不分割。如此重复直至所有的子序列都不可分割为止。此外,当子序列的长度 $\leq l_0$ 时也不再对子序列进行分割。基于上述操作,原序列将被分割为若干不同均值的子序列,分割点即为均值突变点。通常情况下, P_0 取值范围为 0.50~0.95, l_0 的取值则不应小于 25^[18]。

1.3.2 Mann-Kendall 非参数检验 Mann-Kendall 非参数检验能够很好地诊断非正态分布变量的变化趋势和显著性,在水文气象领域具有广泛的应用^[19-20]。Mann-Kendall 的计算原理为:给定一个时间序列 $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,计算统计量 Z_c ,计算公式为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{s}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{s}} & s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$, $1 < i < j < n$ 。

此外,本研究中采用森斜率法进行变化率的计算,计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (5)$$

1.3.3 集中度和集中期 刘贤赵等^[21]基于研究降水量年内分配的向量法思想,构建了描述径流量年内分配不均匀性的指标,即径流集中度和集中期。该指标能够反映径流在年内的集中程度以及最大径流量出现的时段。

该方法首先将某月经流量的大小作为该月经流矢量的模,所处的月份作为该月经流矢量的方向,以此构建 12 个月的月经流矢量,然后将各月经流量以矢量求和的方式进行累加计算,最后计算径流集中度(RCD, runoff concentration degree)和径流集中期(RCP, runoff concentration period)。具体计算公式为:

$$\text{RCD} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / R_{\text{ave}} \quad (6)$$

$$\text{RCP} = \arctan(R_x / R_y) \quad (7)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i, R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \quad (8)$$

式中: R_{ave} 为年径流量; R_x 、 R_y 分别为矢量合成量的水平分量和垂直分量; r_i 为第 i 月的径流量; θ_i 为第 i 月对应的矢量角度。

根据集中度和集中期的定义可知,集中度为介于 0~1 的数值,反映了径流量年内的非均匀分布特征,而集中期则反映了径流最大值在 1 年中出现的时间,用角度值来表示,其中 1 月到 12 月的方向是以 0 为首, 30° 为增量的递增数列。

2 结果与分析

2.1 径流突变识别

本研究采用启发式分割算法识别雅鲁藏布江流域奴下水文站年径流变化过程的突变年份。值得注意,启发式分割算法中的参数 P_0 在本研究中设定为 0.90, l_0 设定为 25。基于启发式分割算法的 T 检验统计量变化见图 2。结果表明, T 检验统计量在 1992 年达到最大值,约为 3.0,这说明奴下水文站的年径流量在 1992 年可能发生突变。更进一步,根据公式(3)计算 T 检验统计量最大值处的显著性概率 $P(T_{\max})$,如果 $P(T_{\max}) > P_0$,则认为该突变是显著的。计算结果表明, T 检验统计量最大值处(1992 年)的显著性概率为 0.93 > 0.90,这进一步证明奴下水文站年径流序列在 1992 年发生突变的可靠性。

2.2 径流年际变化趋势

以 1992 年作为转折点,本研究利用 Mann-Kendall 非参数检验和森斜率法计算了转折点前和转折点后的年径流变化趋势。由图 3 可知,奴下水文站的年径流量在转折点前后发生了明显的变化,即在转折

点前,奴下站年径流量以 2.715 mm/a 的速率呈现显著的下降趋势($p<0.05$),但在转折点后呈现上升趋势($p<0.10$)。由此,雅鲁藏布江流域奴下水文站的年径流量在 1992 年前后呈先减少后增加的变化形态,且转折点后上升趋势不显著。

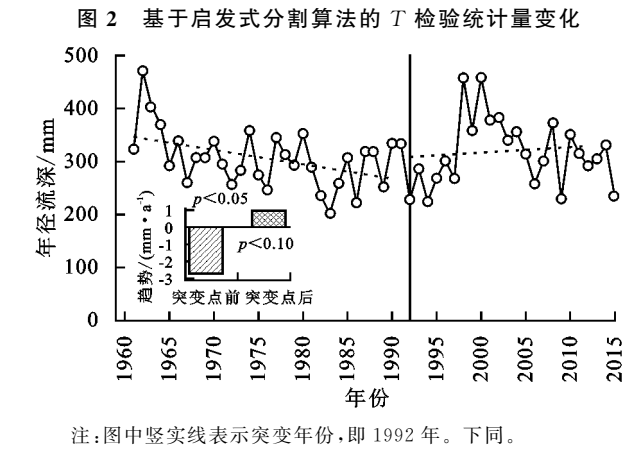
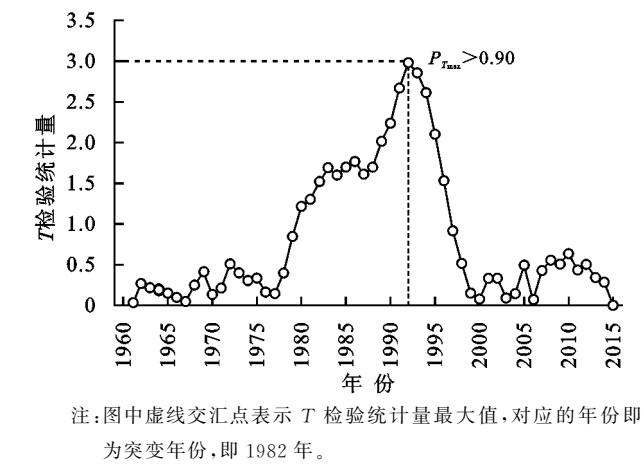


图 3 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流年际变化

本研究进一步分析了雅鲁藏布江流域各月的径流量在转折点前后的变化趋势(图 4),结果表明,在转折点前,各月径流量均呈现下降趋势,这与年径流量的变化趋势呈现一致的变化。其中,湿润季各月(6—9 月)的径流量减少趋势较大,这说明湿润季径流量的下降是年径流量在转折点前呈现显著下降的主要原因。但是转折点后湿润季各月(除 7 月外)的径流量变化趋势与年径流量变化相反,即转折点后年径流呈现增加趋势,但湿润季径流量呈现减少趋势。值得注意,虽然转折点后湿润季径流呈现下降趋势,但是相比转折点前,其下降速率变小。同时,干旱季各月(10 月至翌年 4 月)的径流变化与转折点后的年径流变化趋势相一致,呈现上升趋势,这说明该干旱季径流变化是雅鲁藏布江流域年径流量在转折点后呈现增加趋势的一个重要原因。刘剑等^[22]研究表明,雅鲁藏布江显著的增温趋势加速了冰雪消融从而提高冰川覆盖地区的春季径流量,因此冰川积雪融化对该地区河川径流的形成过程中发挥越来越重要的作用。

2.3 径流年内变化特征

由图 5 可知,奴下水文站的径流量在 1—3 月呈现缓慢下降趋势,随后急剧增加并在 8 月达到最大值,8—12 月呈现下降趋势。位于雅鲁藏布江流域中游的“一江两河”区域是西藏地区重要的人口聚集地和农业灌溉区,因此该地区的早春的农田灌溉可能是导致流域径流量在 3 月下降的主要原因。雅鲁藏布江流域湿润季的径流量占全年径流量的 $71.6\% \pm 4.4\%$,这表明该地区的年径流量变化过程主要受到湿润季径流的控制。以上分析表明,雅鲁藏布江流域的径流年内分配过程主要受到气候变化和人类活动的双重作用,表现为径流量在湿润季集中,并且干旱季径流受到明显的农田灌溉等非气候因素的影响。同时,本研究也发现,转折点后除 8 月外的各月径流深均大于转折点前的径流深。

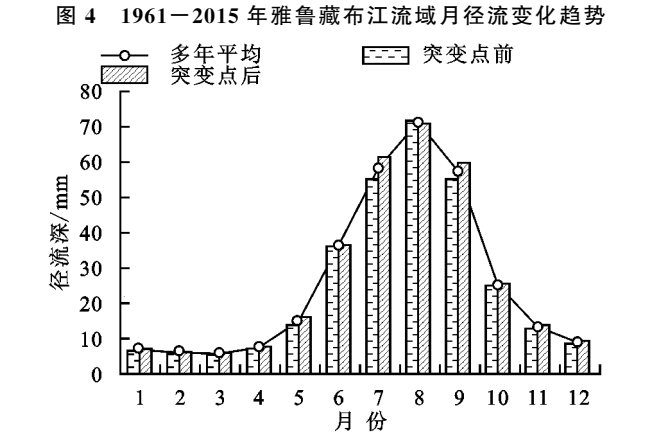
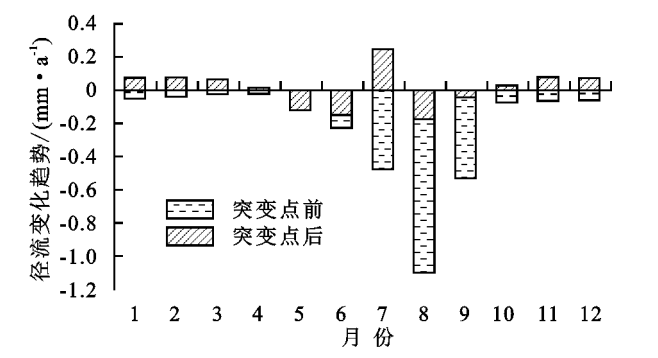


图 5 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流的年内变化

图 6 和图 7 分别反映了 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流集中度和集中期的年际变化。奴下站的径流集中度在 1961—2015 年间以 $0.000 6/a$ 的速率呈现显著的下降趋势($p<0.05$),而集中期呈现显著的增加趋势($p<0.05$),这说明奴下站径流量在年内呈现“坦化现象”,即径流最大值推迟出现且年内分配更加均匀。该地区的径流集中度主要受到西风 and 印度洋季风的相互作用以及水汽输送等因素的影响^[23],因此降水变化可能是雅鲁藏布江流域的径流年内变化的一个重要原因。此外,下垫面变化也显著地调节了径流的年内分配规律。中国政府针对 20 世

纪 90 年代以来雅鲁藏布江流域植被覆盖低和土地退化严重等现状,制定了全方位的生态保护规划,在流域源头建立国家生态功能保护区,在人口密度大、工农业集中的一江两河区域实施植树种草、防沙治沙的措施,在流域下游的雅鲁藏布江大峡谷成立国家级自然保护区以保护生态环境。这些措施都改善了该区域的植被覆盖状况,从而提高了植被对降水的再分配能力,进而调节了径流年内分配。同时,基于遥感卫星数据的植被—气候关系研究^[24]也表明,气候变暖延长了植被生长季节,从而改善了该地区的植被覆盖度。

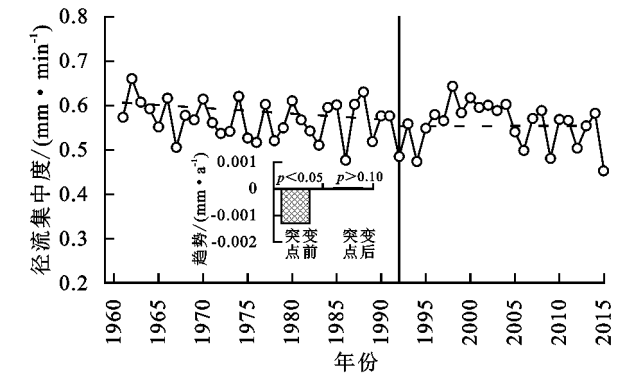


图 6 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流集中度变化

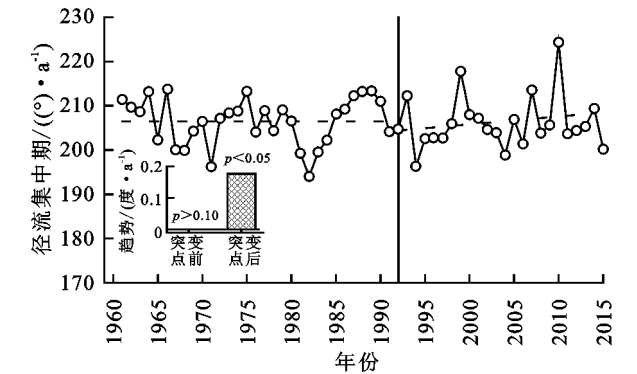


图 7 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流集中期变化

3 结论

- (1)雅鲁藏布江流域奴下水文站的年径流量呈现先减少后增加的变化趋势,且转折点为 1992 年。在转折点前,奴下站年径流量以 2.715 mm/a 的速率呈现显著的下降趋势,但在转折点后呈现不显著的上升趋势。
- (2)湿润季径流量占全年径流量的 71.6%±4.4%,主导着雅鲁藏布江流域的年径流量变化过程,而在转折点后,干旱季径流是年径流呈现增加趋势的一个重要原因,这可能归因于流域变暖导致冰雪消融,从而增大了干旱季的径流量。
- (3)雅鲁藏布江流域径流的年内分配规律呈现“坦化现象”,即最大值出现时间推迟且年内分配更加均匀,这可能归因于气候变暖促进该地区植被覆盖状况的改善。

本研究收集奴下水文站 1961—2015 年的月径流资料,采用启发式分割算法、Mann-Kendall 趋势、集中度和集中期系统分析了雅鲁藏布江流域径流的年内和年际变化规律,为进一步识别径流变化的驱动力奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] Greve P, Orlowsky B, Mueller B, et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land [J]. Nature Geoscience, 2014, 7(10): 716-721.
- [2] Abbott B W, Bishop K, Zarnetske J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(7): 533-540.
- [3] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [4] Li Y, Li H X, Huang J X, et al. An approximation method for evaluating flash flooding mitigation of sponge city strategies: A case study of Central Geelong [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 1-13.
- [5] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [6] Qin Y, Abatzoglou J T, Siebert S, et al. Agricultural risks from changing snowmelt [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(5): 459-465.
- [7] 伊云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响 [J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1481.
- [8] 莫申国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88-96.
- [9] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈 [J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [10] Li Y, Su F G, Chen D L, et al. Atmospheric water transport to the endorheic tibetan plateau and its effect on the hydrological status in the region [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(23): 12864-12881.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周顺武, 吴萍, 王传辉, 等. 青藏高原夏季上空水汽含量演变特征及其与降水的关系 [J]. 地理学报, 2012, 22(5): 795-809.

- [14] 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):e2421.
- [15] Li H, Liu L, Shan B Y, et al. Spatiotemporal variation of drought and associated multi-scale response to climate change over the Yarlung Zangbo River Basin of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(13):e1596.
- [16] 龚志强,封国林,万仕全,等.基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征[J].物理学报,2006,55 (1):477-484.
- [17] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.
- [18] 封国林,龚志强,董文杰,等.基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J].物理学报,2005,54(11):5494-5499.
- [19] Chen T X, Zhang H X, Chen X, et al. Robust drying and wetting trends found in regions over China based on Köppen climate classifications [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(8):4228-4237.
- [20] Zarch M A, Sivakumar B, Sharma A. Assessment of global aridity change [J]. Journal of Hydrology, 2015, 520:300-313.
- [21] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等.基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J].地理科学,2007,27(6):791-795.
- [22] 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.
- [23] Curio J, Scherer D. Seasonality and spatial variability of dynamic precipitation controls on the Tibetan Plateau [J]. Earth System Dynamics, 2016, 7(3):767-782.
- [24] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(8):791-795.
- (上接第 109 页)
- [21] 崔明,张旭东,蔡强国,等.东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J].地理研究,2008,27(3):527-535.
- [22] 刘丽.黑龙江省黑土有机碳的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [23] 王彬.土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [24] 李俊伟,佟金,胡斌,等.不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J].农业工程学报,2019,35(6):130-140.
- [25] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154.
- [26] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-9.
- [27] Wang L, Zheng F L, Zhang X J, et al. Discrimination of soil losses between ridge and furrow in longitudinal ridge-tillage under simulated upslope inflow and rainfall [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198:e104541.
- [28] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21 (6):509-515.
- [29] Gatto L W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: potential impacts on soil erosion [J]. Geomorphology, 2000, 32(1):147-160.
- [30] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等.蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.
- [31] 范昊明,钱多,周丽丽,等.冻融作用对黑土力学性质的影响研究[J].水土保持通报,2011,31(3):81-84.
- [32] Lehrs G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter: Reply [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5):1659-1659.
- [33] Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review [J]. Pedosphere, 2016, 26(2):167-179.