

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0036

LIU Jinping, REN Yanqun, ZHANG Wanchang, 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. [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.]

雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化 对径流的影响研究

刘金平^{1,2}, 任艳群¹, 张万昌², 陶 辉³, 易 路⁴

(1. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 西湖大学 工学院 浙江省 海岸带环境与资源研究重点实验室, 浙江 杭州 310024)

摘 要: 典型高原寒区雅鲁藏布江流域径流变化是反映该区域气候和下垫面变化的重要指标。在全球升温背景下, 由于观测资料稀缺, 导致缺乏针对整个流域的气候和下垫面变化对径流影响的研究。因此, 本研究基于1986—2010年的气象数据和奴下水文站月尺度、动态土地利用数据等, 利用改进的水文模型并结合不同的模拟策略厘清了流域1991—2010年不同时段间气候和下垫面变化对径流的影响。结果表明: 在1991—2010年期间, 不同时段间气候和下垫面变化对径流变化的贡献率差异较大, 气候变化对径流变化的贡献率高于下垫面变化, 且使径流量增加。从空间上看, 气候变化对流域产流的贡献率在上游和中游都较大, 在下游东北部的贡献率较小, 而在该区域下垫面变化的贡献率较大。雪冰融水径流呈增加的趋势, 对年径流的平均贡献率在21.1%~48.6%范围内, 多年平均贡献率为33.6%; 雪冰融水径流一般从4月开始增大, 8月达到最大, 10月达到消融末期。本研究的开展和发现既是雅鲁藏布江流域水文、水资源基础性研究的需要, 具有重要的理论研究意义, 同时也可为该流域的水资源保护、规划与管理提供科学理论和决策依据, 具有重要的现实意义。

关键词: 气候变化; 下垫面变化; 径流; 雪冰径流; 雅鲁藏布江流域

中图分类号: P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0275-13

0 引言

水是一种重要的自然资源和战略经济资源, 在维系和促进经济社会可持续发展方面发挥着不可替代的作用, 也是大气环流和水文循环过程中的重要因素, 最易受到气候变化的直接影响^[1-4], 这种影响因土地利用等条件的不同而存在着巨大的区域差异和不确定性^[5], 导致水资源在时间和空间上的重新分配以及水资源总量的改变, 增加洪涝、干旱等极端灾害发生的频率和强度^[6-10]。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(AR5)证实了20世纪以来全球气候变暖的事实^[11]。在全球气候变化

的驱动下, 雅鲁藏布江流域以冰川强烈退缩、季节性积雪变化明显、部分湖泊扩张(如然乌湖)、土地覆被变化为主要特征的下垫面条件发生着剧烈的变化^[12-13], 导致了流域径流的变化^[14-17]。

国内外学者在气候变化和下垫面变化对径流影响方面的研究, 可以概括为以下三种方法^[18]: 第一种是流域对比试验法, 适用于较小流域中消除气候变化的影响^[19]; 第二种是水文特征参数法, 利用简单的数理统计方法对长时间序列的水文特征参数进行统计分析, 未考虑水文过程的空间异质性和气候变化的机制, 适用于下垫面条件比较均匀和降水量空间差异不大的流域^[20-21]; 第三种是流域水文

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602302); 青海省重点研发转化项目(2020-SF-C37)资助

作者简介: 刘金平, 讲师, 主要从事全球变化水循环研究. E-mail: liujp@radi.ac.cn

通信作者: 任艳群, 讲师, 主要从事陆表水文过程研究. E-mail: renyanqun@ncwu.edu.cn

模型模拟法,尤其是随着遥感技术的快速发展,利用分布式水文模型研究气候变化或下垫面变化对径流的影响已经成熟^[22-24]。与前两种方法相比,流域水文模型模拟法不仅考虑了空间异质性,而且具有更好地描述水文物理过程的优势,总体思路是先建立水文模型,制定不同的气候和土地利用模拟策略进行模拟,最后根据获得的模拟径流厘清气候变化和下垫面变化对径流的贡献。尽管在这一领域已经做了大量研究,由于对深层机制认识不足,导致在不同流域其气候变化和下垫面变化对径流的影响结论未能达成一致^[18]。此外,现有的一些研究主要集中在单一环境因子变化对径流的影响,其中包括下垫面变化或气候变化。针对雅鲁藏布江流域的径流变化及其影响因素研究已存在大量的工作,主要集中在对径流演变规律进行分析^[15,25-26]和气候变化对径流的影响研究^[6,16,27-28]。但是在雅鲁藏布江流域厘清气候和下垫面变化对径流贡献方面的研究较为缺乏,在这方面仅有的研究主要位于中游^[29]和奴下站集水范围内^[13],未能进行全流域研究,这一定程度上是由于该流域基础数据资料匮乏、水文气象站点布设不足且分配不均等^[30-32],如在流域出口处无水文观测站点。另外,雅鲁藏布江流域雪冰分布广泛,积雪和冰川作为特殊的下垫面类型,易受到气候变化的影响,有研究估计雪冰融水约占总径流的30%以上^[33],但其作为特殊的下垫面对径流的定量影响尚未有相关报道。因此,如何改善雅鲁藏布江流域径流影响机制的分析手段成为流域合理开发利用的一大难题,这也是目前高原寒区流域研究中亟待解决的问题之一^[34]。

综上,流域水文模型结合卫星数据的模拟系统无疑为资料匮乏的高原寒区流域研究提供了一种理想的重要手段^[35]。水文模型通过对水文过程的物理概化,利用计算机数值模拟方式,实现流域产汇流过程及地表径流和地下径流等水文过程变量的计算。尤其是近几十年快速发展起来的集成3S技术的分布式水文模型将最新获取的遥感下垫面信息和降水空间数据作为模型参数输入,通过数值模拟再现流域内部空间降雨-径流形成直至最后汇至流域出口的时空过程,发展相对成熟的模型如SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型、TOP-MODEL模型和SHE(System Hydrologic European)模型等。但是以上提到的模型在现阶段由于未全面考虑寒区流域水文的冰川和冻土两大特性,以至

于不能准确模拟高原寒区流域的水文过程。Zhao等^[36]基于VIC(Variable Infiltration Capacity)模型框架改进的VIC-CAS模型虽然能够有效的针对单条冰川进行模拟,但是VIC模型具有的大尺度的特性不能满足本研究要求高空间分辨率的需求(1 km×1 km)。而渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型ESSI(infiltration Excess and Saturation excess Soil-water dynamic Integration model for hydrology)由于考虑了高寒山区的下垫面特征具有较高的模拟精度,在寒旱区的黑河流域模拟月径流的精度达0.92(Nash-Sutcliffe效率系数)^[37]。ESSI模型是由张万昌团队研建而成,以栅格为基本单元,考虑并设计了水文模拟时段内水文年的丰、平和枯的不同情况,也具有积雪模块,但该模型在降水聚集状态判定及融雪量上存在一定的不足,为了提高在雅鲁藏布江流域的模拟精度,需要对ESSI模型进行改进。

因此,本研究以典型的高原寒区雅鲁藏布江流域为研究区,基于ESSI模型并改进其降水聚集状态判定及融雪量计算模块,采用动态下垫面数据,通过制定不同的模拟策略,实现在资料稀缺的雅鲁藏布江流域厘清气候和下垫面变化对径流的影响,将在三个方面展开分析:(1)气候和下垫面变化对出水口径流变化的贡献率,(2)气候和下垫面变化对空间产流变化的贡献率,(3)典型下垫面类型(积雪和冰川)的径流变化特征以及对流域总径流的贡献。本研究的开展既是区域水文水资源基础性研究的需要,具有重要的理论研究意义,同时对于更科学地利用与分配该流域的水资源,以及对我国乃至亚洲的可持续发展亦具有重要的现实意义。

1 研究区概况

雅鲁藏布江流域(图1)在中国境内的部分全长约2 057 km,地理范围介于82°01′~97°06′ E和27°49′~31°17′ N,总面积约为25.8×10⁴ km²。它是世界上最高的流域,平均海拔在4 600 m以上^[38],但是流域内海拔差异极大(149~7 159 m)。从西至东被拉孜水文站和羊村水文站划分为上游、中游和下游,出口处无水文观测站点,但在流域下游存在奴下水文站,其集水面积约占流域面积的80%。受孟加拉湾暖湿气流、西风环流以及高原地理环境的影响,流域内降水分布非常不均匀,从流域下游至上游呈梯度减少趋势^[39]。流域内气温具有东南—西北梯度减

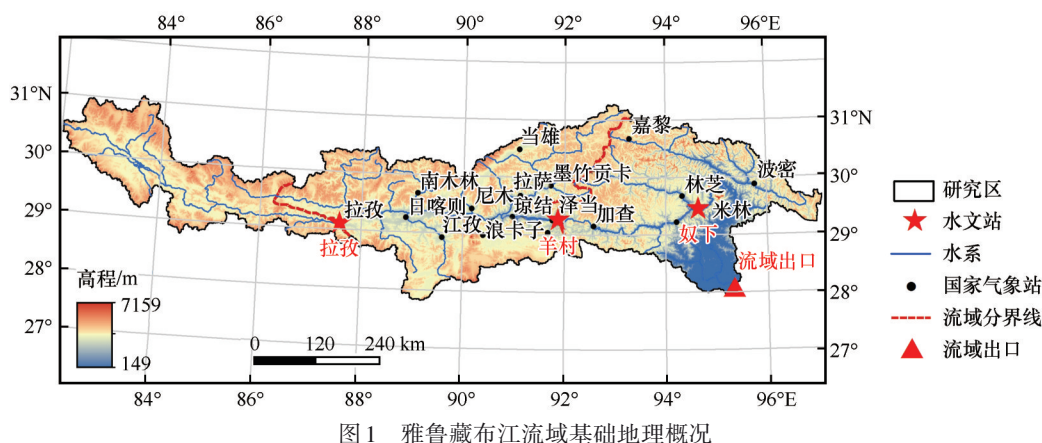


图1 雅鲁藏布江流域基础地理概况
Fig. 1 The fundamental geographic information of the Yarlung Zangbo River basin

少的趋势,且与海拔呈显著负相关关系。由于独特的地理环境,其生态环境非常复杂,植被类型多样,但主要以高原草地为主,约占流域面积的64%。流域内冰川条数占青藏高原冰川数量的29%,占比中国冰川数量、面积、储量分别为23%、24%和23%^[12];冬季积雪大约相当于 $7.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的水量,冰川和积雪季节性融水对于下游水资源利用具有重要作用,对高原寒区生态系统有重要影响^[40-42]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 气象水文数据

雅鲁藏布江流域气象观测站点较少并且分布非常不均匀,特别是流域内上游地区无可观测资料^[39],因此需要空间分布的陆面数据支持。全球陆面同化系统GLDAS(Global Land Data Assimilation Systems)是全球变化与水循环研究的重要数据源之一,分发了V1.0和V2.0两个版本,但GLDAS V2.0在数据一致性、数据质量季节稳定性及对趋势性描述能力方面则明显优于GLDAS V1.0数据^[43-44]。GLDAS V2.0包括Noah、CLSM(Catchment Land Surface Model)两个陆面过程模型输出数据集,其中CLSM是由美国航空航天局(NASA)全球建模和同化办公室(GMAO)构思并不断发展而成的陆面模型,采用以地形获取的流域替代传统陆面模型的网格作为陆面单元^[45],比Noah陆面模型更适用于流域的气候要素分析。因此,本研究采用GLDAS V2.0的CLSM陆面模型输出的气温、降水和实际蒸散发数据集,时间序列为1986—2010年,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。为了提高数据精度以及满足驱动分布式水文模型ESSI的要求,首先基于地面气象站点

观测数据对CLSM陆面数据进行校正,再利用梯度距离平方反比法^[46-47](GIDS, Gradient plus Inverse Distance Squared)将数据插值成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间分辨率。

本研究采用奴下水文站1986—2010年月尺度径流观测数据进行水文模型的率定和验证,以获得雅鲁藏布江流域出口处的径流量。

2.1.2 土地利用数据

土地利用数据采用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的中国1:10万比例尺土地利用现状遥感监测数据库。该数据集已经在国土资源调查、水文、生态研究中被广泛使用,被认为是我国精度最高的土地利用产品,包括1970年代末期(1970s,相当于1980年)、1980年代末期(1980s,相当于1990年)、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年共7期土地利用空间分布数据,本底数据是以美国陆地卫星Landsat遥感影像数据作为主信息源,通过人工目视解译获取,该数据集土地利用一级类型综合评价精度达到94.3%以上,二级类型分类综合精度达到91.2%以上^[48]。目前,1000 m栅格数据可免费下载。本研究选用1990年、1995年、2000年和2010年的土地利用数据。

2.1.3 地形数据

本研究采用SRTM V4(Shuttle Radar Topography Mission, Version 4)DEM数据表征流域内地形高度。SRTM是由美国航空航天局(NASA)、美国图像测绘局(NIMA)、德国及意大利航天局共同实施的航天飞机雷达地形测量任务。SRTM DEM数据包括1000 m、90 m、30 m三个级别的分辨率。本文采用1000 m空间分辨率的DEM数据。在此基础上,利用IDL编程提取DEM各个像元对应的经度

和纬度,用作GLDAS数据插值的辅助数据。

2.2 研究方法

2.2.1 ESSI水文模型改进方法

由于原ESSI中融雪模块设计较为薄弱,仅利用一个温度阈值作为雨雪分离和融雪临界点,不能反映自然界的实际观测现象,包括雪、雨或雨加雪,因此,揭示了模型中应该存在两个温度阈值,低于某个温度阈值时,降水全部以降雪的形式发生;高于某个温度阈值时,降水则全部以降雨的形式发生;介于这两个温度阈值中间时,则以雨、雪混合状态发生。为了更加准确地判断降水的聚集状态,借助遥感手段可以避免在计算融雪量时对无雪区的错误估算。因此,本研究通过耦合降水聚集状态判定、融雪量修正等方面改进ESSI模型。

(1)降水聚集状态判定

原ESSI模型中,降水聚集状态是以一个简单的温度阈值决定的,这种设计不符合实际观测到的自然现象,因此Klok等^[49]提出了一种有效的模糊转换函数(Fuzzy transition function)^[50],当处于两阈值之间时,降雪百分比可以用式(1)表示:

$$P_{\text{snow}} = \frac{T_{\text{R/S}} + T_{\text{trans}} - T}{2T_{\text{trans}}} \quad T_{\text{R/S}} - T_{\text{trans}} < T_{\text{R/S}} + T_{\text{trans}} \quad (1)$$

式中: P_{snow} 为降雪占总降水的百分比; $T_{\text{R/S}}$ 为雨、雪各占50%时的温度; T 为当前的温度; $2T_{\text{trans}}$ 为发生雨雪混合状态时的温度范围。当前温度小于 $T_{\text{R/S}} - T_{\text{trans}}$ 时,降水全部以降雪的形式发生,当温度大于 $T_{\text{R/S}} + T_{\text{trans}}$ 时,降水全部以降雨的形式发生。

(2)融雪量修正相关算法

根据度-日模型,融雪量 M_s 可用公式(2)表示:

$$M_s = \begin{cases} DDF_{\text{snow}}(T - T_0) & T > T_0 \\ 0 & T \leq T_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: DDF_{snow} 为积雪度日因子; T 为实际温度; T_0 为融雪温度阈值。

如果实际积雪量小于理论融雪量,则正积温先将积雪融化完后,判断积雪层下是否有冰川覆盖,如果有积雪覆盖,则剩余的正积温再利用冰川度日因子进行计算融水量,其假设是冰川在短时间内不会发生面积的变化。由于原ESSI中雨雪分离阈值和融雪阈值使用同一个温度值,实际上两者应该设置独立的阈值,因此,本研究在融雪模块中设置独立的融雪阈值。另一方面,采用MODIS积雪产品进行修正计算融雪量时对无雪区的错误估算。因此,计算融雪量分两种情况:

1)当遥感数据观测到有积雪覆盖时,融雪按照

式(2)进行计算,然后按照公式(3)进行判断实际融雪量:

$$M_0 = \begin{cases} M_s & M_s < H_s \\ H_0 + M_{\text{ice}} & M_s > H_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_0 为雪冰总融化量; M_s 为理论融雪量; H_s 为累积积雪量,需要注意的是,当 $M_s \geq H_s$ 时,计算 M_0 后要将 H_s 校正为0; M_{ice} 为理论融冰量,由于假设短时间内积雪不会发生面积的变化,所以冰川足够融化, M_{ice} 也为实际融冰量,其计算见式(4):

$$M_{\text{ice}} = \frac{M_s - H_s}{DDF_{\text{snow}}} DDF_{\text{ice}} \quad M_s > H_s \quad (4)$$

2)当遥感数据观测为无积雪覆盖时,融雪量为0,修正积雪累积量 H_s 为0,正积温如果大于0且有冰川覆盖时,则正积温全部用于融冰,此时, $M_0 = M_{\text{ice}}$,见式(5):

$$\begin{cases} M_s = 0, H_s = 0 & T \leq T_0 \\ M_{\text{ice}} = DDF_{\text{ice}}(T - T_0) & T > T_0 \end{cases} \quad (5)$$

根据气候水文和土地利用变化特征,将研究时段(1986—2010年)划分为一个率定期(1986—1990年)和4个验证期(1991—1995年、1996—2000年、2001—2005年和2006—2010年)。基于奴下站1986—2010年的逐月径流数据,对模拟的径流量进行率定和验证。在各模拟时段内ESSI模型逐月径流模拟精度及模拟效率如表1所示,以及模拟结果和实测值对比情况见图2。从表1和图2可以看到,无论率定期还是验证期都取得了令人满意的结果, R^2 都在0.84以上,NSE(Nash-Sutcliffe效率系数)都达到了0.81以上,满足本研究的需要。

表1 雅鲁藏布江流域月径流量模拟结果的精度评价

Table 1 Accuracy evaluation of monthly runoff simulation results in Yarlung Zangbo River basin

评价 指标	率定期 (1986— 1990年)	验证期1 (1991— 1995年)	验证期2 (1996— 2000年)	验证期3 (2001— 2005年)	验证期4 (2006— 2010年)
R^2	0.89	0.91	0.91	0.9	0.84
NSE	0.88	0.89	0.88	0.87	0.81
RE	-5.03%	-11.74%	-13.85%	2.02%	13.62%

2.2.2 模拟策略

雅鲁藏布江流域径流变化主要受气候和下垫面变化影响,为了定量区分这两种因素的变化对流域径流变化的影响,假设它们对径流的影响是相互独立的,本研究设定了不同的模拟情景(表2),基于表2所示各种情景方案的设计。

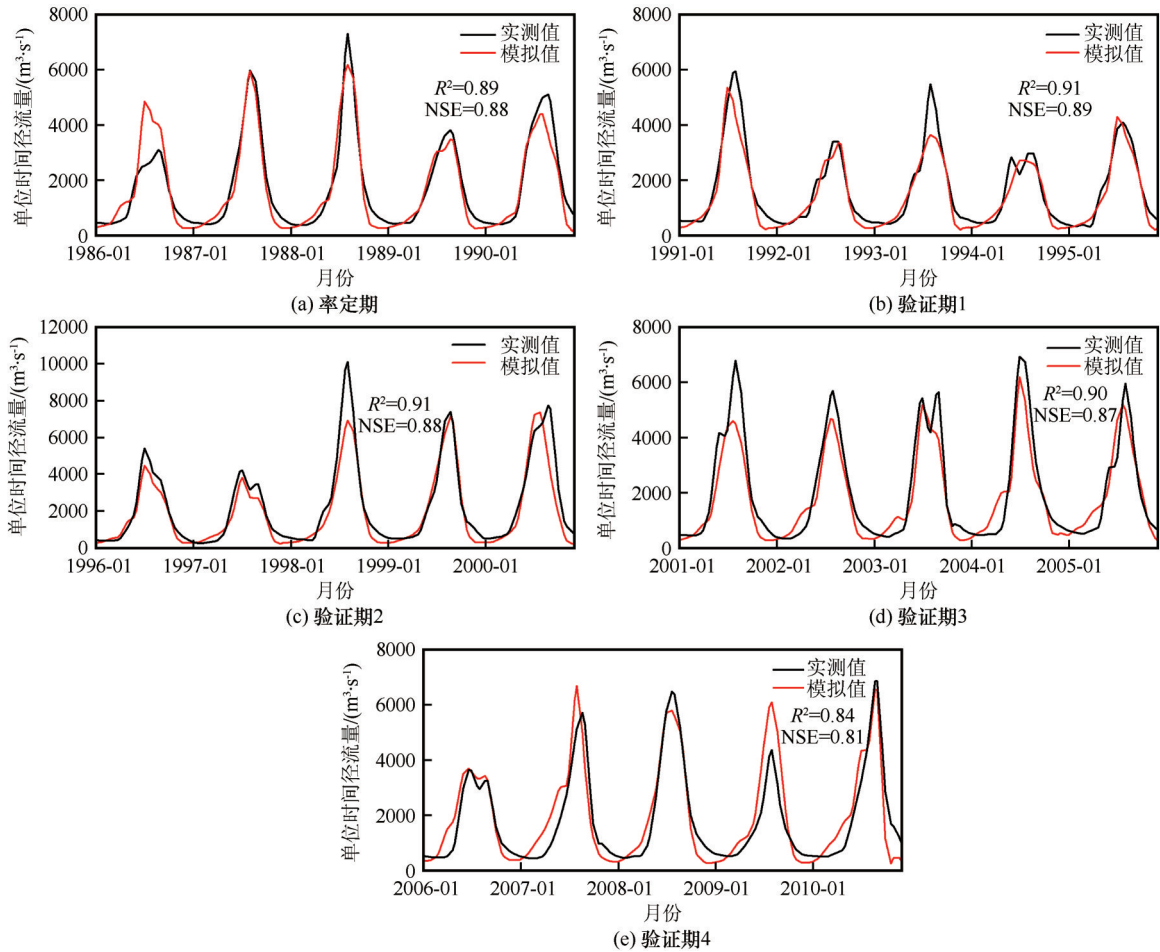


图2 雅鲁藏布江流域率定期和验证期月径流量模拟值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between simulated and measured monthly runoff of Yarlung Zangbo River basin during calibration (a) and validation periods (b)~(e)

表2 气候变化和下垫面变化对径流变化影响评估情景方案设计

Table 2 Scenarios design for quantifying the impacts of climate change and human activities on runoff

情景	土地利用	气象数据	代表情况	研究方案	研究对象	备注
S1	1990年	1991—1995年	实际	/	/	/
S2	1995年	1996—2000年	实际	S2-S1	综合变化	时段2—时段1
S3	2000年	2001—2005年	实际	S3-S2	综合变化	时段3—时段2
S4	2010年	2006—2010年	实际	S4-S3 S4-S1	综合变化	时段4—时段3 时段4—时段1
S5	1990年	2006—2010年	模拟	S4-S5	下垫面变化	气象数据固定(相对S4)
S6	1990年	1996—2000年	模拟	S6-S1	气候变化	下垫面固定(相对S1)
S7	1995年	2001—2005年	模拟	S7-S2	气候变化	下垫面固定(相对S2)
S8	2000年	2006—2010年	模拟	S8-S3	气候变化	下垫面固定(相对S3)

注：时段1为1991—1995年；时段2为1996—2000年；时段3为2001—2005年；时段4为2006—2010年。

2.2.3 贡献率计算方法

气候变化和下垫面变化对出水口径流变化的贡献率,是指气候变化或下垫面变化对径流造成的影响与两者共同对径流造成的影响的比值,可用式(6)和(7)表示:

$$C_c=R_c/R_{c+s} \times 100\% \quad (6)$$

$$C_s=R_s/R_{c+s} \times 100\% \quad (7)$$

式中: C_c 和 C_s 分别为时段内气候和下垫面变化对径流的贡献率; R_c 和 R_s 分别为时段内因气候和下垫面变化造成的径流变化量; R_{c+s} 为时段内径流的总变化

量。以时段 1 和时段 2 为例,其技术路线可由图 3 表示。

3 结果分析

3.1 土地利用变化特征分析

表 3 列出了雅鲁藏布江流域 1990 年、1995 年、2000 年和 2010 年不同土地利用类型的面积以及在不同时段间土地利用类型变化情况。由此可知,在 1990—1995 年时段间草地变化幅度最大且面积减少 $1.24\times 10^4\text{ km}^2$,其中高覆盖度草地减少 $4.87\times 10^4\text{ km}^2$,而中覆盖度草地和低覆盖草地都呈扩张趋势且面积分别增加 $1.85\times 10^4\text{ km}^2$ 和 $1.77\times 10^4\text{ km}^2$ 。其次,未利用地和林地面积增加明显。耕地(包括

水田和旱地)和部分水域(河渠、湖泊和滩地)面积存在不同程度的减少。但是,冰川面积增加了 847.9 km^2 。在 1995—2000 年时段各类土地利用变化方向总体上与 1990—1995 年时段相反,但草地仍然是变化幅度最大的土地利用类型,具体表现为:草地面积增加 $1.2\times 10^4\text{ km}^2$,其中高覆盖度草地增加 $4.85\times 10^4\text{ km}^2$,而中覆盖度草地和低覆盖度草地分别减少 $1.84\times 10^4\text{ km}^2$ 和 $1.78\times 10^4\text{ km}^2$ 。其次,未利用地和林地面积减少明显。耕地和部分水域(河渠、湖泊和滩地)存在不同程度的扩张。但冰川面积减少 811.7 km^2 。

在 2000—2010 年间,在各类土地利用类型中,面积变化最大的仍然是草地(-26.9 km^2),高覆盖度

表 3 1990 年、1995 年、2000 年和 2010 年土地利用类型面积及不同时期面积变化

Table 3 Area of different land use types in 1990, 1995, 2000 and 2010, and the associated change in different periods

土地覆被类型		土地覆被面积/km ²				变化面积/km ²			
一级类型	二级类型	1990 年	1995 年	2000 年	2010 年	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2010 年	1990—2010 年
耕地	水田	72.2	0	83.9	79.7	-72.2	83.9	-4.2	7.5
	旱地	3 180.6	2 137.8	3 162.3	3 153.1	-1 042.8	1 024.5	-9.2	-27.5
	合计	3 252.9	2 137.8	3 246.2	3 232.8	-1 115.1	1 108.4	-13.4	-20.1
林地	有林地	29 475.3	27 479.8	29 373.9	29 356.1	-1 995.5	1 894.1	-17.8	-119.2
	灌木地	5 078.9	10 881.3	5 172.6	5 172.6	5 802.4	-5 708.7	0	93.7
	疏林地	1 069.2	2 244.1	1 053.7	1 053.7	1 174.9	-1 190.4	0	-15.5
	其他林地	24.9	89.7	153.6	174.0	64.8	63.9	20.4	149.1
	合计	35 648.3	40 694.8	35 753.7	35 756.4	5 046.5	-4 941.1	2.7	108.1
草地	高覆盖度草地	86 680.9	37 977.7	86 495.9	86 489.5	-48 703.2	48 518.2	-6.4	-191.4
	中覆盖度草地	48 460.2	67 003.0	48 614.3	48 605.4	18 542.8	-18 388.7	-8.9	145.2
	低覆盖度草地	24 955.3	4 2704.7	24 874.2	24 862.7	17 749.4	-17 830.5	-11.5	-92.6
	合计	160 096.4	147 685.5	159 984.4	159 957.5	-12 410.9	12 298.9	-26.9	-138.9
水域	河渠	713.4	596.1	739.3	740.5	-117.3	143.2	1.2	27.1
	湖泊	1 810.3	1 716.4	1 827.4	1 828.3	-93.9	111.0	0.9	18.0
	水库坑塘	2.0	13.9	6.0	3.6	11.9	-7.9	-2.4	1.6
	冰川	7 504.2	8 352.1	7 540.4	7 540.4	847.9	-811.7	0	36.2
	滩地	1 193.3	767.2	1 079.1	1 091.2	-426.1	311.9	12.1	-102.1
	合计	11 223.1	11 445.6	11 192.2	11 204.0	222.5	-253.4	11.8	-19.1
城乡、工矿、居民用地	城镇用地	26.9	39.0	52.0	67.6	12.1	13.0	15.6	40.7
	农村居民点	48.3	81.4	46.9	49.6	33.1	-34.5	2.7	1.3
	其他建设用地	16.0	26.7	15.7	23.3	10.7	-11.0	7.6	7.3
	合计	91.2	147.1	114.7	140.5	55.9	-32.4	25.8	49.3
未利用土地	沙地	966.4	239.1	948.1	948.1	-727.3	709.0	0	-18.3
	盐碱地	128.2	6.6	128.3	128.3	-121.6	121.7	0	0.1
	沼泽地	21.2	2.0	22.0	22.0	-19.2	20.0	0	0.8
	裸土地	8.0	13.6	6.8	6.8	5.6	-6.8	0	-1.2
	裸岩石质地	43 515.7	53 159.6	43 544.0	43 544.0	9 643.9	-9 615.6	0	28.3
	其他	577.1	0	580.2	580.2	-577.1	580.2	0	3.1
	合计	45 216.6	53 420.9	45 229.4	45 229.4	8 204.3	-8 191.5	0	12.8

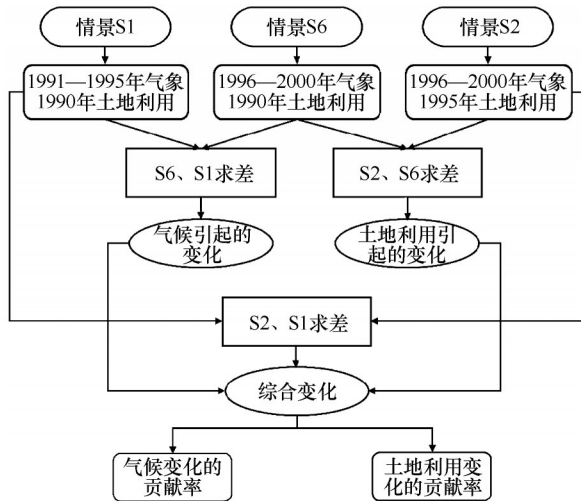


图3 气候变化和下垫面变化对径流变化影响的研究路线
(以时段1和时段2为例)

Fig. 3 Route of quantifying the contribution rates of climate change and underlying surface change (taking period 1 and period 2 for example)

草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地面积都呈减少趋势。耕地减少 13.4 km^2 ，而城乡、工矿、居民用地和水域分别增加了 25.8 km^2 和 11.8 km^2 ，其中冰川面积没有发生变化。在整个土地利用变化时段内（1990—2010年），各类土地利用类型中变化幅度最大的是草地，在20年间减少了 138.9 km^2 ，其中高覆盖度草地和低覆盖度草地分别减少了 191.4 km^2 和 92.6 km^2 ，而中覆盖度草地增加了 145.2 km^2 。其次，林地、城乡、工矿、居民用地和未利用地分别增加了 108.1 km^2 、 49.3 km^2 和 12.8 km^2 。而耕地和水域

在1990—2010年分别减少了 20.1 km^2 和 19.1 km^2 。

3.2 气候和下垫面变化对出水口径流变化的贡献率

不同时段气候变化和下垫面对径流变化的影响以及贡献率如表4所示。总出水口的径流变化揭示了整个雅鲁藏布江流域气候变化和下垫面变化对径流变化的综合影响。结果可知：从时段1至时段2，气候变化导致雅鲁藏布江流域总出水口径流增加了 31.5% ，时段2至时段3气候变化导致径流减少了 13.1% ，时段3至时段4气候变化导致径流增加 20.3% ，时段1至时段4气候变化导致径流增加 36.3% ；下垫面变化引起的径流变化比例从时段1到时段2、时段2到时段3逐渐增加，分别为 2.3% 、 7.7% ，而时段3至时段4下垫面变化引起径流减少 12.3% ，从时段1至时段4，下垫面变化引起的径流变化比例仅为 0.2% 。因此，可以看出气候变化引起径流变化的比例（绝对值都大于 13% ）都高于下垫面变化引起径流变化的比例（绝对值都小于 13% ）。从贡献率来看，气候变化对径流变化的贡献在4个时段中一直处于主导地位，这是由于雅鲁藏布江流域独特的地理环境和复杂的地形，人类活动较弱，下垫面变化较小，而高海拔更易受气候变化的影响，因此，与气候变化对径流的影响相比，下垫面变化对径流变化的贡献非常小。

3.3 气候和下垫面变化对空间产流变化的贡献率

为了定量分析气候变化和下垫面变化对空间产流变化的影响，将分别研究时段1至时段2、时段

表4 不同时段间气候和下垫面变化对径流变化的贡献率

Table 4 Contribution rates of climate change and underlying surface change to the runoff variation between different time periods

研究时段	参与情景	统计量	气候因素	下垫面因素	综合变化
时段1至时段2	S1、S2、S6	单位时间变化量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	453.2	32.8	486.0
		变化比例/%	31.5	2.3	33.8
		贡献率/%	93.3	6.7	/
时段2至时段3	S2、S3、S7	单位时间变化量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	-252.3	148.3	-104.0
		变化比例/%	-13.1	7.7	-5.4
		贡献率/%	242.7	-142.7	/
时段3至时段4	S3、S4、S8	单位时间变化量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	369.3	-224.6	144.7
		变化比例/%	20.3	-12.3	8.0
		贡献率/%	255.3	-155.3	/
时段1至时段4	S1、S4、S5	单位时间变化量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	523.6	3.1	526.7
		变化比例/%	36.3	0.2	36.5
		贡献率/%	99.4	0.6	/

注：径流变化比例是相对于前一个时段气候和下垫面条件状况下计算得到的。

2至时段3、时段3至时段4、时段1至时段4的气候变化和下垫面变化对空间产流变化的贡献率。

(1)时段1至时段2

图4显示了气候变化和下垫面变化在时段1(1991—1995年)至时段2(1996—2000年)对空间产流变化的贡献率。从整个流域来看,气候变化对产流变化的贡献率最大,气候变化贡献率[图4(a)]大于75%的区域面积占流域总面积的96.9%,流域中游贡献率最大,下游东北部区域贡献率较小,而土地利用变化贡献率[图4(b)]在该区域贡献率较大,表明从时段1至时段2该区主要受土地利用影响,而其他区域土地利用贡献率相对较小。总体来讲,从时段1至时段2,雅鲁藏布江流域产流变化的主要贡献来源于气候变化。

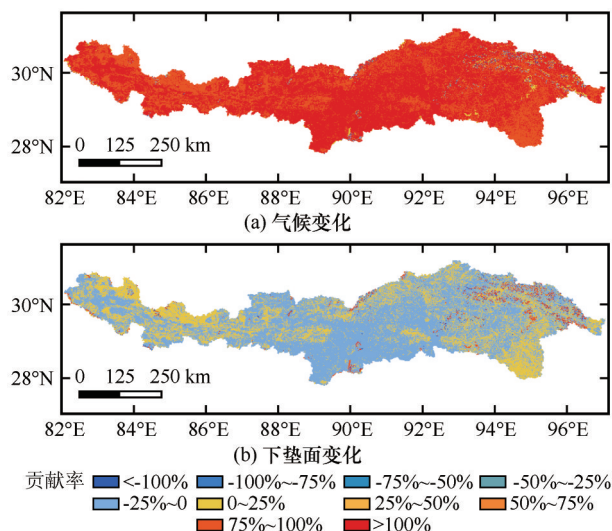


图4 在时段1(1991—1995年)和时段2(1996—2000年)期间气候变化和下垫面变化对雅鲁藏布江流域产流变化的贡献率

Fig. 4 Contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff change in the Yarlung Zangbo River basin during period 1 (1991—1995) and 2 (1996—2000): climate change (a); underlying surface change (b)

(2)时段2至时段3

图5(a)和5(b)分别显示了气候变化和下垫面变化在时段2(1996—2000年)至时段3(2001—2005年)对空间产流变化的贡献率。气候变化对产流变化的贡献率较大,气候变化贡献率大于75%的区域面积占流域总面积的92.8%,流域上游的气候变化贡献率最大,中游其次,下游最低。下垫面变化对产流的贡献率主要表现为对上游产流量的负贡献最大。

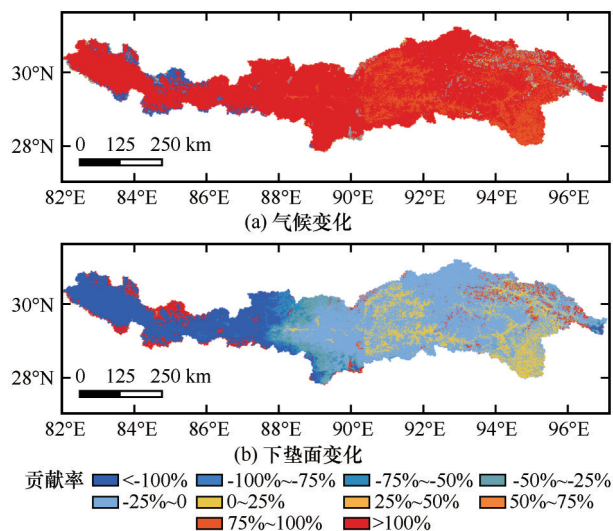


图5 在时段2(1996—2000年)和时段3(2001—2005年)期间气候变化和下垫面变化对雅鲁藏布江流域产流变化的贡献率

Fig. 5 Contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff change in the Yarlung Zangbo River basin during period 2 (1996—2000) and 3 (2001—2005): climate change (a); underlying surface change (b)

(3)时段3至时段4

图6显示了气候变化和下垫面变化在时段3(2001—2005年)至时段4(2006—2010年)对空间产流变化的贡献率。由图可知,总体上,与下垫面变化相比,气候变化对产流的贡献率仍然是较大,与

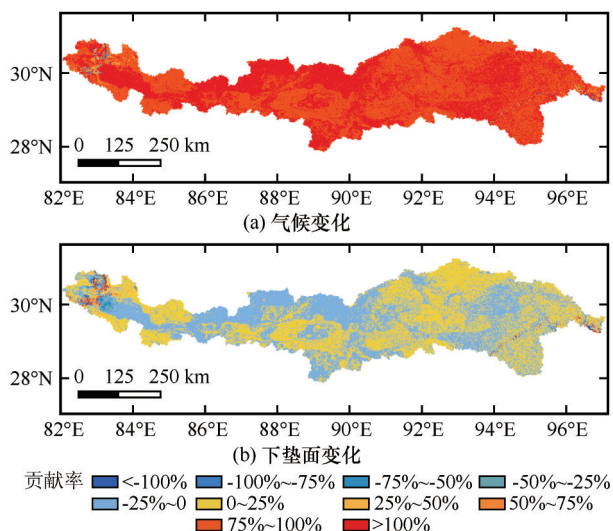


图6 在时段3(2001—2005年)和时段4(2006—2010年)期间气候变化和下垫面变化对雅鲁藏布江流域产流变化的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff change in the Yarlung Zangbo River basin during period 3 (2001—2005) and 4 (2006—2010): climate change (a); underlying surface change (b)

前两个时段相比,时段3至时段4气候变化的贡献率在上、中、下游分布相对均匀。气候变化贡献率[图6(a)]大于75%的区域面积占流域总面积的97.5%,下垫面变化贡献率[图6(b)]非常小,集中分布在-25%~25%范围内,这是由于从2001—2010年下垫面变化(2000年和2010年土地利用数据)非常小。

(4)时段1至时段4

图7显示了气候变化和下垫面变化在时段1(1991—1995年)至时段4(2006—2010年)对空间产流变化的贡献率。从图7(a)来看,在1991—2010年期间,除下游东北部区域外,气候变化对径流变化的贡献率在流域内更加均匀,贡献率大于75%的区域面积占流域总面积的97.9%。从图7(b)来看,下垫面变化对径流的影响主要是流域下游东北部区域(多为冰川积雪发育区域),其他区域对径流变化的贡献非常小。总体上讲,在1991—2010年,雅鲁藏布江流域气候变化对产流的贡献占主导地位,而下垫面变化对产流的贡献主要位于下游雪冰发育区域,但远小于气候变化对径流的影响。这是由于该流域人类活动较小,下垫面变化较弱,尤其在2000年之后,下垫面变化幅度更小(表3)。

3.4 典型下垫面类型的径流变化特征以及对流域总径流的贡献

雅鲁藏布江流域典型下垫面即为积雪和冰川,

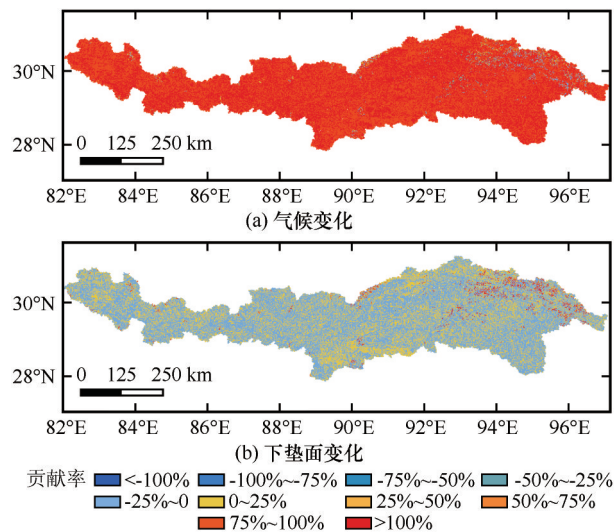


图7 在时段1(1991—1995年)和时段4(2006—2010年)期间气候变化和下垫面变化对雅鲁藏布江流域产流变化的贡献率

Fig. 7 Contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff change in the Yarlung Zangbo River basin during period 1 (1991—1995) and 4 (2006—2010): climate change (a); underlying surface change (b)

研究和分析雪冰融水径流对流域径流的贡献具有十分重要的实际意义和科研价值。改进后的ESSI具有积雪模块和冰川、积雪融化模块,能够依据气温、降水和蒸散发等气候条件的变化对季节性积雪和常年积雪、冰川进行模拟。因此,冰雪融水径流可以由设定融雪和融冰模块是否参与计算得到,即首先按照率定好的参数,在融雪和融冰模块参与条件下模拟雅鲁藏布江流域的径流(记为R1),然后在融雪和融冰模块不参与条件下模拟该流域的径流(记为R2),则R1与R2的差值表示冰雪融水径流量。

图8为雅鲁藏布江流域1991—2010年模拟年径流量与雪冰融水径流量的年际变化趋势。从图8可知,随着气温的升高,雪冰融水径流呈增加的变化趋势,对年径流的平均贡献率在21.1%~48.6%,最大年份为2005年,最小年份为1999年,多年平均为33.6%。在年内变化上(图9),流域雪冰融水一般从4月开始增大,8月达到最大为4 621.1 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

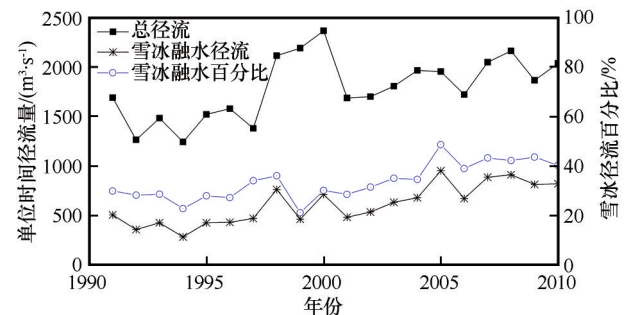


图8 雅鲁藏布江流域总径流、雪冰融水径流以及雪冰融水径流占总径流百分比的年际变化趋势

Fig. 8 Interannual trends of total runoff, snow-ice melt runoff, and snow-ice melt runoff as a percentage of total runoff in the Yarlung Zangbo River basin

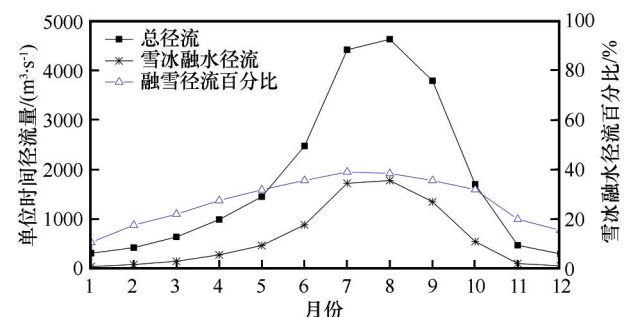


图9 雅鲁藏布江流域总径流、雪冰融水径流以及雪冰融水径流占总径流百分比的年内变化情况

Fig. 9 Annual variations of total runoff, snow-ice melt runoff, and snow-ice melt runoff as a percentage of total runoff in the Yarlung Zangbo River basin

10月消融期结束。11月至次年3月为积累期,消融量较小。从雪冰融水径流占总径流的百分比来看,全年变化相对平稳(10.4%~38.9%),总体来讲,冷季时雪冰融水径流占总径流百分比较低,暖季时所占百分比比较高。

4 讨论

通过对气候和下垫面变化对出水口径流变化的贡献率、气候和下垫面变化对空间产流变化的贡献率、典型下垫面类型(积雪和冰川)的径流变化特征以及对流域总径流的贡献这三个方面展开研究,本研究较为全面地分析了整个雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响。由于雅鲁藏布江流域在流域上游和下游气象水文观测资料稀缺,尤其是流域出口处无水文观测站,导致针对该流域与径流变化有关的研究主要集中于中游和奴下站以上的区域,如Liu等^[13]利用水量平衡法分析了1974—2000年雅鲁藏布江流域奴下站以上4个区域(分别以拉孜、奴各沙、羊村和奴下水文站以分界点)的气候和下垫面变化对径流的影响,结果表明在冷季和暖季,气候和下垫面对径流的影响具有差异,但总体来说,气候变化较下垫面变化对径流的影响更为显著;雪冰融水增加了流域径流量,这与本研究的结论是一致的。王蕊^[29]利用SWAT水文模型以雅鲁藏布江流域中游(拉孜和羊村水文站之间的集水区域)为研究区,分析了该区域1990—2010年气候和下垫面变化对径流的影响,结果表明雪冰融水对流域中游总径流的平均贡献率约为6.2%。而本研究以整个雅鲁藏布江流域为研究区,得到雪冰融水对流域总径流的多年平均贡献率为33.6%,这与许朋琨等^[33]的描述是一致的。其原因在于积雪和冰川主要集中在雅鲁藏布江流域下游,而中游分布较少^[39,51],导致流域中游雪冰融水对总径流的贡献较低。

虽然本研究针对雅鲁藏布江整个流域首次定量给出了气候和下垫面对径流(包括总径流、空间产流)的影响,但是也存在一些限制,如未对上、中、下游进行具体的分析,以及未具体地阐明气候因子和除雪冰类型以外的下垫面因子在不同时段对径流的影响,这将会在下一步的工作中进一步分析。尽管在研究实施过程中力争水文模拟精确,但是由于气象水文资料稀缺和模型不确定性都会导致分析结果存在一定的不确性,即模型物理结构、参数、驱动和初始条件的不确定性都可能通过复杂的误

差传递反映到模拟结果中。在研究中发现土地利用数据在该流域可能存在一定的误差,如在1990—2010年间冰川这一类型的面积增加了36.2 km²,可能导致在一定程度上增加了雪冰径流计算误差。然而本研究尽可能地将误差减少到最小,如改进水文模型、利用GLDAS和站点数据等,在典型高原寒区雅鲁藏布江流域通过制定不同模拟策略厘清气候和下垫面变化对径流的影响,可为资料稀缺的高原寒区流域的径流变化机制分析提供一个新的途径,这些分析结果为了解雅鲁藏布江流域径流变化主要影响因素提供了一个独特的机会,尤其是定量评估了雪冰径流在总径流的占比,为山区流域春、夏季融雪和融冰洪水预估提供了技术支撑。

5 结论

本研究以位于青藏高原东南部的典型高原寒区雅鲁藏布江流域为研究区,通过耦合降水聚集状态判定、融雪量修正等方面改进ESSI模型,对雅鲁藏布江流域进行水文模拟,制定不同的模拟策略以定量评估流域1991—2010年不同时段间气候和下垫面变化对总径流和空间产流的贡献率,尤其定量分析了作为流域典型下垫面(积雪和冰川)的融水径流的变化特征以及对总径流的贡献率。主要研究工作及结论如下:

(1)为了定量分析气候和下垫面变化对流域径流变化的影响,在1991—2010年设计了8个模拟情景,得到在不同的时间段内径流对气候变化和下垫面变化的响应,结果表明,在1991—2010年期间,由于下垫面的变化,总体上引起径流具有增加的趋势。在全球变暖的背景下,雅鲁藏布江流域气候变化引起径流的变化量远大于下垫面引起径流的变化量,除在2001—2005年期间由于气候的变化使径流量减少外,其他时间段由于气候变化都使径流量增加,总体上,气候变化使雅鲁藏布江流域径流量增加,且远高于下垫面变化对径流的影响。

(2)4个时段中(时段1至时段2、时段2至时段3、时段3至时段4、时段1至时段4),不同时段间气候和下垫面变化对径流变化的贡献率差异较大,总体上,气候变化对径流变化的贡献率都远高于下垫面变化对径流变化的贡献率,即气候变化主导了径流变化的方向。从空间上看,在4个时段中,气候变化对流域产流的贡献率在上游和中游都较大,在下游东北部的贡献率较小,而在该区域下垫面变化的

贡献率较大,主要是由于雪冰的融化使该区的下垫面类型发生了变化。

(3)1991—2010年期间,随着气温的升高,雪冰融水径流呈增加的变化趋势,最小和最大年份分别出现在1999年和2005年,对年径流的平均贡献率在21.1%~48.6%范围内,多年平均贡献率为33.6%。在年内变化上,雪冰融水径流一般从4月份开始增大,8月份达到最大,10月份达到消融末期;从年内来看,从1月至12月份,雪冰融水径流对径流的贡献率在全年变化相对平缓,冷季时相对较低,而暖季时达到最高。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Climate change science and sustainable development [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 33(7): 874-883. [秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.]
- [2] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076. [沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.]
- [3] Gao Wende, Wang Yu, Li Zongxing, et al. Analysis on the characteristics of climate change in the endorheic area in alpine region based on extreme precipitation index [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 1-11. [高文德, 王昱, 李宗省, 等. 高寒内流区极端降水的气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 1-11.]
- [4] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1115-1125. [吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1115-1125.]
- [5] Liu Changming. Discussion on some problems of China's water resources in the 21st century [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, 33(1): 15-19. [刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15-19.]
- [6] Wang Rui, Yao Zhijun, Liu Zhaofei, et al. Changes in climate and runoff in the middle course area of the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Resources Science*, 2015, 37(3): 619-628. [王蕊, 姚治君, 刘兆飞, 等. 雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 619-628.]
- [7] Xu Zongxue, Liu Xiaowan, Liu Liu. Impact of climate change on hydrological cycle in river basins: past, present and future [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(6): 722-730. [徐宗学, 刘晓婉, 刘浏. 气候变化影响下的流域水循环: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 722-730.]
- [8] Yang Zhigang, Zhuo Ma, Lu Hongya, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961—2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 166-172. [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.]
- [9] Gao Jiajia, Du Jun. Extreme precipitation simulation and forecast of the Yarlungzangbo River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 580-588. [高佳佳, 杜军. 雅鲁藏布江流域极端降水模拟及预估[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 580-588.]
- [10] Dai Sheng, Bao Guangyu, Qi Guiming, et al. Impacts of extreme climatic events under the context of climate warming on hydrology and water resources in the Qinghai Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1053-1066. [戴升, 保广裕, 祁贵明, 等. 气候变暖背景下极端气候对青海祁连山水文水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1053-1066.]
- [11] IPCC. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Synthesis Report, 2014.
- [12] Yao Tandong, Li Zhiguo, Yang Wei, et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2072-2078.
- [13] Liu Zhaofei, Yao Zhijun, Huang Heqing, et al. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the yarlung zangbo river basin, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2014, 25(3): 203-215.
- [14] Bai Junrui, Xu Zongxue, Ban Guangchun, 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. [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.]
- [15] Li Hao, Niu Qiankun, Wang Xuanxuan, 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. [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.]
- [16] Tian Fuqiang, Xu Ran, Nan Yi, 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. [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.]
- [17] Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1264-1273. [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.]
- [18] Chen Qihui, Chen Hua, Zhang Jun, et al. Impacts of climate change and LULC change on runoff in the Jinsha River Basin [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(1): 85-102.
- [19] Gao Chao, Ruan Tian. The influence of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Huaihe River basin, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 79-92.
- [20] Pan Zharong, Ruan Xiaohong, Qian Mingkai, et al. Spatio-temporal variability of streamflow in the Huaihe River basin, China: climate variability or human activities? [J]. *Hydrology Research*, 2017, 49(1): 177-193.
- [21] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467: 43-51.

- [22] Guo Juntao, Zhang Zhiqiang, Wang Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1559-1567. [郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用SWAT模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567.]
- [23] Lu Jianzhong, Cui Xiaolin, Chen Xiaoling, et al. Evaluation of hydrological response to extreme climate variability using SWAT model: application to the Fuhe basin of Poyang Lake watershed, China [J]. *Hydrology Research*, 2016, 48(6): 1730-1744.
- [24] Yuan Yuzhi, Zhang Zhengdong, Meng Jinhua. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 989-998.
- [25] Wang Xin, Qin Guanghua, Li Hongxia. Analysis on characteristics and variation trend of annual runoff of mainstream of Yarlung Tsangpo River [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(1): 23-26. [王欣, 覃光华, 李红霞. 雅鲁藏布江干流年径流变化趋势及特性分析[J]. *人民长江*, 2016, 47(1): 23-26.]
- [26] Zhao Zhichao, Fu Qiang, Gao Chao, et al. Simulation of monthly runoff considering flow components in Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(2): 26-30. [赵智超, 富强, 高超, 等. 考虑径流成分的雅鲁藏布江月径流模拟[J]. *水文*, 2017, 37(2): 26-30.]
- [27] Tang Xiongpeng, Liu Yanli, Zhang Jianyun, et al. Runoff Simulation and Prediction under Climate Change above Lazi Station in Upstream of Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(6): 24-30. [唐雄朋, 刘艳丽, 张建云, 等. 气候变化下雅鲁藏布江拉孜以上流域径流过程模拟与预测[J]. *水文*, 2018, 38(6): 24-30.]
- [28] Jiang Ke. Runoff composition of the Yarlung Zangbo River and its response to climate change [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. [江科. 雅鲁藏布江流域径流组成及其对气候变化的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.]
- [29] Wang Rui. Impacts of climate change and underlying surface variation on runoff in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River basin [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [王蕊. 雅鲁藏布江流域中游气候与下垫面变化对径流的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [30] Liu Jiangtao, Xu Zongxue, Zhao Huan, et al. Accuracy assessment for two satellite precipitation products: case studies in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(2): 386-396. [刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 不同降水卫星数据反演降水量精度评价——以雅鲁藏布江流域为例[J]. *高原气象*, 2019, 38(2): 386-396.]
- [31] Liu Jinping, Zhang Wanchang, Nie Ning. Spatial downscaling of TRMM precipitation data using an optimal subset regression model with NDVI and terrain factors in the Yarlung Zangbo River basin, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 3491960.
- [32] Yang Hao, Cui Chunguang, Wang Xiaofang, et al. Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River basin under global climate warming [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(6): 565-575. [杨浩, 崔春光, 王晓芳, 等. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(6): 565-575.]
- [33] Xu Pengkun, Zhang Wanchang. Inversion of terrestrial water storage changes in recent years for Qinghai-Tibetan Plateau and Yarlung Zangbo River basin by GRACE [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(1): 23-29. [许朋琨, 张万昌. GRACE反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 23-29.]
- [34] Immerzeel W W, Droogers P, De Jong S M, et al. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 40-49.
- [35] Xu Jingwen, Zhang Wanchang, Zheng Ziyan, et al. Establishment of a hybrid rainfall-runoff model for use in the Noah LSM [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(1): 85-92.
- [36] Zhao Qiudong, Ding Yongjian, Wang Jian, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [37] Zhang Dong. Study of distributed hydrological model with the dynamic integration of infiltration excess and saturated excess water Yielding Mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University, 2006. [张东. 基于渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2006.]
- [38] Sun He, Su Fengge. Precipitation correction and reconstruction for streamflow simulation based on 262 rain gauges in the upper Brahmaputra of southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125484.
- [39] Liu Jinping, Zhang Wanchang, Deng Cai, et al. Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 643-654. [刘金平, 张万昌, 邓财, 等. 2000-2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(4): 643-654.]
- [40] Deng Haijun, Pepin N C, Chen Yaning. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(14): 7323-7341.
- [41] Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Li Na, et al. Influence of snow and temperature on the depth of frozen soil in winter half year in Northeast China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1027-1039. [周晓宇, 赵春雨, 李娜, 等. 东北地区冬半年积雪与气温对冻土的影响[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1027-1039.]
- [42] Wang Kang, Zhang Tingjun, Mu Cuicui, et al. From the Third Pole to the Arctic: changes and impacts of the climate and cryosphere [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 104-123. [王康, 张廷军, 牟翠翠, 等. 从第三极到北极: 气候与冰冻圈变化及其影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 104-123.]
- [43] Wang Wen, Wang Xiaojun, Wang Peng. Assessing the applicability of GLDAS monthly precipitation data in China [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 769-778. [王文, 汪小菊, 王鹏. GLDAS月降水数据在中国区的适用性评估[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 769-778.]
- [44] Liu Yonghe, Yang Zongliang, Lin Peirong, et al. Comparison and evaluation of multiple land surface products for the water budget in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124534.
- [45] Koster R D, Suarez M J, Ducharme A, et al. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D20): 24809-24822.
- [46] Zhou Yi, Qin Zhihao, Bao Gang. Land surface temperature estimation under cloud cover with GIDS [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2012, 16(3): 492-504. [周义, 覃志豪, 包

- 刚. GIDS 空间插值法估算云下地表温度[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 492-504.]
- [47] Li Kuangyu, Zhou Mei, Chen Jiuying, et al. An approach of improved gradient plus inverse distance squared for spatial[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(4): 491-497. [李框宇, 周梅, 陈玖英, 等. 一种适用于气温空间插值的改进梯度距离平方反比法[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(4): 491-497.]
- [48] Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195-210.
- [49] Klok E J, Jasper K, Roelofsma K P, et al. Distributed hydrological modelling of a heavily glaciated Alpine river basin[J]. Hydrological Sciences Journal, 2001, 46(4): 553-570.
- [50] Schaeffli B, Hingray B, Niggli M, et al. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9(1/2): 95-109.
- [51] Liu Jinping, Zhang Wanchang. Spatial variability in degree-day factors in Yarlung Zangbo River basin in China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(5): 704-711.

Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River basin

LIU Jinping^{1,2}, REN Yanqun¹, ZHANG Wanchang², TAO Hui³, YI Lu⁴

(1. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. Key Laboratory of Coastal Environment and Resources Research of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Runoff variation is an important indicator reflecting the regional climate and underlying surface changes in the typical plateau region, Yarlung Zangbo River basin. Facing the global warming, there is still a lack of study on the influence of climate and underlying surface changes on the runoff of the Yarlung Zangbo River Basin because of its scarce observation data. Therefore, based on the daily meteorological data and the monthly hydrological data of Nuxia station during 1986—2010, as well as dynamic land use data, this study comprehensively investigated the influence of climate and underlying surface changes on runoff at different period from 1991 to 2010 in the Yarlung Zangbo River basin, with the final goal of clarifying the discharge variation mechanism of the high-altitude watershed by means of the improved distributed hydrological model in association with different simulation strategies. The results suggested that: (1) During 1991—2010, the contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff variation varied greatly in different periods, and the contribution rate of climate change to runoff variation was higher than that of underlying surface change, which increased runoff during the period. (2) In spatial perspective, the contribution of climate change to runoff was larger in the upper and middle reaches, but smaller in the northeast of the lower reaches where the underlying surface changes contributed relatively large. (3) Runoff from snow and ice ablations tended to increase with climate warming, their average contribution to the annual total runoff of the basin was in the range of 21.1% to 48.6% approximately, and the average long-term contribution was about 33.6%. The snow-ice melting runoff started to increase from April of a year, reached to the maximum in August of the year, and approached to the end of ablation in October in general. The implementation and findings of this study is not only the need of basic research on hydrology and water resources in the Yarlung Zangbo River basin, but also has important theoretical significance. At the same time, it can also provide scientific theory and decision-making basis for the protection, planning and management of water resources in the basin, which has important practical significance.

Key words: climate change; underlying surface change; runoff; snow-ice runoff; Yarlung Zangbo River basin

(责任编辑: 张世强)