

文章编号: 1008-2786-(2017)2-129-13

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000205

长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应

韩 丽 宋克超 张文江* 刘 俐 蒋蕙如

(四川大学 水利水电学院 四川 成都 610065)

摘 要: 长江源区位于青藏高原腹地,其水文过程空间异质性强、对气候变化敏感,但其水文要素的时空特征尚不太清楚。本文结合站点和同化气象要素资料,采用寒区水文模型(CRHM)模拟了 1979—2012 年间长江源沱沱河、楚玛尔河和当曲流域的汛期水文过程,据此分析了其汛期水文要素的时空变化特性,解析了水文要素对气候因子的响应。结果表明:(1) 沱沱河、楚玛尔河和当曲三子流域的汛期径流深度与系数具有显著的空间差异,依次分别为:56.4 mm 和 0.20、7.1 mm 和 0.03、152.0 mm 和 0.41,呈南多北少的空间规律,与降水分布基本一致;(2) 1979—2012 年间,长江源区径流深与降水显著相关,表明源区水文过程对降水变化敏感($R > 0.54$, $p < 0.01$);(3) 唐古拉山地区的汛期产流量深明显高于周围地区,并表现出对降水的敏感响应($R > 0.95$, $p < 0.01$),而当曲流域沼泽湿地则为蒸散发高值区。本研究阐明了长江源头流域汛期水文要素空间特征及时间变化,并表明了水文过程的气候敏感性及其空间差异,这在长江源区的气候变化响应分析中应予以充分考虑。

关键词: 水文过程; 时空特征; 气候变化; 水文模型; 长江源

中图分类号: P941.77

文献标志码: A

青藏高原作为“全球气候变化的驱动机与放大器”^[1],自 20 世纪以来增温显著^[2]。而位于高原腹地的长江源区对气候变化非常敏感^[3],已有研究表明近些年来源区升温显著^[4]、降水有增加趋势^[5,6]。作为水文过程的驱动要素,气候因子的变化将改变研究区的水文过程。已有众多研究表明长江源区的气候水文要素,发生了显著的变化:姜永见等^[7]估算了长江源及周边 1971—2008 年的年蒸散发量,整体上呈增加趋势;而白路遥等^[8]分析气象站点资料,表明过去十年长江源区降水、气温、蒸散发均呈现递增的趋势,且源区的水资源量也有明显的增长;并且,气候变化也会影响植被、冻土等下垫面要素而改变长江源区的水文过程^[9,10]。

楚玛尔河、沱沱河及当曲流域是长江源头三个主要的流域,其内部地势差异明显(海拔 4 200—6 500 m)、下垫面系统复杂多样^[9]、水文过程空间差异显著^[11,12]。但由于长江源区位于高寒地带,自然条件恶劣,区内布设的水文气象站点较少,且站点资料的空间代表性较差^[13],在很大程度上限制了对该区域水文过程的空间分析。为此,本研究将利用寒区水文模型(Cold Region Hydrological Model, CRHM),模拟楚玛尔河、沱沱河和当曲流域 1979—2012 年间水文过程的时空变化,并据此探讨该地区水文要素变化同气候因子的关系,以解析该地区水文要素的时空特征及气候变化响应机制。

收稿日期(Received date): 2016-1-4; 改回日期(Accepted date): 2016-03-08。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41471084) [National Natural Science Foundation of China General Program(41471084)]

作者简介(Biography): 韩丽(1992-),女,汉族,甘肃白银人,硕士研究生,水文模型与水文气候变化研究。[Li Han (1992-), female, born in Baiyin, Gansu province, M. Sc. candidate, mainly engaged in hydrological modeling, hydrology and climate change] E-mail: 2013223060034@stu.scu.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 张文江(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向:高寒生态水文。[Wenjiang Zhang (1976-), male, Ph. D., associate professor, specialized in Alpine ecological hydrology] E-mail: zhang_wj@scu.edu.cn

1 研究区概况

本文以长江源头的楚玛尔河、沱沱河和当曲流域为研究区(图1),面积约83 800 km²,位于32°26′~35°53′N、90°28′~95°8′E间。区内地势西高东低,地形以高山及高海拔平原区为主,周围山峰海拔多高于5 500 m,其他地区也在海拔4 000 m以上(如图1a)。研究区气候属于高寒半干旱与半湿润气候过渡带,来自印度洋孟加拉湾的水汽受输送途径和高原地形影响,使得区内降水呈现极强空间异质性,从东南向西北递减趋势明显^[11]。

研究区植被类型主要分为高寒草甸、高寒草原及高寒沼泽三大类别,具体包括禾本科、菊科、豆科和莎草科等种类^[14]。当曲、沱沱河及楚玛尔河的植被类型分别为高寒沼泽与草甸、高寒草原及高寒荒漠草原(如图1b)。各个流域的土壤类型也有如下差异:当曲分布有大量的高寒草甸土及部分沼泽土;沱沱河主要为高寒草原土,并有少量草甸土及沼泽土;而楚玛尔河分布有大量的高寒荒漠土^[15]。多年冻土是研究区重要的下垫面特征,冻土的变化与分布对源区的水文过程有着显著的影响^[10]。

2 研究方法与数据

2.1 寒区水文模型 CRHM

长江源区是中国典型的高寒区,冻土是源区下垫面的主要特征。一般水文模型通常对冻土因子考虑不足,CRHM水文模型是针对高寒地区开发的分布式水文物理过程模型,考虑了冻土、融雪、风吹雪等寒区水文过程^[16],并已在加拿大、中国等多地得

到了应用^[16-18],得到较好模拟结果。本研究采用CRHM模型模拟研究区径流过程,并在此基础上分析水文要素对气候因子的响应。CRHM以水文响应单元(HRU)为基本计算单元,模拟寒区径流过程,进而计算径流深与蒸散发等寒区水文要素,该模型的原理详细可参考Pomeroy *et al.*^[19]。

2.2 CRHM模型的本地化

(1) 模块选取:长江源区属于典型高寒地区,因此冻土及积雪对水文过程影响显著。为了描述该下垫面特征及水文效应,在CRHM模块库中选择了冻土模块、风吹雪模块、积雪消融模块,用以模拟寒区水文过程。基于CRHM模型的模块化结构,本文研究所用模型本地化的模块构成包括:辐射、风吹雪、反照率、融雪、积雪升华、冻土下渗、蒸散发、土壤水分平衡和河道汇流等模块。

(2) 模型参数:首先,依据水文响应单元(Hydrological Response Unit, HRU)的划分原则^[20]——保证单一HRU内具有近似的下垫面及水文气象特性,根据水系、高程、植被、土壤被等特征,将楚玛尔河、沱沱河和当曲流域划分为16、27、22个HRU(图1b),并统计各HRU的面积、坡度、高程、纬度等参数(表1);然后,参考zhou *et al.*关于长江源地区下垫面及水文模拟相关研究^[16],确定不同HRU的模型参数(表1),其中土壤水初始值由高泽永等的相关研究得出^[21];此外,由于研究区范围较大,流域下垫面空间差异比较强,而该区域相关水文参数观测相对有限,因此本研究根据土壤质地、HRU面积及地形等基本条件,设定了壤中流排水、贮存时间等参数的初始值,并进一步率定修正(表1)。

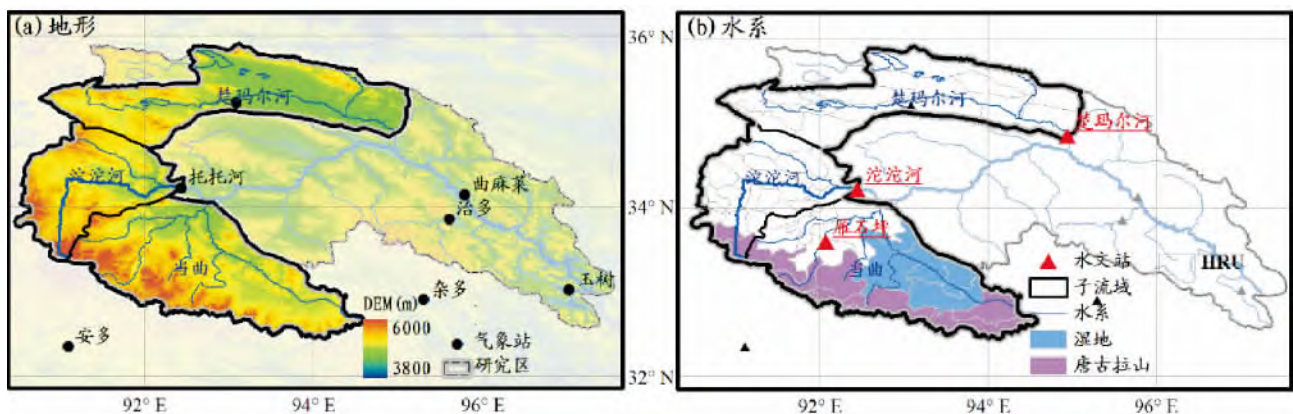


图1 研究区在长江源(直门达以上)的位置及其地形(a)与水系特征(b)

Fig.1 Location, terrain and river system of the Yangtze River source area (above Zhimenda).

表 1 长江源头子流域的主要模型参数值

Tab. 1 Key parameters of CRHM model for sub-basins of the Yangtze River source area

模型参数	楚玛尔河流域	沱沱河流域	当曲流域
HRU 个数	16	27	22
高程 (m)	4 479.2 – 5 005.9	4 681 – 5 509	4 654.7 – 5 428.6
主要植被类型	高寒草甸、高寒草原	高寒草甸、高寒草原	高寒草甸、高寒草原、高寒沼泽
纬度 (N)	34.91 – 35.80°	33.52 – 34.80°	32.61 – 33.99°
子流域面积 (km ²)	26 779	17 526	31 596
HRU 面积范围 (km ²)	259 – 2 542	279 – 1 445	760 – 2 514
坡度 (°)	2.4 – 12	3.2 – 11.2	3 – 13.5
植被高度 (m)	0.01 – 0.35	0.2 – 0.4	0.2 – 0.4
积雪反照率	0.85	0.85	0.85
裸土反照率	0.21 – 0.4	0.2 – 0.44	0.15 – 0.44
风吹雪运移最大距离 (m)	2 500	2 000	1 800
气温递减率 (°C · (100 m) ⁻¹)	0.75	0.75	0.75
土壤补给区最大持水能力 (mm)	35 – 60	40 – 90	35 – 42
土壤初始含水量 (mm)	30	40	60
土壤最大持水能力 (mm)	200	200	200
壤中流排水因子 (mm · d ⁻¹)	0.01 – 0.14	0.8 – 1	0.6 – 2.5
壤中流贮存时间常数 (d)	1 – 2	2 – 4	2 – 5
径流贮存时间 (d)	0.5 – 1.5	1 – 2.5	1.5 – 4

(3) 驱动数据: 本研究采用中国科学院寒区旱区科学数据中心提供的“中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集”^[22-23], 包括 1979—2012 年间 3 小时步长的气温、降水、相对湿度、风速、长波辐射、短波辐射 6 类气象因子。但经站点降水观测资料检验, 该同化数据集的降水值在唐古拉山地区等存在偏大问题, 因此本研究采用周边 6 个气象站点 (图 1a) 日降水数据 (来源: 中国气象科学数据共享服务网), 对格网同化降水数据进行校正。降水校正方法为: 在气象点位置, 计算格网与实测多年平均降水的比例关系, 用于对邻近地区格网降水进行检验并做必要的校正。本研究将 1979—2012 年的 3 小时步长驱动数据输入 CRHM 模型, 考虑到短时间尺度输入数据等的误差^[23], 模型按旬尺度径流结果进行率定和验证。

2.3 模拟结果的分析方法

本文采用斜率法估算水文及气候因子的时间变化, 计算 1979—2012 年间降水、气温、径流深和蒸散发的趋势。偏相关分析, 可在消除其他因子对某两变量相关性的检验, 因此本文采用偏相关方法, 分别以径流深和蒸散发为因变量, 检验降水和气温与之

的相关性, 用以解析水文因子同气候要素的关系。以上斜率变化与偏相关关系均由 F 检验来检验其显著性。 F 检验结果中, $p < 0.05$ 表示变化或相关性显著, $p < 0.01$ 表示变化或相关性极其显著。

3 模型率定

3.1 率定指标

本文采用以下两个指标, 检验模型的模拟效率及在本文研究区的适应性:

(1) Nash-Sutcliffe 效率系数: 是由 Nash 和 Sutcliffe 提出的模型效率系数 (确定性系数), 可直观地体现实测值与模拟值的拟合程度^[24], 其表达式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - X_{mod\ i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - \overline{X_{obs\ i}})^2} \quad (1)$$

(2) 相对误差:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{obs\ i} - X_{mod\ i}|}{\sum_{i=1}^n X_{obs\ i}} \quad (2)$$

以上各式中, $X_{mod\ j}$ 为流量模拟值; $X_{obs\ j}$ 为流量观测值; $\overline{X_{obs\ j}}$ 为流量观测值的平均值; n 为模拟的时段数。

3.2 率定结果

研究区径流为典型的寒区径流, 降水、径流及蒸散发主要发生在 5—10 月^[11, 12], 如沱沱河 1979—1985 年间的非汛期平均径流只有 $1.45\text{ m}^3/\text{s}$, 仅占全年平均径流的 7%。因此本文主要研究汛期(5—10 月)的水文、气候过程。

本文按照 3 小时步长模拟径流, 利用楚玛尔河流域(1980—1987 年)、沱沱河流域(1991—2005 年)及布曲(当曲子流域, 1979—1987)汛期实测旬径流资料, 对模型进行率定与检验。当曲流域没有水文测站, 但其一级支流上布设有雁石坪水文站(集水面积 $3\ 580\text{ km}^2$), 可反映当曲及沱沱河邻近山区流域相邻区域的水文过程特征参数, 将其移植到当曲流域。另外, 由于雁石坪、楚玛尔水文站在 1991 年后撤站停测^[12], 且在 1987—1991 年间有观测缺值, 因此只选用 1979—1987 年雁石坪水文站的数据; 而楚玛尔河在 1979 年数据缺失严重, 故只考

虑其在选用 1980—1987 年的水文站点径流数据。在对水文模型进行率定与验证时, 要求较长时段径流资料, 雁石坪站和楚玛尔站只用于率定参数; 其参数的取值也参考了相邻区域沱沱河流域的参数, 因此可以将这两个区域率定后的参数用于模拟后期的径流过程。

三个流域旬径流的率定与验证的具体结果如表 2 与图 2: 沱沱河流域旬径流在率定期(1991—1999 年)与验证期(2000—2005 年)的 NSE 均在 0.70 左右, 相对误差小于 0.08; 楚玛尔河流域与布曲流域旬径流的模拟与实测过程较为吻合(图 2c—d), 两个流域旬径流的相对误差不超过 0.15, NSE 分别为 0.75 和 0.54, 这表明 CRHM 模型在三个流域具有较好适用性, 能够较好地模拟流域水文过程, 这为分析长江源头流域水文要素的时空特征及其对气候因子响应提供了基础。

本文基于上述的模型率定参数, 模拟了研究区 1979—2012 年间的径流过程(表 3), 并计算了各个水文响应单元的径流深、径流系数与蒸散发。

表 2 研究区模型率定与检验结果

Tab. 2 Calibration and validation results

率定指标	沱沱河率定期(1991—1999)	沱沱河验证期(2000—2005)	楚玛尔河率定期(1980—1986)	布曲率定期(1979—1986)
NSE	0.77	0.69	0.75	0.54
ME	0.078	0.056	0.150	0.068

表 3 研究区 1979—2012 多年平均的汛期(5—10 月)水文要素统计结果

Tab. 3 Hydrologic variables results of the study area during flood season (May-Oct) from 1979 to 2012

流域	面积(km^2)	径流量(m^3/s)	径流深(mm)	降水量(mm)	径流系数	C_v
楚玛尔河	26 779	10.47	7.1	208.6	0.03	0.86
沱沱河	17 526	62.15	56.4	280.0	0.20	0.33
当曲	31 596	302.12	152.0	374.7	0.41	0.27

4 结果分析

4.1 气候要素的时空分异

本文分别利用研究区 1979—2012 年间的气象站点资料 and 同化气象数据资料, 显示了该地区气候因子(降水与气温)的时空特征。首先, 从表 4 气象站点实测资料, 显示的统计数据可以看出, 随着纬度

的递增, 年降水由南部(如索县: 549 mm)向北(如沱沱河: 280 mm)递减, 南北梯度变化特征显著; 气温则同时受纬度和海拔控制。在过去 34 年中, 大部分站点的降水呈现递增的趋势, 尤以伍道梁站最为明显, 其变化率达到了 4.14 mm yr^{-1} ($p < 0.01$); 研究区气温呈显著上升趋势, 过去 34 年各站点的平均气温上升了近 1.5°C , 变化非常显著 ($p < 0.001$)。

图 3a—b 同化降水资料, 则显示了更为详尽的

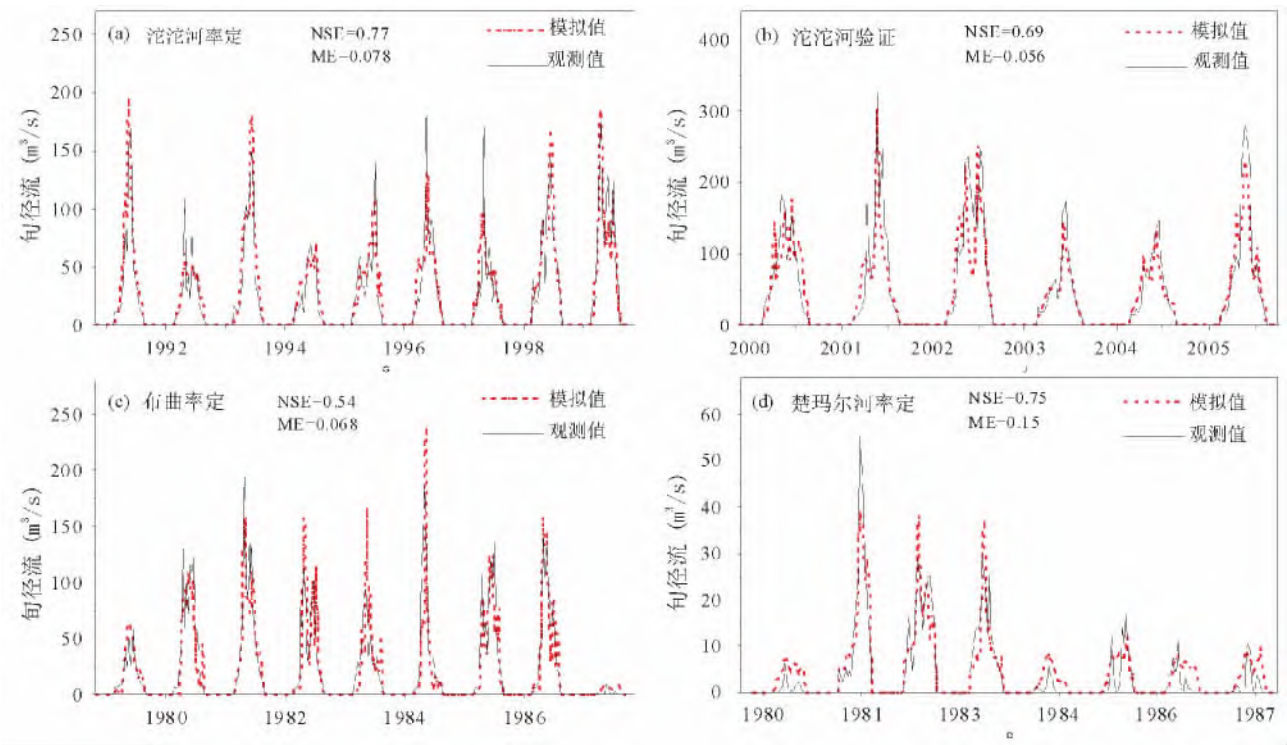


图 2 汛期旬径流的率定与检验结果

Fig.2 Calibration and Validation results of the ten days runoff in flood season

表 4 研究区周边气象站点 1979—2012 年间 5—10 月降水与平均气温统计结果

Tab.4 Statistic of precipitation and average temperature for the meteorological stations near the study area during flood season (May-Oct) from 1979 to 2012

气象站	纬度(N)	经度(N)	高程(m)	降水		气温	
				均值(mm)	变化率(mm yr ⁻¹)	均值(°C)	变化率(°C yr ⁻¹)
索县	31.88°	93.81°	3 956	549.5	1.16	8.43	0.035 * *
杂多	32.90°	95.32°	4 320	494.4	2.38	7.58	0.044 * *
安多	32.35°	91.13°	4 687	439.6	-0.51	4.55	0.035 * *
曲麻莱	34.13°	95.85°	4 192	393.4	1.29	5.25	0.050 * *
沱沱河	34.22°	92.43°	4 521	280.0	3.38*	3.81	0.050 * *
伍道梁	35.22°	93.17°	4 599	286.2	4.14 * *	1.86	0.040 * *

(注: * 表示 $p < 0.05$, * * 表示 $p < 0.001$)

降水、气温时空特征(图 3a - b),同站点观测值指示的规律相似。降水由南向北呈现明显的递减趋势,以当曲流域东南部的降水最为丰沛(505 mm),而位于楚玛尔河北部的高寒荒漠区降水最少(165 mm)。当曲流域与沱沱河流域的降水,均呈现出明显的南北梯度变化特征。由于研究区南部的唐古拉山脉海拔较高,对北上水汽的地势拦截效应比较明显,山体的垂直地带性显著,因此位于沱沱河和当曲南部的

山区降水明显高于山体北部海拔较低的区域。楚玛尔河流域处于研究区北端,降水普遍较少且空间异质性明显,流域内降水由 270 mm 递减到 165 mm (图 3a)。研究区气温呈中部高边缘低的空间特征,显示出了海拔和纬度对热量条件的控制(图 3b)。

研究区降水与气温,在过去 34 年中发生了显著的变化,同时其变化也呈现出明显的空间差异(图 3c - d)。区内沱沱河和楚玛尔河流域的降水,呈现

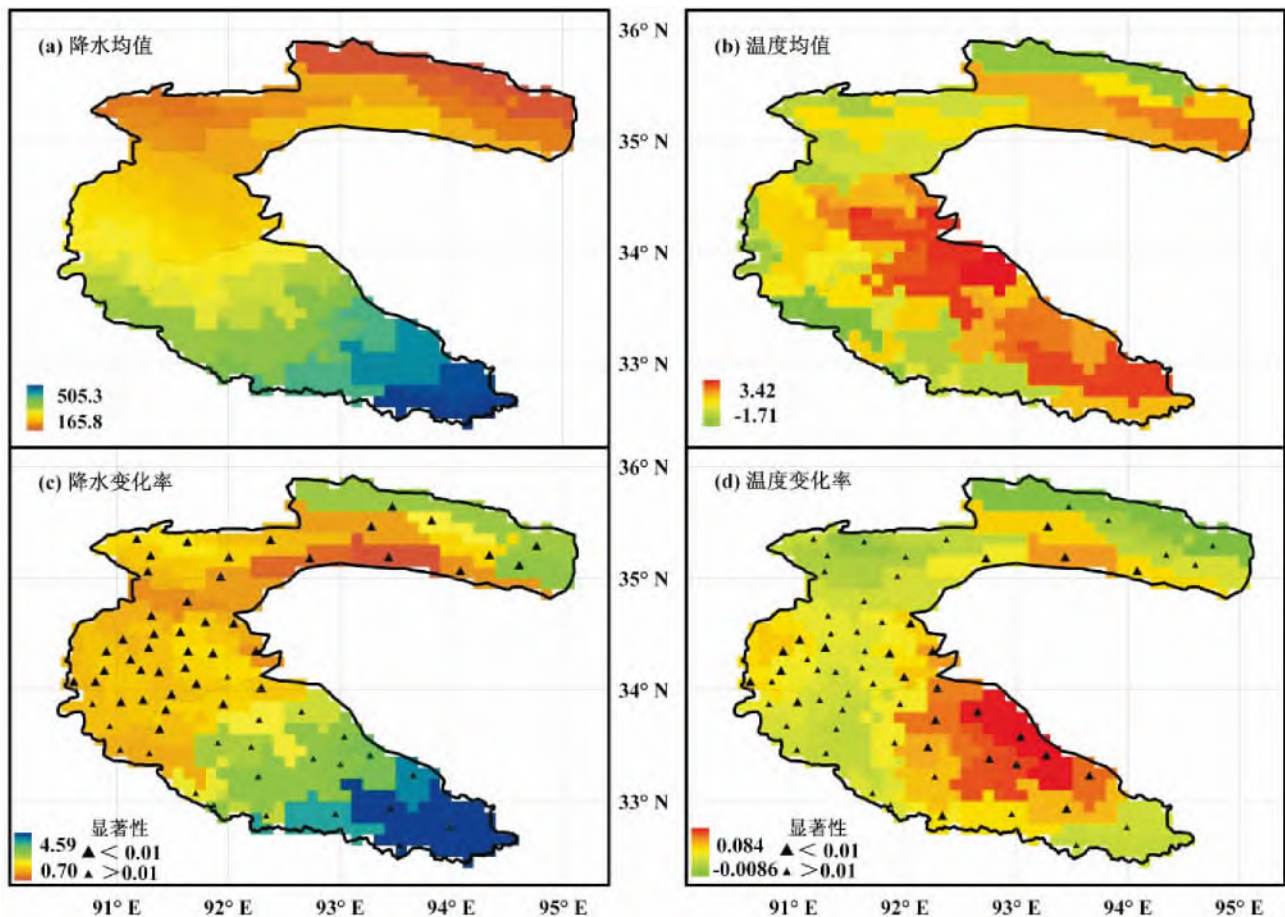


图3 研究区降水与气温的空间分布和时间变化特征 a c 分别为降水均值 (mm) 与降水变化率 (mm yr⁻¹);
b d 分别为温度均值 (°C) 与温度变化率 (°C yr⁻¹)

Fig.3 Spatial-temporal characteristics of precipitation and temperature in study area; a c are average precipitation (mm) and its variation rate (mm yr⁻¹); b d are average temperature (°C) and its variation rate (°C yr⁻¹)

显著的上升趋势 ($p < 0.01$)。与气象站点的结果相似,研究区北部地区的降水变化明显大于南部地区,且以楚玛尔河南部区域的变化最为明显,其变化率达到了 4.59 mm yr^{-1} (图 3c)。与降水的变化趋势不同,研究区气温变化以当曲中部地区最为显著,在过去 34 年中上升了近 2.8°C ($p < 0.05$),而楚玛尔河北部区域有轻微的下陷趋势 (图 3d)。

4.2 水文要素的时空变化

本文的水文模拟结果,反映了研究区内水文要素显著的时空变异性,是该地区研究区内部海拔地势起伏高、气候变异大、下垫面类型复杂和气候变异的共同作用结果。

4.2.1 水文要素的空间变化规律

1979—2012 年各个子流域多年平均汛期径流深、径流系数和蒸散发显示 (图 4): 径流深从南向北递减 (由 269 mm 到 1.6 mm) 与降水量的空间分布

基本一致; 蒸散发模拟值局部区域相对偏小^[25 26], 可能是由于所用降水数据在迎风坡等地存在偏低问题,使得基于径流率定的蒸散发模拟值相对偏低; 此外蒸散发与降水及径流深的空间分布有所不同,但整体也呈现出南多北少的空间格局。对于研究区北部的楚玛尔河流域,区内径流深普遍较小——最高值仅有 26 mm ,这主要由于降水较少,且下垫面沙滩广布,多风积沙丘、干谷等^[6],使得区内的产流系数很低 (图 4b)。沱沱河流域多年平均汛期径流深呈明显的空间梯度变化,由南部高山区的 129.8 mm 递减为北部荒漠区的 20 mm ,与降水的空间分布状况相似。当曲流域具有海拔高、水系复杂、沼泽遍布等特点^[27],区内径流深的空间分布差异更加明显,东南部中上游地区的径流深明显偏小,而西南部高山区的径流深则相对偏大; 这与下垫面的空间差异密切相关: 前者为典型的高寒沼泽区,区内主要为地

势低平、排水不畅的山间盆地和滩地,且下伏多年冻土,雪融水及降水不易下渗。因而,地表长期处于过湿积水状态^[27],这样的地势条件一方面使得区域的产流系数较低(图4b),另一方面充足的地表水分易于植被生长,增强了地表与大气的水分交换,使得该区蒸散发高于邻近地区(图4c)。而位于当曲西南部的唐古拉高山区,由于气候高寒、地形坡度大,使得土壤发育差,地表以碎屑物质覆盖为主,不利于植被生长,因此产流系数较高(图4b),相应的蒸散发小于周边地势较低区域(图4c)。

4.2.2 水文要素的年际变化规律

气候要素作为水文过程的驱动因子,其在时间上的变化必然会引起水文要素的变化。研究区的降水与气温在过去34年中变化显著(图3),相应地水文因子也发生了较为明显的改变(图5)。图5a-b为研究区径流深与蒸散发在过去34年中的变化速率,普遍呈增长趋势,与前人在该地区基于站点的研究结果相似^[7],同时蒸散发的变化趋势也与整个青藏高原的相一致^[26]。特别地,研究区西南部高山区的径流深增幅最为明显,而蒸散发的增幅则相对较弱,这与均值的空间分布情况极其相似。说明海拔较高、坡度较大的高山区,不仅容易形成径流,对降水的响应也更为强烈。此外,研究区东南部的沼泽区,径流深呈现递减趋势,而蒸散发增幅比降水增幅更大。这与该地区的显著增温有关,气温的升高增强了地表蒸散发能力,加之沼泽地区的水分相对充足,因而实际蒸散发会随着气温的升高显著增强。

4.3 水文要素对气候因子的响应

研究区是青藏高原内部对气候变化较为敏感的地区之一^[3],气候影响着该区水文过程的时空分异,而水文要素的时空变化特征及其与气候因子的相关性,则体现了其对气候要素的响应。

蒸散发与降水在过去34年中的变化特征较为一致(图3、5),说明降水是蒸散发的重要影响因子。图6a中显示出降水与蒸散发呈现非常显著的相关性($p < 0.005$),且其相关性由南向北递增强;而蒸散发对气温也有较为明显的响应(图6b),尤其在研究区南部地区,蒸散发与气温的相关性关系均大于0.6($p < 0.01$)。这说明研究区的蒸散发除了受降水的直接影响外,也同气温的时空变异特征相关。不过,蒸散发同气候要素的相关性,也表现出空间区域差异:北部区域的蒸散发与降水的关系更为紧密,而相关性相对较大;而在南部地区,蒸散发则同时受

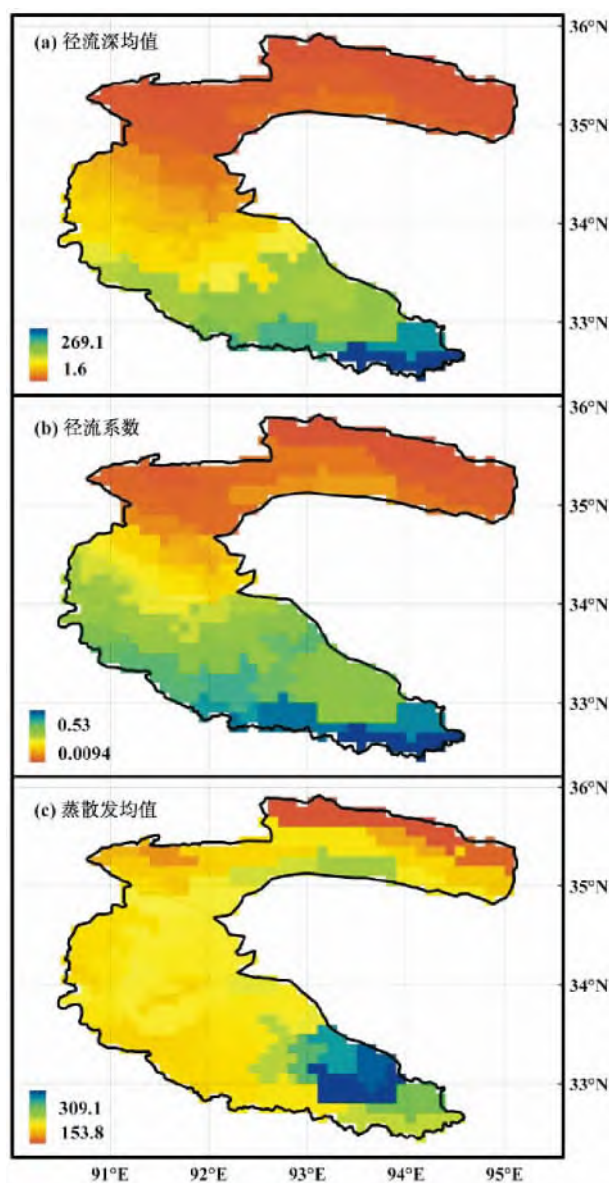


图4 研究区汛期径流深(a: mm)、径流系数(b)、蒸散发(c: mm)的空间分布

Fig. 4 Spatial characteristics of runoff depth (a: mm), runoff coefficient (b) and evapotranspiration (c: mm)

降水和气温控制。该结果说明:研究区位于半干旱与半湿润的过渡带,南部区域降水较为充沛,蒸散发主要受热量条件的限制,即在南部区域与气温表现出较大的相关性;而北部大部分地区为干旱、半干旱的荒漠区,降水相对较少,水分条件是限制蒸散发的主要因素,所以蒸散发与降水呈现出极其显著的相关性。

在整个研究区内降水与径流深的相关性非常明显(图6c),均大于0.54($p < 0.01$),但气温与径流深的相关性相对较弱(图6d),说明研究区降水的改

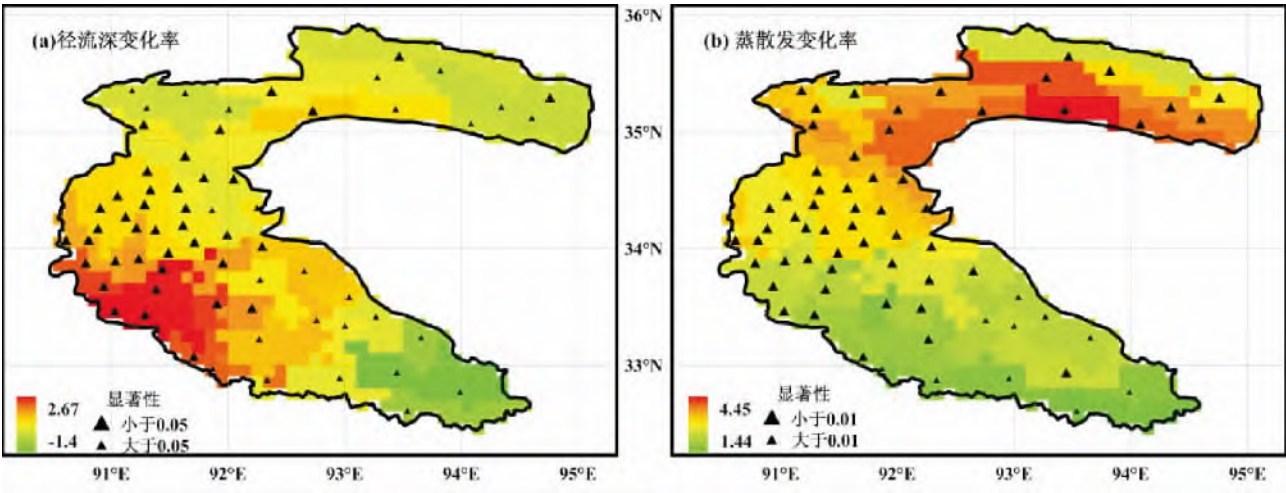


图 5 研究区径流深 (a: mm yr^{-1}) 与蒸散发 (b: mm yr^{-1}) 的时间变化规律

Fig.5 Temporal characteristics of hydrological processes; a, b are variation rate (mm yr^{-1}) of runoff depth and evapotranspiration.

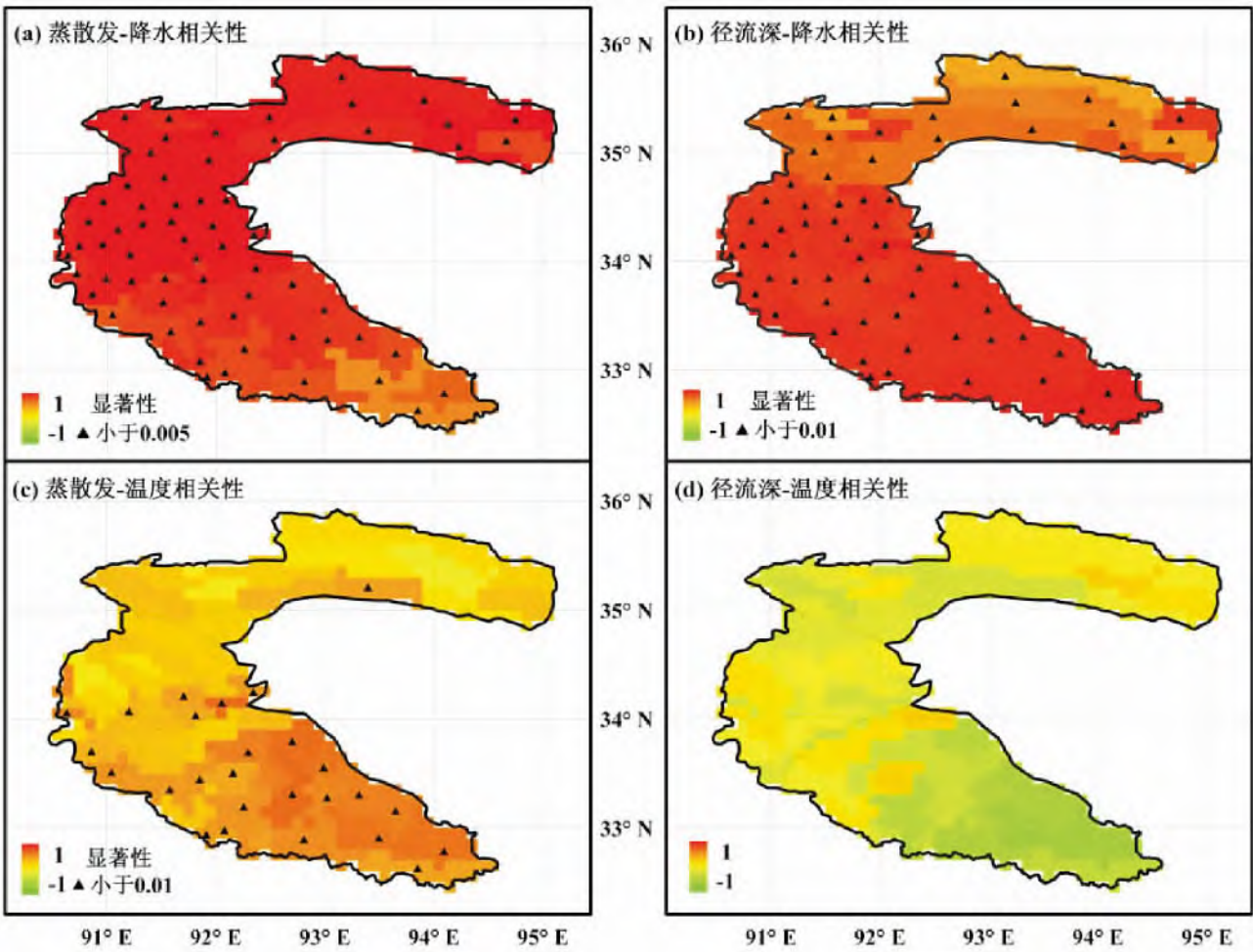


图 6 研究区蒸散发 (a, c) 及径流深 (b, d) 分别与降水、气温的相关性

Fig.6 Correlations between evapotranspiration (a, c) and runoff depth (b, d) during 1979—2012

变会直接引起径流深的变化,而气温对其直接影响较小。而已有研究表明该区径流年内分配特征受温度影响显著^[12],特别在春季与秋季^[28-30],这说明在研究区内气温对于径流的影响在年际尺度与季节性尺度上有较大区别,在今后的研究中应区别讨论。另一方面,从水量平衡角度出发,降水作为主要的输入项,必然会对径流深产生直接影响;而蒸散发与径流深均是水量平衡方程的主要输出项,两者的时空变异规律密切相关,因此气候对蒸散发的影响也会间接的影响到径流深。如在研究区南部,气温对于蒸散发有直接影响(图6b),即升温引起蒸散发的显著增大,而相应地降水变率相对稳定(图3),径流深则表现出减小的趋势。由此可以看出,在气温蒸散

发相关性显著的区域,气温可以通过直接影响蒸散发而间接影响径流深的大小。具体地,图7显示了研究区典型高寒荒漠、唐古拉山和沼泽湿地 HRU 过去 34 年的气温、降水和径流深,表明降水对径流深有着明显的控制作用;同时唐古拉山区的产流效率明显大于沼泽湿地区,因而其对降水的响应更加敏感。由图 7a、d 可以看出自 2000 年以后,随着气温的升高蒸散发也有明显的增加趋势,这与前人在黄河源区得到的研究结果相似^[31],因而由升温引起的蒸散发增多也是导致沼泽湿地径流减少的原因之一。可见,研究区径流深对降水响应极其敏感,对气温的响应则基于蒸散发的变化情况。

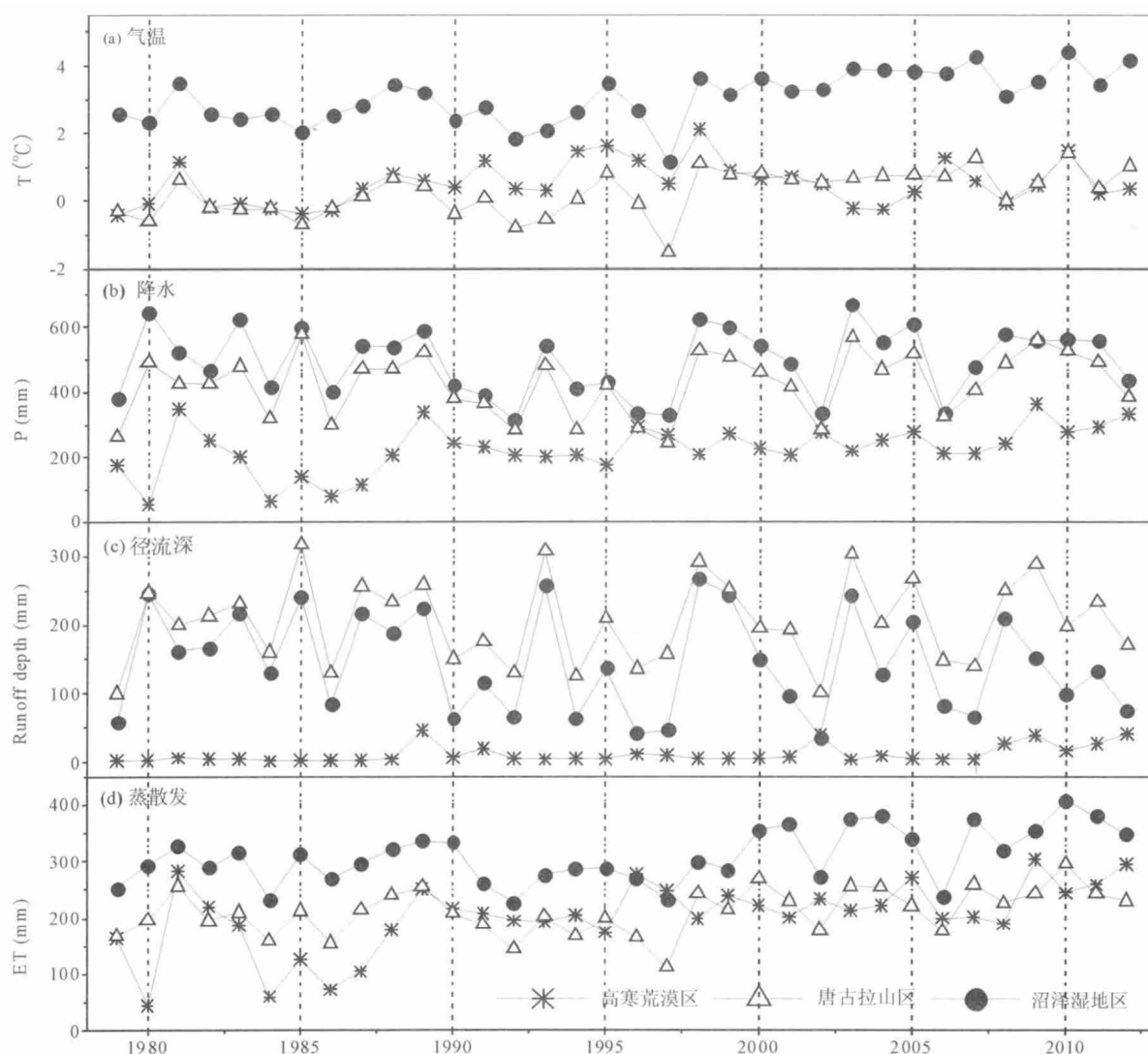


图7 研究区典型高寒荒漠、沼泽湿地、唐古拉山 HRU 在 1979—2012 年间汛期(5—10 月)的平均气温、降水、径流深及蒸散发

Fig.7 Precipitation, runoff depth, average temperature and evapotranspiration of the typical HRUs in cold desert region, mire wetland and Tanggula Mountains during flood season (May-Oct) from 1979 to 2012

5 讨论与结论

5.1 讨论

研究区地处青藏高原腹地,其水文过程对气候变化响应敏感^[3]。由于研究区自然条件恶劣、水文气象站点稀少,为研究区水文过程的研究带来了更多的不确定因素。已有研究多基于对水文、气象站点观测资料的统计分析,然而由于长江源区地表系统空间分异显著,站点资料的空间代表性非常局限^[13]。本研究利用陆面同化数据,并将其与相邻区域的气象站点进行对比修正,一方面可以减小同化数据的误差,另一方面可增强气象站点在空间上的代表性。相比于其它基于水文气象站点数据的分析成果,本研究基于水文响应单元分析了研究区内部水文要素的时空分异特点,加深了该区内部地表过程的认知与理解。

研究区的径流深与蒸散发,在空间上均有南多北少的分布特征,这与降水的空间分布一致,说明降水作为水文循环的输入项,对于长江源水文因子的空间分布起着主要的决定性作用。在研究区西南高山区与东南部的沼泽分布区,水文要素的空间分布与降水有所差异,这说明:研究区内部水文过程的主要控制因子,具有空间差异。例如,在研究区西南部的唐古拉高山区,海拔高、坡度大、土层薄,导致区域地表蓄水较少,植被生长状况差,这些因素使得该区具有较高的产流系数,而蒸散发相对较小。因此,海拔高、坡度大是该区径流深较大,蒸散发较少的主要原因,可见在海拔较高的唐古拉山区,地形要素(通过影响植被、土壤等下垫面条件)是控制该区域水文过程除降水外的重要因子。另外,而在研究区东南部的沼泽地带分布区,地形主要为以坡度较小的山前洼地为主,不利于地表的排水;加之多年冻土层的分布^[32],使得地表水分不易向下渗透,因而地表长期处于过湿积水状态。而在气温相对较高的5—10月,近地表上层冻土消融会增加土壤含水量,较好的水分状况和适宜的气温易于沼泽植被的生长。以上诸多因素均使得该区蒸散发明显高于周边地区,而径流深则相对较小。可以明显看出,坡度较小的地形及下伏冻土分布,使得区域蓄水较多;而相对较高的气温为区域植被生长和蒸散发提供了热量条件,良好的植被状况也直接影响了区域的蒸散发,从而间接影响径流深的大小与变化。因此,该区的水

文过程是降水、气温、地形、冻土及植被等多种因素共同作用的结果。

上述水文气象因子在长时间尺度内的变化规律及其相关性,指示了该区域水文要素对于气候因子的敏感性。在过去34年中,随着降水的增多和气温的升高,研究区内的径流深与蒸散发均呈现普遍的增长趋势。同时,整个研究区内蒸散发和径流深均与降水有着非常显著的相关关系,这说明降水的变化对区内水文过程有显著的直接影 响。其中,研究区西南部高山区的径流深增幅最大,说明该区水文过程对于降水的响应较其他区域更为敏感;主要由于海拔高、坡度大、地面渗透性较好、植被条件差等诸多地表因子不利于水源涵养,导致区域的调蓄能力较差,故而该区的径流深对于降水的响应更为敏感。这与Yokoo提出的坡度较大,沉积层颗粒较粗的地表状况对于气候更敏感的结论相一致^[33]。此外,与降水变率对比可以看出,研究区东南部沼泽地区的降水变化较小,而蒸散发增幅相对较大,同时该区升温幅度为研究区内最大,说明该区域的水文过程对于气温的变化比较敏感,蒸散发与气温在该区的相关关系显著也很好的佐证了这一点。这是由于沼泽地区地表水分充沛,蒸散发主要受热量因子控制,随着区域气温的显著升高,使其蒸散发能力增强,则在水分供应充足的情况下该区的实际蒸散发会大大加强。

5.2 结论

由于地形复杂,气候因子空间差异明显,研究区水文要素的时空分异显著。首先,径流深的空间分布与降水较为一致,呈南多北少的梯度特征,表明降水对该区水文过程的空间分布有着重要的控制作用;其次,研究区水文要素对降水响应敏感:径流深与蒸散发的年际变化受降水的影响明显,且二者均与降水显著相关;特别地,唐古拉高山区海拔高、坡度陡,产流系数大,区内径流深明显高于周围地区,对降水的响应也更敏感。当曲沼泽湿地有较大的蒸散发与较小的径流深,且蒸散发与气温相关性显著,表明该 区的水文要素对气温变化的响应比较敏感。本研究基于水文响应单元从空间分布的角度,阐明了长江源头流域内部的水文要素空间分布特征及其时间变化,为该区水文气候研究提供了理论依据;同时本研究表明不同区域对气候因子的不同敏感性,这在分析长江源区对气候变化响应时需予以充分考虑。

参考文献(References)

- [1] 潘保田,李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报. 1996 **32**(1): 108–115. [PAN Baotian, LI Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change—III. The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic change [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1996 **32**(1): 108–115.]
- [2] 姚檀栋,朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展. 2006 **21**(5): 459–464. [YAO Tandong, ZHU Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy [J]. Advances in Earth Science 2006 **21**(5): 459–464.]
- [3] 康世昌,张拥军,秦大河,等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据[J]. 科学通报. 2007 **52**(4): 457–462. [KANG Shichang, ZHANG Yongjun, QIN Dahe, et al. Ice core evidence of temperature rising quickly in the Yangtze sources region of Qinghai-Xizang plateau in recent period [J]. Chinese Science Bulletin 2007, **52**(4): 457–462.]
- [4] 刘光生,王根绪,胡宏昌,等. 长江黄河源区近45年气候变化特征分析[J]. 资源科学. 2010 **32**(8): 1486–1492. [LIU Guangsheng, WANG Gengxu, HU Hongchang, et al. Climate change characteristics in the source regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years [J]. Resources Science 2010 **32**(8): 1486–1492.]
- [5] 王可丽,程国栋,丁永建,等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. 冰川冻土. 2006 **28**(1): 8–14. [WANG Ke-li, CHENG Guodong, DING Yongjian, et al. characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2006 **28**(1): 8–14.]
- [6] 钱开铸. 长江源区水文周期特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 55–81. [QIAN Kaizhu. Hydrological periods and its responses to climate change in the source region of Yangtze River [D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing 2013: 55–81.]
- [7] 姜永见,李世杰,沈德福,等. 青藏高原江河源区近40年来气候变化特征及其对区域环境的影响[J]. 山地学报. 2012 **30**(4): 461–469. [JIANG Yongjian, LI Shijie, SHEN Defu, et al. Climate Change and its impact on the regional environment in the Source Regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers in Qinghai-Tibetan Plateau during 1971–2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2012 **30**(4): 461–469.]
- [8] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护. 2012 **28**(1): 46–50. [BAI Luyao, RONG Yanshu. Impact of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2012 **28**(1): 46–50.]
- [9] 王根绪,李元寿,王一博,等. 长江源区高寒生态与气候变化对河流径流过程的影响分析[J]. 冰川冻土. 2003 **29**(4): 159–168. [WANG Genxu, LI Yuanshou, WANG Yibo, et al. Impacts of alpine ecosystem and climate changes on surface runoff in the headwaters of the Yangtze River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003 **29**(4): 161–168.]
- [10] WANG GenXu, LIU Guangsheng, LI Chunjie. Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope hydrological processes in a permafrost watershed [J]. Journal of Hydrology. 2012 **444**: 22–33.
- [11] 梁川,侯小波,潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技. 2011 **9**(1): 53–59. [LIANG Chuan, HOU Xiaobo, PAN Ni. Spatial and temporal variations of precipitation and runoff in the source region of the Yangtze River [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology 2011 **9**(1): 53–59.]
- [12] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 长江—黄河源寒区径流时空变化特征对比[J]. 冰川冻土. 2003 **25**(4): 414–422. [XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Comparison analysis of runoff change in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2003 **25**(4): 414–422.]
- [13] 张文江,宁吉才,宋克超,等. 岷江上游植被覆被对水热条件的响应[J]. 山地学报. 2013 **31**(3): 280–286. [ZHANG Wenjiang, NING Jicai, SONG Kechao, et al. The response of vegetation cover to variation of heat and water conditions in upper Minjiang watershed, China [J]. Journal of Mountain Science 2013 **31**(3): 280–286.]
- [14] 吴玉虎. 长江源区植物区系研究[J]. 西北植物学报. 2000, **20**(6): 1086–1101. [WU Yuhu. The floristic characteristic in the source region of Yangtze River [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica 2000 **20**(6): 1086–1101.]
- [15] 吕新苗,郑度. 气候变化对长江源地区高寒草甸生态系统的影响[J]. 长江流域资源与环境. 2006 **15**(5): 603–607. [LV Xinmiao, ZHENG Du. Impacts of global change on the alpine meadow ecosystem in the source region of the Yangtze River. Resource Environment Yangtze Basin [J] 2006 **15**(5): 603–607.]
- [16] ZHOU Jian, Pomeroy J W, Zhang Wei, et al. Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in the west of China [J]. Journal of Hydrology. 2014 **509**: 13–24.
- [17] FANG Xing, Pomeroy J W, Ellis C R, et al. Multi-variable evaluation of hydrological model predictions for a headwater basin in the Canadian Rocky Mountains [J]. Hydrol. Earth System Sci. 2013, **17**(4): 1635–1659.
- [18] LÓPEZ-MORENO J I, Revuelto J, Gilaberte M, et al. The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees [J]. Theoretical and Applied Climatology. 2014, **117**(1–2): 207–219.
- [19] POMEROY J W, Gray D M, Brown T, et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence [J]. Hydrological Processes. 2007 **21**(19): 2650–2667.
- [20] FLÜGEL W. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany [J]. Hydrological Processes. 1995 **9**(3–4): 423–436.

- [21] 高泽永, 王一博, 刘国华, 等. 多年冻土区活动层土壤水分对不同高寒生态系统的响应[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(4): 1002 – 1010. [GAO Zeyong, WANG Yibo, LIU Guohua, et al. Response of soil moisture within the permafrost active layer to different alpine ecosystems [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(4): 1002 – 1010.]
- [22] 何杰, 阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[J]. 寒区旱区科学数据中心. 2011: <http://westdcwestgis.ac.cn/data/>. [HE Jie, YANG Kun. China meteorological forcing dataset [J]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou. 2011: <http://westdcwestgis.ac.cn/data/>.]
- [23] YANG Kun, HE Jie, TANG Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology 2010, **150**: 38 – 46.
- [24] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology. 1970, **10**(3): 282 – 290.
- [25] 范晓梅. 长江源区植被覆盖变化对高寒草甸蒸散的影响及作物系数的确定[D]. 兰州: 兰州大学, 2011: 24 – 25. [FAN Xiaomei. Influence of vegetation coverage on evapotranspiration process of alpine meadows in the head of the Yangtze River and determination of crop coefficients [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011: 24 – 25.]
- [26] 尹云鹤, 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. [YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan Plateau during 1981—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(11): 1471 – 1481.]
- [27] 陈进. 长江源——当曲水系及其生态系统特征探讨[J]. 长江科学院院报. 2014, **31**(10): 1 – 6. [CHENG Jin. The Water system and ecological system characteristics of Dangqu River, Yangtze River region [J]. Yangtze River Scientific Research Institute. 2014, **31**(10): 1 – 6.]
- [28] WANG Genxu, HU Hongchang, LI Taibin. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed. Journal of Hydrology 2009, **375**: 438 – 449.
- [29] WANG Genxu, LIU Guangsheng, LIU Lin'an, et al. Spatial scale effect on seasonal streamflows in permafrost catchments on the Qinghai-Tibet Plateau. Hydrology Process. 2012, **26**: 973 – 984.
- [30] ZHANG Yinsheng, OHATA T, KADATA T. Land surface hydrological processes in the permafrost region of the eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology 2003, **283**: 41 – 56.
- [31] LI Zhouyuan, LIU Xuehua, NIU Tianlin, et al. Ecological restoration and its effects on a regional climate: the source region of the Yellow River, China [J]. Environmental Science & Technology. 2015, **49**: 5897 – 5904.
- [32] 张继平, 张德铨, 刘峰贵, 等. 长江源区当曲流域高寒湿地类型划分及分布研究[J]. 湿地科学. 2011, **9**(3): 218 – 226. [ZHANG Jiping, ZHANG Yili, LIU Fenggui, et al. Classification and distribution of alpine wetland of Damqu River Basin in the Source Region of the Yangtze River [J]. Wetland Science, 2011, **9**(3): 218 – 226.]
- [33] YOKOO Y, SIVAPALAN M, OKI T. Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances [J]. Journal of Hydrology. 2008, **357**(3–4): 255 – 269.

Temporal and Spatial Variations of Hydrological Factors in the Source Area of the Yangtze River and Its Responses to Climate Change

HAN Li, SONG Kechao, ZHANG Wenjiang*, LIU Li, JIANG Huiru

(College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China)

Abstract: The source area of the Yangtze River (YR) originates from the Tibetan Plateau, where regional climate warming has been observed over the past half century, leading to growing spatial heterogeneity of hydrological processes in the area. However, researches on the variation of hydrological processes were restricted due to insufficient observations. In this study, the hydrological processes in the source area of YR were investigated using hydrological modeling and integrated multiple observations. Using historical data from 1979 to 2012, the hydrological processes of three major sub-basins (i. e., Tuotuo River (TR), Qumar River (QR) and Dam River (DR)) were analyzed by the Cold Region Hydrological Model (CRHM). Then, the spatial-temporal characteristics of the processes and their hydrological responses to climate change were analyzed in different hydrological response units (HRUs). According to the results, the average runoff depth and average runoff coefficient were 56.4 mm and 0.2

in TR 7.1 mm and 0.03 in QR and 152.0 mm and 0.41 in DR sub-basins ,respectively. The spatial distribution of the runoff depth and runoff coefficient in each sub-basin as well as the whole region varied distinctly with a decreasing trend from south to north. This phenomena demonstrated a moderate agreement to the spatial variation of precipitation over the region (correlation coefficients $R > 0.54$,and statistical significance $p < 0.01$) ,which revealed the influence of precipitation to hydrological processes in this region. The sensitivity of the modeled hydrological processes in different altitudes was also illustrated by the simulation; runoff depth of the mountain area in the southwest was significantly higher than one in the lowlands ,showing high positive correlation against precipitation ($R > 0.95$ $p < 0.01$) . In the swamp dominating southeast area ,however ,much lower runoff depth was obtained due to high evapotranspiration. This study suggested that hydrological responses to climate changes in the source area of YR were strongly related to the spatial heterogeneity in different sub-basins ,which should be carefully taken into account in estimating further hydrological variations in this region.

Key words: hydrological processes; spatial-temporal characteristics; climate changing; hydrological model; the Yangtze River source area