

罗贤,何大明,季璇,等.近50年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应[J].地理科学,2016,36(1):107-113.[Luo Xian, He Daming, Ji Xuan et al. Low Flow Variations in the Middle and Upper Nujiang River Basin and Possible Responds to Climate Change in Recent 50 Years. Scientia Geographica Sinica,2016,36(1): 107-113.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.01.013

近50年怒江流域中上游枯季径流 变化及其对气候变化的响应

罗贤,何大明,季璇,陆颖,李运刚

(云南大学亚洲国际河流中心/云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室,云南 昆明 650091)

摘要:利用长序列观测记录,分析怒江流域中上游1960~2009年枯季气温和降水的变化规律,探讨近50 a来该流域中上游枯季径流变化特征及其对气候变化的响应规律。结果表明:怒江流域中上游冬季和春季气温均有上升趋势;怒江流域中上游春季和冬季降水量均有增加的趋势;怒江干流道街坝站冬季和春季平均流量都有显著的增加趋势;无论是年最小1、7、30及90 d流量等枯季极值流量,还是75%,90%,95%等不同保证率枯水径流特征值,1990 s和2000 s均远高于其他年代,说明20世纪90年代以来怒江流域枯水径流有较为明显的增长。

关键词:气候变化;枯季径流;极值流量;流量历时曲线;怒江流域

中图分类号:P343.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2016)01-0107-07

近百年来,全球气候经历显著变化,并已成为当今科学界、各国政府和社会公众普遍关注的问题之一^[1,2]。气候变化使水文循环过程不断改变,导致水资源在时空上的重新分配^[3-6]。作为地球表层系统中一个极端复杂的动态系统和环境脆弱地区,青藏高原在响应气候变化方面非常敏感;另一方面,青藏高原是亚洲主要大河的发源地,由气候变化引起的水资源变化,对高原本身和周边地区的人类生存环境和社会经济发展都将产生重大影响^[7-9]。

在当代全球以及中国气候以变暖为主要特征背景下^[10],青藏高原地区气温总体上呈显著增暖的趋势^[11-13],其中冬季的增暖趋势较其他季节更为明显^[14];在降水方面,青藏高原地区冬季和春季降水量显著增加^[12]。无论是气温还是降水,青藏高原地区枯水季节尤其是冬季的变化都是较为明显的。受此影响,青藏高原外流区主要河流径流量总体上没有增加,但季节径流量的变化比较显著^[15]。

怒江是中国西南重要的国际河流^[16],发源于青

藏高原唐古拉山南麓,自西北向东南穿过西藏自治区,后沿横断山脉向南,纵贯云南西部,入缅甸后称萨尔温江,至毛淡棉进入印度洋,南北跨越近16个纬度。怒江-萨尔温江全流域面积32.5万km²,干流全长3 673 km,其中中国境内流域面积13.6万km²,干流河段长2 020 km。

相关研究表明,近50 a来,怒江流域总体上呈增温增湿的趋势,年平均气温增幅达0.36℃/10 a^[17],且流域内平均气温增速显著增高^[18,19];另一方面,怒江河川径流量表现出增加的趋势^[20,21]。可以看出,现有研究多集中于从整体上分析怒江流域气候及径流变化特征。如前所述,怒江流域中上游所处的青藏高原地区,枯水季节的增暖增湿趋势较洪水季节更为显著^[12,14];另一方面,受冰雪融水及冻土的影响,青藏高原地区枯水径流对气候变化的响应尤为错综复杂^[22]。基于上述原因,需要着重关注怒江流域中上游枯季径流变化,以及高原山地环境下该流域枯季水文过程对气候变化的响应规律。

收稿日期:2014-12-04;**修订日期:**2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U1202232)、国家科技支撑计划重大项目(2011BAC09B07)、喜马拉雅地区气候变化适应性研究项目(挪威外交部和瑞典国际发展署)资助。[Foundation: State Key Program of National Natural Science of China (U1202232), The National Key Technologies R&D Program of China (2011BAC09B07), The Himalayan Climate Change Adaptation Program (the Ministry of Foreign Affairs, Norway and Swedish International Development Agency).]

作者简介:罗贤(1985-),男,彝族,云南玉溪人,博士,助理研究员,主要从事水文水资源研究。E-mail: luoxian@ynu.edu.cn

通讯作者:何大明,研究员。E-mail: dmhe@ynu.edu.cn

本研究利用1960~2009年怒江流域中上游的气温、降水及径流资料,重点分析了近50 a来怒江流域中上游枯季气象要素以及径流特征的变化规律,并对高原山地环境枯季水文过程对气候变化的可能响应作了探讨,为怒江流域水文过程变化的预估以及水资源的合理利用提供依据。

1 数据来源

怒江流域中上游气象站较少,且已有气象站大多观测时间相对较短。本研究采用具有较长观测资料的那曲、索县、丁青及贡山站的气温及降水数据进行分析(气温及降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网,http://cdc.cma.gov.cn/home.do),4个站的海拔高度依次为4 507、4 023、3 873及1 591 m。在径流资料方面,收集了怒江干流道街坝站(24°59'N,98°53'E)研究时段内的径流数据(图1)。

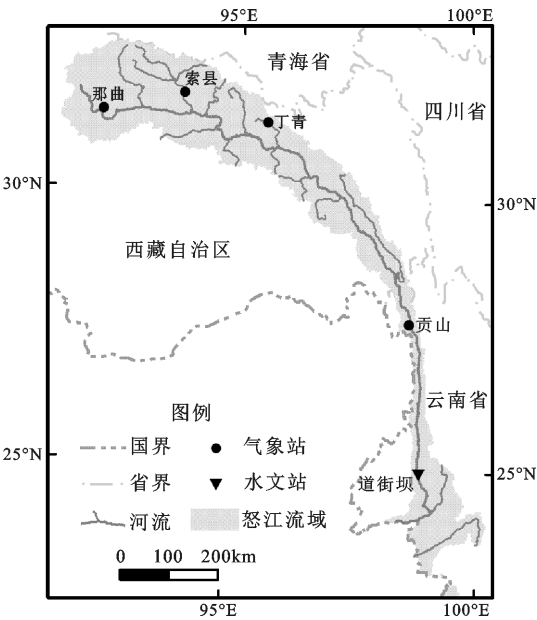


图1 怒江流域气象站及水文站分布
Fig. 1 The distribution of meteorological and hydrological stations in the Nujiang River Basin

2 怒江流域中上游降水及径流的时空分布规律

2.1 怒江流域中上游降水月分配情况

表1列出了怒江流域4个典型代表站降水量的月分配情况。从表中可以看出,怒江流域上游那曲、索县及丁青的降水高度集中于汛期,枯季11~4月的平均降水量仅依次为25.4、44.0及63.3 mm,分别占年降水量的5.8%、7.5%及9.8%;受南支槽和特殊地形复杂影响,怒江中游存在两个雨季,即1~4月及5~10月,受此影响,贡山站枯季降水量较大,占年降水量的40.2%。

2.2 怒江流域径流量月分配情况

怒江流域的径流补给方式在空间上差异较大。其中,上游降雨、冰雪融水及地下水补给的比例分别为35%、32%及33%;中游的径流补给以降雨为主,少量来源于冰雪融水;下游则全部为降水补给^[23]。表2列出怒江流域干流道街坝站径流量的年内分配情况,可以看出,怒江流域径流量季节分配较不均匀,枯季流量占总径流量的比重较小。其中,冬季(上年12至当年2月)的径流量最小,仅占年径流总量的6.6%,而春季(3~5月)径流量所占比例则为14.6%。

3 怒江流域中上游枯季气候变化

3.1 气温变化

近50 a来,怒江流域中上游冬季和春季气温均有上升趋势,但趋势的显著性并不一致(表3)。上游各站冬季的平均气温增加趋势均显著,那曲站平均气温的增加幅度最大,达到了0.81℃/10 a,而索县和丁青站的增幅则分别为0.38℃/10 a及0.37℃/10 a。Mann-Kendall非参数检验结果表明上游3站冬季平均气温的增加趋势均显著;春季平均气温的增加幅度不如冬季,那曲、索县及丁青春季平均气温的增长幅度依次为0.37℃/10 a、

表1 怒江流域中上游典型代表站降水量月分配情况

Table 1 Monthly distribution of precipitation in typical stations in the middle and upper Nujiang River Basin

时间(月)	降水量月分配(%)												年平均降水量 (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
那曲	0.7	0.6	0.9	2.2	7.4	19.1	24.2	22.9	16.0	4.6	0.8	0.5	435.9
索县	1.0	1.1	1.4	2.6	9.5	22.2	21.2	18.4	15.7	5.4	0.8	0.6	585.3
丁青	0.5	1.2	2.3	3.8	8.4	19.8	21.8	18.5	15.1	6.5	1.6	0.5	644.8
贡山	3.6	7.7	12.7	11.9	8.6	13.2	11.7	9.2	9.2	7.9	2.7	1.6	1713.5

表2 怒江流域道街坝站径流量月分配情况(%)

Table 2 Monthly distribution of flow in Daojieba station in the Nujiang River Basin (Unit: %)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
道街坝	2.0	1.8	2.7	4.4	7.5	14.7	19.5	17.7	13.8	8.8	4.3	2.7

表3 怒江流域中上游枯季气温变化率(°C/10 a)

Table 3 Change rate of air temperature in dry season in the middle and upper Nujiang River Basin (Unit: °C/10 a)

	那曲	索县	丁青	贡山
平均气温	0.81**	0.38*	0.37**	0.16
冬季 平均日最低气温	1.25**	0.51**	0.42**	0.14**
平均日最高气温	0.36	0.31	0.36**	0.39*
平均气温	0.37**	0.21*	0.16	0.13
春季 平均日最低气温	0.73**	0.32**	0.26**	0.26**
平均日最高气温	0.13	0.15	0.07	0.22

注: *通过 $\alpha=0.05$ 置信水平; **通过 $\alpha=0.01$ 置信水平。

0.21°C/10 a及0.16°C/10 a。在当代气候变暖条件下,青藏高原及其相邻地区的气温变化与海拔高度有关,变暖的幅度一般随海拔高度升高而增大^[24,25],近50 a,怒江流域中上游冬季和春季平均气温的增加表现出了同样的空间差异性。

从日最高及最低气温来看,河源区的那曲站平均日最低气温的变化幅度最大,1960 s该站的冬季平均日最低气温为-22.9°C,而2000 s则为-17.4°C,近50 a冬季平均日最低气温的增幅高达1.25°C/10 a。从河源到中游,冬季和春季的日最低气温的增加幅度逐渐减小。对于春季气温来说,虽然丁青和贡山站平均气温的增加趋势不显著,但中上游各个站点日最低气温的增加趋势均为极显著。从整体上看,怒江中上游冬季和春季的平均日最低气温增加幅度较大,且其增加趋势均为极显著,而平均日最高气温的增加趋势则多不显著,平均气温的增加在很大程度上是由于夜间温度的增加。在全球陆面温度的升高过程中,多数地区最低温度的增大明显高于最高温度,表现出一种日夜增暖的不对称性,使得日温差变小^[26,27],可以看出,怒江流域上游气温亦表现出这样的变化。

3.2 降水量变化

表4为不同年代怒江流域中上游主要站点春季及冬季降水量距平,可以看出,1960 s及1970 s怒江流域中上游冬季降水量均偏少,而1990 s及2000 s冬季降水量则较平均值高。另外,1960 s怒

表4 怒江流域中上游冬季及春季降水量距平

Table 4 The departure of winter and spring precipitation in the middle and upper Nujiang River Basin

季节	站名	季节降水量距平(%)					季节平均 降水量 (mm)
		1960~ 1969年	1970~ 1979年	1980~ 1989年	1990~ 1999年	2000~ 2009年	
冬季	那曲	-49.4	-38.6	12.8	51.8	23.4	8.1
	索县	-46.1	-15.7	-7.7	42.3	27.3	16.0
	丁青	-23.4	-8.9	9.3	18.2	4.9	14.2
	贡山	-14.7	-0.9	5.8	0.6	9.2	220.2
春季	那曲	-22.3	-17.1	-8.1	-6.8	54.4	45.8
	索县	-20.3	2.5	-12.2	-5.6	35.6	79.3
	丁青	-26.5	4.9	1.2	2.4	18.0	93.2
	贡山	-20.3	-2.8	13.2	13.4	-3.5	570.0

江上游3站春季降水量均较平均值少20%以上,而2000 s则远高于其他年代,那曲、索县及丁青2000 s的春季降水量距平分别为54.4%、35.6%及18.0%。丁一汇和张莉^[12]对1961~2006年青藏高原地区降水变化进行分析,其结果表明,20世纪70年代初期之前,青藏高原地区春季降水量以偏少为主,而90年代中期之后,该区春季降水量则以偏多为主,近50 a怒江上游春季降水量的变化与青藏高原地区较为一致。

近50 a怒江流域中上游大部分站点年降水量有增加的趋势,然而此趋势大多不显著(表5)。从枯季降水量的变化来看,各站点春季和冬季降水量均有增加的趋势,上游那曲、索县及丁青3个站点春季降水量的增幅较大,介于(6.5~7.7)mm/10 a之间,且增加趋势均为极显著。

表5 怒江流域中上游降水变化率(mm/10 a)

Table 5 Change rate of precipitation in the middle and upper Nujiang River Basin (mm/10 a)

	那曲	索县	丁青	贡山
年降水量	13.4*	6.4	-5.0	25.5
冬季降水量	1.8**	3.0**	1.3	10.8
春季降水量	6.5**	7.1**	7.7**	19.9

注: *通过 $\alpha=0.05$ 置信水平; **通过 $\alpha=0.01$ 置信水平。

4 怒江流域中上游枯季径流量变化特征

4.1 季节径流变化

从道街坝站不同年代冬季及春季的径流量(表6)来看,1990 s及2000 s的冬季及春季径流量均大于其他3个年代。其中,1990 s及2000 s冬季径流量的距平值分别为7.3%及10.7%,而1990 s怒江春季径流量的距平值为16.8%,远高于多年平均值。

表6 道街坝站不同年代冬、春季径流量变化

Table 6 Winter and spring flow variations among different decades

时间	季节径流量距平(%)					多年平均 径流量 (m ³ /s)
	1960~ 1969年	1970~ 1979年	1980~ 1989年	1990~ 1999年	2000~ 2009年	
冬季	-3.7	-5.9	-8.3	7.3	10.7	455.9
春季	-13.5	-1.8	-2.8	16.8	1.3	991.2

图2为道街坝站枯季季节流量的变化情况。近50 a怒江流域道街坝站冬季和春季平均流量都有增加趋势,其增加趋势分别达到了 $\alpha=0.01$ 及 $\alpha=0.05$ 的显著水平,而增长率则依次为18 (m³/s)/10 a及44 (m³/s)/10 a。春季径流量的增大在青藏高原其他地区亦有所体现,曹建廷等^[15]综合分析了青藏高原主要河流1956~2000年径流量的变化,其结果表明长江上游、黄河上游、雅砻江及澜沧江春季径流量存在较为明显的增加趋势。

4.2 枯季极值径流量变化

为了探讨近50 a来怒江流域枯季极值流量的演变,对道街坝站年最小1、7、30及90 d流量的变化进行分析,其结果如图3所示。可以看出,道街坝站年最小1、7、30及90 d流量均有显著的增加趋

势($\alpha=0.01$)。1990 s和2000 s中大部分年份的年最小1、7、30及90 d流量远高于其他年代。以年最小1 d流量为例,在1960~2009年期间,道街坝站共有10 a的年最小1 d流量达到或超过了400 m³/s,而这10 a全部都位于1990 s和2000 s;此外,在研究时段的50 a中,年最小1 d流量小于或等于350 m³/s的共有20 a,其中位于1990 s和2000 s的仅有1995及2007年。

4.3 流量历时曲线比较

流量历时曲线根据给定时段内流域的流量数值及其相对历时绘制而成,表示该时段内大于或等于某一流量的时间百分比,能够很好地说明径流量的分配特征^[28]。在水资源开发和生态环境保护等工作中,常采用流量历时曲线对枯水径流特征进行分析,所使用的流量特征指标主要有保证率为75%,90%及95%等的日平均流量(分别用Q75、Q90及Q95表示)^[29,30]。本文即利用近50 a来的道街坝站日平均径流资料,绘制各个年代流量历时曲线,获得不同年代Q75、Q90及Q95等各保证率流量值,其结果如表7所示。可以看出,道街坝站不同年代流量特征差距较大,1990 s及2000 s的Q75、Q90及Q95远高于此前的1960 s、1970 s及1980 s,以Q75为例,1960 s、1970 s及1980 s道街坝站的Q75分别为489 m³/s、510 m³/s及488 m³/s,而1990 s及2000 s则依次为577 m³/s及563 m³/s,较之前的3个年代高10%~18%。

5 结论与讨论

1) 近50 a来,怒江流域中上游冬季和春季气温均有上升趋势,冬季的增幅高于春季,且变暖的幅度一般随海拔高度升高而增大,河源区那曲站冬季平均气温的增幅达到了0.81℃/10 a;另一方面,

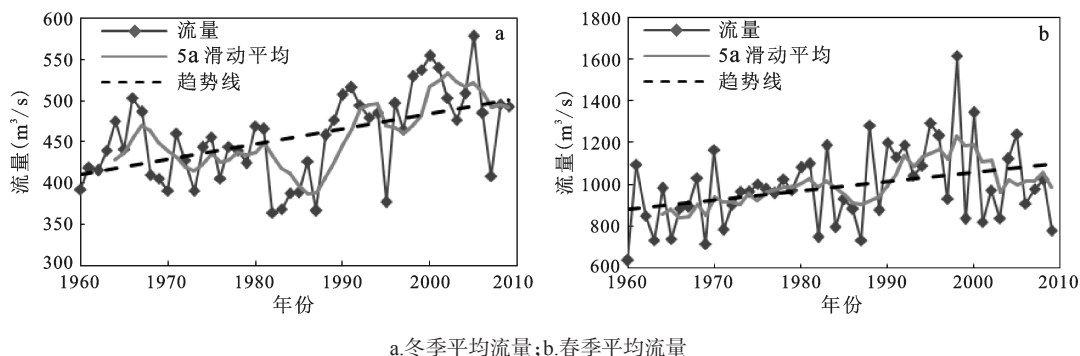
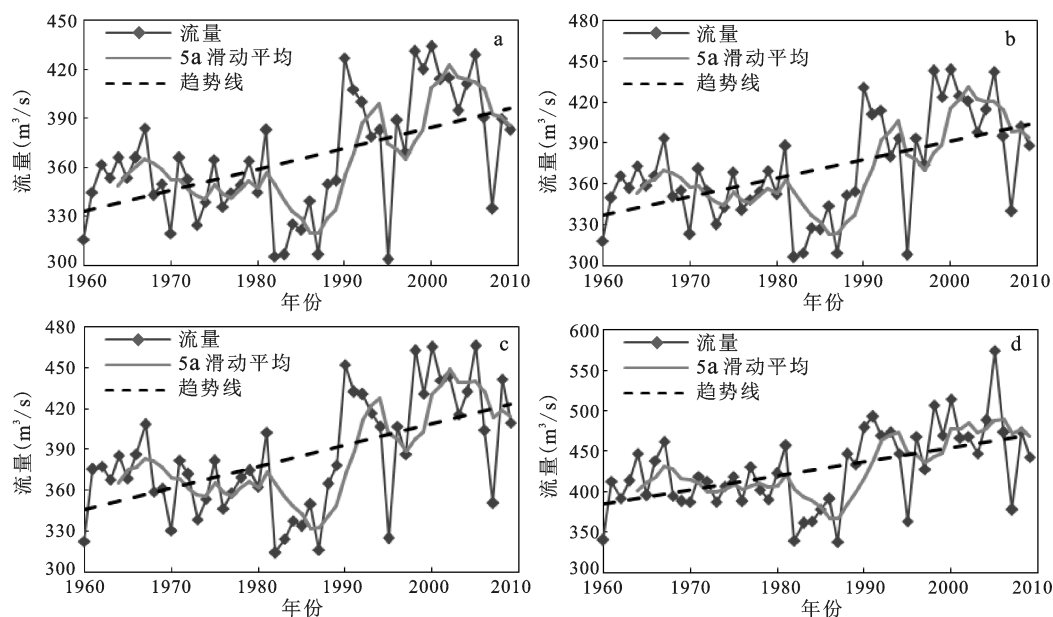


图2 道街坝站枯季季节流量变化

Fig. 2 Low flow variations in Daojieba station



a.年最小1 d流量; b.年最小7 d流量; c.年最小30 d流量; d.年最小90 d流量

图3 道街坝站枯季极值流量变化

Fig. 3 Minimum flow variations in Daojieba station

表7 道街坝站不同年代枯水流量特征指标值(m^3/s)Table 7 Low-flow indices value in different decades in the Daojieba station (m^3/s)

	1960 s	1970 s	1980 s	1990 s	2000 s
Q75	489	510	488	577	563
Q90	383	381	359	438	448
Q95	364	359	338	407	417

怒江中上游冬季和春季的平均日最低气温增加幅度较大,且其增加趋势均为极显著,而平均日最高气温的增加趋势则多不显著,平均气温的增加在很大程度上是由于夜间温度的增加。对于降水量而言,各站点春季和冬季降水量均有增加的趋势,上游那曲、索县及丁青站春季降水量的增幅介于(6.5~7.7)mm/10 a之间,且增加趋势均为极显著。

2) 怒江流域枯季径流在近50 a来发生了较为明显的变化。近50 a来,怒江流域道街坝站冬季和春季平均流量都有显著的增加趋势(分别达到了 $\alpha=0.01$ 及 $\alpha=0.05$ 的显著水平),其增长率则分别为 $18(\text{m}^3/\text{s})/10 \text{ a}$ 及 $44(\text{m}^3/\text{s})/10 \text{ a}$ 。另一方面,无论是年最小1、7、30及90 d流量等枯季极值径流量,还是75%、90%及95%等不同保证率枯水径流特征值,1990 s和2000 s均远高于其他年代,说明20世纪90年代以来,怒江流域中上游枯水径流有

较为明显的增长。

3) 怒江流域中上游枯季径流量的增加,与冬季和春季气温和降水增加有一定关系。首先,怒江中上游地区尤其是冬季及春季降水量较大的贡山、福贡一带降水量的增多将使枯季径流量增加;其次,气温的上升将加速融雪融冰形成径流的过程;再者,怒江流域上游冬季径流补给以地下水为主,冻土退化对枯季径流量及其分配将会造成一定影响。

参考文献(References):

- [1] IPCC.Climate change 2007: The physical science basis, summary for policymaker[R].Geneva: IPCC,2007.
- [2] Nema P,Nema S,Priyanka R.An overview of global climate changing in current scenario and mitigation action[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16:2329-2336.
- [3] 梁国付,丁圣彦.气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学,2012,32(5):635-640.[Liang Guofu,Ding Shengyan.The impacts of climate and landuse changes on the runoff effects: case in the upper reaches of the Yihe River, the Yiluo River Basin.Scientia Geographica Sinica,2012,32(5):635-640.]
- [4] Arnell N W,Gosling S N.The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale[J].Journal of Hydrology,2013, 486:351-364.
- [5] Van Vliet M T H,Franssen W H P,Yearsley J R et al.Global river discharge and water temperature under climate change[J].Glob-

- al Environmental Change, 2013, 23: 450-464.
- [6] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464. [Li Fengping, Zhang Guangxin, Dong Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 457-464.]
 - [7] 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. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464.]
 - [8] Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328: 1382-1385.
 - [9] 潘威, 闫芳芳, 郑景云, 等. 1766年以来黄河上中游汛期径流量变化的同步性[J]. 地理科学, 2013, 33(9): 1145-1149. [Pan Wei, Yan Fangfang, Zheng Jingyun et al. The synchronization of natural runoff change in flood-season of upper and middle reaches of the Huanghe River in 1766-2004. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(9): 1145-1149.]
 - [10] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8. [Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8.]
 - [11] 王堰, 李雄, 缪启龙. 青藏高原近50年来气温变化特征的研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 41-46. [Wang Yan, Li Xiong, Miu Qilong. Analyses on variety characteristics of temperature in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 41-46.]
 - [12] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805. [Ding Yihui, Zhang Li. Inter-comparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 794-805.]
 - [13] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近40年来气候变化特征及湖泊环境响应[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1503-1512. [Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1503-1512.]
 - [14] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186. [Li Lin, Chen Xiaoguang, Wang Zhenyu et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3): 181-186.]
 - [15] 曹建廷, 秦大河, 康尔泗, 等. 青藏高原外流区主要河流的径流变化[J]. 科学通报, 2005, 50(21): 2403-2408. [Cao Jianting, Qin Dahe, Kang Ersi et al. River discharge changes in the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(21): 2403-2408.]
 - [16] 刘新有, 何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及变化趋势[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 365-371. [Liu Xinyou, He Daming. Temporal and spatial distribution and its change trend of suspended sediment transport in the Nujiang River Basin. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 365-371.]
 - [17] 樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 621-630. [Fan Hui, He Daming. Regional climate and its change in the Nujiang River Basin. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 621-630.]
 - [18] 杜军, 翁海卿, 袁雷, 等. 近40年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 581-591. [Du Jun, Weng Haiqing, Yuan Lei et al. The climate characteristics and changing trends over the Nujiang River Basin in Tibet from 1971 to 2008. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 581-591.]
 - [19] 姚治君, 段瑞, 刘兆飞. 怒江流域降水与气温变化及其对跨境径流的影响分析[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 202-210. [Yao Zhijun, Duan Rui, Liu Zhao-fei. Changes in precipitation and air temperature and its impacts on runoff in the Nujiang River Basin. Resources Science, 2012, 34(2): 202-210.]
 - [20] 张万诚, 肖子牛, 郑建萌, 等. 怒江流量长期变化特征及对气候变化的响应[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 II): 135-141. [Zhang Wancheng, Xiao Ziniu, Zheng Jianmeng et al. Characteristics of the Nujiang River runoff for a long term and its response to climate change. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(zkII): 135-141.]
 - [21] 尤卫红, 郭志荣, 何大明. 纵向岭谷作用下的怒江跨境径流量变化及其与夏季风的关系[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 II): 128-134. [You Weihong, Guo Zhirong, He Daming. Variation in transboundary flow of Nujiang River and its correlation with summer monsoon under the effect of the Longitudinal Range-Gorge. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(zkII): 128-134.]
 - [22] 叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 103-110. [Ye Baisheng, Ding Yongjian, Jiao Keqin et al. The response of river discharge to climate warming in cold region over China. Quaternary Sciences, 2012, 32(1): 103-110.]
 - [23] 刘冬英, 沈燕舟, 王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 64-66. [Liu Dongying, Shen Yanzhou, Wang Zhengxiang. Water resource characteristics in the Nujiang River Basin. Yangtze River, 2008, 39(17): 64-66.]
 - [24] 刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近30年气候变暖与海拔高度的关系[J]. 高原气象, 1998, 17(3): 245-249. [Liu Xiaodong, Hou Ping. Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation. Plateau Meteorology, 1998, 17(3): 245-249.]
 - [25] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 98-106. [Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian et al. Amplitude of climatic changes in Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1): 98-106.]
 - [26] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N et al. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change[J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18(12): 2253-2256.
 - [27] Karl T R, Jones P D, Knight R W et al. A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and

- minimum temperature[J].Bulletin of the American Meteorological Society,1993,74(6):1007-1023.
- [28] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响[J].地球科学进展,2008,23(4):382-389.[Mu Xingmin,Gao Peng,Basang Chilie et al.Estimating the impact of conservation measures on stream-flow regime in catchments of the Loess Plateau,China.Advances in Earth Science,2008,23(4):382-389.]
- [29] Smakhtin V U.Low flow hydrology: a review[J].Journal of Hydrology,2001,240:147-186.
- [30] 黄国如,陈永勤.枯水径流若干问题研究进展[J].水电能源科学,2005,23(4):61-64.[Huang Guoru,Chen Yongqin.Review of some problems about low runoff.Hydroelectric Energy,2005,23(4):61-64.]

Low Flow Variations in the Middle and Upper Nujiang River Basin and Possible Responds to Climate Change in Recent 50 Years

Luo Xian, He Daming, Ji Xuan, Lu Ying, Li Yungang

(Asian International Rivers Center of Yunnan University, Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650091, Yunnan, China)

Abstract: The impacts of climate change on hydrological processes in Tibetan Plateau are complicated and sensitive, and the resulting water resource change could have profound influences. Nujiang River, sourcing from Tibetan Plateau, is an important international river in southwest China. Taking use of long term records, air temperature and precipitation variations in the middle and upper Nujiang River Basin during 1960 to 2009 were analysed. On the other hand, seasonal flow, extreme flow, and flow duration curve in Daojieba station were compared to study the variation characteristics of low flow and their responses to climate change in recent 50 years. The results show that winter and spring air temperature had increased, and the rate in winter was higher than that in spring, which increased with altitude. In Naqu station in the river source, the increasing rate of winter temperature could reach $0.81^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. In addition, daily minimum air temperature in winter and spring in the middle and upper Nujiang River Basin had increased more quickly and significantly than daily maximal air temperature, which showed that increasing mean temperature was largely due to rising nocturnal temperature. The trends of winter and spring precipitation were both increasing. The increasing rate of spring precipitation in Naqu, Suoxian, and Dingqing stations were between 6.5 and 7.7 mm/10 a, and spring precipitation in these 3 stations in 2000 s were 54.4%, 35.6%, and 18.0% more than the average value. Winter and spring flows in Daojieba station had increased significantly, and the increasing rate were 18 and 44 (m^3/s)/10 a, respectively. Winter flows in 1990s and 2000s were 7.3% and 10.7% higher than the average value, while the anomaly of spring flow in 1990s reached 16.8%. On the other hand, whether annual minimum of 1-day, 7-day, 30-day, and 90-day moving average flows, or Q75, Q90, and Q95, the value in 1990s and 2000s were all much higher than those in other decades, which showed that low flow had increased from 1990s. For instance, between 1960 and 2009, there were 10 years with minimum daily flow greater than $400\text{ m}^3/\text{s}$, which were all in 1990s and 2000s. While 20 years with minimum daily flow less than $350\text{ m}^3/\text{s}$, among which only 2 years were in 1990s and 2000s. In addition, Q75 in Daojieba station in 1960s, 1970s, and 1980s were 489, 510, and $488\text{ m}^3/\text{s}$ respectively. While in 1990s and 2000s, the values were 577 and $563\text{ m}^3/\text{s}$, which were 10%-18% higher than previous 3 decades. The increase of low flow in the middle and upper Nujiang River Basin could be attributed to the increasing air temperature and precipitation in winter and spring. At first, increasing precipitation would generate more flow. Secondly, rising air temperature may accelerate melting processes of snow and ice. In addition, frozen soil degradation caused by climate warming could also affect hydrological processes.

Key words: climate change; low flow; hydrological extremes; flow duration curve; Nujiang River Basin