

怒江流域气候特征及其变化趋势

樊辉, 何大明

(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, 昆明 650091)

摘要: 利用怒江流域及其毗邻地区 16 个气象台站长时序逐月气温和降水量数据, 运用 TFPW-MK (Trend-free Pre-whitening Mann-Kendall) 检验和重复迭代变化诊断等方法, 分析了近几十年来怒江流域气候要素空间格局和变化特征。结果表明: (1) 怒江流域气温 (年平均、年最高和年最低) 和年降水量由北向南总体呈递增, 并与海拔相关性极为显著 ($\alpha = 0.01$), 且气候要素值随海拔升高而降低; (2) 降水集中度地域差异明显, 西藏境内降水集中度多达 60% 以上, 全流域降水集中期 (除贡山站外) 多介于 7 月下旬至 8 月下旬; (3) 流域升温趋势显著, 其年平均、年最高和年最低气温变化趋势多与纬度和海拔呈显著相关, 其中年平均气温增幅为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; (4) 部分站点气温变化存在突变点, 且其多出现于暖冬频发的 20 世纪 80 年代以后; (5) 年降水量总体有所增多, 但变化趋势多不显著, 无明显变点。

关键词: 气候变化; Mann-Kendall 检验; 突变分析; 高原山地

1 引言

全球气候变暖已成为一种共识。IPCC 第四次评估报告表明, 最近 100 年 (1906-2005 年) 全球地表气温呈线性上升趋势, 其上升幅度为 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.56\sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[1]。伴随着气候变暖, 全球大部分地区降水量和降水模式也发生了明显变化, 其陆域强降水事件发生频率有所上升^[1]。我国境内气候变化与全球变化总体趋势基本一致, 但也存在明显差异^[2]。近百年来, 尤其是近 50 年来, 我国气候变暖趋势明显, 年平均地表气温增幅约为 $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2], 略低于同期全球升温幅度。此外, 我国气温和降水变化区域分异明显^[2]。

高海拔高原山地是影响区域和全球气候的重要因素, 其气候变化对全球气候变化具有指示性意义^[3-6]。青藏高原是亚洲主要大江大河 (如黄河、长江、雅鲁藏布江、怒江—萨尔温江和澜沧江—湄公河等) 的发源地, 其气候变化会对区域乃至全球水文循环和水资源产生重要影响^[7-9]。以往研究多侧重于高原整体气候演变特征^[4, 10-13], 而从大流域尺度分析纵向峡谷山地气候变化区域分异特征的研究相对较少。

怒江是发源于青藏高原的我国西南重要国际河流。它横跨 9 个经度, 纵贯 10 个纬度, 呈南北狭长形, 流域平均宽度仅 70 余 km, 面积约 13.6 万 km^2 , 干流河段全长 2013 km ^[14]。流域地势北高南低, 地形起伏巨大, 相对高差达 6000 余米, 气候类型多样且变化异常复杂, 是全球生物多样性和生态景观保护的重要区域, 以及我国西南与东南亚极为重要的生态廊道, 具有重要的生态意义^[15]。郝振纯等^[11]和杜军等^[16]研究了上游青藏高原怒江流域的

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41061010); 国家科技支撑计划重大项目课题 (2011BAC09B07); 云南省应用基础研究项目 (2010zc002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41061010; National Science and Technology Support Program, No.2011BAC09B07; Applied Basic Research Foundation of Yunnan Province, No.2010zc002]

作者简介: 樊辉 (1972-), 男, 江西修水人, 副研究员, 博士, 主要从事全球变化与环境遥感研究。

E-mail: fanhui@ynu.edu.cn

通讯作者: 何大明 (1958-), 男, 教授, 博导, 中国地理学会会员 (S110000355M), 主要从事国际河流、跨境生态安全等研究。E-mail: dmhe@ynu.edu.cn

气候变化特征,张万诚等^[17]则对怒江流域云南境内部分降水时空变化进行了研究,但目前尚缺乏怒江全流域气候变化特征及区域分异规律的探讨。基于此,本文利用怒江流域及其毗邻地区 16 个气象站的时序观测资料,探讨全球气候变暖背景下全流域气候变化的区域分异特征及突变,为该流域与气候变化相关的资源合理开发利用与管理提供气候变化背景信息。

2 资料与方法

2.1 气象资料

研究选用的怒江流域及其毗邻地区 16 个气象站(图 1 和表 1)的逐月气温(包括平均气温、最高气温和最低气温)和降水量资料来源于国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)。研究区内,西藏境内气象站点海拔均在 3000 m 以上,而云南境内站点海拔均位于 2000 m 以下(图 1 和表 1)。

2.2 集中度与集中期计算

降水量年内分配向量法^[18]就是将一年内各月降水量作为向量,月降水量的多少(r_i ,其中 $i=1, \dots, 12$)作为向量的长度,月份则代表向量的方向(月中代表的角度值 θ_i)。再将分解后(水平和垂直方向分量分别为 $r_i \sin \theta_i$ 和 $r_i \cos \theta_i$)向量逐月累加再合成,合成向量的大小则为各分量之和的总效应(R),而合成向量的方向则表示总效应的方向。集中度(C_n)则为合成向量大小占年降水量(W)的百分数^[18-19],其表达式为:

$$C_n = \frac{R}{W} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i\right)^2}}{\sum_{i=1}^{12} r_i} \quad (1)$$

集中期(D)则以 12 个月降水量分量和(水平和垂直方向分别为 R_x 和 R_y)之比值的正切角度来表示^[18-19],其计算公式为:

$$D = \arctan\left(\frac{R_x}{R_y}\right) = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i}\right) \quad (2)$$

表 1 怒江流域气象站点及观测年限

Tab. 1 Observation period of metrological stations in the Nujiang River basin

站名	海拔 (m)	起止时间	站名	海拔 (m)	起止时间	站名	海拔 (m)	起止时间
安多	4800	1966-2010	类乌齐	3810	1991-2010	腾冲	1655	1951-2010
那曲	4507	1955-2010	八宿	3260	1991-2010	临沧	1502	1954-2010
洛隆	3640	1992-2010	左贡	3780	1978-2010	孟定	511	1955-1990
索县	4023	1957-2010	贡山	1591	1958-2010	耿马	1104	1990-2010
比如	3940	1991-2010	泸水	1805	1957-2002			
丁青	3873	1954-2010	保山	1654	1951-2010			

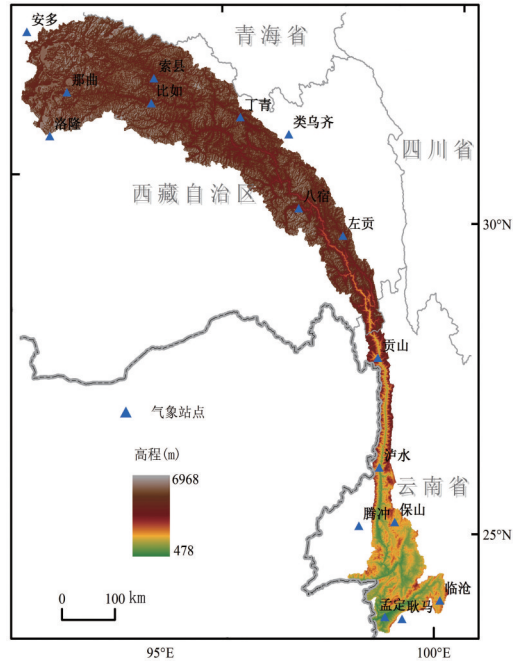


图 1 怒江流域气象站点分布图

Fig. 1 The distribution of metrological stations in the Nujiang River basin

2.3 TFPW-MK (Trend-Free Pre-Whitening Mann-Kendall) 检验法

气候变量时序趋势分析采用无趋势白化 Mann-Kendall 检验法^[20]。Mann-Kendall 为非参数检验方法,它不要求时序遵循特定分布,各观测值趋势在时序内可随机独立。由于气温和降水时序往往存在明显的自相关性,可能会导致时序的趋势显著性被夸大。为消除序列中自相关成分对时序趋势值的影响,在 Mann-Kendall 检验前预先使用无趋势白化处理^[20-21]。

2.4 变点分析

变点分析采用 Verbesselt 等提出的重复迭代变化诊断方法^[22]。该方法将时序数据迭代分解(包括趋势性、季节性和剩余成分)和变点诊断(包括趋势和季节性成分变点)有机整合,克服传统基于局部加权回归平滑(LOESS)分解方法难以识别时序内部变化的缺陷。

变点诊断迭代算法的基本步骤为:1) 估算 \hat{S}_t (所有季节子时序的平均值),利用基于普通最小二乘残差的滑动加和(OLS-MOSUM)检验求去季节性时序数据 $Y_t - \hat{S}_t$ 的趋势成分变点数和位置,其中 Y_t 为时间 t 的观测值;2) 基于 $Tt = \alpha_j + \beta_j t$ ($j = 1, \dots, m$),利用 M-估计稳健回归方法计算趋势系数 α_j 和 β_j 。趋势成分估计值设为 $\hat{T}_t = \hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_j t$, 式中 $t = t_{j-1}^* + 1, \dots, t_j^*$;3) 利用基于普通最小二乘残差的滑动加和(OLS-MOSUM)检验求去趋势时序数据 $Y_t - \hat{T}_t$ 的季节成分变点数和位置;4) 利用 M-估计稳健回归方法计算季节系数 γ_j , 季节性成分估计值设为 $\hat{S}_t = \sum_{i=1}^{s-1} \hat{\gamma}_j (d_{t,i} - d_{t,0})$, 式中 $t = t_{j-1}^* + 1, \dots, t_j^*$, 当 t 为 i 季节时, $d_{t,i}$ 等于 1; 否则, $d_{t,i}$ 等于 0。重复上述四个过程,直到趋势和季节变点数量和位置均不再变化。

3 结果分析

3.1 气温与降水的区域差异特征

3.1.1 气温空间分布特征 怒江流域年平均气温南北相差悬殊,由北向南呈递增趋势(图 2a)。河源区附近的安多站和那曲站年平均气温在 0 °C 以下,而流域南端的孟定站年平均气温在 20 °C 以上。流域内各站年平均气温地理分异明显,可大致划分为海拔 3000 m 以上的西藏境内和海拔 2000 m 以下的云南境内。西藏境内各站中,除位于高山河谷的洛隆站和八宿站年平均气温介于 5~12 °C 之间外,其余站点年平均气温均低于 5 °C; 云南境内各站年平均气温均在 12 °C 以上,流域南端三站(临沧、孟定和耿马)更高,尤以低纬度河谷的孟定站更为突出,其年平均气温高于 21 °C。从年际变化来看,流域内各站年平均气温年际波动不是太大,介于 2~4 °C 之间,且地域分布差异规律不明显。

流域内年最高与最低气温分布格局和年平均气温较为一致,总体表现为南北差异由北向南递增(图 2b, c)。除八宿站外,西藏境内各站年最高和最低气温分别在 28 °C 和 -15 °C 以下,而云南境内各站则分别高于 28 °C 和 -3 °C。位于干热河谷的八宿站年最高气温与流域南端临沧站相当,略高于泸水、保山和腾冲等站;而其年最低气温介于 -9~-7 °C,远低于贡山以下各站。年最高和最低气温的变化幅度均大于年平均气温,其分别为 4~7 °C 和 2~19 °C。与年平均气温一样,年最高气温年际变化地域差异规律不明显,而年最低气温年际变化存在一定的地域分异。西藏境内各站年最低气温年际变幅总体上较云南境内各站大,尤以安多、那曲和比如三站更为突出。

3.1.2 降水空间分布特征 怒江流域降水分布亦可大致划分为两大区域(图 3a),即海拔 3000 m 以上的西藏境内和海拔 2000 m 以下的云南境内。西藏境内各站年降水量仅为 200~700 mm,而云南境内各站年降水量则为 850~1850 mm。西藏境内流域各站中,八宿站降水最少,年降水量仅为 200~300 mm; 其次是安多、那曲、洛隆和左贡,该四站的年降水量介于 350~500 mm; 而索县、比如、丁青和类乌齐四站的降水相对较多,年降水量为

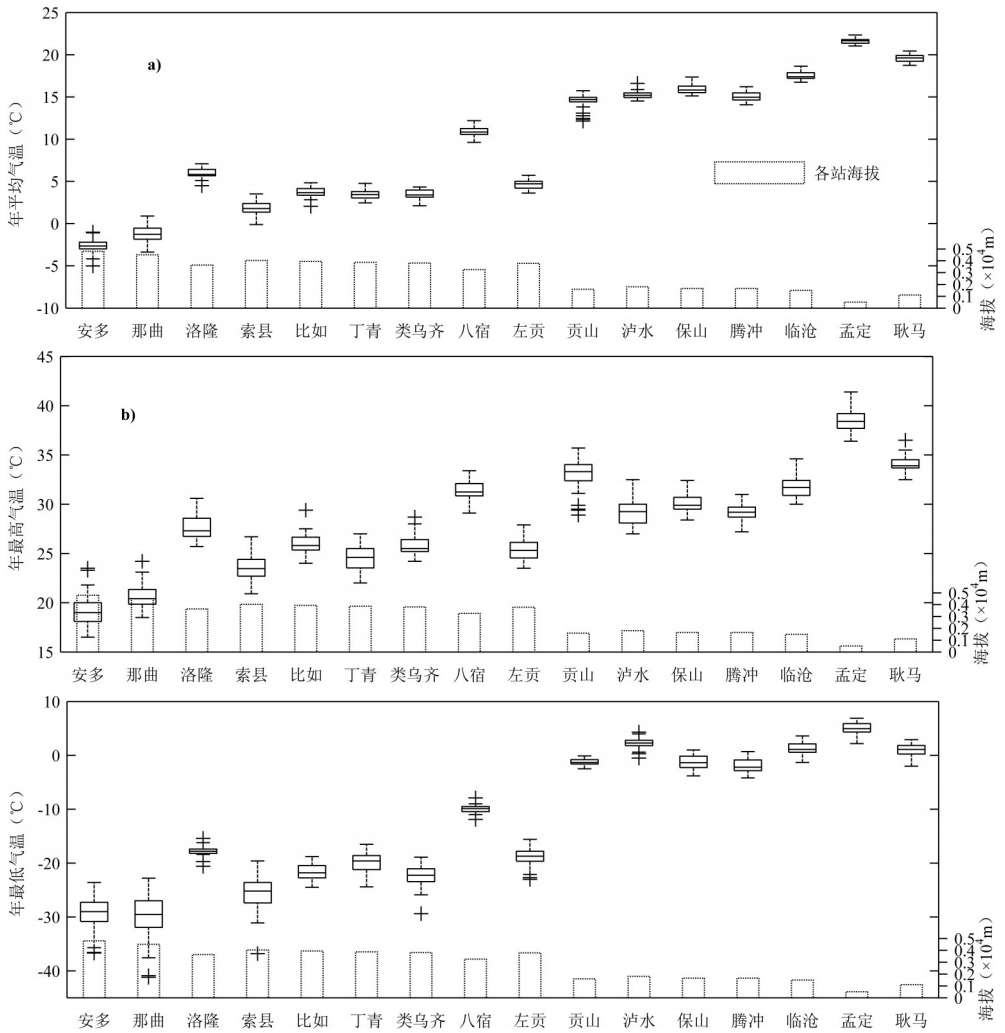


图2 怒江流域各气象站点气温盒须图

Fig. 2 Boxplot of air temperature at the metrological stations in the Nujiang River basin

500~700 mm。云南境内各站中，贡山站降水最多，其年降水量为1550~1850 mm，极端年份其降水量达约2400 mm；其次是腾冲和孟定，二者年降水量为1350~1700 mm；而保山站年降水量最小，仅为850~1100 mm。从年间变幅来看，西藏境内各站年间变化均较小，最大极差值约为500 mm（丁青站），最小极差仅为250 mm（八宿站）；而云南境内各站年间变化均较大，最大极差高达1100 mm以上（贡山站），最小极差也达550 mm（孟定站）。

怒江流域各站降水年内分配极不一致，且存在明显的地域差异（图3b）。全流域降水集中度介于10%~86%之间。其中，贡山站降水集中度最小，其多年中值为30%左右；安多站最大，其多年中值高达75%。西藏境内各站降水集中度多为50%~80%，站间差异较小；而云南境内各站降水集中度多为40%~70%，且顺江而下呈递增态势。此外，流域内各站降水集中度的年际波动也非常明显，多数站点年间变化幅度介于15%~50%。总体来看，西藏境内各站集中度年际变化较小，多小于35%。其中，以比如站最小，仅为15%。而云南境内各站降水集中度差异较为明显，除耿马站外，其余各站年际变化值均大于30%。其中，以泸水站最大，高达50%。从全流域来看，各站降水集中期跨度从4月下旬至9月中旬（图3c）。除贡山站外，其余各站的降水集中期多出现于7月下旬至8月下旬。

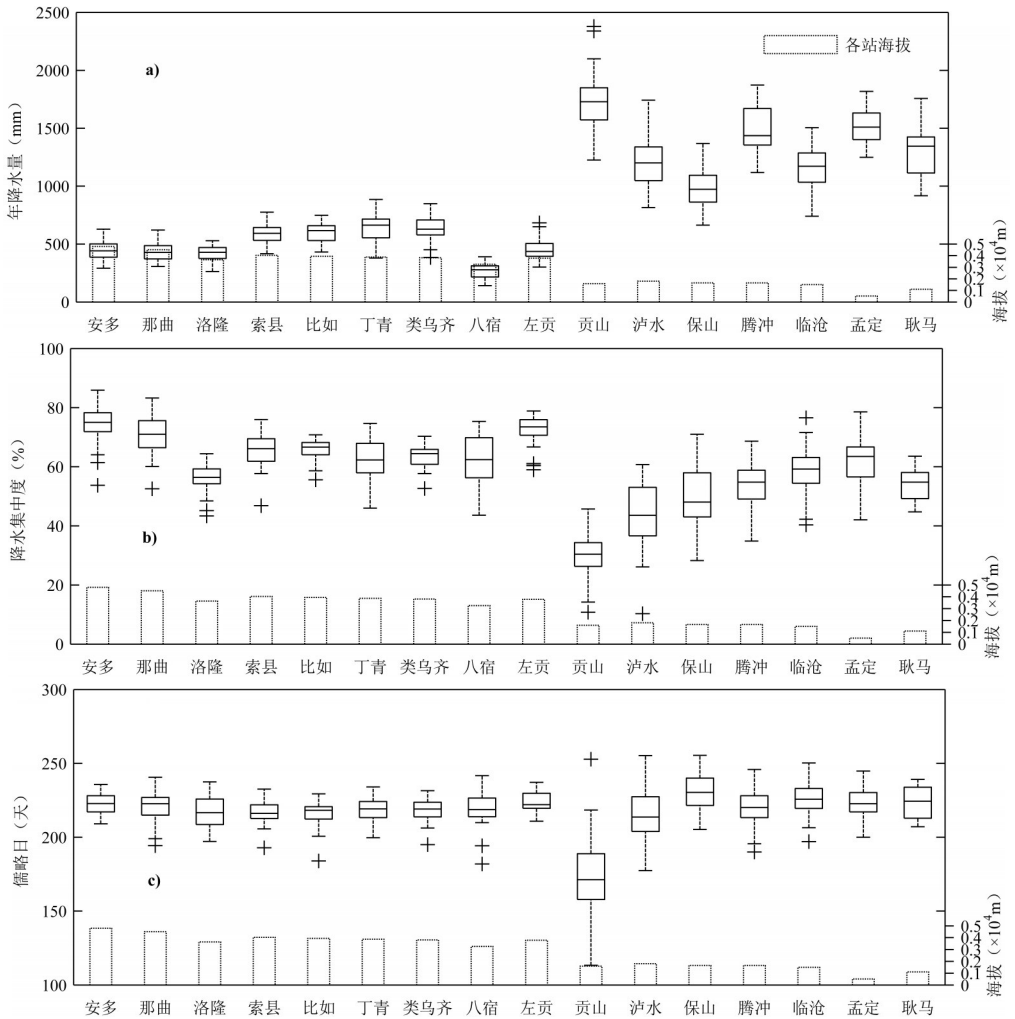


图3 怒江流域年平均降水量 (a)、降水集中度 (b) 和集中期 (c) 盒须图

Fig. 3 Boxplot of annual precipitation (a), precipitation-concentration degree (b), and precipitation-concentration time (c) at the metrological stations in the Nujiang River basin

贡山站降水集中期多发生在6月上旬至7月上旬。各站降水集中期的年际差异也很明显,均在1个月以上。其中,以贡山和泸水尤为突出,其多年降水集中期时间跨度超过2个半月;而其余各站的多年降水集中期波动范围均在2个月以内。如不考虑异常值,云南境内各站降水集中期波动幅度总体上较西藏境内各站大。

3.1.3 经纬度和海拔对气温和降水区域分异的影响 计算怒江流域气候要素与经纬度和海拔的相关程度可知(表2),年平均、年最高、年最低气温和年降水量与经纬度和海拔均存在极显著相关,与经度呈正相关,而与纬度和海拔呈负相关。各气候要素与海拔的相关程度最为密切,其相关系数高达-0.89~0.99。考虑到经度、纬度和海拔三者并不是独立的,而存在相互关联,故采用逐步回归分析对因子进行筛选。分析表明,海拔对年平均、年最高和年最低气温以及年降水量影响均极显著,经度仅对年最低气温影响极显著,纬度仅对年最高气温影响显著(表2)。

3.2 气温与降水变化特征及突变分析

3.2.1 气温变化趋势 近40年来,怒江流域增温显著(表3)。全流域年平均气温增温速率为0.10~0.75 °C/10a。西藏境内各站升温趋势更为显著,年平均气温增速为0.23~0.75 °C/

10a; 而云南境内各站年平均气温增速仅为 0.10~0.28 °C/10a。尤以洛隆、比如、类乌齐、八宿四站增温最为突出, 年平均气温 10a 增幅高达 0.50 °C 以上, 高于其它各站。

流域内增温的季节性差异明显(表 3)。春季, 多数站点增温不显著, 其平均气温上升幅度为 0.07~0.51 °C/10a。夏季和秋季, 大多数站点增温显著或极显著, 平均气温升幅均略大于春季, 分别为 0.12~0.65 °C/10a 和 0.06~0.61 °C/10a。冬季, 全流域增温最为突出, 该季平均气温升幅为全年最高, 且均表现为显著或极显著, 升温范围为 0.19~1.14 °C/10a。尤以洛隆、比如、类乌齐、八宿和耿马各站冬季增温最为明显。

年极端气温总体上也表现为升高趋势(表 3)。年最高气温以那曲至贡山段上升幅度较大(0.25~0.78 °C/10a), 尤以洛隆为最大; 而河源区的安多站和贡山以下各站则变化不明显或略有下降。全流域年最低气温上升明显, 除河谷区的几个站点(洛隆、八宿、贡山、泸水和孟定)外, 均呈现显著或极显著上升, 其升温幅度为 0.30~2.24 °C/10a。

3.2.2 降水变化趋势 与全流域的普遍显著升温不同, 流域内各站点降水量有增有减, 且绝大多数站点变化不显著(表 4)。年均降水量变化仅安多、那曲和左贡三站呈极显著增加, 增幅为 2.04~3.11 mm/a, 其余各站变化趋势均不显著。从季节分配来看, 怒江流域仅春季降水量呈一致性增多, 增幅为 0.39~2.89 mm/a, 且近半数站点降水量增加显著或极显著。夏、秋、冬三季全流域除极少数站点外降水量变化趋势均不显著。夏季该流域云南境内段降水量一致性减少, 变幅为 -0.51~-6.26 mm/a; 而秋季却呈现普遍性增加(除耿马外), 变幅为 0.42~2.54 mm/a。冬季全流域降水量变化幅度为全年最小。降水集中度与集中期的多年变化趋势也表明, 全流域降水的季节性变化不显著(表 4)。流域内绝大多数站点降水集中程度有所下降, 除八宿站(10a 下降约 7.1%)外, 其余站点降水集中程度 10a 下降幅度均不及 2%; 多数站点降水集中期也有所提前, 但除八宿站(10a 提前约 9 天)外, 其余站点变化幅度均不大, 10a 提前幅度均不及 3 天。

3.2.3 气温与降水突变特征 通过对全流域气温和降水逐月时序分析表明, 逐月平均、最高和最低气温均未出现周期性突变点, 仅部分站点存在趋势性突变点(表 5); 所有站点逐月降水时序均未有转折性变化。存在气温突变的各站点, 其发生转折性变化的具体时间各异。同一站点(如保山和腾冲等), 其平均、最高和最低气温突变时间点也极少一致。

3.2.4 经纬度和海拔对气温和降水变化区域分异的影响 气候要素变化趋势与经纬度和

表 2 怒江流域气温和降水与经纬度和海拔的相关分析

Tab. 2 Correlation analyses of air temperature and precipitation with longitude, latitude and altitude in the Nujiang River basin

	年平均气温		年最高气温		年最低气温		年降水量	
	Pearson 相关	逐步回归 F 检验	Pearson 相关	逐步回归 F 检验	Pearson 相关	逐步回归 F 检验	Pearson 相关	逐步回归 F 检验
经度	0.73**	-	0.85**	-	0.92**	**	0.87**	-
纬度	-0.81**	-	-0.81**	*	-0.93**	-	-0.95**	-
海拔	-0.89**	**	-0.90**	**	-0.97**	**	-0.99**	**

注: *为 $\alpha=0.05$ 置信水平, **为 $\alpha=0.01$ 置信水平。

表 3 怒江流域气温变化趋势

Tab. 3 Changing trend of air temperature in the Nujiang River basin

站名	安多	那曲	洛隆	索县	比如	丁青	类乌齐	八宿	左贡	贡山	泸水	保山	腾冲	临沧	孟定	耿马	
平均气温 (°C/10a)	全年	0.36**	0.44**	0.68**	0.29**	0.75**	0.23**	0.66**	0.51**	0.45**	0.10	0.13**	0.19**	0.25**	0.24**	0.28**	0.14
	春	0.21*	0.33**	0.51	0.25	0.38	0.16**	0.44	0.30	0.36**	0.09	0.17	0.25**	0.20**	0.20**	0.07	0.44
	夏	0.23**	0.26**	0.61**	0.21**	0.66**	0.22**	0.61**	0.51	0.19	0.12	0.13**	0.20**	0.14**	0.24**	0.14**	0.20
	秋	0.44**	0.46**	0.50	0.33**	0.61**	0.19**	0.42	0.40	0.42**	0.17	0.16**	0.21**	0.27**	0.24**	0.06	0.25
	冬	0.55**	0.75**	0.94**	0.39**	1.14**	0.33**	1.00**	0.81**	0.62**	0.22	0.19	0.21	0.36**	0.30**	0.24	0.59**
年最高气温 (°C/10a)		-0.03	0.25*	0.78**	0.36**	0.37	0.46**	0.64	0.69	0.50*	0.30	-0.14	0.02	0.00	0.04	-0.22	0.00
年最低气温 (°C/10a)		1.00*	1.41**	0.67	0.71*	2.24**	0.52**	1.59*	0.36	1.00**	0.07	0.30*	0.59**	0.42**	0.30	1.04*	

注: *为 $\alpha=0.05$ 置信水平, **为 $\alpha=0.01$ 置信水平。

海拔的相关分析表明,流域的年平均、年最高和年最低气温变化趋势与经纬度和海拔多呈显著相关,而年降水量与经纬度和海拔则相关不显著(表6)。从季节变化来看,秋、冬季平均气温变化与经纬度和海拔相关关系显著或极显著,而春、夏季则相关多不显著。各季降水量中,仅夏季降水变化与经纬度和海拔相关显著。气候要素变化趋势与经度多呈负相关,而与纬度和海拔则多呈正相关。各气候要素特征值与经纬度和海拔的逐步回归分析表明,海拔对年平均和年最低气温变化影响显著,而纬度对年最高气温变化影响显著。从年内变化来看,夏季平均气温变化受纬度影响显著,秋、冬季平均气温变化则受海拔影响显著,而夏季降水量变化则受经度影响显著。

4 讨论

4.1 气候要素时空变化与经纬度和海拔的关系

怒江流域南北狭长,气候要素变化的地域分异显著。由北向南,年平均气温增幅达20℃以上,年最高气温和最低气温升幅分别在20℃和30℃以上,降水量也由500mm以下增至1500mm以上。统计分析进一步表明,各气候要素特征值均受海拔影响极为显著,经度和纬度仅分别对年最低和年最高气温有显著影响。这说明研究区内巨大的海拔差异是该区气候要素地域分异明显的主控因素。

海拔和经纬度还是影响流域气候要素变化区域不平衡的重要因素。年平均和年最低气温变化幅度与海拔相关显著,而年最高气温变化大小却与纬度相关显著。从各季节平均气温变化来看,夏季变化幅度与纬度相关显著,而秋、冬季变化则与海拔相关显著。说明怒

表4 怒江流域降水量变化趋势

Tab. 4 The changing trend of precipitation in the Nujiang River basin

站名		安多	那曲	洛隆	索县	比如	丁青	类乌齐	八宿
降水量 (mm/a)	全年	2.37**	2.04**	0.72	7.05	-0.03	-6.64	3.22	0.80
	春	0.75**	0.65**	1.59	0.69**	2.75	0.57	0.40	2.38
	夏	0.86	0.60	1.48	-0.50	3.53	-1.37	-3.48	-1.64
	秋	0.50	0.32	-1.05	0.38	0.45	0.60	-0.22	-0.38
	冬	0.11	0.09	0.20	0.23*	-0.29	0.06	-0.26	0.22
C _n (%/a)		-0.12	-0.11*	0.03	-0.14	-0.19	-0.19*	0.01	-0.71
D(天/a)		-0.09	-0.05	-0.10	-0.04	-0.29	0.02	-0.09	-0.91
站名		左贡	贡山	泸水	保山	腾冲	临沧	孟定	耿马
降水量 (mm/a)	全年	3.11**	3.96	1.03	0.87	0.58	1.96	3.21	-8.37
	春	1.01*	2.89	1.85**	1.10*	1.48**	0.39	1.93	1.06
	夏	1.99	-0.65	-1.84*	-1.56	-0.51	-0.87	-2.01	-6.26
	秋	-0.01	0.61	1.43	0.34	0.79	0.42	2.54*	-4.38
	冬	0.03	0.15	-0.20	-0.09	0.14	0.14	-0.17	-0.41
C _n (%/a)		-0.17	-0.08	-0.14	-0.01	-0.02	-0.03	-0.10	-0.09
D(天/a)		-0.16	-0.25	0.02	-0.11	-0.08	0.03	0.08	-0.28

注: *为 $\alpha=0.05$ 置信水平, **为 $\alpha=0.01$ 置信水平。

表5 怒江流域气温趋势突变时间点

Tab. 5 Change point of air temperature in the Nujiang River basin

站名	安多	索县	丁青	贡山	保山	腾冲	临沧	耿马
平均气温	1997	1968	1996	1966	1993	1993	-	2006
最高气温	-	-	-	1975	1993	1993	2002	-
最低气温	1997	1998	-	-	1989	1986	-	-

表6 怒江流域气温和降水变化趋势与经纬度和海拔的相关分析

Tab. 6 Correlation relationships between the changing trends of air temperature and precipitation with longitude, latitude and altitude in the Nujiang River basin

	平均气温					年最高气温	年最低气温	降水量				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季			全年	春季	夏季	秋季	冬季
经度	-0.56*	-0.41	-0.47	-0.73**	-0.57*	-0.44	-0.50*	-0.16	0.12	-0.56*	0.01	-0.32
纬度	0.57*	0.38	0.52*	0.72**	0.59*	0.68**	0.51*	0.21	-0.11	0.52*	0.04	0.32
海拔	0.60*	0.44	0.48	0.78**	0.60*	0.60*	0.57*	0.17	-0.29	0.54*	-0.02	0.31

注: *为Pearson相关 $\alpha=0.05$ 置信水平, **为 $\alpha=0.01$ 置信水平; 浅色阴影为逐步回归F检验显著, 深色阴影为极显著。

江流域海拔与纬度对气温变化的控制性影响,特别是海拔对秋、冬季平均气温变化影响更加强烈^[23]。这不同与我国气温变化幅度主要受控于纬度梯度变化,而与海拔相关不明显的总体趋势^[24]。海拔和经纬度对年降水量变化趋势影响均不显著,仅夏季降水量变化与经度相关显著,这是由高原山地复杂的局部地形因素和大气环流综合作用所决定的^[25-26]。怒江上游属高原气候区,多受高原气流影响;中下游属于典型的季风气候区,处于印度洋、太平洋水汽交汇区(0~32.5°N和97.5~142.5°E),主要受西南季风控制,尤以夏季为甚^[14, 27]。加之南北纵向河谷的水汽通道作用^[15, 27]等多源因素叠合影响,从而导致降水量变化与经纬度和海拔相关不显著。

尽管全流域年平均、年最高和最低气温多呈显著或极显著上升,但只有少数站点存在突变点,且出现时间点较为散乱。这说明上述气温因素的转折性变化并非大尺度区域性因子所促成,而更多受制于局域地形的作用。

4.2 气候变化与其它区域的对比

怒江流域年平均气温升幅范围为0.10~0.75 °C /10a,其均值约为0.36 °C /10a。这与青藏高原气温增幅相当(0.37 °C /10a)^[10],明显高于近50年全国的增温水平(0.16 °C /10a)^[2]。从季节分配来看,怒江流域春、夏、秋、冬四季平均气温升幅分别为0.26 °C /10a、0.29 °C /10a、0.32 °C /10a和0.54 °C /10a,与青藏高原四季平均气温变化趋势(分别为0.25 °C /10a、0.26 °C /10a、0.38 °C /10a和0.59 °C /10a)^[10]相比较,其春、夏季平均气温增暖幅度略高,而秋、冬季却又明显不及。研究区内冬、秋季增温趋势显著强于春、夏季,这与全国其它地区的增温季节性差异规律相一致^[23, 28]。此外,流域年最高、年最低气温增幅分别为0.25 °C /10a和0.77 °C /10a,前者比青藏高原年最高增幅(0.28 °C /10a)略低,而后者却远高于青藏高原0.51 °C /10a的年最低气温增幅^[10]。这表明怒江流域气温变化在夜间要较日间明显、冬季较其他季节明显。上述变化趋势均可能与频发的暖冬事件有关。据有关数据表明,1985年以来怒江流域频繁出现大范围的暖冬(约12~16次),尤其是2001-2008年出现连续暖冬,冬季最大温度偏差较常年高出3.0~4.5 °C^[16]。

温度的升高使地表蒸发散增强,进而导致降水量增多^[1]。在流域气温变暖背景下,虽然年降水量总体有所增多,但除少数站点外,流域年降水量和各季降水量变化趋势均不显著。部分站点年平均、年最高和年最低气温增温均显著,但年降水量却呈减少趋势。这表明降水与气温变化趋势并不同步,呈现多元化特征。

怒江流域气象观测站点稀少且分布不均,多数气象站设在河谷低处,高海拔地区观测站点极少。因此,利用现有站点观测资料,很难全面地反映气候要素的区域差异。如能将某一点的实际气候要素值分解为由大尺度地理因素、高度因素和局地地形因素等组成部分^[25-26],并由此建立流域气候要素随地理因素和海拔高度变化的半经验数学模式,可弥补此方面不足。此外,1980年代以来我国升温更为明显^[11, 29],而文中所采用站点观测时序不一致,特别是始于1990年代初的短期观测站点的使用,可能也会夸大流域气温变暖幅度。

5 结论

(1) 怒江流域气温(年平均、年最高和年最低)和降水量由北向南总体呈递增,气候要素特征值地域分异与海拔相关性均极显著($\alpha = 0.01$),气温特征值(年平均、年最高和年最低)和降水量均随海拔升高而降低;而经度和纬度则仅分别对年最低和年最高气温地域分异有显著影响。流域降水集中度地域差异明显,高海拔的西藏境内降水集中度较云南境内高,且年际变化小;除贡山站外,流域降水集中期多介于7月下旬至8月下旬。

(2) 流域变暖趋势显著,年平均气温增幅为0.36 °C /10a;年最高气温显著上升仅出现在高海拔的西藏境内,而云南境内升温和降温兼有,但变化趋势均不显著;年最低气温升

高趋势显著,其升幅较年平均气温大。西藏境内较云南境内升温幅度大;气温变化趋势多与纬度和海拔呈显著相关,高纬度和高海拔地区气温变化幅度较大。

(3) 流域年降水量总体有所增多,但变化趋势多不显著,仅安多、那曲和左贡三站降水极显著增加,其增幅为2.04~3.11 mm/a,且无明显变点。

参考文献 (References)

- [1] IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Ding Yihui, Ren Guoyu. National assessment report of climate change (I). Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8, 50. [丁一汇, 任国玉. 气候变化国家评估报告 (I). 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8, 50.]
- [3] Becker A, Bugmann H. Global change and mountain regions: An IGBP initiative for collaborative research. Global Change and Protected Areas, 2001, 9: 3-9.
- [4] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 青藏高原近30年气候变化趋势. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11.]
- [5] Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.]
- [6] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change (III). Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1996, 32(1): 108-111. [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). 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(1): 108-115.]
- [7] Lai Zuming. Impact of climate variation on the runoff of large rivers in the Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(suppl.): 314-320. [赖祖铭. 气候变化对青藏高原大江河径流的影响. 冰川冻土, 1996, 18(增刊1): 314-320.]
- [8] Immerzeel W W. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [9] Cao Jianting, Qin Dahe, Kang Ersi et al. Changes of runoff of main rivers in the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(21): 2403-2408. [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. 科学通报, 2005, 50(21): 2403-2408.]
- [10] 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. [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. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186.]
- [11] Hao Zhenchun, Jiang Weijuan, Ju Qin et al. The features of climate changes in the five river source regions of the Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1130-1135. [郝振纯, 江微娟, 鞠琴等. 青藏高原河源区气候变化特征分析. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1130-1135.]
- [12] Li Chaoliu, Kang Shichang. Review of studies in climate change over the Tibetan Plateau. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 327-335. [李潮流, 康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述. 地理学报, 2006, 61(3): 327-335.]
- [13] Lin Zhenyao. Spatial characters of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau. Science in China: Series D, 1996, 26(4): 354-358. [林振耀. 青藏高原气温降水变化的空间特征. 中国科学: D辑, 1996, 26(4): 354-358.]
- [14] Guo Jinghui. Hydrography of Western Sichuan and Northern Yunnan. Beijing: Science Press, 1985. [郭敬辉. 川西滇北地区水文地理. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [15] He Daming, Wu Shaohong, Peng Hua et al. A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge region and transboundary eco-security in southwestern China. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(3): 338-344. [何大明, 吴绍洪, 彭华等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338-344.]
- [16] 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. [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. 地理学报, 2009, 64(5): 581-591.]
- [17] Zhang Wancheng, Wan Yunxia, Xiao Ziniu. The spatio-temporal variations of the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) precipitation in recent 100 years in Southeast China. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 802-809. [张万诚, 万云霞, 肖子牛. 中国西南纵向岭谷区近百年降水的时空变化特征. 自然资源学报, 2006, 21(5): 802-809.]
- [18] Markham C G. Seasonality of precipitation in the United States. Annals of the Association of American Geographers, 1970, 60(3): 593-597.
- [19] Tang Qicheng, Cheng Tianwen, Li Xiuyun et al. Preliminary study on the degree and time of concentration of monthly

- runoff of Chinese streams. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(4): 383-393. [汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究. *地理学报*, 1982, 37(4): 383-393.]
- [20] Yue S, Pilon P, Phinney B et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [21] Fan Hui, Yang Xiaoyang. Interannual change characteristics of runoff and sediment load from the mainstream and major tributaries of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2010, (4): 11-15. [樊辉, 杨晓阳. 黄河干、支流径流量与输沙量年际变化特征. *泥沙研究*, 2010, (4): 11-15.]
- [22] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106-115.
- [23] He Y, Lu A, Zhang Z et al. Seasonal variation in the regional structure of warming across China in the past half century. *Climate Research*, 2005, 28(3): 213-219.
- [24] Lu Aigang, Pang Deqian, He Yuanqing et al. Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 345-350. [卢爱刚, 庞德谦, 何元庆 等. 全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响. *地理科学*, 2006, 26(3): 345-350.]
- [25] Fu Baopu. The effects of topography and elevation on precipitation. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(4): 302-314. [傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响. *地理学报*, 1992, 47(4): 302-314.]
- [26] Tang Maocang. The distribution of precipitation in mountain Qilian (Nanshan). *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(4): 323-332. [汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征. *地理学报*, 1985, 40(4): 323-332.]
- [27] Cao Jie, Li Huahong, Yao Ping et al. Study on the moisture joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean and its spatial variation in the Northern Hemisphere. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(3): 302-309. [曹杰, 李华宏, 姚平等. 北半球夏季印度洋和太平洋水汽交汇区及其空间分异规律研究. *自然科学进展*, 2009, 19(3): 302-309.]
- [28] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison 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. [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. *大气科学*, 2008, 32(4): 794-805.]
- [29] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.]

Regional Climate and Its Change in the Nujiang River Basin

FAN Hui, HE Daming

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

Abstract: Long time series of monthly air temperature and precipitation data, which were recorded at 16 meteorological observation stations in the Nujiang River basin and its adjacent areas, were employed to analyze spatial distributions and changes of these meteorological elements in this basin during the past decades. In this research, TFPW-MK (Trend-free Pre-whitening Mann-Kendall) test and BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) were used to determine trends in climate data and to detect abrupt changes within the trend and seasonal components, respectively. The results show that air temperature and precipitation increased southward along the Nujiang River and heavily negatively correlated with altitude. The regional difference in PCD was obvious and higher PCD values, more than 60%, were observed in the Nujiang River basin in Tibet Autonomous Region. Precipitation-concentration time (PCT) in the study area (except for Gongshan) mainly from late July to late August. Generally speaking, the Nujiang River basin has become warmer in the past decades. The annual mean air temperature increases at a rate of 0.36 °C /10a.

Key words: climate change; Mann-Kendall test; change point analysis; highland regions