

文章编号: 1008-2786-(2018)2-171-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000313

横断山区气温和降水年季月变化特征

徐 飞^{1,2}, 贾仰文^{1*}, 牛存稳¹, 刘佳嘉¹, 张汶海^{1,3}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 3. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 为详尽分析横断山区气候变化过程, 利用横断山区内 90 个气象站点的 1961—2011 年气温和降水资料, 采用线性趋势、Mann-Kendall 非参数趋势和突变检验法、反距离加权插值法等方法研究了横断山区气温和降水年、季、月的多时间尺度下的变化规律和变化趋势的空间分布情况。结果表明: 1961—2011 年横断山区气温以 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高, 降水以 $11.41\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈现不显著的递减趋势, 说明横断山区呈现变暖变干的趋势, 2000 年以后暖干趋势尤为明显。从气温和降水的变化趋势的空间分布来看, 气温升温趋势北部比南部剧烈, 西部比东部更为剧烈, 降水减少趋势呈现南部比北部更剧烈。1961—2011 年横断山区春夏秋冬四季气温分别以 0.09 、 0.14 、 0.16 和 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高。夏、秋、冬季降水分别以 -7.88 、 -8.90 、 $-2.61\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈不显著减少的趋势, 春季降水以 $7.34\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率显著增加。1961—2011 年横断山区全年 12 个月的气温都呈升高趋势, 1—5 月降水呈现增加趋势, 6—12 月减少。分析表明在大气环流发生异常 (北极涛动、南极涛动、东亚夏季风、西太平洋副高、南亚高压和海温) 和人类活动的共同影响下, 横断山区气候呈现暖干的趋势。研究结果为把握横断山区对全球气候变化的响应程度, 水资源的合理开发利用提供依据。

关键词: 横断山区; 气温; 降水; 变化特征

中图分类号: P466

文献标志码: A

IPCC 第五次评估报告指出, 过去 50 年全球经历了一个变暖的过程, 在 20 世纪平均气温升高 (0.6 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ ^[1]。全球气候变暖引发一系列问题, 如干旱、洪涝等极端事件, 进而影响环境、生态、水资源, 甚至威胁人类的生存发展^[2]。伴随着全球气候变暖, 全球众多地区的气温和降水也发生变化, 而且这种变化趋势仍旧在持续^[1]。我国气候变化与全球气候变化总体趋势基本一致, 但也存在明显差异, 而且区域差异明显^[3]。由于区域所处的陆地位置、纬度位置以及大气环流系统位置的不同, 加上地形等的影响, 区域对全球变化的响应是千差万别

的^[4]。即使对于同一个流域或区域, 由于所选研究时段以及区域内自身差异, 也会得到不同结果。如研究表明西藏怒江流域年平均气温以 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高, 年降水量以 $21.0\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率显著增加^[5], 而有研究表明怒江流域年平均气温增幅 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 年降水量呈不显著增加趋势^[6]。山区对气候变化较为敏感, 特别是高海拔地区^[7]。横断山区位于青藏高原与云贵高原和四川盆地的过渡地带, 由高原、高山、峡谷和盆地等多种地貌所构成, 海拔较高、冰川发育广泛, 是我国现代冰川分布的最南和最东部, 也是我国重要的海洋型冰川分布

收稿日期 (Received date): 2017-01-14; **改回日期** (Accepted date): 2017-03-30

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划项目 (2015CB452701); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室团队重点课题 (2016ZY03) 资助。[National Key Basic Research Development Program of China (973 Program) (2015CB452701); Team Key Study of State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (2016ZY03).]

作者简介 (Biography): 徐飞 (1989-), 男, 江西吉安人, 博士, 主要从事流域水循环模拟研究。[XU Fei (1989-), male, born in Ji'an, Jiangxi, Ph. D. candidate, research on water cycle simulation.] E-mail: pinghuyu@outlook.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 贾仰文 (1965-), 男, 山东成武人, 教授级高工, 主要从事流域水循环模拟研究。[JIA Yangwen (1965-), male, born in Chengwu, Shandong, professor level senior engineer, research on water cycle simulation.] E-mail: jiayw@iwhr.com

区。由东南季风、西南季风和南支西风急流组成的冬夏季风环流所控制,降水量存在明显的季节差异^[8]。有研究表明横断山区呈现变暖趋势,尤其是春冬季,年均降水量以 9.09 mm/10 a 的速度增加^[9]。随着卫星遥感技术的发展,有研究利用 MODIS 地表温度结合台站气温数据分析了横断山区气温时空规律^[10];还有学者利用 TRMM 降水数据探讨了 1998—2012 年横断山区的降水时空分布特征及变化趋势,结果表明横断山区降水量呈减少趋势,减少地区主要分布在南部以及中西部地区,夏季降水减少趋势最突出,秋季次之,而冬春变化趋势不明显^[11]。可见,一方面由于横断山区地形复杂,气象资料稀缺,另一方面影响气温和降水变化的因素众多且变化复杂,不同研究者之间所得结果仍旧存在差异。而横断山区谷坡不稳定,易发崩塌、泥石流、滑坡等次生气象灾害,且水土流失严重,分析该区域的气候特征及其趋势对趋利避害和生态环境的保护具有重要意义。因此,针对已有研究所用气象站点偏少且系列长度偏短(未能包括 2010 年西南大旱)、时空分布与变化机理分析不足等问题,本文利用横断山区内 90 个气象站 1961—2011 年长系列的实测气温和降水资料,从年、季、月的多时间尺度上分析气温和降水的变化特征及其变化趋势的空间分布规律,并深入探讨气温和降水变化的过程及其机理,从而更加全面地把握该区对全球气候变化的响应程度与趋势,为山区水资源的合理开发利用提供依据。

1 研究区概况、数据及方法

1.1 研究区概况

横断山区(24°40′~34°00′N; 96°20′~104°30′E)位于青藏高原东南,是第一和第二阶地的过渡带,总面积约 500 000 km²,海拔范围 291~7556 m,由西北向东南递减,横断山区概况如图 1 所示。横断山区山川南北纵贯,东西并列,自东而西有岷江、邛崃山、大渡河、大雪山、雅砻江、沙鲁里山、金沙江、芒康山、澜沧江、怒山、怒江和高黎贡山等,最高峰为坐落于横断山区中东部的贡嘎山(7556 m)。由于山川的“通道-阻隔”作用,幽深的河谷成为季风湿润气流北上的重要通道,是著名的纵向岭谷区^[12]。横断山区是典型的季风气候区,不仅受来自西太平洋的东亚季风影响,同时也受来自孟加拉湾和印度洋的南亚季风影响,此外,还受青藏高原季风和西风带影响。受多种季风和复杂地形的共同影响,横断

山区呈现出明显的季节性和垂直气候带。5—10 月为夏季季风期,主要受东亚和南亚季风影响,水汽丰富,降水充沛,占全年降水的 60%~90%;11 月至次年 4 月,受微弱西风环流南支控制,降水较少^[13]。受季风的强弱进退影响,经常发生洪涝和干旱等极端事件,如 2009 年秋季至 2010 年春季的西南百年一遇干旱。

1.2 数据和方法

气温和降水资料来自中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)。由于横断山区内各气象站的建站时间不一,资料长短不一致,另外还存在缺测和数据资料质量不佳等情况。为减少站点资料对结果的影响,在气象站点的选取过程中,根据实测资料的连续性、最长时段性和气象站空间分布等依据,选取数据资料完整、时段一致且较长并具有一定代表性的气象站点。因此,在横断山区内共选取符合条件的气象站 90 个(图 1),时间系列都是从 1961 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日。分别计算各气象站的年均气温、年降水量,月平均气温和月降水量,按 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月一次年 2 月为冬季,计算得到不同季

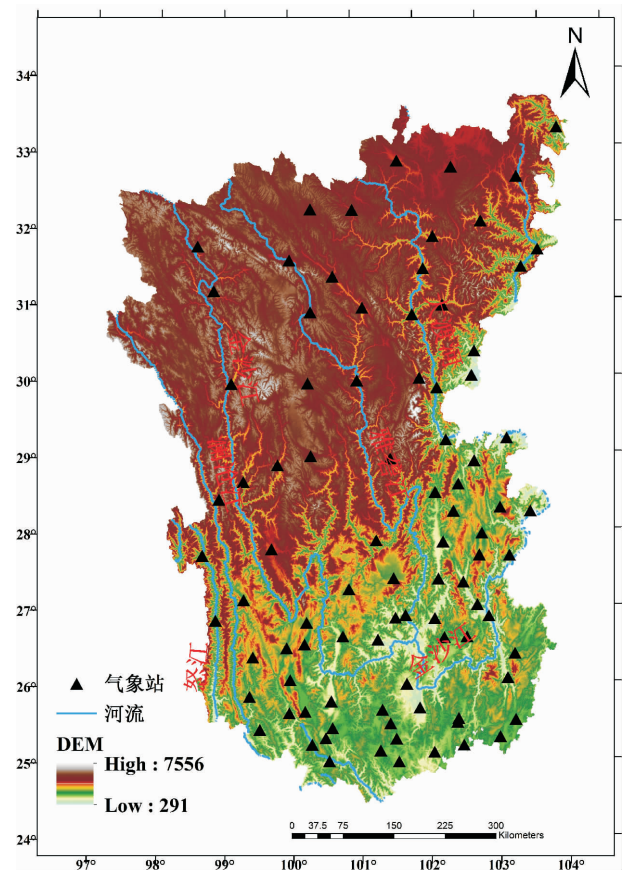


图 1 横断山区概况

Fig. 1 Location of Hengduan Mountains

节的平均气温和降水量,再加以平均得到横断山区的气温均值和降水量。采用线性趋势法和5年滑动平均分析气温和降水变化趋势。利用线性趋势法计算得到各站点的年、季、月气温和降水的变化趋势,利用倾向率分析年、季、月的变化率。同时利用非参数统计检验方法 Mann-Kendall(以下简称 M-K 检验)进行趋势检验^[14],分析年、季节变化显著性和突变情况,根据突变情况,将年、季节的气温和降水划分成几个时段,以分析不同时段的气温和降水变化情况。利用反距离加权插值法 IDW (Inverse Distance Weighted)^[15]结合 GIS 将气温和降水的变化趋势进行空间插值,分析其空间分布情况。

气温和降水的变化趋势采用一次线性方程表示,即:

$$Y = a + bt \tag{1}$$

式中:Y为气温均值和降水量,t为时间(本文为1961—2011年);b为线性趋势项,b*10表示气象要素每10 a的变化量,b为正,则表明是增量,若b为负,则表明是减量。

2 结果与分析

2.1 气温和降水年变化

图2为1961—2011年横断山区气温和降水的年际变化,气温和降水的变化特征如表1所示。1961—2011年横断山区年均气温13.0℃,以0.16℃/10 a的速度呈现极显著升高(M-K检验中Z值4.24>2.32,通过99%水平显著性检验)。横断山区气温于2001年发生突变,突变前1961—2000年平均气温12.9℃,而突变后11年平均气温为13.5℃,比突变前高0.6℃。此外,突变前升温率0.08℃/10 a,而突变后为0.38℃/10 a。无论是平均气

温的变化还是升温率,突变后较突变前都呈现异常偏暖。说明横断山区气温呈现升高趋势,特别是进入新世纪后,气温显著升高。

1961—2011年横断山区年均降水量为982.3 mm,以-11.41 mm/10 a的速率呈现减少的趋势,但趋势不明显(M-K检验中Z值|-1.25|<1.28,未通过90%水平显著性检验)。横断山区降水于1984年发生突变,突变前24年年均降水量987.2 mm,1984—2011年呈现波动中下降的趋势,减少不明显,年均降水量978.4 mm,相比突变前降水量减少8.8 mm,减少率仅-0.89%。但从5年滑动平均趋势来看,2000年以后,降水减少非常明显,1961—2000年的年均降水量为993.3 mm,而2001—2011年为942.6 mm,减少了50.7 mm,减少率达-5.10%,表明2000年后降水减少非常明显。横断山区气温和降水的变化,说明1961—2011年气温显著升高,而降水减少不显著,但21世纪以来,气温和降水变化较为明显,横断山区倾向于变暖变干。

表1 1961—2011年横断山区年气温和降水变化特征

Tab. 1 Variation character of annual temperature and precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

要素	突变年	时段	时长/a	平均值	标准差 SD	M-K 检验 Z 值
气温	2001	1961—2000	40	12.9℃	0.32	1.64
		2001—2011	11	13.5℃	0.32	1.17
		1961—2011	51	13.0℃	0.40	4.24
降水	1984	1961—1983	23	987.2 mm	69.17	-1.43
		1984—2011	28	978.4 mm	79.02	-0.12
		1961—2011	51	982.3 mm	74.14	-1.25

为分析横断山区气温和降水的空间变化差异,将90个气象站点1961—2011年的变化趋势利用

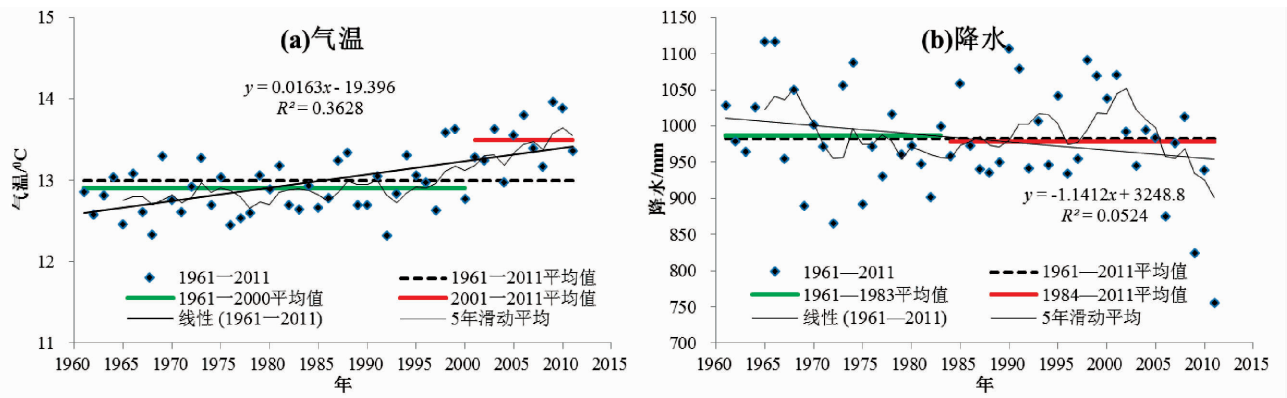


图2 1961—2011年横断山区年气温和降水年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of annual temperature and precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

IDW 方法进行空间插值,得到横断山区气温和降水的变化趋势的空间分布情况,如图 3 所示,表 2 为气温和降水的变化趋势。1961—2011 年横断山区以升温为主,90 个气象站点中 82 个呈现出升温趋势,升温速率范围 0 ~ 0.79 °C/10 a,平均升温率 0.19 °C/10 a。从空间分布来看,北部比南部,西北比东部升温趋势更剧烈。仅在横断山区东南部分地区呈现降温趋势,但最大降温率也仅为 -0.17 °C/10 a。

1961—2011 年横断山区降水基本呈现减少趋势,特别是西南区域。69% 的站点变干,变干速率从 -1.61 至 -117.52 mm/10 a,平均变干趋势为 -23.13 mm/10 a。从空间分布情况来看,南部降水减少趋势较中部和北部更为剧烈。降水呈现增加的区域主要集中于中部和西部部分地区,增加的速率

范围 0 - 37.84 mm/10 a,平均增湿率 14.52 mm/10 a。

2.2 气温和降水季节变化

图 4 和图 5 分别为 1961—2011 年横断山区季节气温和降水的年际变化,季节性变化特征如表 3 所示。横断山区四季的气温都呈现升高趋势,升温速率分别为 0.09、0.14、0.16、0.27 °C/10 a,只有春季没有通过显著性检验,其他季节升温显著性都达到 99% 的显著性水平。春夏秋冬都只有一个突变点,分别于 2002、2002、2003 和 1996 年发生突变,突变后气温相对于突变前气温分别升高 0.5、0.4、0.6 和 0.9 °C。无论从升温速率和突变前后变化来看,都是冬季升温最为剧烈。1961—2011 年横断山区降水除春季增加外,其他季节都减少,变化速率分别

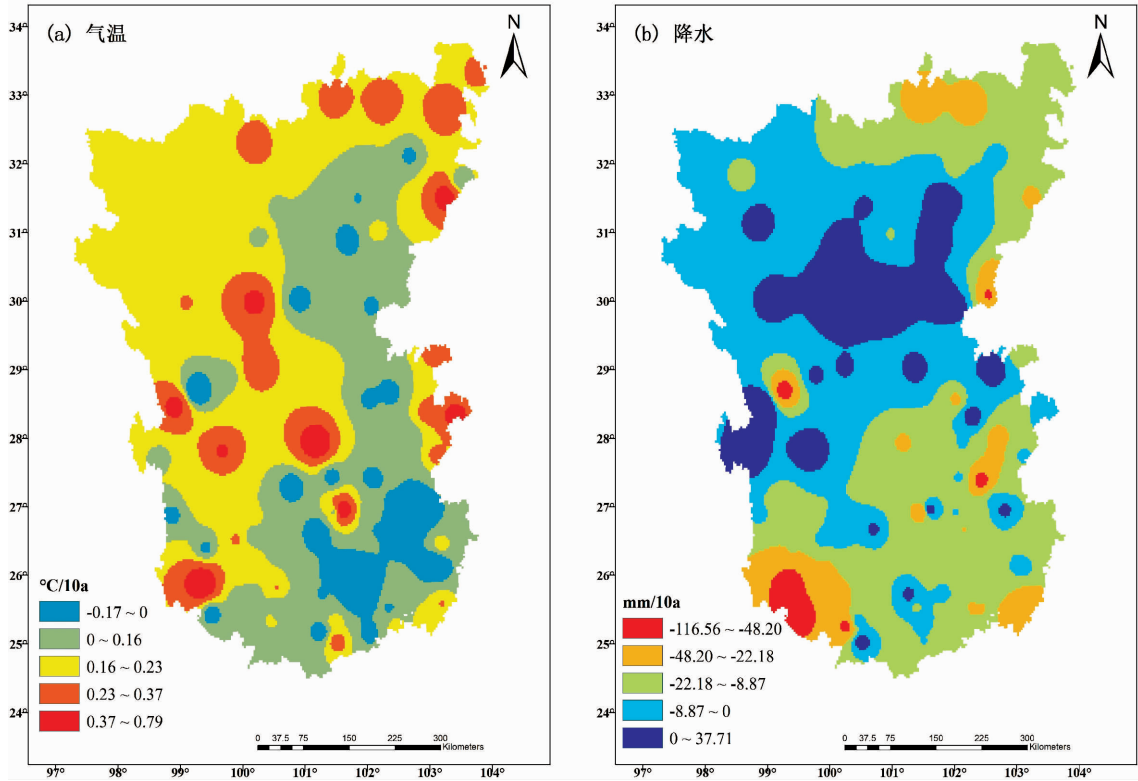


图 3 1961—2011 年横断山区年气温和降水的变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual temperature and precipitation trends in Mts. Hengduan during 1961—2011

表 2 1961—2011 年横断山区年气温和降水的变化趋势

Tab. 2 Variation trends of annual temperature and precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

气温	变暖			变冷		
	站点数/个	占比/%	趋势/(°C/10 a)	站点数/个	占比/%	趋势/(°C/10 a)
	82	91.11	0.19	8	8.89	-0.09
降水	变湿			变干		
	站点数/个	占比/%	趋势/(mm/10 a)	站点数/个	占比/%	趋势/(mm/10 a)
	28	31.11	14.52	62	68.89	-23.13

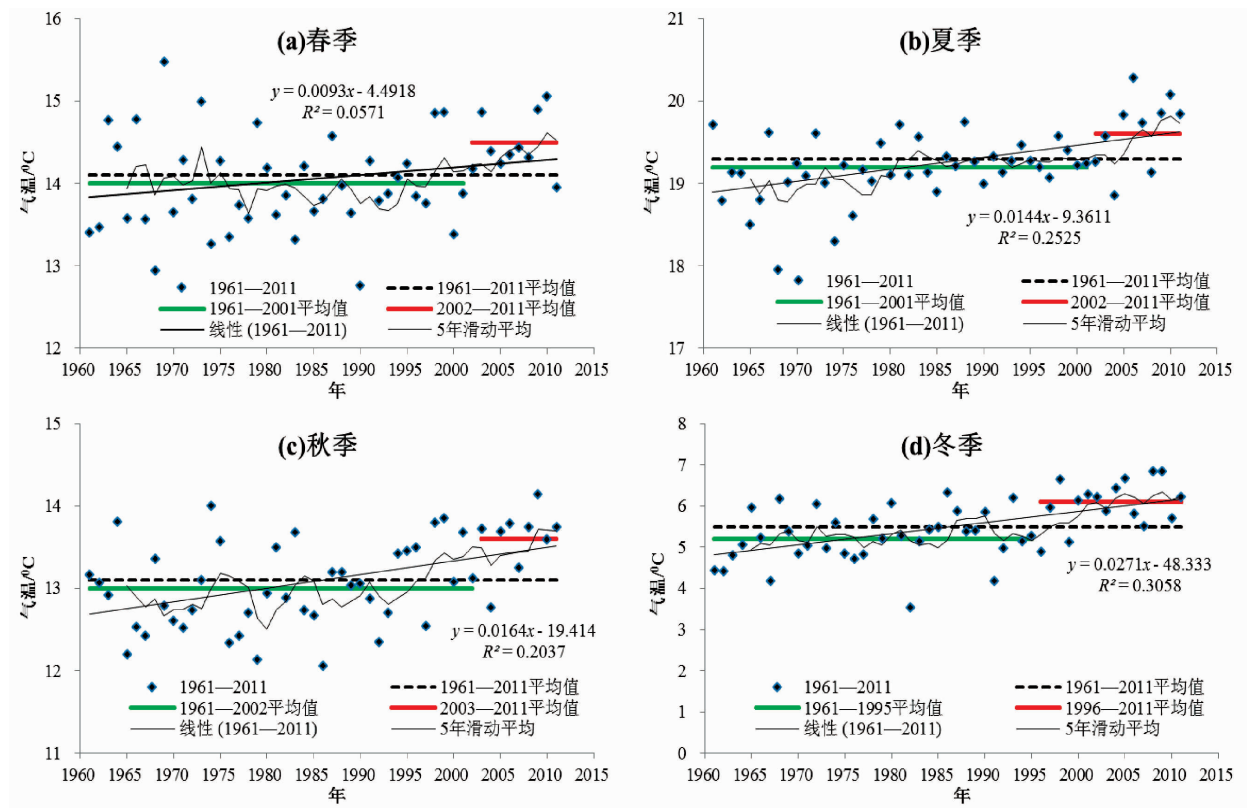


图4 1961—2011年横断山区季节气温年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of seasonal temperature in Mts. Hengduan during 1961–2011

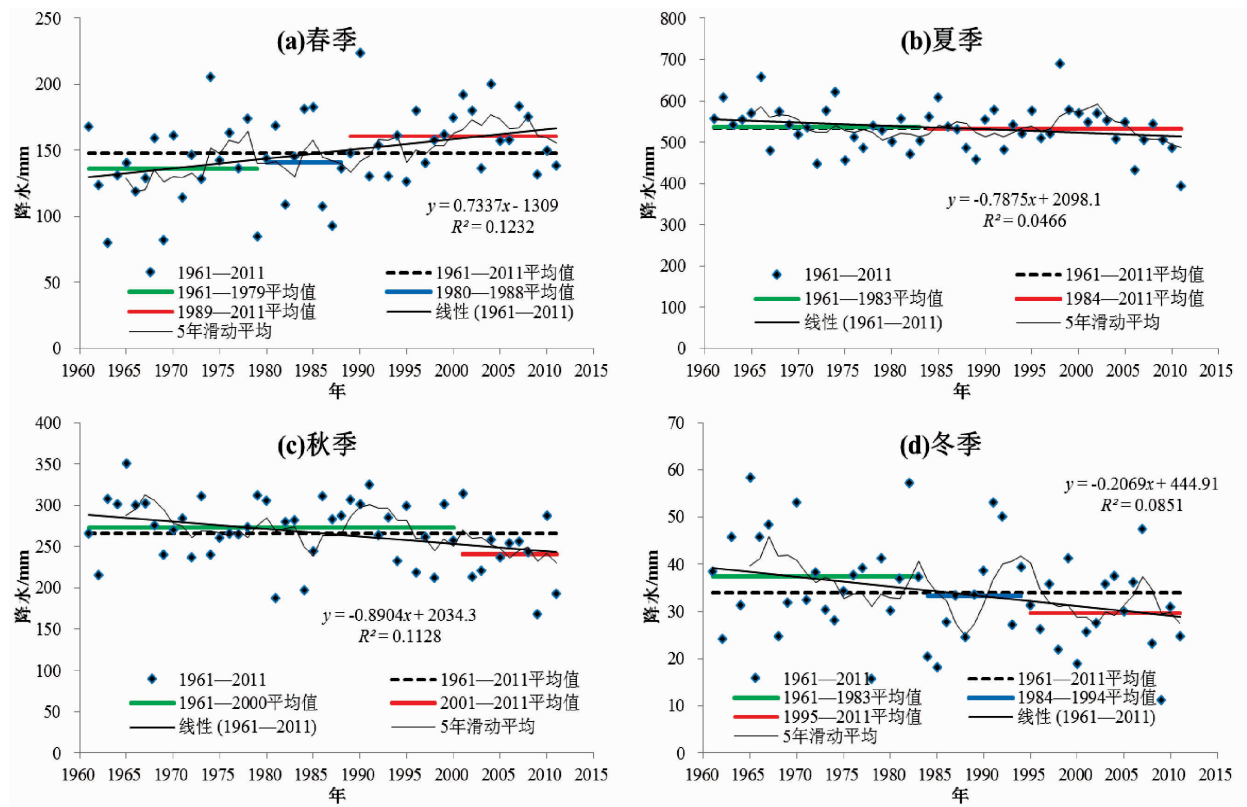


图5 1961—2011年横断山区季节降水量年际变化

Fig. 5 Inter-annual variation of seasonal precipitation in Mts. Hengduan during 1961–2011

为 7.34、-7.88、-8.90、-2.61 mm/10 a。四季 M-K 检验中 Z 值分别为 2.58、-1.40、-2.16 和 -1.89,分别通过 99%、90%、95%和 95%水平的显著性检验,说明春季降水显著增加,而秋冬季降水明显减少,而夏季降水减少不显著。夏季和秋季都只有一个突变点,分别在 1984 和 2001 年发生突变,夏季 1984—2011 年年均降水量比突变前减少了 4.4 mm,减少率仅为 -0.82%,而秋季突变后的降水量相比突变前减少 32.5 mm,减少率达 -11.91%。春季和冬季都存在两个突变点,春季于 1980 年和 1989 年发生突变,1980—1988 年相比 1961—1979

年降水增加 4.5 mm,增加率 3.30%,而 1989—2011 年相比 1980—1988 年增加 19.7 mm,增加率 13.98%,说明 90 年代后春季降水明显增加。冬季于 1984 年和 1995 年两次发生突变,两个突变后时期的降水量相比突变前分别减少 4.1 mm 和 3.6 mm,减少率分别为 -10.96%和 -10.81%。说明横断山区秋冬季降水减少较为明显,夏季微弱减少,春季显著增加。

图 6 和图 7 分别为 1961—2011 年横断山区季节气温和降水量变化趋势的空间分布。春季大部分区域气温都呈现升温的趋势,尤其是西部区域,最大

表 3 1961—2011 年横断山区季节气温和降水变化特征
Tab. 3 Variation character of seasonal temperature and precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

要素	季节	突变年	时段	时长(a)	平均值	标准差 SD	M-K 检验 Z 值
气温	春季	2002	1961—2001	41	14.0 ℃	0.59	0.57
			2002—2011	10	14.5 ℃	0.36	0.36
			1961—2011	51	14.1 ℃	0.58	1.09
	夏季	2002	1961—2001	41	19.2 ℃	0.37	2.19
			2002—2011	10	19.6 ℃	0.44	1.34
			1961—2011	51	19.3 ℃	0.43	3.73
	秋季	2003	1961—2002	42	13.0 ℃	0.51	1.65
			2003—2011	9	13.6 ℃	0.39	0.52
			1961—2011	51	13.1 ℃	0.54	3.27
	冬季	1996	1961—1995	35	5.2 ℃	0.64	1.66
			1996—2011	16	6.1 ℃	0.57	1.13
			1961—2011	51	5.5 ℃	0.73	4.18
降水	春季	1980 1989	1961—1979	19	136.4 mm	30.27	-1.07
			1980—1988	9	140.9 mm	40.56	-0.31
			1989—2011	23	160.6 mm	40.17	0.31
			1961—2011	51	143.7 mm	31.08	2.58
	夏季	1984	1961—1983	23	536.6 mm	52.29	-2.11
			1984—2011	28	532.2 mm	56.64	-1.80
			1961—2011	51	534.2 mm	54.23	-1.40
	秋季	2001	1961—2000	40	273.0 mm	36.41	-0.68
			2001—2011	11	240.5 mm	41.06	-0.47
			1961—2011	51	266.0 mm	39.42	-2.16
	冬季	1984 1995	1961—1983	23	37.4 mm	17.55	-0.03
			1984—1994	11	33.3 mm	25.82	2.34
			1995—2011	17	29.7 mm	37.18	-0.08
			1961—2011	51	34.0 mm	10.55	-1.89

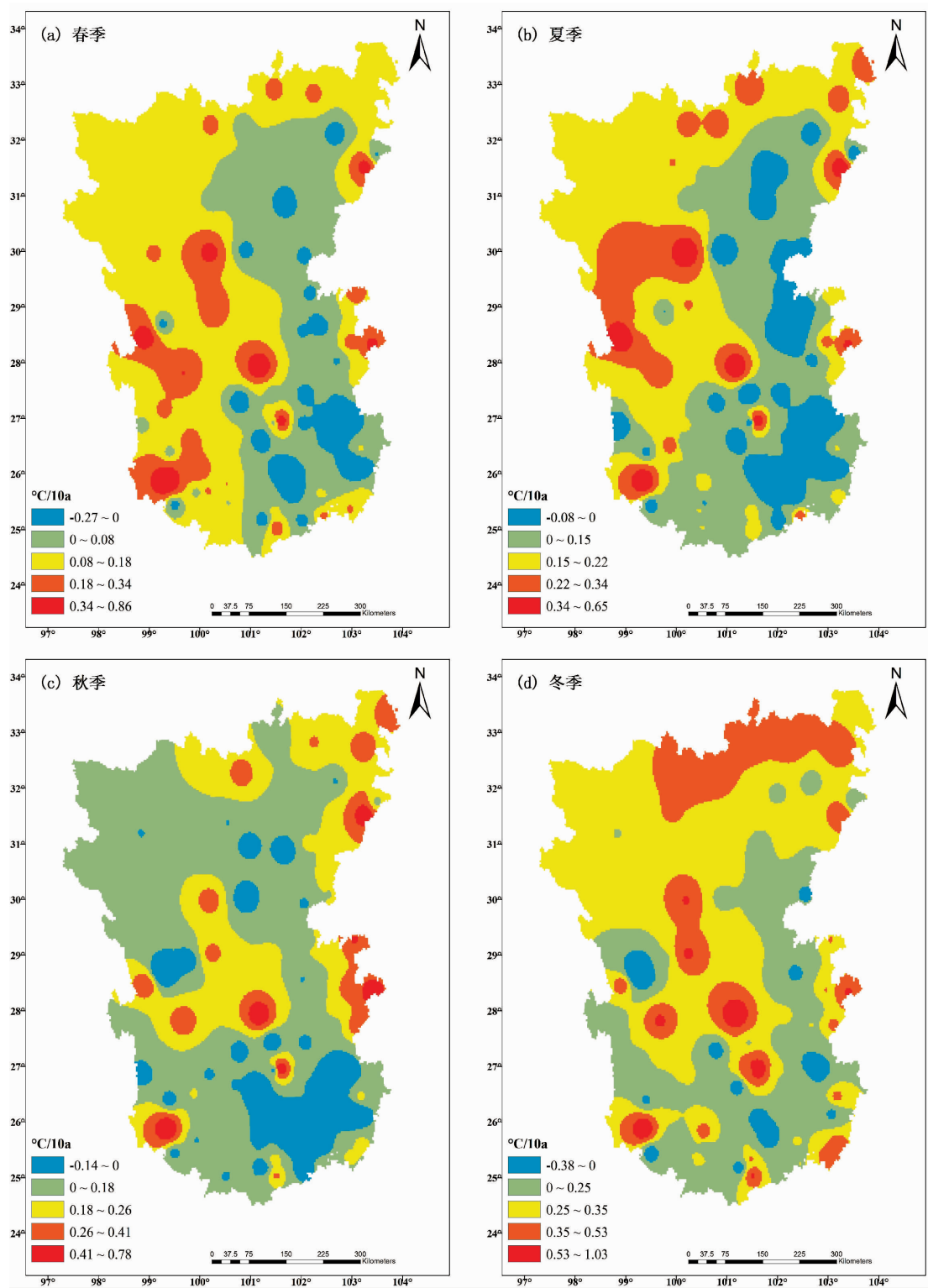


图6 1961—2011年横断山区季节气温的变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of seasonal temperature trends in Mts. Hengduan during 1961—2011

升温趋势 $0.86\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。东部区域升温幅度较小,甚至存在降温区域,最大降温趋势 $-0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。夏季大部分区域气温呈升高趋势,最大升温趋势 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,东部区域表现为降低趋势,最大降温趋势仅

$-0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。秋季仅东南区域呈现降低趋势,最大降低趋势为 $-0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其他区域都呈升高的趋势。冬季只有6个站点的气温呈现降低趋势,而84个站点气温呈升高趋势,最大升温趋势达 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10$

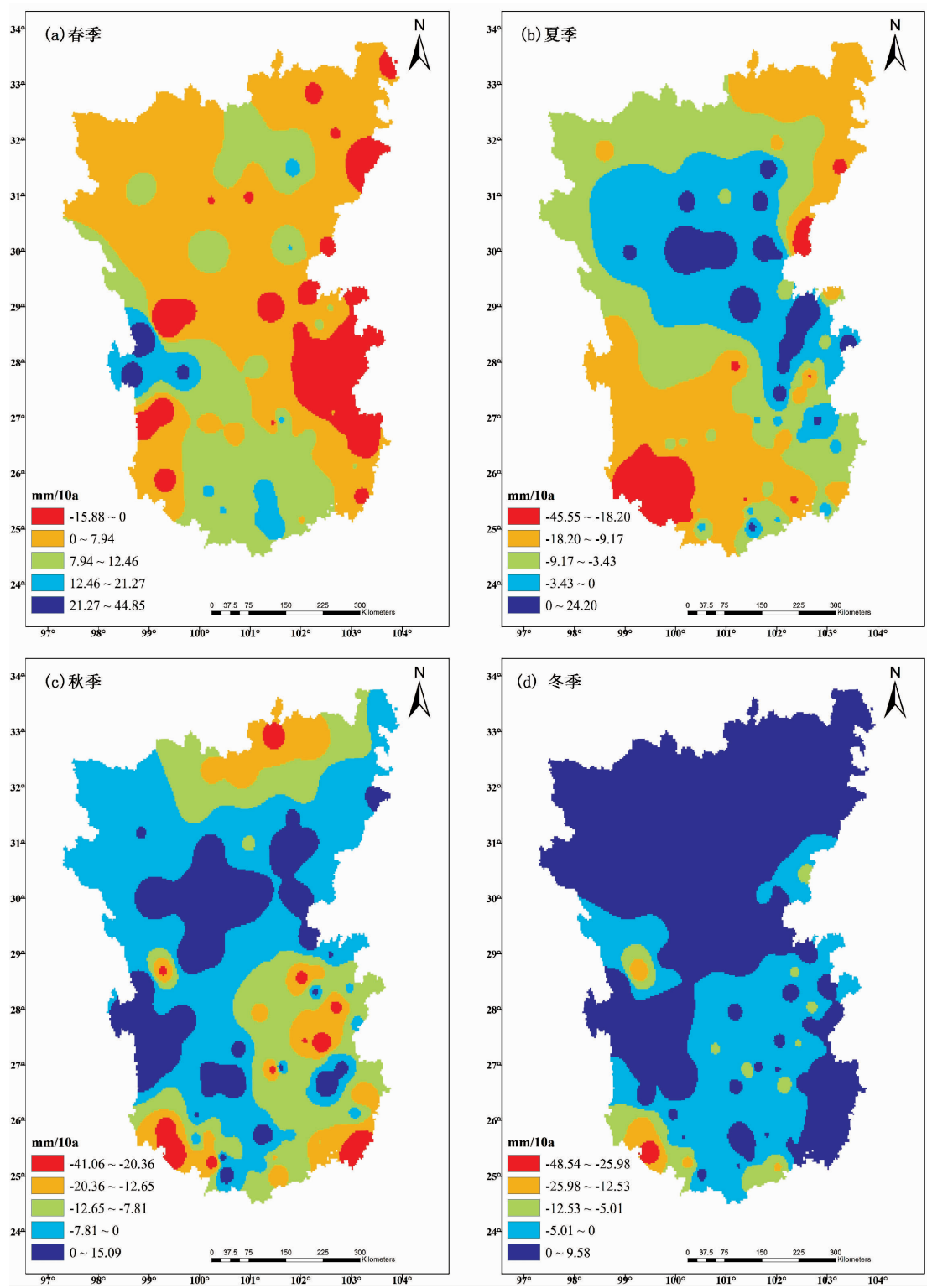


图 7 1961—2011 年横断山区季节降水的变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal precipitation trends in Mts. Hengduan during 1961—2011

a,北部区域升温较南部大。无论从升温范围和变化趋势的幅度来看,都以冬季气温升温最为剧烈。

春季大部分区域降水呈现增多的趋势,尤其是西部,最大增加趋势 44.85 mm/10 a,而东部降水大

多呈现减少的趋势。夏季大部分区域降水呈现减少的趋势,南部较北部减少更为剧烈,特别是西南区域,最大减少趋势达 -45.55 mm/10 a,中部呈现增加的趋势。秋季大部分区域降水呈现减少的趋势,

南部较北部减少更剧烈,中部和西部呈增加的趋势。冬季大部分区域降水呈增加的趋势,尤其是北部,但最大增加趋势仅为 9.58 mm/10 a,而南部大都呈现减少的趋势,减少趋势却达 -48.54 mm/10 a,导致横断山区整体上冬季降水呈减少的趋势。

2.3 气温和降水月变化

图 8 和图 9 分别为 1961—2011 年横断山区月气温和降水量的年际变化,表 4 为 1961—2011 年横断山区月气温和降水 M-K 趋势检验。从中可以看出,1961—2011 年横断山区全年 12 个月的气温都呈升高趋势,尤其是 1 月、2 月、6 月、11 月、12 月,升温极为显著,都通过 99% 水平显著性检验,升温速率都超过 0.20 °C/10 a;而 4 月、5 月和 7 月升温不明显,都未通过 90% 水平显著性检验,特别是 5 月最不明显,升温率仅为 0.01 °C/10 a。进一步说明横断山区冬季升温最为剧烈。

从图 9 月降水量年际变化来看,1961—2011 年横断山区 1 月至 5 月降水呈现增加趋势,增湿率在 0.09 ~ 3.92 mm/10 a 之间,只有 3 月、4 月和 5 月都只是通过 90% 水平的显著性检验,降水增加不明显。6—12 月都呈减少趋势,其中 12 月减少最为明显,通过 99% 水平的显著性检验,其次是 11 月,达

到 95% 的水平,而 6 月、7 月、10 月减少都不明显,都未通过 90% 水平显著性检验,其中 7 月最不明显,减少率仅为 0.32 mm/10 a,而 7 月是全年中降水量最大的月份,这也是横断山区年降水量减少不明显的重要原因之一。进一步说明横断山区秋季降水明显减少,而春季降水显著增加。

表 4 1961—2011 年横断山区月气温和降水 M-K 检验

Tab. 4 M-K tests of monthly temperature and precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

月份	气温	降水
1	3.09	-0.20
2	3.04	-0.05
3	2.12	1.34
4	1.23	1.59
5	0.34	1.50
6	3.15	-1.23
7	0.87	-0.36
8	2.10	-1.62
9	1.88	-1.58
10	2.07	-0.92
11	3.10	-1.97
12	3.72	-3.63

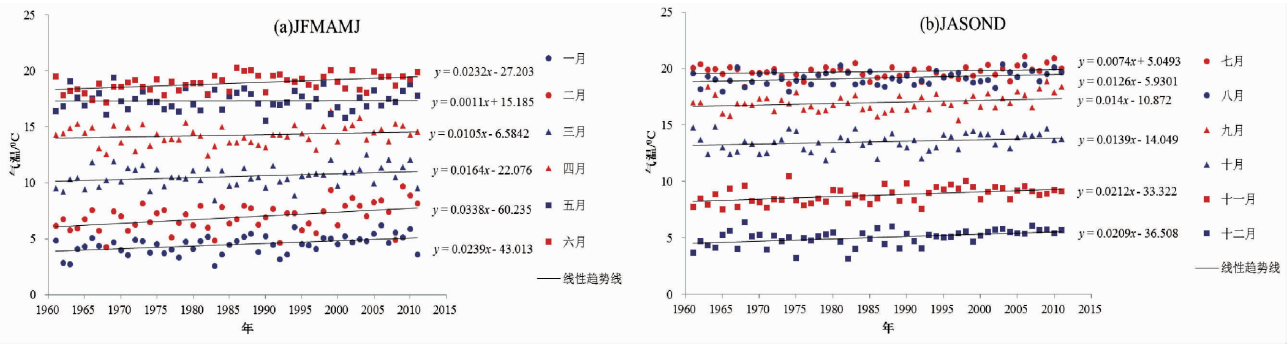


图 8 1961—2011 年横断山区月气温年际变化

Fig. 8 Inter-annual variation of monthly temperature in Mts. Hengduan during 1961—2011

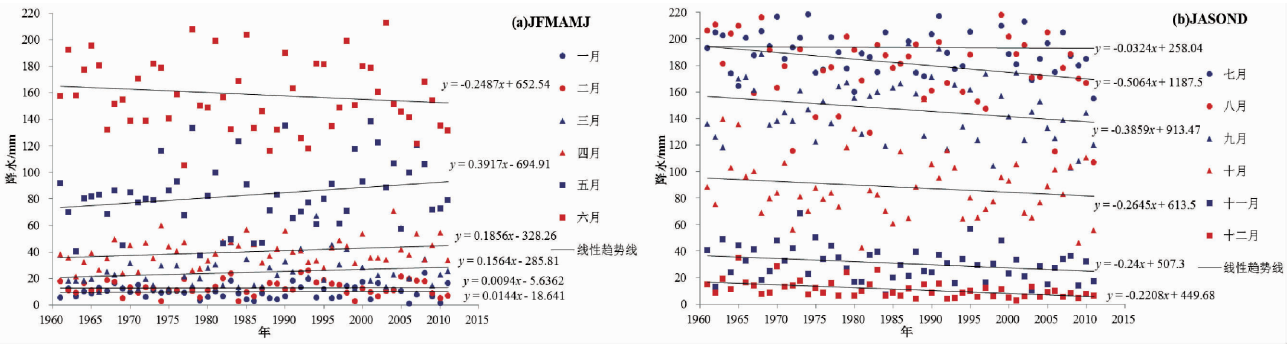


图 9 1961—2011 年横断山区月降水量年际变化

Fig. 9 Inter-annual variation of monthly precipitation in Mts. Hengduan during 1961—2011

3 讨论

1961—2011 年横断山区气温以 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高,尤其是 2000 年后升温尤为剧烈。横断山区升温率 ($0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) 这与 Li et al. (2011)^[8-9] 在横断山区的升温率 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 Wang et al. (2013)^[16] 在四川盆地的升温率 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 相近;而远低于全国平均水平 ($0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[17] 和云南高原地区 ($0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[18]。1961—2011 年横断山区降水以 $-11.41\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈现不显著减少的趋势,而 2000 年后降水明显减少。这和李宗省等^[8-9] 在横断山区的研究结论相反,他们认为横断山区降水以 $9.09\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈现不显著增加趋势。这可能一方面是由于本文和他们的研究所选的站点数不同,本文共选取 90 个气象站点,海拔从 639.5 m 至 3948.9 m,而他们选取了 27 个站点,海拔范围 1244.8 ~ 4200 m;另一方面,所选的研究时期也不一致,本文研究时段为 1961—2011 年,而他们则选取了 1960—2008 年。众所周知,2009 冬季至 2010 年西南发生百年一遇干旱,而李宗省等所选研究时段未包含此段特干旱时期。此外,本文中横断山区 1961—2000 年呈现 $1.22\text{ mm}/10\text{ a}$ 的增加趋势,而 2000 年后持续呈现干旱趋势。这些可能是导致二者之间差异的主要原因。1961—2011 年横断山区气温和降水的变化情况说明该区域呈现变暖变干的趋势,尤其是 2000 年后暖干趋势尤为明显。这和聂宁等^[19] 在雅鲁藏布江流域和 Wang et al. (2013)^[16] 在四川盆地的研究结果是一致的。

1961—2011 年横断山区春夏秋冬四季气温分别以 0.09 、 0.14 、 0.16 和 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率升高。春季和夏季西部升温较东部大,秋季和冬季大部分区域都表现为升温的趋势,仅在东南区域存在降温趋势。从升温的区域范围和幅度来看都以冬季升温最为剧烈,Yan and Liu (2014)^[20] 在青藏高原也得到冬季升温最剧烈的结果。1961—2011 年横断山区降水除春季增加外,其他季节都减少,变化速率分别为 7.34 、 -7.88 、 -8.90 、 $-2.61\text{ mm}/10\text{ a}$ 。横断山区降水春季西部大都呈增加趋势,而东部呈减少趋势。夏秋冬三季南部降水减少的趋势都较北部更为剧烈。横断山区秋季降水减少较为明显,春季显著增加,这和前人的研究结论相似,认为秋季降水最为明显^[16,21],而春季降水显著增加^[22]。

在全球气候变暖的大环境下,横断山区气温变化与全球气温变化的趋势基本一致。全球气候变化主要是自然变化和人类活动影响共同引起的结果。自然原因包括大气环流异常和海温异常等。气候变化是一定范围内大气环流运动的必然结果,因此大气环流的变化是引起区域气候异常最直接、最根本的原因^[23]。目前一般认为大气中温室气体浓度的增加,是全球气候变暖的主要原因^[22]。由于大气环流的变异和调整,北极涛动持续增强,西伯利亚高压和冬季风持续减弱,使得北方冷空气南下频次、强度逐渐减少、减弱,从而引起横断山区冬季气温升高^[24]。南极涛动增强,减弱了冬季和春季冷空气的南侵^[25],使得横断山区冬季、春季气温升高。70 年代中期后东亚夏季风减弱,是横断山区降水减少的一个重要原因。西太平洋副热带高压逐渐增强,位置逐渐偏南偏西,是导致秋季降水明显减少的重要原因之一^[26]。研究证实横断山区南边界的水汽输入总体呈减少趋势,而另一水汽输入边界西边界夏季水汽收入却呈增加趋势^[27],这也可能是导致横断山区年和夏季降水量减少不显著的主要原因。20 世纪 90 年代后,南亚高压中心位置偏西、偏南,不利于西南地区夏季降水的发生^[23]。东亚大槽偏弱或偏东,冷空气南侵困难;南海上空低层维持一个异常的气旋环流,西南地区暖湿气流输送偏弱;西太平洋副高偏强、西伸,南亚高压面积偏大,与西太平洋副高重叠,西南地区长期受高压控制,这些异常环流是造成西南地区天气晴朗少雨,气温偏高,持续干旱的重要原因^[28]。由于海洋温度升高,向大气释放能量,使大气环流异常,从而影响气候变化。当热带西印度洋海温偏高明显时,在热带印度洋上有一偏东风,热带西印度洋上为一气旋性距平环流,其上的印度洋的暖湿气流向北进入大陆,然后经由高原南侧并由北向南进入孟加拉湾,从而抑制了孟加拉湾南支槽的发展和孟加拉湾暖湿空气向西南地区的输送,使得西南地区降水偏少^[29]。

由于社会经济的发展,特别是 2000 年以后,在中国西部大开发进程中,横断山区经济社会快速发展,温室气体和气溶胶的大量排放,土地利用的变化和城市化等人类活动在一定程度上影响横断山区的气候变化。高浓度的气溶胶,一方面直接散射和吸收太阳辐射,使日照时数和能见度明显减少,造成大气变冷;另一方面以云凝结核的形式改变云的光学特性和生命期,从而间接影响气候^[30-31]。横断山区东南部经济发展较好,人类活动强烈,大量的气溶胶

排放,因而使气温升高趋势比横断山区其他区域较缓。在山区,气温升高促进区域水汽循环,伴随着冰雪融化,蒸发加剧,增加空气湿度和水汽,从而促进山区降水的形成^[32]。平均气温升高 2℃ 将使阿尔卑斯山地区降水增加 30%^[33]。由于横断山区西部和北部较东部和南部气温升高趋势更快,这也可能是导致北部降水减小的趋势没有南部快的原因之一。此外,人类活动也对降水产生重要影响。一是如西南诸河梯级水库的建设、引水灌溉工程、水土保持等改变了区域内下垫面情况,影响降水分布;二是由人类活动所导致的温室气体排放以及硫化物、气溶胶增加等,增加了区域气候变化的不确定性,从而影响区域降水等水文要素。

值得注意的是,本文的研究结论是通过横断山区内气象站点数据分析所得,虽然利用站点数达 90 个,但相比于横断山区 500 000 km² 范围内,平均单个站点覆盖 5556 km²,站点密度远小于中国水文系统所建雨量站网平均密度约为 1 站/500 km²^[34]。由此可见,横断山区气象资料匮乏,另外,由于现有站点多分布在峡谷或平原等离城镇比较近、便于收集获取数据的地方,这些台站所获得的气象数据并不能完全反映横断山区,特别是高海拔地区的实际气温和降水分布情况。因此,目前对于横断山区气温和降水的空间分布规律仍旧认识不足,亟须利用热红外遥感数据及卫星降水产品数据,以更为详尽的认识横断山区气温和降水的时空分布情况。

4 结论

(1)1961—2011 年横断山区年均气温以 0.16℃/10 a 的速率显著升高,降水量以 11.41 mm/10 a 的速率呈现不显著的递减趋势,横断山区呈现暖干趋势,2000 年后尤为明显。此外,气温和降水分别于 2001 和 1984 年发生突变。横断山区气温和降水的变化趋势空间分布情况,气温升温趋势北部比南部,西部比东部更为剧烈,降水减少趋势南部比北部更剧烈。

(2)1961—2011 年横断山区春夏秋冬四季气温升温率分别为 0.09、0.14、0.16 和 0.27℃/10 a。春季和夏季西部升温较东部大,秋季和冬季大部分区域都表现为升温的趋势,仅在东南区域存在降温趋势。从升温的区域范围和幅度看都以冬季升温最为剧烈。四季气温分别于 2002、2002、2003 和 1996 年发生突变。1961—2011 年横断山区降水除春季增

加外,其他季节都减少,变化速率分别为 7.34、-7.88、-8.90、-2.61 mm/10 a。横断山区秋季降水减少明显,春季显著增加。横断山区降水春季西部大都呈增加趋势,而东部呈减少趋势。夏秋冬三季南部降水减少的趋势都较北部更为剧烈。

(3)1961—2011 年横断山区全年 12 个月的气温都呈升高趋势,尤其是 1 月、2 月、6 月、11 月、12 月,升温极为显著,升温速率都超过 0.20℃/10 a。降水量月变化中,1961—2011 年横断山区 1—5 月呈现增加趋势,增湿率在 0.09~3.92 mm/10 a 之间。6—12 月降水都呈减少趋势,其中 12 月减少最为明显,7 月最不明显,减少率仅为 0.32 mm/10 a,而 7 月是全年中降水量最大的月份,这也是横断山区年降水量减少不明显的重要原因之一。

(4)在大气环流发生异常(北极涛动、南极涛动、东亚夏季风、西太平洋副高、南亚高压和海温升高)和人类活动的共同影响下,横断山区气候呈现暖干的趋势。

参考文献(References)

- [1] CAI Yangpeng, HUANG Gordon, TAN Qian, et al. Identification of optimal strategies for improving eco-resilience to floods in ecologically vulnerable regions of a wetland [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(2): 360–369
- [2] BOCCOLARI M, MALMUSI S. Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 16–31
- [3] 丁一汇,任国玉. 气候变化国家评估报告(I) [J]. 气候变化研究进展, 2006, **2**(1): 3–8, 50 [DING Yihui, REN Guoyu. National assessment report of climate change (I) [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**(1): 3–8, 50]
- [4] 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[J]. 地理科学, 2006, **26**(3): 345–350 [LU Aigang, PANG Deqian, HE Yuanqing, et al. Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **26**(3): 345–350]
- [5] 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 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(5): 581–591]
- [6] 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 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(5): 621–630]
- [7] PEIN N, BRADLEY RS, DIAZ HF, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [J]. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(5), 424–430
- [8] LI Zongxing, HE Yuanqing, WANG Chunfen, et al. Spatial and

- temporal trends of temperature and precipitation during 1960—2008 at the Hengduan Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 2011, **236**: 127–142
- [9] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(5): 563–579 [LI Zongxing, HE Yuanqing, XIN Huijuan, et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan region during 1960—2008 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(5): 563–579]
- [10] 姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于 Modis 地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析 [J]. *地理学报*, 2011, **66**(7): 917–927 [YAO Yonghui, ZHANG Baiping, HAN Fang. MODIS-based air temperature estimation in the Hengduan Mountains and its spatio-temporal analysis [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(7): 917–927]
- [11] 张涛, 李宝林, 何元庆, 等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(2): 260–270 [ZHANG Tao, LI Baolin, HE Yuanqing, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation based on corrected TRMM data in Hengduan Mountains [J]. *Journal of natural resources*, 2015, **30**(2): 260–270]
- [12] 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 [J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(3): 338–344 [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 [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, **20**(3): 338–344]
- [13] 李吉均, 苏珍. 横断山冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1996 [LI Jijun, SU Zhen. *Glaciers of Hengduan Mountains* [M]. Beijing: Science Press, 1996.]
- [14] YUE Sheng, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearmans tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **259**(1): 254–271
- [15] WANG Xuan, LIANG Peiyu, LI Chunhui, et al. Analysis of regional temperature variation characteristics in the Lancang River Basin in southwestern China [J]. *Quaternary International*, 2014, **333**(2): 198–206
- [16] WANG Shijin, JIAO Shitai, XIN Huijuan. Spatio-temporal characteristics of temperature and precipitation in Sichuan Province, Southwestern China, 1960—2009 Significantly decreasing precipitation [J]. *Quaternary International*. 2013, **286**(5): 103–115
- [17] DONG Danhong, HUANG Gang, QU Xia, et al. Temperature trend-altitude relationship in China during 1963–2012 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, **122**(9): 285–294. DOI: 10.1007/s00704-014-1286-9
- [18] FAN Zexin, BRAUNING A, THOMAS A, et al. Spatial and temporal temperature trends on the Yunnan Plateau (Southwest China) during 1961—2004 [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, **31**(1): 2078–2090
- [19] 聂宁, 张万昌, 邓财. 雅鲁藏布江流域 1978—2009 年气候时空变化及未来趋势研究 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(1): 64–71 [NIE Ning, ZHANG Wanchang, DENG Cai. Spatial and temporal climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 64–71]
- [20] YAN Libin, LIU Xiaodong. Has climatic warming over the Tibetan Plateau paused or continued in recent years [J]. *Journal of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences*, 2014, **1**(1): 13–28
- [21] ZENG Wei, YU Zhen, WU Shihu, et al. Changes in annual, seasonal and monthly precipitation events and their link with elevation in Sichuan province, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, **36**(5): 2303–2322
- [22] WU Feifei, WANG Xuan, CAI Yanpeng, et al. Spatiotemporal analysis of precipitation trends under climate change in the upper reach of Mekong River basin [J]. *Quaternary International*, 2013, **392**(1): 1–10
- [23] 齐东梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析 [J]. *高原山地气象研究*, 2012, **32**(1): 35–42 [QI Dongmei, ZHOU Changyan, LI Yueqing, et al. Cause Analysis of Climate Changes in Southwest China [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2012, **32**(1): 35–42]
- [24] 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. *高原气象*, 2004, **23**(4): 429–434 [JU Jianhua, REN Juzhang, LV Junmei. Effect on interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East of Asian winter [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(4): 429–434]
- [25] FAN Ke, WANG Huijun. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. *Geophysical Research Letter*, 2004, **31**(10): 399–420. DOI: 1029/2004G1109465
- [26] 龚道溢, 何学兆. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响 [J]. *地理学报*, 2002, **57**(2): 185–193 [GONG Daoyi, HE Xuezhao. Interdecadal change in Western Pacific Subtropical High and climatic effect [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(2): 185–193]
- [27] 周长艳, 蒋兴文, 李跃清, 等. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征 [J]. *高原气象*, 2009, **28**(1): 55–63 [ZHOU Changyan, JIANG Xingwen, LI Yueqing, et al. Features of climate change of water vapor resource over eastern region of the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, **28**(1): 55–63]
- [28] 徐栋夫, 李栋梁, 王慧. 我国西南地区秋季干湿分类及主要类型异常年环流特征分析 [J]. *大气科学*, 2014, **38**(2): 373–385 [XU Dongfu, LI Dongliang, WANG Hui. Autumn dry-wet conditions and main types of atmospheric circulation in anomalous years in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, **38**(2): 373–385]
- [29] 谭晶, 王彰贵, 黄荣辉, 等. 云南雨季降水异常的热带海温和大气环流异常分析 [J]. *热带海洋学报*, 2015, **34**(2): 15–23 [TAN Jing, WANG Zhanggui, HUANG Ronghui, et al. Analysis of tropical sea surface temperature and atmospheric circulation anomalies and their relationship with abnormal precipitation in Yunnan during rainy season [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, **34**(2): 15–23]
- [30] 石广玉, 王喜红, 张立盛, 等. 人类活动对气候影响的研究 II. 对东亚和中国气候变化的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2002, **7**

- (2): 255 – 266 [SHI Guangyu, WANG Xihong, ZHANG Lisheng, et al. Impact of human activities on climate II. Impact on climate variability over East Asia and China [J]. Climate and Environmental Research, 2002, 7(2): 255 – 266]
- [31] LI Xiaowen, ZHOU Xiuji, LI Weiliang, et al. The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanisms [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 9(1): 57 – 68
- [32] YAO Junqiang, YANG Qing, MAO Weiye, et al. Precipitation trend-Elevation relationship in arid regions of the China [J]. Global and Planetary Change, 2016, 143(5): 1 – 9
- [33] CHRISTOPH Schär, CHRISTOPH Frei, DANIEL Lüthi, et al. Surrogate climate-change scenarios for regional climate models [J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(6): 669 – 672
- [34] 何惠. 中国水文站网[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 460 – 465 [HE Hui. China gauging station network [J]. Advance in water science, 2010, 21(4): 460 – 465]

Variation Character of Annual, Seasonal and Monthly Temperature and Precipitation

XU Fei^{1, 2}, JIA Yangwen^{1*}, NIU Cunwen¹, LIU Jiajia¹, ZHANG Wenhai^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To detailed analyze the climate change process in the Hengduan Mountains region (HDMR), spatiotemporal variation of temperature and precipitation were analyzed based on the temperature and precipitation data at 90 meteorological stations in this region from 1961 to 2011, by the linear regression method, the Mann-Kendall nonparametric statistical test and the inverse distance weighted interpolation. The results indicated that the annual mean temperature in the HDMR exhibited significantly increasing trends of 0.16 °C/10 a during 1961—2011, while the annual precipitation showed a nonsignificant decreasing trend at a rate of -11.41 mm/10 a. It implied that the HDMR tended to be much warm and dry. From the spatial distribution of the variation trends of temperature and precipitation, the warming trend of the north was fiercer than that of the south, the west was more intense than the east; and the trend of decreasing precipitation showed that the south was more intense than the north. At the seasonal scale, the temperature increased by 0.09, 0.14, 0.16 and 0.27 °C/10 a in spring, summer, autumn, and winter, respectively. Precipitation decreased by -7.76, -8.49 and -2.07 mm/10 a in summer, autumn, and winter, respectively, and increased by 7.34 mm/10 a in spring. At the monthly scale, all twelve monthly mean temperatures exhibited an increasing trend, and the precipitation showed increasing trends from January to May and decreasing trends from June to December. In addition, causes of climate changes were also analyzed. This study can be helpful for deeper understanding of the variabilities in temperature and precipitation in response to climate change, and will provide supports for the water resource management in the HDMR.

Key words: Hengduan Mountains region; temperature; precipitation; variation character