

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0085

LIU Youcun, JIAO Keqin, ZHAO Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748-759. [刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759.]

中国天山地区降水对全球气候变化的响应

刘友存¹, 焦克勤², 赵奎¹, 刘燕¹, 韩添丁², 钟宇³,
沈永平², 郝永红³, 叶柏生²

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;
3. 天津师范大学 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387)

摘 要: 天山地区的降水变化及其对全球气候变化的响应是近年来研究的热点。利用中国天山地区 40 个气象站 1951-2014 年的月降水数据, 运用线性倾向估计、相关分析等气候诊断方法, 分析了该区域的降水变化, 探讨了主要气候指数与降水同步变化的相关关系。结果表明: 年降水呈现出“西多东少, 北多南少, 高山多外围少”的特征, 年降水变化率为 $6.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。SASMI 与年降水表现为显著正相关, PDO、PNA 和 AO 与年降水表现为弱正相关, 且有局限性。在枯水期, SASMI 与天山北坡及部分中高山地带的降水表现为弱正相关, 而在西天山南坡表现为弱负相关, ENSO 与中、西天山南北坡的中低山带的降水变化相关性较高。在丰水期, SASMI 与天山南坡和高山区降水变化相关性较高, PDO 与中、西天山南北坡的低山带部分站点的降水变化相关性较高。

关键词: 气候变化; 气候指数; 降水; 天山

中图分类号: P468.0⁺24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)04-0748-12

0 引言

近年来, 有关天山地区气候特征的研究一直是气候变化研究的热点^[1-5], 而气候变化引起降水的时空分布转化问题尤为突出^[6-9]。天山地区特殊的地理位置和地貌格局决定了其降水的时空特征对全球气候变化的响应更为显著^[10-13], 即使微小的气候变化都会引起降水较大幅度的波动^[14-15]。区域乃至全球尺度的气候变化对天山地区降水的影响已引起广大学者的极大关注^[16-18]。Li 等^[19]应用数理统计方法分析了单一或两种大尺度的气候模式对天山地区降水的影响。Kalra 等^[20]运用大气-海洋涛动模式对开都河径流变化进行了预测。魏文寿等^[21]通过对树木年轮的分析, 研究了天山山区 1770-2004 年气候变化及降水趋势, 并进行了预测。赵传成等^[22]分析了天山山区降水量的空间分布, 并对降水量进行了估算。袁晴雪等^[23]发现天

山山区 1959-2000 年降水存在 3 个“干-湿”周期性变化。蓝永超等^[24]研究了天山山区 1960-2005 年水循环要素的变化及趋势, 发现 1980 年以来山区降水呈明显上升趋势, 天山西段南坡是近期降水增幅最大的区域。普宗朝等^[25]指出 1971-2006 年天山山区气候呈较明显的暖湿化趋势, 降水在 1986 年发生突变性的增大。此外, 部分学者对整个天山或部分区域的降水变化对气候变化的响应进行了探讨^[26-28]。这些研究工作对天山地区的降水特征进行了有益的尝试, 对后续工作具有重要的指导意义。本文是在前人研究工作的基础上, 综合运用各种全球气候系统监测指数(以下简称“气候指数”), 探讨天山地区降水变化趋势、变化特征及其对全球气候变化的响应。

天山山区大气降水是新疆河川径流的最终来源, 无论是降雨形成的径流, 还是积雪和冰川的积累与消融, 都为天山南北绿洲提供了重要水资

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471001; 41271083; 41271035); 江西理工大学人才引进基金项目(jxxjbs17017); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04)资助

作者简介: 刘友存(1977-), 男, 河北迁安人, 副教授, 2008 年在法国科学院巴黎地球物理研究院获博士学位, 从事水文水资源、河流动力地貌学研究。E-mail: liuyoucun@gmail.com.

源^[21]。山区的降水变化对新疆的工农业生产具有重要影响,是生态环境和社会经济可持续发展的命脉。此外,天山山区远离人类活动密集区,人为活动影响相对较小,其气候变化能够反映全球气候背景下的区域响应^[29-30]。因此,系统分析天山地区降水时空分布,对于客观认识天山地区现代气候变化特征,进一步研究全球气候变化的区域响应具有重要的科学意义。

本文旨在运用多种气候指数,结合天山地区 40 个气象站 1951-2014 年的逐月降水资料,重点分析天山及周边地区的降水时空变化特征,探讨年际间和不同季节的各种气候指数与降水同步变化的相关关系,预估未来的降水变化,为进一步开展气候变化对天山地区水资源影响的研究提供科学依据和理论参考。

1 研究区概况

天山横亘于亚洲腹地,呈纬向分布,是亚洲中部最大的山系。中国天山(图 1)约占该山系总长度的 2/3,横贯全疆,东西长约 1 700 km^[11,30];南北宽 250~350 km,山脊平均海拔在 4 000 m 左右^[21]。它既是南北疆气候的分水岭,又是影响新疆乃至我国中西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障^[31]。同时,天山山区降水分布极不均匀,具有“西段多,东段少;北坡多,南坡少”的特点^[22]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

中国境内的天山山区及其周边地区 40 个气象

站的逐月降水监测数据中,39 个站点的数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),时间序列为观测以来至 2014 年 2 月。大西沟站逐月降水资料由大西沟气象站提供,时间序列为 1959 年 1 月-2010 年 12 月,数据亦经过了整理。各气象站的相关资料如表 1 所示,数据主要包括月降水量、站点的坐标和海拔等。

1951 年 1 月-2014 年 2 月的 ENSO(El Nino-Southern Oscillation)和 IOD(Indian Ocean Dipole)数据来源于英国气象管理局的哈德利观测中心(<http://www.metoffice.gov.uk>)。SASMI(South Asian Summer Monsoon Index)来源于北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院李建平教授的个人主页(<http://ljp.gcess.cn/>)。AO(Arctic Oscillation)、NAO(North Atlantic Oscillation)、PDO(Pacific Decadal Oscillation)、PNA(Pacific North American Oscillation)来源于美国海洋和大气管理局下属的气候预测中心(CPC)网站(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 皮尔逊相关性分析

运用皮尔逊法分别对各站降水与气候指数进行相关分析。皮尔逊相关系数的计算公式^[32]为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: r 为要素 X 与 Y 之间的相关系数; X_i 、 Y_i 分别为第 i 年的降水和气候指数; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为研究时段多年降水和气候指数的平均值。相关系数显著检

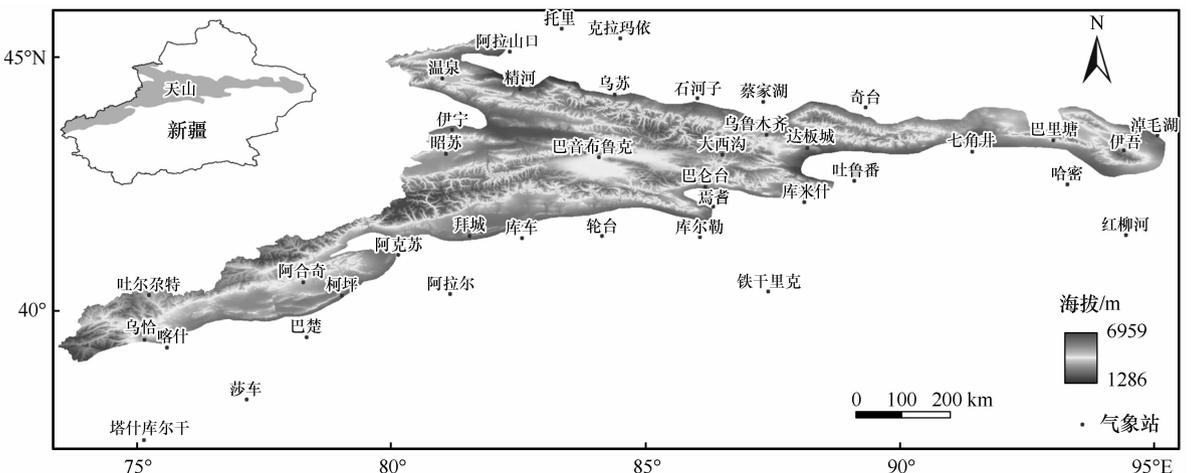


图 1 天山地区地形及气象站点分布

Fig. 1 Location of the Tianshan Mountains and the distribution of meteorological stations

表1 天山及周边气象站点信息
Table 1 Information of the meteorological stations in the Tianshan Mountains and neighbor regions

台站名称	坐 标		海拔 /m	最大年降水量		最小年降水量		多年平均降 水量/mm	年降水变化率 /[mm · (10a) ⁻¹]	时间序列
	经度/°E	纬度/°N		值/mm	年份	值/mm	年份			
托里	83.60	45.93	1 077.8	432.6	2010	92.9	1997	250.4	2.7	1956 – 2014
克拉玛依	84.85	45.62	449.5	227.3	1960	37.5	1997	116.6	6.3	1956 – 2014
温泉	81.02	44.97	1 357.8	394.3	1999	77.8	1968	235.3	15.9	1957 – 2014
精河	82.90	44.62	320.1	186.0	2011	28.5	1957	103.7	5.7	1953 – 2014
乌苏	84.67	44.43	478.7	338.1	2010	71.4	1957	172.7	6.8	1953 – 2014
石河子	86.05	44.32	442.9	339.7	1999	124.9	1978	210.0	6.5	1952 – 2008
蔡家湖	87.53	44.20	440.5	239.0	1987	70.7	1974	143.7	8.0	1958 – 2014
奇台	89.57	44.02	793.5	325.5	1987	89.3	1962	189.0	5.9	1951 – 2014
伊宁	81.33	43.95	662.5	496.3	2004	137.6	1967	277.3	10.4	1951 – 2014
昭苏	81.13	43.15	1 851.0	676.0	1981	351.0	1997	507.8	0.7	1954 – 2014
乌鲁木齐	87.65	43.78	935.0	419.5	2007	131.3	1974	269.4	14.0	1951 – 2014
巴仑台	86.30	42.73	1 739.0	339.3	1999	72.3	1985	208.4	6.8	1957 – 2014
达坂城	88.32	43.35	1 103.5	151.3	2003	22.4	1968	70.4	4.5	1956 – 2014
七角井	91.73	43.22	721.4	99.1	1990	4.8	1985	34.4	-3.2	1952 – 2014
库米什	88.22	42.23	922.4	108.2	1998	14.5	1978	54.2	3.0	1958 – 2014
巴音布鲁克	84.15	43.03	2 458.0	406.6	1999	191.4	1975	272.6	8.6	1957 – 2014
焉耆	86.57	42.08	1 055.3	142.1	1992	16.2	1985	73.3	2.8	1951 – 2014
吐鲁番	89.20	42.93	34.5	48.4	1958	2.9	1968	15.7	-0.6	1951 – 2014
阿克苏	80.23	41.17	1 103.8	186.2	1996	18.7	1986	73.2	7.6	1953 – 2014
拜城	81.90	41.78	1 229.2	223.7	2010	48.6	1961	119.0	12.7	1958 – 2014
轮台	84.25	41.78	976.1	139.0	1960	2.6	1962	65.8	5.8	1958 – 2014
库车	82.97	41.72	1 081.9	194.7	1958	33.0	1965	81.2	2.5	1951 – 2014
库尔勒	86.13	41.75	931.5	127.4	2012	14.0	2011	55.9	1.4	1958 – 2014
吐尔杂特	75.40	40.52	3 504.4	428.9	1998	139.0	1976	249.2	11.8	1958 – 2014
乌恰	75.25	39.72	2 175.7	401.4	2012	48.3	1985	182.3	14.8	1955 – 2014
喀什	75.98	39.47	1 289.4	191.6	2010	16.2	1994	68.2	4.0	1951 – 2014
阿合奇	78.45	40.93	1 984.9	436.7	2010	89.1	1975	218.3	20.1	1957 – 2014
阿拉山口	82.57	45.18	336.1	198.6	1987	32.1	1997	113.3	7.7	1956 – 2014
巴楚	78.57	39.80	1 116.5	149.2	2010	8.6	1985	58.2	6.2	1953 – 2014
柯坪	79.05	40.50	1 161.8	252.5	2010	19.3	1985	98.1	13.0	1959 – 2014
阿拉尔	81.27	40.55	1 012.2	91.9	1998	7.0	1959	103.7	3.3	1958 – 2014
铁干里克	87.70	40.63	846.0	75.7	1974	3.4	2001	33.6	0.1	1957 – 2014
塔什库尔干	75.23	37.77	3 090.1	140.8	2010	20.1	1963	75.3	5.1	1957 – 2014
莎车	77.27	38.43	1 231.2	153.7	1996	101.0	1985	53.8	5.1	1953 – 2014
巴里坤	93.05	43.60	1 677.2	342.4	2007	121.4	1962	218.8	9.6	1956 – 2014
淖毛湖	95.13	43.77	479.0	61.3	2005	9.8	2013	21.8	-20.7	2003 – 2014
伊吾	94.70	43.27	1 728.6	196.7	1998	35.1	1985	98.1	6.0	1958 – 2002 2007 – 2014
哈密	93.52	42.67	737.2	71.7	1992	9.2	1997	38.6	2.3	1951 – 2014
红柳河	94.67	41.53	1 573.8	122.3	1979	16.9	1986	50.7	-0.8	1952 – 2014
大西沟	86.67	43.12	3 543.8	632.4	1996	293.4	1985	449.9	19.3	1958 – 2010

验采用 t 检验法。 r 值介于 $[-1, 1]$, $r > 0$ 表示正相关, $r < 0$ 表示负相关。 $0.3 > |r| \geq 0$ 表示弱相关, $0.5 > |r| \geq 0.3$ 表示中度相关, $0.8 > |r| \geq 0.5$ 表示强相关, $|r| \geq 0.8$ 表示极强相关。

通过对比单个气候指数在不同气象站点的相关系数, 可以判断该气候指数在不同区域影响程度的大小。

2.2.2 相关系数的假设检验

利用样本相关系数推断两个变量是否相关, 可用 t 统计量对相关系数为 0 的原假设进行检验。若 t 检验显著, 则拒绝原假设, 即两个变量是线性相关的; 若 t 检验不显著, 则不能拒绝原假设, 即两个变量不是线性相关的^[33]。

3 结果与分析

天山地域辽阔, 受地形和季风的影响, 在天山地区不同区域不同时间内影响降水的主导因素各不相同, 区域性气候指数的响应表现出了较大的时空差异性。

3.1 降水的时空变化特征

作为南北疆气候过渡带, 天山地区是新疆乃至我国西北地区最大的降水区域。已有研究表明, 天山地区降水呈增加趋势^[31]。据 40 个气象站降水记录估算, 多年平均降水变化率为 $6.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。然而, 由于地形、纬度、海拔等地理因素的影响, 其空间分布极为复杂, 局地特征亦明显, 影响机制多样。从天山地区多年平均降水量的空间分布[图 2(a)]可以看出: ①天山地区年降水呈现出“西多东少, 北多南少”的特征。②伊犁河流域年降水量明显高于其他地区, 以昭苏站为例, 多年平均降水量为 507.8 mm , 为全疆之冠。③中天山北坡年降水量亦较高, 以大西沟站为例, 多年平均降水量为 449.9 mm 。④其他 38 个站点的年均降水量小于 300 mm , 其中有 10 个站点介于 $200 \sim 300 \text{ mm}$ 之间(表 1), 多分布于天山的北坡和南坡的中高山地区。⑤天山南坡的中低山区年降水量普遍偏少, 不足 100 mm 的 19 个站点(表 1)全分布于天山南坡的中低山区或沙漠盆地边缘。

天山地区降水除在空间上分布不均外, 在时间上也波动较大。从年降水变化率分布[图 2(b)]可以看出: ①天山地区年降水总体上呈现增加趋势, 且西段大于东段。②年降水增率最大的区域主要集中在天山西段的叶尔羌河与阿克苏河上游地区, 以阿合奇站为例, 年降水变化率为 $20.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

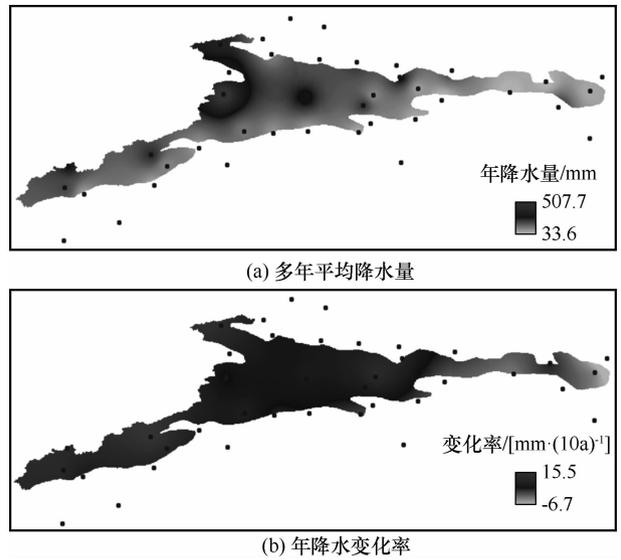


图 2 天山及周边多年平均降水量和年降水变化率分布
Fig. 2 Distributions of annual mean precipitation and decadal precipitation changing rate in the Tianshan Mountains and neighbor regions

③中、西天山北坡的降水增率也是比较大的, 年降水变化率大于 $10.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的 9 个站点全分布在该区域, 其中大西沟站和温泉站的年降水变化率分别为 $19.3 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $15.9 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。④天山东段东南坡的吐鲁番、七角井、红柳河和淖毛湖站降水呈现减少趋势, 尤其是淖毛湖站, 过去 11 年的年降水变化率为 $-20.7 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 减少趋势很明显。

3.2 降水与同期气候指数的相关关系

3.2.1 全年

表 2 给出了不同时期主要的降水和气候指数通过置信度检验的相关分析结果。从年均降水和同期的气候指数相关分析中可以看出: ①就年尺度而言, 除伊宁和吐尔尕特站外, 其他 38 个站点的降水与 SASMI 具有显著的正相关性, P 小于 0.001 (哈密站除外)。②伊宁和吐尔尕特站未通过置信度检验, 说明这个两地区的降水与 SASMI 同步变化不具有相关性。③PDO、PNA 和 AO 与天山地区降水变化也具有一定的同步性, 但从相关系数可以看出, 远小于 SASMI。④除个别站点外, ENSO、IOD 和 NAO 等气候指数与天山地区降水相关性并不显著(数据未列出)。

图 3 展示了天山地区年降水与主要气候变化模式指数年均值的同步变化关系。

从 SASMI 与降水关系分布[图 3(a)]可以看出, 年降水量与同期 SASMI 具有很好的相关关系,

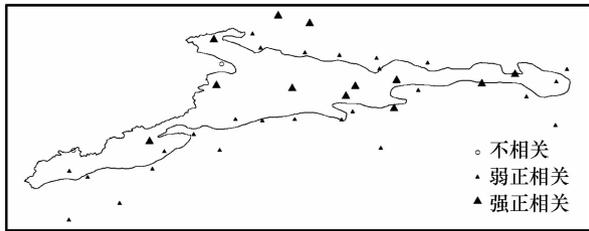
表2 天山及周边降水与气候指数在全年的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between different climate index and precipitation of the meteorological stations in the Tianshan Mountains and neighbor regions during the whole year

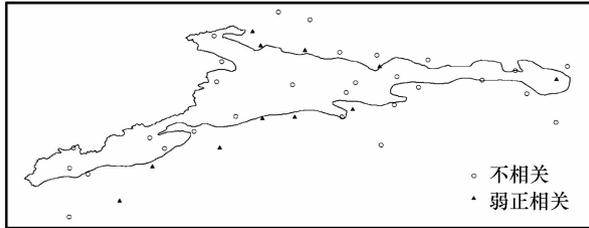
台站名称	SASMI		PDO		AO		PNA	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
托里	0.543	0.000						
克拉玛依	0.500	0.000					0.102	0.045
温泉	0.500	0.000			0.096	0.013		
精河	0.298	0.000	0.100	0.006				
乌苏	0.252	0.000	0.081	0.028				
石河子	0.170	0.000						
蔡家湖	0.279	0.000						
奇台	0.424	0.000			0.104	0.004		
伊宁								
昭苏	0.666	0.000						
乌鲁木齐	0.233	0.000	0.089	0.014	0.104	0.004		
巴仑台	0.668	0.000			0.076	0.049		
达坂城	0.545	0.000						
七角井	0.507	0.000						
库米什	0.539	0.000						
巴音布鲁克	0.764	0.000						
焉耆	0.451	0.000	0.090	0.014				
吐鲁番	0.208	0.000					0.045	0.037
阿克苏	0.396	0.000						
拜城	0.419	0.000						
轮台	0.388	0.000	0.110	0.004				
库车	0.401	0.000	0.134	0.000			0.087	0.050
库尔勒	0.413	0.000						
吐尔尕特								
乌恰	0.386	0.000						
喀什	0.127	0.000			0.076	0.036		
阿合奇	0.517	0.000						
阿拉山口	0.431	0.000	0.075	0.048			0.097	0.037
巴楚	0.426	0.000	0.101	0.007				
柯坪	0.485	0.000						
阿拉尔	0.445	0.000	0.089	0.023			0.105	0.050
铁干里克	0.403	0.000						
塔什库尔干	0.365	0.000						
莎车	0.215	0.000	0.082	0.027				
巴里坤	0.668	0.000						
淖毛湖	0.293	0.000						
伊吾	0.574	0.000	0.114	0.005				
哈密	0.081	0.027						
红柳河	0.167	0.000						
大西沟	0.785	0.000			0.085	0.033		

全年降水与同期 SASMI 指数变化相关程度较高的站点占 95.0%，这说明 SASMI 对降水的影响具有普遍性，SASMI 值越高，降水越大。在中高山和北坡地区，二者表现为较强的正相关，相关系数 r 值大于 0.5 的强相关站点占 30.0%，这说明在该区域 SASMI 是影响全年降水的主要因素。

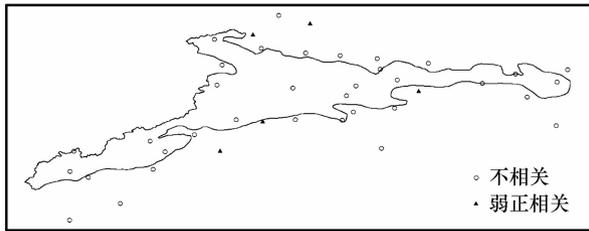
从 PDO 与降水关系分布[图 3(b)]可以看出，PDO 与降水同步变化的相关性并不显著，通过置信度检验的站点占 27.5%，且存在着明显的空间差异。二者同步变化的相关性主要体现在中、西天山南北坡的低山区，且南坡强于北坡。二者表现为弱的正相关，相关系数 r 值介于[0.075, 0.130]，这说明 PDO 与天山南北坡低山区的降水有一定程度的关系，但不是主导因素。



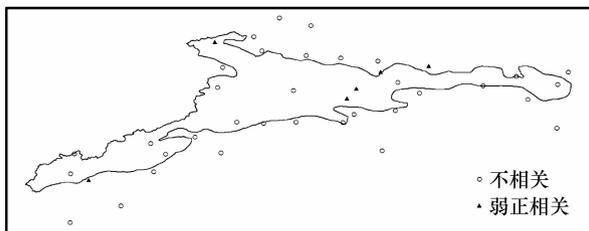
(a) SASMI与降水



(b) PDO与降水



(c) PNA与降水



(d) AO与降水

图3 天山及周边降水与气候指数在全年的相关关系分布
 Fig.3 Spatial distribution of correlativity between different climate index and precipitation in the Tianshan Mountains and neighbor regions during the whole year

PNA 与降水同步变化相关程度较高的区域主要集中在低山区和出山口附近，通过检验的站点仅占 12.5%，亦表现为弱的正相关[图 3(c)]。AO 与降水同步变化相关程度较高的区域主要表现在中天山的 4 个站，而西天山南坡的喀什站和北坡的温泉站亦通过了 0.05 的显著水平检验，但相关系数却在 0.1 左右波动[图 3(d)]。总之，PNA、AO 对天山地区降水同步变化具有一定的影响，但在空间上和强度上，其影响具有较大的局限性。

为了区分不同时期降水变化对气候指数的响应，分别就枯水期(11月至翌年4月)和丰水期(5-10月)的降水量与对应时期的气候指数进行了相关性分析。

3.2.2 枯水期

与全年相比，枯水期气候变化对降水的影响表现出一定的独特性。从枯水期降水与同期气候指数间的相关系数(表3)可以发现：①在枯水期，16个站(40.0%)的降水与 SASMI 具有显著的相关性， $|r|$ 介于[0.1, 0.2]，说明 SASMI 是影响降水的主要因素之一。②8个站(20.0%)的降水与 ENSO 显示出明显的正相关， $|r|$ 亦介于[0.1, 0.2]，说明枯水期的降水对同期的 ENSO 也具有一定的响应。③枯水期降水对同期的 PDO、AO 和 NAO 也具有一定的响应，通过检验的站点分别占 17.5%、15.0% 和 17.5%， $|r|$ 均介于[0.1, 0.2]。④PNA 与枯水期降水同步变化，在个别站点通过了置信度检验(数据未列出)。⑤IOD 与所有站点的相关性未通过显著性检验(数据未列出)。⑥11个站点与所有气候指数的相关性未通过置信度检验，而这些站点主要集中在中、东天山南坡低山带。总之，枯水期天山地区的降水与多种气候模式同步变化相关，但具有较大的空间差异，这说明了天山地区降水变化驱动因素的复杂性和不稳定性。

图 4(a)展示了 SASMI 与枯水期降水的相关关系。从图中可以看出，除了未通过置信度检验的站点外，枯水期 SASMI 对降水量的影响表现为正、负两种弱相关。正相关的区域主要分布在北坡和部分中高山地带，负相关的区域主要分布在西天山南坡，正、负相关站点的比例各为 20.0%。而在中、东天山，尤其是南坡，二者未通过置信度检验。

图 4(b)展示了 ENSO 与枯水期降水的相关关系。从图中可以看出，ENSO 对枯水期降水的影响主要集中在中、西天山的南北坡中低山带，且表现为弱的正相关。除东天山南缘的红柳河站通过检验

表3 天山及周边降水与气候指数在枯水期的相关系数
 Table 3 Correlation coefficients between different climate index and precipitation of the meteorological stations in the Tianshan Mountains and neighbor regions during dry seasons

台站名称	SASMI		ENSO		PDO		AO		NAO	
	<i>r</i>	<i>P</i>								
托里	0.189	0.000	0.106	0.049						
克拉玛依	0.158	0.003								
温泉							0.162	0.003	0.137	0.011
精河			0.122	0.019						
乌苏										
石河子										
蔡家湖	0.148	0.007								
奇台	0.159	0.002								
伊宁	0.114	0.028	0.146	0.005						
昭苏										
乌鲁木齐	0.129	0.012					0.133	0.010	0.103	0.045
巴仑台										
达坂城										
七角井										
库米什										
巴音布鲁克	0.138	0.011			0.110	0.043				
焉耆										
吐鲁番										
阿克苏	-0.119	0.023							0.178	0.001
拜城	-0.188	0.001	0.157	0.004	0.133	0.015				
轮台			0.142	0.010	0.120	0.028				
库车			0.137	0.007						
库尔勒			0.113	0.039						
吐尔尕特										
乌恰	-0.169	0.002			0.120	0.024	0.126	0.018		
喀什	-0.171	0.001					0.126	0.014		
阿合奇	-0.128	0.018			0.167	0.002	0.147	0.006	0.158	0.003
阿拉山口					0.125	0.020				
巴楚										
柯坪	-0.122	0.028							0.127	0.021
阿拉尔									0.118	0.031
铁干里克										
塔什库尔干	-0.187	0.000								
莎车	-0.135	0.010							0.129	0.014
巴里坤										
淖毛湖										
伊吾					0.144	0.011				
哈密	0.118	0.021								
红柳河			0.125	0.016						
大西沟							0.135	0.017		

外, 其他地区均未通过显著性检验。这说明 ENSO 在秋冬季节对中天山低山带的降水具有一定的影响。

PDO、AO 和 NAO 与枯水期降水的相关关系在局部地区通过了显著性检验, 表现为弱的正相关, 但其影响比较分散。PDO 与降水的同步变化在中高山区均通过显著性检验, 但站点比例只有 17.5%, 且较分散[图 4(c)]。AO 与降水的相关关系通过显著性检验的 6 个站点也比较分散, 规律性不明显[图 4(d)]。NAO 对降水的影响比较集中,

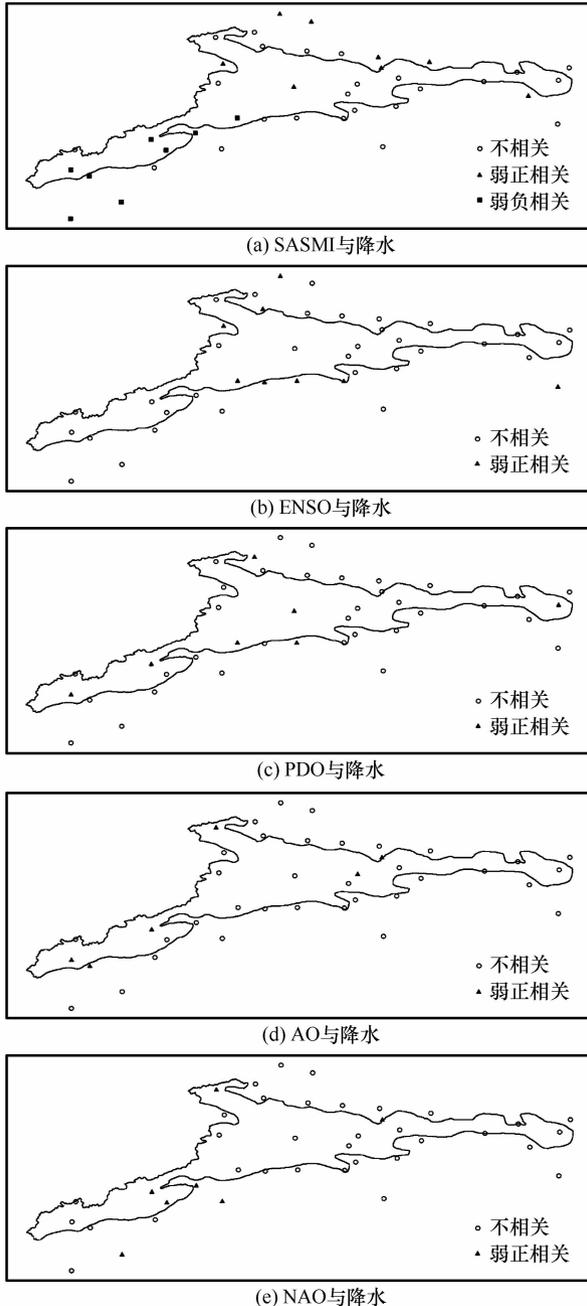


图 4 天山及周边降水与气候指数在枯水期的相关关系分布
Fig. 4 Spatial distribution of correlativity between different climate index and precipitation in the Tianshan Mountains and neighbor regions during dry seasons

在西天山南坡有 5 个站点通过检验, 2 个站点零星分布在天山北坡低山区[图 4(e)]。

3.2.3 丰水期

在丰水期, 天山地区降水对气候变化的响应同样具有显著特点。从丰水期降水与同期气候指数间的相关系数(表 4)可以发现: ① 29 个站点(67.5%)的降水与 SASMI 通过了 0.01 的显著性检验, 均为正相关, 绝大部分 r 值大于 0.2, 这说明 SASMI 是影响丰水期降水的主要因素之一。② 7 个站点(17.5%)的丰水期降水与 PDO 通过了 0.05 的显著性检验, 为正相关, r 值介于 [0.1, 0.13], 说明 PDO 对局部丰水期的降水有一定影响。③ PNA 对丰水期降水也具有一定的影响, 5 个站点(12.5%)通过置信度检验, 但 r 值比较小。④ 与枯水期不同的是, ENSO、IOD 和 NAO 只有个别站点通过了置信度检验(数据未列出), 其比例分别为 2.5%、5.0% 和 2.5%。⑤ AO 与所有站点的相关性未通过显著性检验(数据未列出)。⑥ 9 个站点与所有气候指数的相关性未通过置信度检验, 除哈密站外, 其他 8 个站点主要分布在中天山北坡低边缘和西天山西段低山区。总之, 丰水期的降水亦受多种气候模式的影响, 但 SASMI 和 PDO 的影响较大, 且分布区域广。其他气候模式对降水的影响较小, 也比较分散。部分站点与几种气候指数的相关性未通过置信度检验, 这说明了天山地区丰水期降水变化的复杂性和综合性。

图 5(a) 展示了 SASMI 与丰水期降水的相关关系。从图中可以看出, 丰水期 SASMI 与同期的降水变化表现为较好的正相关, 尤其在天山南坡, 海拔越高, 相关系数越大; 在中天山高山区, 表现为强正相关; 未通过置信度检验的站点主要分布在中天山北坡低山带和西天山西段南坡。这说明丰水期 SASMI 对天山南坡和高山区的降水影响较大。

图 5(b) 展示了 PDO 与丰水期降水的相关关系。从图中可以看出, PDO 对丰水期降水的影响主要集中在中天山西部和西天山东部的南北坡中低山带, 表现为弱的正相关, 但规律性不明显; 东天山东段的伊吾站也通过了显著性检验。这说明 PDO 在丰水期主要对中、西天山南北坡低山带部分区域的降水存在影响, 且影响能力有限。

图 5(c) 展示了 PNA 与丰水期降水的相关关系。在局部地区也通过了显著性检验, 表现为弱的正相关, r 值介于 [0.1, 0.2], 但其影响比较分散, 多分布在低山带或戈壁边缘。

表 4 天山及周边降水与气候指数在丰水期的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between different climate index and precipitation of the meteorological stations in the Tianshan Mountains and neighbor regions during wet seasons

台站名称	SASMI		PDO		PNA	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
托里	0.227	0.000				
克拉玛依	0.301	0.000	0.102		0.143	0.047
温泉	0.152	0.005				
精河				0.046		
乌苏						
石河子						
蔡家湖						
奇台						
伊宁				0.041		
昭苏	0.252	0.000				
乌鲁木齐						
巴仑台	0.437	0.000				
达坂城	0.418	0.000				
七角井	0.368	0.000				
库米什	0.356	0.000				
巴音布鲁克	0.583	0.000				
焉耆	0.243	0.000				
吐鲁番	0.163	0.001	0.045		0.101	0.050
阿克苏	0.199	0.000				
拜城	0.193	0.000				
轮台	0.218	0.000		0.019		
库车	0.228	0.000	0.087	0.001	0.097	0.041
库尔勒	0.196	0.000				
吐尔尕特	0.142	0.009				
乌恰						
喀什						
阿合奇	0.251	0.000			0.103	0.045
阿拉山口	0.179	0.001	0.097			
巴楚	0.198	0.000		0.021		
柯坪	0.251	0.000				
阿拉尔	0.169	0.002	0.105	0.023	0.895	0.033
铁干里克	0.253	0.000				
塔什库尔干	0.145	0.007				
莎车						
巴里坤	0.448	0.000				
淖毛湖	0.279	0.023				
伊吾	0.426	0.000		0.022		
哈密						
红柳河	0.360	0.000				
大西沟	0.586	0.000				

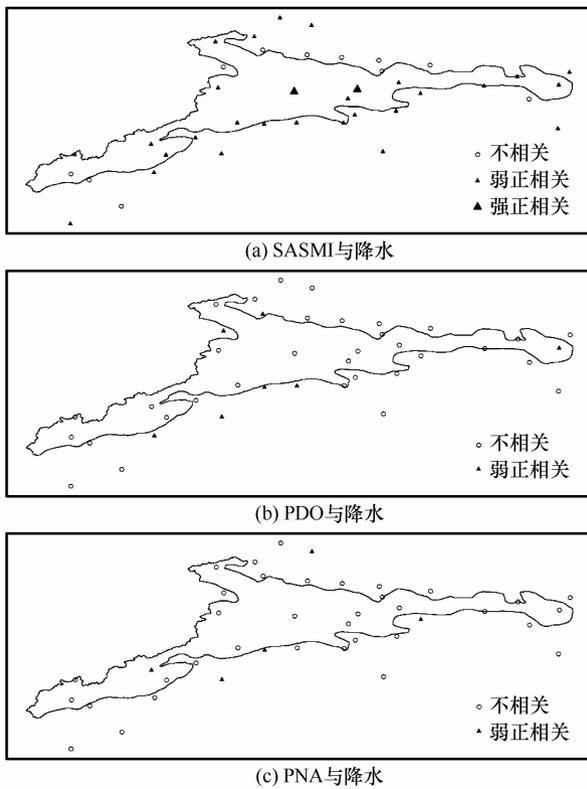


图5 天山及周边降水与气候指数在丰水期的相关关系分布
Fig. 5 Spatial distribution of correlativity between different climate index and precipitation in the Tianshan Mountains and neighbor regions during wet seasons

4 结论

利用1951–2014年天山地区降水实测资料,通过线性估计、相关分析等气候诊断方法,分析了过去60多年天山地区的降水变化趋势,探讨了降水变化对同期主要气候指数的响应。得到以下结论:

(1) 在空间上,天山地区降水呈现“西多东少,北多南少,高山多外围少”的特征,伊犁河流域降水最大;在时间上,年降水总体呈增加趋势,年降水变化率为 $6.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,变化率大小表现为“西段大于东段,北坡大于南坡”,而东天山南坡降水呈减少趋势。

(2) 年降水量与部分气候指数显示出较好的相关性。SASMI与降水变化的相关性最高,二者在绝大部分地区表现为显著的正相关;PDO、PNA和AO与降水表现为弱的正相关,在空间上和强度上存在较大的局限性;ENSO、IOD和NAO等气候指数与天山地区降水的相关性并不显著。

(3) 在枯水期,降水与部分气候指数显示出较

好的相关性,但空间差异性较大。这说明天山地区降水变化驱动因素的复杂性和不稳定性。SASMI是影响天山地区降水的第一要素,在天山北坡和部分中高山地带表现为弱的正相关,在西天山南坡表现为弱的负相关;ENSO对枯水期天山地区降水的影响主要集中在中、西天山的南北坡中低山带,且表现为弱的正相关;PDO、AO和NAO对枯水期天山地区降水的影响比较分散,且规律性不明显。

(4) 在丰水期,SASMI与降水表现为较好的正相关,尤其在天山南坡和高山区;PDO与中、西天山南北坡低山带部分区域降水的相关性较低;PNA、ENSO、IOD和NAO等对降水的影响较小,且比较分散;部分站点与几种气候指数的相关分析未通过置信度检验,说明了天山地区丰水期降水变化影响因素的复杂性和多样性。

特殊的地理位置和高海拔,使得天山地区降水变化呈现出明显的局地性和复杂性。中高山地区实测数据稀少,对数据的分析存在一定的影响,这也是目前山区降水研究的瓶颈,有待进一步开展相关工作。

参考文献 (References):

- [1] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1/2): 1–12.
- [2] Shen Yongping. Tianshan: A hot spot for researches of global climate change and water circulation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4): 780. [沈永平. 中亚天山是全球气候变化和水循环变化的热点地区[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 780.]
- [3] Kutuzov S. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatau, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(1/2): 59–70.
- [4] Wang Rongjun, Liu Shiyin, Wang Rui, et al. Analysis of a river fed by precipitation in north slopes of the Tianshan Mountains: runoff characteristics and influence factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1353–1361. [王荣军, 刘时银, 王睿, 等. 天山北坡降雨补给型河流径流变化特征及其影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1353–1361.]
- [5] Liu Youcun, Lu Miaojie, Huo Xueli, et al. A Bayesian analysis of generalized Pareto distribution of runoff minima[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(3): 424–432.
- [6] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: Summary for policymakers[R/OL]. [2013-10-28]. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.
- [7] Burns D A, Klaus J, McHale M R. Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New York, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(1/2): 155–170.

- [8] Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyin. Effect of climate factors on streamflow in the alpine catchment of the Qilian Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(5): 431–437. [丁永建, 叶柏生, 刘时银. 祁连山区流域径流影响因子分析[J]. *地理学报*, 1999, 54(5): 431–437.]
- [9] Liu Youcun, Huo Xueli, Liu Yan, et al. Analyzing streamflow extremes in the upper Ürümqi River with the generalized Pareto distribution[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 4885–4895.
- [10] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295–1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295–1304.]
- [11] Zhang Zhengyong, Liu Lin, Tang Xiangling. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan Mountains during 1960–2010[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1475–1484. [张正勇, 刘琳, 唐湘玲. 1960–2010年中国天山山区气候变化区域差异及突变特征[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1475–1484.]
- [12] Liu Y, Metivier F, Gaillardet J, et al. Erosion rates deduced from seasonal mass balance along the upper Ürümqi River in Tianshan[J]. *Solid Earth*, 2011, 2(2): 283–301.
- [13] Xia Jun, Liu Chunzhen, Ren Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1–12. [夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 1–12.]
- [14] Liu Youcun, Liu Zhifang, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale features of runoff on cross-wavelet transformation in the upstream of Ürümqi River, Tianshan Mountain[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1564–1572. [刘友存, 刘志方, 郝永红, 等. 基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1564–1572.]
- [15] Liu Zhifang, Liu Youcun, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1137–1146. [刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1137–1146.]
- [16] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303–309.
- [17] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(I): hydrological effects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513–527.]
- [18] Ma Yi, Bai Lei, Li Qian, et al. The error analysis of the long-term air temperature and precipitation in Northwest China simulated by WRF model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 77–78. [马奕, 白磊, 李倩, 等. 区域气候模式在中国西北地区气温和降水长时间序列模拟的误差分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 77–78.]
- [19] Li Lanhai, Bai Lei, Yao Yanan, et al. Patterns of climate change in Xinjiang projected by IPCC SRES[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(1): 27–35.
- [20] Kalra A, Li Lanhai, Li Xuemei, et al. Improving streamflow forecast lead time using oceanic-atmospheric oscillations for Kaidu River Basin, Xinjiang, China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 18(8): 1031–1040.
- [21] Wei Wenshou, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan mountainous area[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(5): 803–808. [魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区235 a气候变化及降水趋势预测[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 803–808.]
- [22] Zhao Chuancheng, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains and its estimation[J]. *Advance in Water Science*, 2011, 22(3): 315–322. [赵传成, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 315–322.]
- [23] Yuan Qingxue, Wei Wenshou. Annual climate change in Tianshan mountainous since recent 40 years[J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(1): 115–118. [袁晴雪, 魏文寿. 中国天山山区近40 a来的年气候变化[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1): 115–118.]
- [24] Lan Yongchao, Wu Sufen, Zhong Yingjun, et al. Characteristics and trends of changes on water cycle factors in the Tianshan mountainous area since 1960s[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(2): 177–183. [蓝永超, 吴素芬, 钟英君, 等. 近50年来新疆天山山区水循环要素的变化特征与趋势[J]. *山地学报*, 2007, 25(2): 177–183.]
- [25] Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Wang Shenglan, et al. Study on the change of annual potential evapotranspiration in the Tianshan mountainous in recent 36 years and its comparison with that in South Xinjiang and North Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(3): 424–432. [普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近36年天山山区潜在蒸散量变化特征及其与南、北疆的比较[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(3): 424–432.]
- [26] Gao Qianzhao, Wang Run, Giese E. Impact of climate change on surface runoff of Tarim River originating from the south slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 1–11. [高前兆, 王润, Giese E. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 1–11.]
- [27] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1037–1046. [毛炜峰, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1037–1046.]
- [28] Liu Youcun, Wu Jing, Liu Yan, et al. Analyzing effects of climate change on streamflow in a glacier mountain catchment using an ARMA model[J]. *Quaternary International*, 2015, 358: 137–145.
- [29] Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1–14; 180–198. [胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1–14; 180–198.]
- [30] Liu Youcun, Hou Langong, Jiao Keqin, et al. On the teleconnection patterns to air temperature in the Tianshan Mountain, China[J]. *Mountain Research*, 2016, 34(6): 679–688. [刘友存, 侯兰功, 焦克勤, 等. 全球气候指数与天山地区气温变化遥相关分析[J]. *山地学报*, 2016, 34(6): 679–688.]

- [31] Han Xueyun, Yang Qing, Yao Junqiang. Spatiotemporal distribution characteristics of precipitation in Tianshan Mountain of Xinjiang during the last 51 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 139 - 144. [韩雪云, 杨青, 姚俊强. 新疆天山山区近 51 年来降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 139 - 144.]
- [32] Xu Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography

[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. [徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.]

- [33] Liu Xinping, Wei Qi'en. Probability and mathematical statistics [M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2002: 20 - 54. [刘新平, 魏启恩. 概率论与数理统计[M]. 西安: 西安出版社, 2002: 20 - 54.]

The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China

LIU Youcun¹, JIAO Keqin², ZHAO Kui¹, LIU Yan¹, HAN Tianding², ZHONG Yu³,
SHEN Yongping², HAO Yonghong³, YE Baisheng²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The precipitation in the Tianshan Mountains and its response to global climate change is a hotspot in recent years. In this paper, precipitation dataset of 40 meteorological stations from 1951 through 2014 in the Tianshan Mountains and general climate indexes were used to analyze the precipitation changing trend in the Tianshan Mountains over the past 60 years, and to investigate the impact of general climate indexes on precipitation, through linear tendency estimation and correlation analysis. Result of the study shows that, firstly, precipitation is more in the north/west and alpine regions but less in the south/east and plain regions. There was an increasing tendency of precipitation, about $6 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$. Secondly, SASMI is the main factor that controls annual precipitation, and there is a significant positive correlation between them. However, PDO, PNA and AO have a positive correlation with annual precipitation insignificantly in range and intensity. Thirdly, during dry seasons, precipitation is affected by various general climate indexes which have distinct spatial differential. SASMI has a little positive correlation with precipitation in the northern slopes of the Tianshan Mountains and parts of the alpine regions, but it has a minor negative correlation with precipitation in the southern slopes of the western Tianshan Mountains. What's more, there is more similarity between ENSO and the precipitation variation in the southern and northern slopes and low-medium mountainous belts of the middle-western Tianshan Mountains. Finally, during wet seasons, there is more similarity between SASMI and precipitation variation in the southern and northern slopes of the Tianshan Mountains, as well as in the alpine regions; also there is more similarity between PDO and precipitation variation in low mountainous belts in the southern and northern slopes of the middle-western Tianshan Mountains.

Key words: climate change; climate index; precipitation; Tianshan Mountains

(本文编辑: 武俊杰)