

新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应

陈亚宁¹, 徐长春², 杨余辉¹, 郝兴明¹, 沈永平³

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 基于全疆8条代表性河流近50年的地表径流、气温和降水数据, 采用Mann-Kendall趋势检验和突变检测法, 对各条河流地表径流、年均气温和年降水进行了长期趋势检验和突变分析, 同时对径流与气温、降水之间的变化关系以及水文极端事件洪水的发生频次和洪峰流量进行了分析。结果表明, 20世纪80年代中期以来全疆各地气候一致表现为气温升高和降水增多, 其中北疆地区变化最为显著, 南疆其次, 东疆最小。受气温、降水变化影响, 河流径流发生年际和年内分布变化。大部分河流自20世纪90年代初水量显著增多, 有春汛提前、夏汛推后和洪峰流量增大的现象, 其变化特征与河流补给类型密切相关。全疆洪水发生频次增多、洪峰流量增大。气候变暖已对区域水文循环产生重要影响。

关键词: 水文水资源; 气候变化; 新疆

1 引言

水资源是基础性的自然资源, 也是生物赖以生存的环境资源。它不仅影响、制约现代社会的可持续发展, 而且已经成为21世纪全球资源环境的首要问题^[1]。过去100年, 全球经历了气候变暖, 同时也遭遇了由此而引发的诸多环境、灾害问题, 如冰川退缩、冻土融化、海平面上升、干旱、暴雨、洪水、高温热浪和低温冷害等。研究人员认为, 气温升高导致的全球水文循环过程加速与众多环境问题之间有着重要的联系^[2]。水文水资源循环及其气候变化响应问题正逐渐受到人们的关注而成为研究热点^[3-8]。

新疆位于西北内陆干旱区, 水汽主要来自西、西北和北方, 特殊的地理环境决定了降水及地表水资源时空分布的不均匀性。从空间分布上看, 新疆水资源北部多于南部, 西部多于东部。北疆水资源主要分布于伊犁、阿勒泰和塔城地区, 分别为170.9亿 m³、129亿 m³和61.6亿 m³, 地表水资源总量435.7亿 m³; 南疆水资源空间分布相对均匀, 阿克苏、和田、喀什地区和巴州、克州水资源量分别为98.6亿 m³、86.2亿 m³、84.4亿 m³、83.2亿 m³和78.3亿 m³, 地表水资源总量为446.7亿 m³^[9]。从时间上看, 径流年内分布极不均匀, 水量主要集中于夏季, 占全年水量的50%~70%; 其次是春、秋季, 各占10%~20%; 冬季最少, 仅占10%以下。水资源时空分布的不均匀性和干燥的气候环境决定了绿洲灌溉农业活动对水的完全依赖性, 土地面积扩大要与水资源的可利用性相联系。然而, 随着绿洲人口的激增, 土地面积的持续扩大, 新疆灌溉面积已由121万 hm²增加到目前的420万 hm², 灌区引水量大幅度增加, 不但挤占了生态用水, 使得天然植被严重缺水而退化、死亡, 而且引发了许多环境问题, 如土地沙化、土壤次生盐渍化、河道断流、湖泊萎缩等,

收稿日期: 2009-06-17; 修订日期: 2009-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(90502004; 40671014); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-127) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.90502004; No.40671014; Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-127]

作者简介: 陈亚宁(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110004398M), 主要从事干旱区水资源与地表过程研究。E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

严重威胁着区域的社会、经济和生态安全，天山北坡经济带、吐哈盆地和南疆塔里木盆地，尤为突出。伴随全球气候不断变暖，水文循环过程将进一步加剧，进而改变水资源供给，并影响区域社会经济的可持续发展和生态安全的维护。研究气候变化及其水文水资源影响意义重大。本文基于全疆 8 个代表性河流的地表径流资料和相应的气温、降水数据，对径流的年际、年内变化，气温、降水的年际变化以及径流对气候变化的响应进行了分析。旨在通过上述分析，了解全疆水文水资源的长期变化规律及其对气候变化响应的区域差异，为未来水资源合理调配和使用提供科学依据。

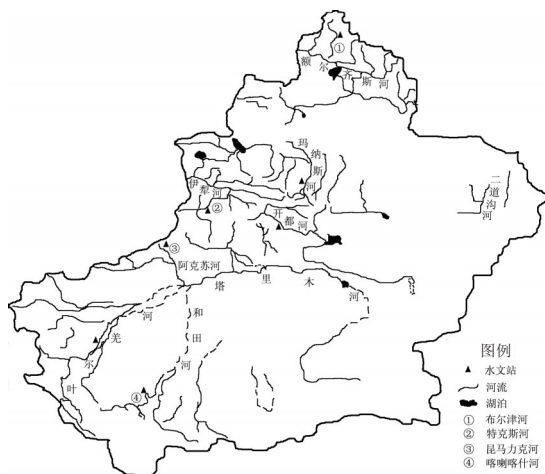


图 1 新疆河流水系分布图

Fig. 1 Sketch map of river systems in Xinjiang

2 资料与方法

2.1 数据资料

本文分析资料为全疆 8 个代表性河流 (图 1) 近 50 年的地表径流及其相应的气温和降水数据，分南、北、东疆三大区对比分析。其中，北疆指天山以北的地区，包括阿勒泰、塔城、伊犁 3 地区以及博尔塔拉蒙古自治州、乌鲁木齐市和昌吉回族自治州。选择的代表性河流及其测站分别为布尔津河群库勒站、特克斯河卡甫其海站和玛纳斯河肯斯瓦特站，分别代表北疆北部、北疆西部和天山北坡区域。南疆指天山以南环塔里木盆地的广大地区，包括阿克苏、喀什、和田 3 地区以及克孜勒苏柯尔克孜自治州和巴音郭楞蒙古自治州。选择的代表性河流及其测站分别为开都河大山口站、昆马力克河协合拉站、叶尔羌河卡群站和喀喇喀什河乌鲁瓦提站。东疆指吐鲁番、哈密地区。该区因水资源匮乏，主要是一些小型河流，且河流水文统计资料缺乏，本文仅选择了资料相对较全的哈密二道沟河为研究对象。

2.2 研究方法

本文使用的数据分析方法主要为 Mann-Kendall 非参数检验，包括突变检验和长期趋势检验，用于气温、降水和径流序列的突变检测和长期趋势分析。

(1) Mann-Kendall 突变检验^[10] 对于具有 n 个样本量的时间序列，构造一秩序列：

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \tag{1}$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \tag{2}$$

可见，秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下，定义统计量：

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \tag{3}$$

其中： $UF_1 = 0$ ， $E(s_k)$ 和 $Var(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差，在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立，且有相同连续分布时，它们可由下式算出：

$$E(s_k)=\frac{n(n+1)}{4}$$

(4)

$$\text{var}(s_k)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

(5)

式中： UF_i 为标准正态分布，它是按时间序列 x 顺序 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 计算出的统计量序列，给定显著性水平 α ，查正态分布表，若 $UF_i > U_\alpha$ ，则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$ ，再重复上述过程，同时使 $UF_k = -UB_k$ ($k = n, n-1, \cdots, 1$)， $UB_1 = 0$ 。

(2) Mann-Kendall 单调趋势检验^[11]

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i)$$

(6)

式中： x_k 和 x_i 为连续的数据值， n 为数据集合的长度。而且，

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases}$$

(7)

对于样本数大于10的集合，检验统计量 S 接近于正态分布，例如下面的统计值就是一个标准的正态变量：

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$

(8)

式中：统计量 S 的理论均值和方差如下：

$$E(S) = 0$$

(9)

$$\text{var}[S] = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_i t(t-1)(2t+5) \right] / 18$$

(10)

式中： t 为“结”的宽度， Σ 表示所有“结”的总和。

3 新疆水文水资源时空变化及特征

3.1 径流年际变化

气候变化对水资源带来的最直接影响就是改变径流的大小及其空间分布。从全疆代表性河流近50年地表径流的变化过程看(图2)，南、北、东疆水资源变化具有一定相似性，但仍存在差异。

北疆北部的布尔津河(群库勒站)、西部的特克斯河(卡甫其海站)和天山北坡的玛纳斯河(肯斯瓦特站)近50年的径流变化大致经历三个阶段，即：20世纪50年代至70年代中期的丰水阶段，70年代后期至80年代末的下降阶段和20世纪90年代中期至21世纪初的上升阶段，且总体表现为上升趋势。Mann-Kendall趋势检验显示北疆河流近50年径流呈显著性增长(表1)。径流的年代际变化分析(表2)表明，20世纪70年代和80年代是布尔津河、特克斯河和玛纳斯河的相对枯水期；20世纪90年代和21世纪初水文状况有所好

表1 全疆地表径流时间序列的
M-K趋势检验

Tab. 1 M-K trend detection of
surface runoff series in Xinjiang

	Mann-Kendall		β	趋势
	Zc	Ho		
北疆	2.62	R	0.119	↑
南疆	4.67	R	0.225	↑
东疆	1.72	A	0.003	/

Zc, 检验统计量; Ho, 零假设; R, 拒绝零假设; A, 接受零假设; β , Kendall斜率; “↑”表示递增趋势; “/”表示无明显变化趋势; 置信度95%。

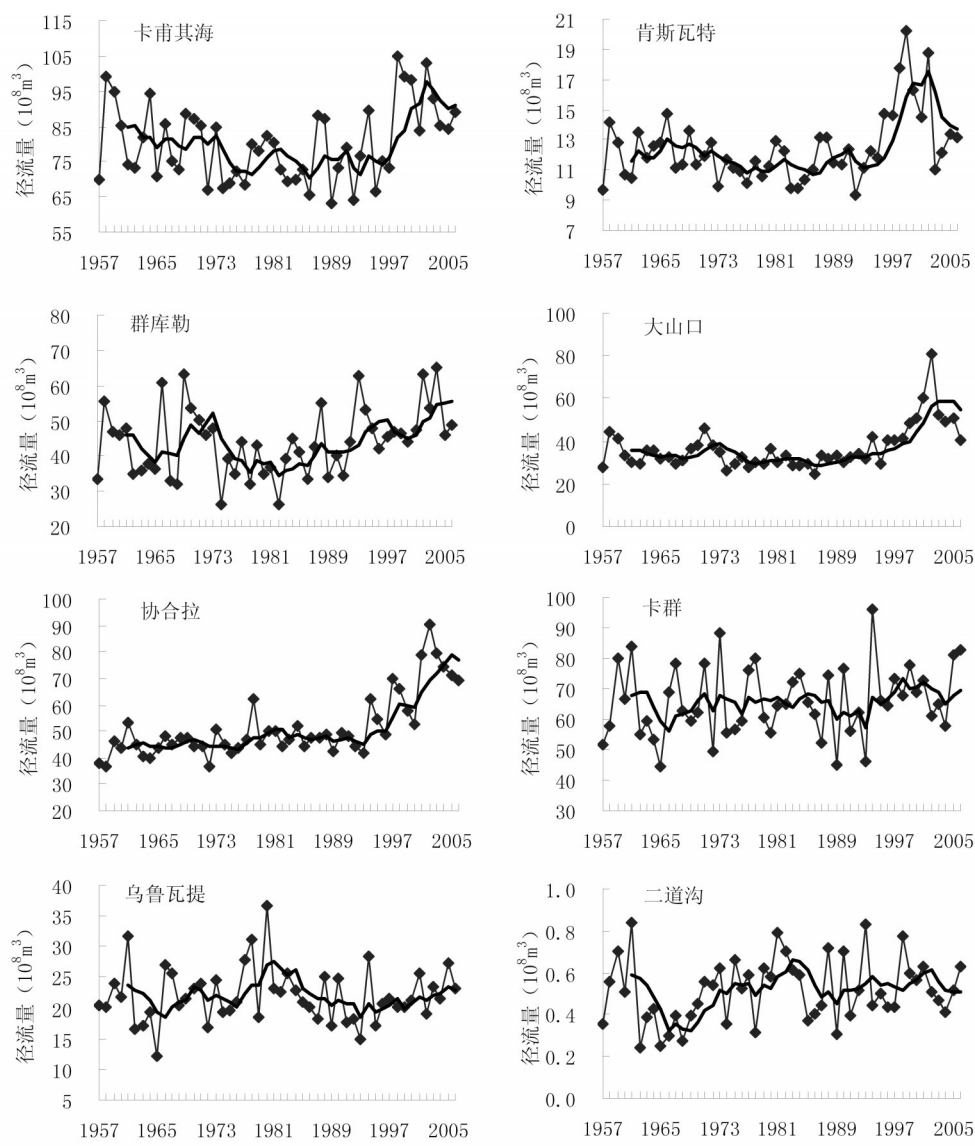


图2 新疆典型河流1957-2006年径流变化过程及趋势 (黑色实线为5年滑动平均曲线)

Fig. 2 Processes and trend of surface runoff of typical rivers in Xinjiang during 1957-2006

(black solid line is the 5-year moving average curve)

转，并超过了20世纪60年代水平。布尔津河20世纪90年代和21世纪初径流量比20世纪60年代分别增加了 $3.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $10.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；特克斯河相应分别增加了 $2.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；玛纳斯河相应分别增加了 $1.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

南疆河流径流变化存在明显的区域差异。分布在南疆北部、天山南坡东段和西段的开都河和昆马力克河，河流径流均表现为明显的两个变化阶段。第一阶段为20世纪50年代末至90年代初，河流水量变化较小，波动平缓，二者的变差系数Cv分别为0.105和0.143，水量多年平均值分别为 $32.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $45.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；第二阶段为20世纪90年代初至今，河流水量持续增加，且保持较高的增长趋势，二者的变差系数Cv分别为0.259和0.178，水量多年平均值分别为 $48.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $67.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，比第一阶段分别增加了47.4%和

47.2%。可见，南疆北部地区的河流受气候变化影响程度大致相当。分布在南疆西部和南部的叶尔羌河和喀喇喀什河，近50年径流变化总体趋于平缓，但期间波动较为频繁，二者变差系数Cv分别为0.177和0.204。20世纪90年代以来水量虽有所增长，但不显著。径流的年代际变化分析(表2)表明，南疆四条代表性河流2000年代的水量比1960、1970、1980和1990年代平均分别增加37.4%、33.3%、35.8%和24.9%。可见，20世纪90年代以来南疆地区水量增多是显著的，Mann-Kendall检验(表1)显示这种增长比北疆和东疆都更为明显。

东疆地区哈密二道沟河近50年来径流具有一定增长趋势，但不显著(表1)。河流径流增加较为明显的时期主要是20世纪60年代中期到70年代末，80年代有所减少，90年代以来则变化不明显。年代际变化分析(表2)表明，与1960、1970、1980和1990年代相比，2000年代的径流分别增加32.5%、1.92%、-3.64%和-5.36%。

3.2 径流年内分布

内陆干旱区河流的径流年内分配十分不均匀，这与河流的补给来源形式密切相关。北疆阿勒泰山克兰河是一条以季节性积雪融水补给为主的融雪水和雨水混合补给型河流，夏季降水补给，冬季地下水补给。其特点是全年水量集中在5-6月，以春汛的形式出现，年最大流量多发生在5月下旬和6月下旬。冬季为枯水期，径流量稳定。在分类上，克兰河属于阿尔泰型河流。由于该区冬季严寒漫长，所以冬季降水(11-3月)以季节积雪形式存在流域内，进入春季以后，主要在5-6月融水进入河槽，使该地区的河流具有明显的春汛特点。河流冬季结冰，冰期较长，整个冬季河流由流域内冻土层以下的地下水补给，十分稳定^[12]。从年代际看，随着气候变暖，河流径流的年内分配在时间上发生变动。20世纪90年代以前，6月份月径流量达到全年最大；进入90年代以来，随着气温上升，5月径流达到最大，且流量最大值也呈增长趋势。即，气候变暖已影响到了该区的季节性积雪分布，积雪提前消融，春汛提前且水量增多。

表2 全疆代表性河流径流年代际变化 (10⁸ m³)
Tal. 2 Decadal runoff variation of representative rivers in Xinjiang (10⁸ m³)

	1960's	1970's	1980's	1990's	2000's (2001-2006)
布尔津河	43.52	39.92	39.39	46.67	53.98
特克斯河	80.32	75.43	74.33	82.62	89.77
玛纳斯河	12.33	11.21	11.53	14.05	15.42
开都河	32.59	33.25	30.92	37.02	54.88
昆马力克河	45.55	45.91	47.47	54.32	73.77
叶尔羌河	63.26	66.64	63.17	68.64	69.99
喀喇喀什河	21.31	22.60	23.28	20.33	23.13
二道沟河	0.40	0.52	0.55	0.56	0.53

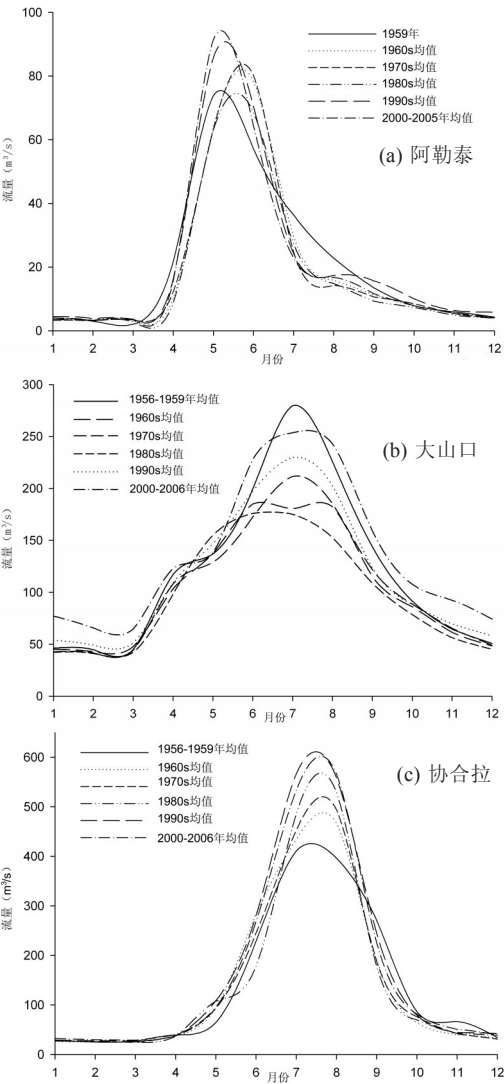


图3 新疆典型水文台站1956-2006年径流年代际年内变化

Fig. 3 Decadal average monthly streamflow changes at the typical hydrological stations

位于天山南坡东段和西段的开都河和昆马力克河，分别以雨雪混合补给和冰川补给为主。其径流年内分配变化亦有较大差别。开都河水量自春季3月开始增加，4月有一较小的汛期，7-8月又至夏汛，水量达最大，为冬季平均流量的4-5倍，10-11月水量开始消落。3-11月水量占全年水量的80%左右，其中夏季7-8月水量占30.2%。径流年内分配的年代际变化显示，20世纪90年代以来开都河河流水量存在春汛提前、水量增多、夏季水量最大值推迟（约半个月）的现象，特别是2000年以来尤为明显。与此相对比，昆马力克河河流水量自5月开始迅速增加，至7~8月达最大，9月又开始迅速消退。水量集中于5-9月，总水量占全年水量的85%，其中7-8月占57%，为冬季平均流量的10~13倍。径流年内分配的年代际变化显示，河流最大水量出现的时间基本未变，但在7-8月间，水量大小则有明显变化，呈不断增长趋势。20世纪90年代以来最大水量比1960、1970、1980年代分别增多28.7%、24.4%和16.7%。开都河和昆马力克河河流水量最大值均出现在夏季气温最高时7-8月，虽河流补给类型不同，但同属西北型河流，对气候变暖的响应异中有同。

4 新疆气候变化特征分析

北疆地区近50年气温和降水时间序列的长期变化趋势M-K检验结果显示，年均气温和年降水序列均表现为明显的增长趋势（表3）。其中，气温序列发生明显突变的年份是1984年，而降水发生突变的年份则在1987年左右（图4）。20世纪80年代中期以来，北疆地区气温急剧升温，2000-2007年年均气温为6.86℃，比1990、1980、1970和1960年代分别增长0.46℃、0.91℃、1.26℃、1.54℃；降水也显著增多，环准噶尔盆地周边地区，特

表3 全疆气温和降水时间序列的M-K趋势检验
Tab. 3 M-K trend detection of temperature and precipitation time series in Xinjiang

		Mann-Kendall		β	趋势
		Zc	Ho		
北疆	气温	5.57	R	0.042	↑
	降水	3.68	R	1.556	↑
南疆	气温	3.04	R	0.022	↑
	降水	2.48	R	0.700	↑
东疆	气温	4.88	R	0.033	↑
	降水	3.14	R	0.613	↑

Zc, 检验统计量; Ho, 零假设; R, 拒绝零假设; β , Kendall 斜率; “↑”表示递增趋势; 置信度 95%

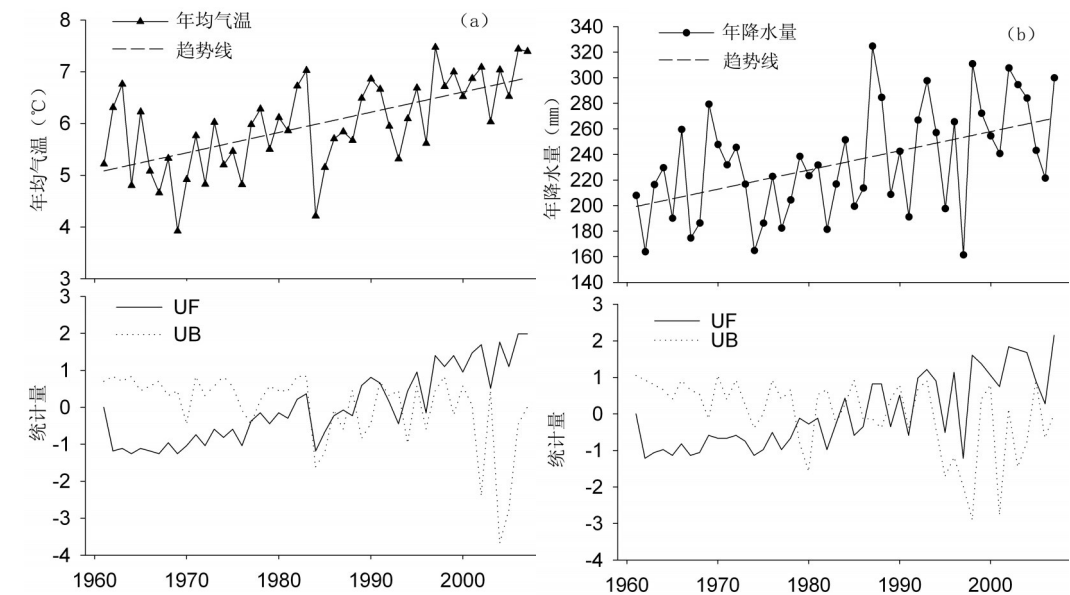


图4 北疆地区1961-2007气温和降水时间序列变化及突变检测
Fig. 4 Trend and jump point detection of temperature and precipitation in northern Xinjiang during 1961-2007

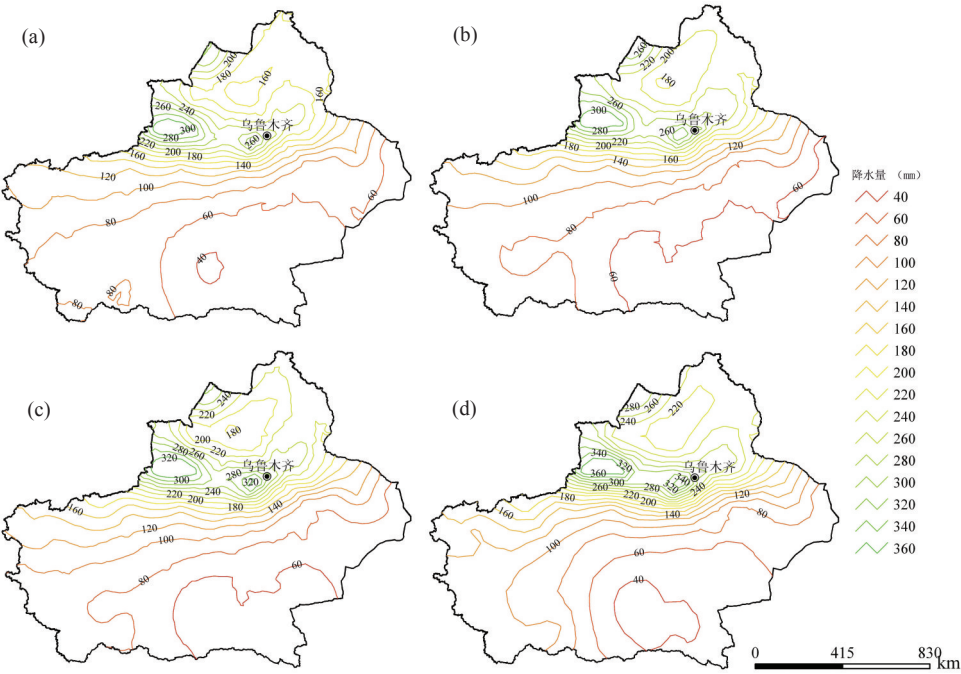


图5 全疆降水年代际变化分布图 (a) 1970s; (b) 1980s; (c) 1990s; (d) 2000s
Fig. 5 Distribution of decadal precipitation change in Xinjiang (a) 1970s; (b) 1980s; (c) 1990s; (d) 2000s

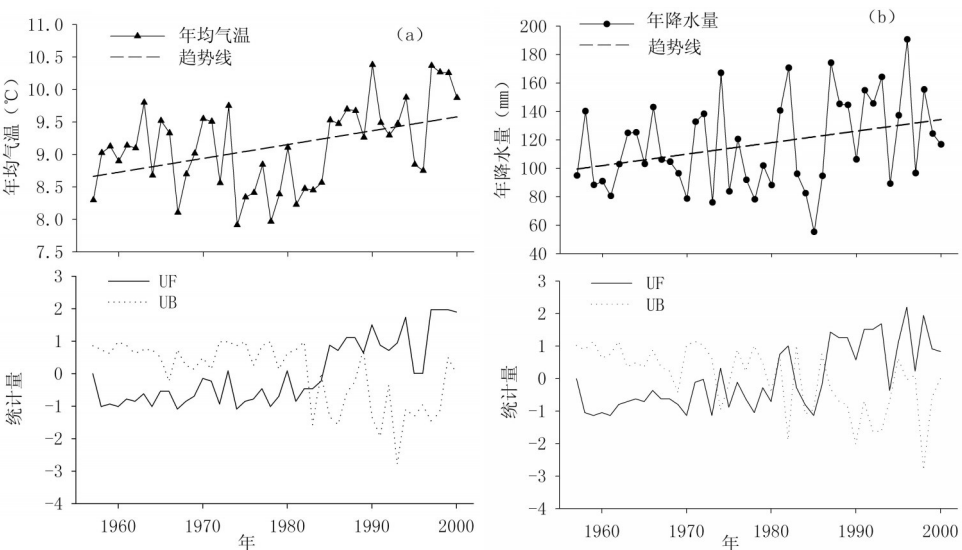


图6 南疆地区近50年气温和降水时间序列变化及突变检测

Fig. 6 Trend and jump point detection of temperature and precipitation in southern Xinjiang over the last 50 years
别是天山北坡西段伊犁河谷区，降水增多十分明显，其次是阿勒泰地区、塔城地区和玛纳斯河流域 (图5)。

南疆地区近50年气温和降水时间序列的长期变化趋势M-K检验结果显示，气温序列增长趋势明显 (表3)。特别是1984年以来气温增长显著 (图6a)，年均增长率达0.074℃/a，至1990年年均气温已超过10℃，成为近半个世纪以来最温暖的10年。突变检测结果显示该气温时间序列发生明显突变的年份是1984年，进一步证实了南疆气温显著升高是自20

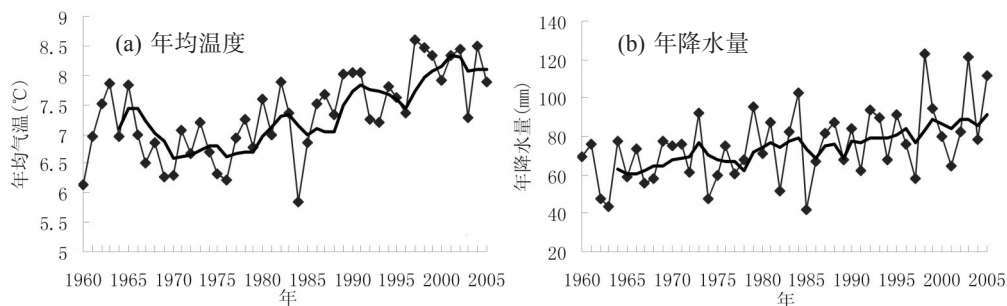


图7 东疆地区近50年来年均温度、降水量变化趋势;

Fig. 7 Variation of annual average temperature and precipitation in eastern Xinjiang during the last 50 years.
世纪80年代中期开始的。南疆气温升高是全球温暖化的局地表现，反映了区域气候系统对全球气候变化的积极响应。与此同时，南疆降水(图6b)也表现出了明显的增长趋势(表3)，降水增多主要在阿克苏地区和开都河流域(图5)。突变检测结果表明，整个序列在1986年前后发生了明显的突变。1986年以后降水增多十分显著，1986-2000年年降水量为136 mm，比1957-1985年增长27.1%。近年来南疆降水的增多在一定程度上缓和了因气温升高而导致的蒸发增强，对于干旱加剧起到了抑制作用，整个环境表现出暖湿化的倾向。

对东疆近50年来气温、降水时间序列的分析(图7)表明：东疆地区增温明显，气温线性增长率达到了 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；从气温变化趋势变化来看，以1985年为分界点，1985年之前增温不甚明显，1985年之后增温趋势显著。在增温的同时，研究区降水量也呈现出持续增长的趋势，降水线性增长率为 $9.02\text{mm}/10\text{a}$ ；年降水量变化趋势同样可以发现以1980年代中后期为界，在此之后降水量增加趋势相对较明显。Mann-Kendall 检验结果(表3)表明：年平均气温和年降水量时间序列均具有显著的增加趋势。

5 水文水资源对气候变化的响应

5.1 径流变化与气候因子的关系

径流变化与气候因子的关系密切相关。从影响径流变化的气温与降水的关系分析，运用 Correlate-Bivariate 方法对北疆地区三个代表性测站径流和温度、降水进行相关分析。结果发现，布尔津河径流与降水量显著相关，相关系数为0.486(通过了0.01的显著性水平检验)；特克斯河径流与降水量显著相关，相关系数为0.681(通过了0.01的显著性水平检验)；玛纳斯河径流与温度显著相关，相关系数为0.406(通过了0.01的显著性水平检验)。20世纪90年代以来布尔津河径流形成区(山区)近50年代温度变化较为稳定，因而季节性积雪形成的径流量变化稳定，但夏季降水量的增加导致径流的增加。特克斯河因地处有“塞外江南”的伊犁地区，降雨量丰沛，因其主要的补给来源是降雨，所以温度的显著增温对径流影响不大，因此20世纪90年代以来降雨量的增加导致了其径流的增加。地处天山北坡的玛纳斯河，该地区年降雨量较少，最主要的径流补给来源是冰川融水，20世纪90年代以

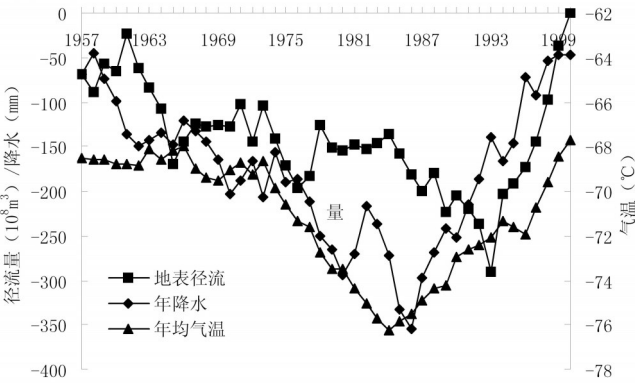


图8 南疆地区1957-2000年径流量、气温和降水的累积距平图

Fig. 8 Accumulated anomalies of annual runoff volume, air temperature and precipitation of southern Xinjiang during 1957-2000

表 4 代表性测站超标准年最大洪水年均频次及变率*

Tab. 4 Mean frequency and variability of annual exceeding standard maximum floods in the representative observation stations

	群库勒	卡甫其海	肯斯瓦特	大山口	协合拉	卡群	乌鲁瓦提
1956-1986	0.47	0.33	0.26	0.23	0.29	0.27	0.47
1987-2001	0.53	0.53	0.53	0.40	0.80	0.20	0.53
%	14	60	107	77	176	-27	14

* 据文献[13]整理

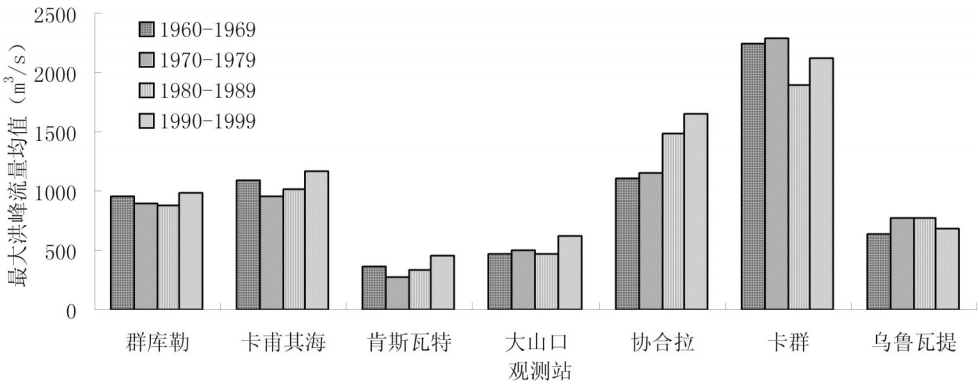


图 9 新疆代表性河流各年代最大洪峰流量均值

Fig. 9 Decadal mean value of the maximal flood peak flow of typical rivers in Xinjiang

来的显著增温导致了径流的增加。

从南疆地区 1957-2000 年地表径流、气温和降水的累积距平可以看到 (图 8), 尽管年径流量累积距平均为负值, 但曲线的变化形态却十分直观、清晰地反映了近 44 年来这一地区的径流量经历了一次十分显著的波动。年径流量在 1993 年之前呈波浪式下降趋势, 1993 年以后上升较快, 上升趋势至今未减。相对应地, 南疆地区 1957-2000 的气温和降水序列的累积距平也呈现了先减少后增加的变化趋势, 但发生转折的时间有所不同, 分别是 1984 年和 1986 年。径流量的增加作为气温升高、降水增多的滞后效应, 在 20 世纪 90 年代以后是非常明显的。做同期年径流量和年均气温、年降水的 Pearson 相关分析, 结果显示年径流量与年降水之间不存在显著的相关性 ($r = -0.179$, $p = 0.245$), 但年径流量与年均气温间存在显著的相关性 ($r = 0.324$, $p = 0.032$)。可见, 南疆地区以冰雪融水为主要补给源的河流, 其径流更易受气温变化的影响。全球变暖使得该地区冰雪加速融化, 地表水资源得到暂时性的增多。

东疆地区哈密二道沟河年径流量与年均气温、年降水时间序列的相关分析表明, 径流主要受降水量影响, 二者相关系数为 0.466, 这与该地区河流以降水为主要补给方式有关。

5.2 洪水对气候变暖的响应

洪水是水文循环的一种极端表现, 是气候变化对水文影响的表征之一。统计全疆代表性河流最大洪峰流量 1956-2001 年超标准 (年最大洪峰流量的平均值)洪水出现的频次 (表 4)及各年代最大洪峰流量值 (图 9)。从洪水的年均发生频次上看, 1987 年以前布尔津河和喀喇喀什河的洪水发生频次较大, 但 1987 年以后除这两条河外, 特克斯河、玛纳斯河和昆马力克河的洪水也频繁发生。总体而言, 源于天山的各条河流洪水发生频次变化较为明显, 如昆马力克河的协合拉站、玛纳斯河的肯斯瓦特站以及开都河的大山口站, 洪水年均频次分别增长 176%、107%和 77%。从各站的最大洪峰流量及其年代际变化看, 20 世纪 80 年代以来, 除喀喇喀什河的乌鲁瓦提站洪峰降低以外, 其余各站的最大洪峰流量都在增大, 尤其是玛纳斯河和开都河, 增率分别达 39.6%和 31.5%。叶尔羌河卡群站的洪峰流量最大, 平均值可达 1800~2300 m³/s, 1980 年代以来洪水频次虽稍有减少, 但最大洪峰流量

值却在增大,即洪水强度在增强。叶尔羌河是一条以冰川融水(占径流总量的63.10%)为主要补给方式的河流,气温升高带来的最直接影响就是冰川加速消融、冰河湖溃决、河流水量急剧增多,其带来的危害也是十分惊人的^[13]。昆马力克河的协合拉站自20世纪60年代以来洪峰一直呈上升趋势,特别是80年代以来,增大更为明显,亦是气候变暖对冰川影响的有力证据。喀喇喀什河的乌鲁瓦提站洪峰最大值虽有所降低,但洪水发生频次在增多,说明河流仍然受到了气候变暖的影响。

6 结论

(1) 受地理位置和气候差别的影响,全疆水资源变化存在时空差异。北疆地区,河流径流变化趋势大体相似,均是以20世纪60年代至80年代的减少和90年代至21世纪初的增多变化为特征,且径流增多十分明显(通过0.05的显著性检验)。南疆地区,河流径流变化存在较大差异。分布在北部地区的河流,如开都河和昆马力克河,20世纪50年代末至90年代初,河流水量变化平缓,1993年以来,水量急剧增多,径流变化显著;分布在南部的河流,水量变化不显著,甚至有略微减少的趋势,如喀喇喀什河。叶尔羌河水量波动较大,但总体趋势平缓。东疆地区,河流属小型河流,受气候变化影响较小,地表径流无显著变化趋势。

(2) 受气候变化影响,河流径流年内分布发生变化。北疆地区,以季节性积雪融水和降雨混合补给的河流,春汛由6月提前至5月,洪峰峰值亦有所增大。南疆地区,以季节性积雪融水和降雨混合补给的河流,有一较小的春汛,且其发生时间有所提前、水量有所增多,并且夏季汛期峰值推后,约半月左右;以冰川融水为主要补给形式的河流,夏季汛期峰值时间基本未变,但洪峰流量增大。

(3) 气温升高,降水增多。20世纪80年代中期以来,全疆各地的气温和降水均有不同程度的增大。其中,气温变异程度为:北疆 > 东疆 > 南疆;降水变异程度为:北疆 > 南疆 > 东疆。

(4) 地表径流变化受气温、降水变化影响。以雨雪为主要补给形式的河流,如布尔津河、特克斯河和开都河,径流与降水之间存在较大相关性,即径流更易受降水变化影响;而以冰川融水为主要补给形式的河流,如昆马力克河、叶尔羌河和喀喇喀什河,径流与气温显著相关,即径流更易受气温变化影响。总体而言,在北疆和东疆,降水是影响水资源变化的主导因子;在南疆,气温是影响水资源变化的主导因子。

(5) 洪水发生频次增多,洪峰流量增大。1987年以后,南北疆各典型河流,特别是发源于天山山脉的河流,洪水发生频次明显增多;除喀喇喀什河外,其余各河的最大洪峰流量都有所增大。气候变暖已经对区域水文循环产生影响。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Yan, Xu Jianhua, Lv Guanghui. Dynamic analysis of water footprint and resources utility efficiency of Xinjiang in Northwest China arid area. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 775-780. [张燕, 徐建华, 吕光辉. 西北干旱区新疆水资源足迹及利用效率动态评估. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 775-780.]
- [2] Menzel L, Burger G. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 2002, 267: 53-64.
- [3] Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, 438: 303-309.
- [4] Nigel W Arnell. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: A continental perspective. *Global Environmental Change*, 1999, 9: 5-23.
- [5] Douglas A Burns, Julian Klaus, Michael R McHale. Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New York, USA. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 155-170.
- [6] Hagg W, Braun L N, Kuhn M et al. Modeling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian

- catchments. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 40-53.
- [7] Zeng Tao, Hao Zhenchun, Wang Jiahu. Modeling the response of runoff to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 324-332. [曾涛, 郝振纯, 王加虎. 气候变化对径流影响的模拟. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 324-332.]
- [8] Chen Yaning, Xu Zongxue. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin. *Science in China: Series D*, 2005, 48(1): 65-73.
- [9] Yuan Yujiang, Sang Xiucheng, Gong Yuan et al. Primary discussion on regional difference of influence of climate on surface water resources in Xinjiang. *Quarterly of Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(2): 210-217. [袁玉江, 桑修成, 龚原等. 新疆气候对地表水资源影响的区域差异性初探. *应用气象学报*, 2001, 12(2): 210-217.]
- [10] Wei Fengying. *Diagnose and Forecast Technology of Modern Climate Statistics*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 1-296. [魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 北京: 气象出版社, 2007: 1-296.]
- [11] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrological trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 255: 107-122.
- [12] Harlan Hazaizi. River hydrological features in Altay region, Xinjiang. *Hydrology*, 2001, 21(4): 53-55. [努尔兰·哈再孜. 阿勒泰地区河流水文特征. *水文*, 2001, 21(4): 53-55.]
- [13] Wu Sufen, Zhang Guowei. Preliminary approach on the floods and their calamity changing tendency in Xinjiang region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 199-203 [吴素芬, 张国威. 新疆河流洪水与洪灾的变化趋势. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 199-203.]

Hydrology and Water Resources Variation and Its Responses to Regional Climate Change in Xinjiang

CHEN Yaning¹, XU Changchun², YANG Yuhui¹, HAO Xingming¹, SHEN Yongping³

(1. *Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;*

2. *School of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;*

3. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Based on the surface runoff, temperature and precipitation data over the last 50 years from eight representative rivers in Xinjiang, this paper, using the method of Mann-Kendall trend and jump detection, investigated the long-term trend and jump point of time series of surface runoff, mean annual temperature and annual precipitation. Besides, this paper analyzed the relationship between runoff and temperature and precipitation, and the frequency and peak flow of floods. Results showed that all parts of Xinjiang had experienced an increase in temperature and precipitation since the mid-1980s. Northern Xinjiang is the area that saw greatest change, followed by southern Xinjiang and eastern Xinjiang. Affected by temperature and precipitation variations, river runoff had both inter-annual and inner-annual changes. The surface runoff of most rivers had increased significantly since the early 1990s. And some of them had the phenomena of spring floods appearing ahead of time, summer floods lagging behind and flood peaks increasing. The variation characteristics were closely related with the replenishment types of rivers. The flood frequency and peak flow increased all over the Xinjiang region. Climate warming has had an effect on the regional hydrological cycle.

Key words: hydrology and water resources; climate change; Xinjiang