

全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的 可能性影响*

陈亚宁**

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

徐宗学

(北京师范大学水科学研究所, 北京 100875)

摘要 结合 77 个气象站近 50 年的水文气象资料, 探讨了全球气候变化与塔里木河流域水资源变化间的相互关系. 通过参数和非参数检验, 发现了包括温度、降水和流量在内的水文时间序列的长期趋势. 检验了厄尔尼诺-南方涛动与 3 种时间序列间的可能联系. 研究表明, 在过去 50 年里, 温度在 5% 的置信水平下呈单调上升趋势, 降水也表现出了增加的趋势. 相应的时间序列在 1986 年附近有一个明显的跳跃, 这可能是气候变化影响的结果. 塔里木河源流区的径流量虽然呈现出明显的增加趋势, 但干流的径流量呈下降趋势. 研究表明, 厄尔尼诺-南方涛动与研究区内近 50 年的温度、降水、径流间不存在明显的联系. 塔里木河干流的水量缩减、河流干涸和生态系统恶化主要是人类活动造成的.

关键词 气候变化 水文过程 非参数检验 降水 温度 塔里木河

水资源在经济发展所需要的各种自然资源中是最重要的, 尤其在干旱、半干旱地区^[1]. 人类活动将影响自然生态系统和可获得的水资源量, 最明显的例子是引起全球气温的升高和降水类型的变更. 而气候变化导致的最明显的结果之一是区域内水循环

的变化和径流系数发生相应的变化^[2]. 近些年来, 干旱、洪水等极端事件的发生率在全世界范围内急剧增加. 在干旱、半干旱地区, 径流和水资源的弹性非常大, 降水和温度较小的变化会引起径流较大幅度的改变^[3]. 作为水资源管理者, 很重要的一点是了解

2003-11-25 收稿, 2004-08-24 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 90102007)和中国科学院知识创新项目(批准号: KZCX1-08-03, KZCX-SW-327)联合资助

** E-mail: chenyn@ms.xjib.ac.cn

并准备好去处理气候变化对水循环和径流变化的影响^[4].

塔里木河是中国最长的内陆河, 在过去的 50 年里, 塔里木河的水资源开发主要是用于农业生产和居民生活, 对新疆社会经济的发展起到了重要作用. 然而, 水资源利用过程中经济与生态的矛盾也日益突出. 伴随着流域上游的高强度、大规模水资源开发利用, 流域下游自然生态过程发生了显著变化, 尤其是下游水量减少对塔里木河生态系统造成了很大的不利影响. 塔里木河下游 321km 河道彻底断流, 河流尾间湖泊-罗布泊和台特玛湖分别于 1970 年和 1972 年干涸, 地下水位大幅度下降, 由地下水维系的天然植被极度退化, 风蚀沙化加剧, 土地荒漠化过程加强, 生物多样性严重受损. 新疆塔里木河下游的生态危机得到了当地政府和中央的密切关注, 中国政府拟投资 1.07×10^{10} 元对塔里木河流域进行综合治理.

面对新疆塔里木河流域以水过程为主线的生态与经济的矛盾, 为了满足流域供水的多样性和环境生态需水的需要, 必须以未来水资源管理利用和气候、水文条件的变化等为基础, 对流域水资源的可获得量、水资源潜力和造成水资源短缺原因等进行评价^[5], 以正确处理好生活、生产、生态用水关系, 最大限度地维持径流和保护生态系统的安全与稳定. 而本项研究的重点之一则是分析气候变化对水文、水资源可能造成的影响, 检测温度、降水和径流时间序列的长期变化趋势, 检验水文过程与厄尔尼诺-南方涛动之间的潜在联系. 本文结合近 50 年塔里木河流域气候与水文资料对上述问题进行了探讨, 并提出了未来气候变化给区域社会经济发展和生态系统带来的影响以及应采取的对策与建议, 旨在为我国西部大开发与塔里木河流域的社会经济可持续发展和生态保育提供决策参考的依据.

1 气候变化统计检验方法

1.1 单调趋势的非参数统计检验(Mann-Kendall 法)

在本项研究中, 应用非参数统计检验 (Mann-Kendall 法), 检验水文过程的可能趋势, 其非参数统计检验公式如下:

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

其中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] / 18, \quad (4)$$

式中 x_k 和 x_i 为连续的数据值, n 为数据集合的长度, t 为“结”的宽度, \sum 表示所有“结”的总和.

衡量趋势大小的指标为

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right), \quad \forall j < i \quad (5)$$

式中 $1 < j < i < n$, 正的值表示“上升趋势”, 负的值表示“下降趋势”. Mann-Kendall 检验如下所示:

零假设 $H_0: \beta = 0$,

当 $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$, 拒绝 H_0 假设.

其中 $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态方差, α 为显著性检验水平.

1.2 两变量 Kendall 的 τ 关联检验

Kendall 的 τ 关联检验对非独立的时间序列和随机正态分布变量非常有用, 常常被用来检验水文变量同厄尔尼诺-南方涛动之间的联系. 在 Kendall 的 τ 方法中, 检验统计量如下所示:

$$Z_c = \frac{S'}{\sqrt{\text{var}(S')}} \quad (6)$$

其中,

$$\text{var}(S') = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_x t_x(t_x-1)(2t_x+5) - \sum_y s_y(s_y-1)(2s_y+5) \right] / 18$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\left[\sum_x t_i(t_i-1)(t_i-2) \right] \cdot \left[\sum_y s_i(s_i-1)(s_i-2) \right]}{9n(n-1)(n-2)} \\
 & + \frac{\left[\sum_x t_i(t_i-1) \right] \cdot \left[\sum_y s_i(s_i-1) \right]}{2n(n-1)}, \tag{7}
 \end{aligned}$$

这里 S' 是 Kendall 的和, 并被估计为 $S' = L - M$, 其中 L 是 $y_i > y_j (i > j)$ 的事件数, M 是事件 $y_i < y_j (i < j)$ 的数量. 在显著性水平 α 下, 如果 $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝零假设, 其中 $Z_{1-\alpha/2}$ 是概率超过 $\alpha/2$ 的标准正态分布值.

指标 τ_a 或 τ_b 被用于测度两个时间序列之间联系的强度, 其估计如下:

$$\tau_a = \frac{S'}{n(n-1)/2}, \tag{8}$$

$$\tau_b = \frac{2S'}{\sqrt{\left\{ n(n-1) - \sum_{i=1}^{n_x} t_i(t_i-1) \right\} \left\{ n(n-1) - \sum_{i=1}^{n_y} s_i(s_i-1) \right\}}}, \tag{9}$$

其中 n_x 为 x 序列中“结”的数量, n_y 为 y 序列中“结”的数量. Kendall 的 τ_a / τ_b 数值在 $-1 \sim 1$ 之间. 符号显示出正/负关联的信息, 绝对值表明关联的强度.

1.3 两变量的 Wilcoxon 关联检验

虽然 Kendall 的 τ 检验对检验水文过程和 ENSO 之间的关联强度可能有用, 但它不能识别水文过程与不同的 ENSO 状态之间的关系. 为了进一步分析水文变化与不同 ENSO 事件的内在联系, 可以利用非参数 Wilcoxon 统计检验技术来检验它们之间的关系^[6]. Wilcoxon 检验公式如下:

$$Z_w = \frac{W - E(W)}{\sqrt{\text{var}(W)}}, \tag{10}$$

其中,

$$W = \sum_{i=1}^n \text{rank}(ENSO_i), \tag{11}$$

$$E(W) = \frac{n(n+m+1)}{2}, \tag{12}$$

$$\text{var}(W) = \frac{mn(n+m+1)}{12}, \tag{13}$$

一般 $n < m$, 其中 n 是暖年的年数或者冷年的年数, 而 m 则是温和年的年数. 水文变量被分作暖年和温和年或者冷年和温和年. Wilcoxon 双样本总和统计被用来划分这些变量. 假设检验如下所示:

接受假设 $H_0: \mu_{\text{Nino}} = \mu_{\text{Neutral}} = \mu_{\text{Nina}}$,

(ENSO 与水文过程无关联);

拒绝假设 H_1 : 至少两平均数是不同的,

(ENSO 与水文过程有关联).

其中 μ_{Nino} , μ_{Neutral} 和 μ_{Nina} 分别是 El Niño 时期、温和时期以及 La Niña 时期的变量均值. 当 μ_{Nino} 与 μ_{Neutral} 具有显著性差异或者 μ_{Nina} 与 μ_{Neutral} 具有显著性差异, 水文过程被定义为受到 El Niño 或 La Niña 的影响. 如果 $|Z_w| > Z_{1-\alpha/2}$, 假设 H_0 就被推翻. 这里 $Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布的 $1 - \alpha/2$ 点, α 为显著性水平.

2 研究区域和资料

塔里木河是中国最大的内陆河, 塔里木河流域是环塔里木盆地的阿克苏河、和田河、叶尔羌河、车尔臣河、克里亚河、迪纳河、喀什噶尔河、开都河-孔雀河、渭干河等九大水系 114 条河流的总称, 流域面积为 $102 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是黄河流域的 1.4 倍, 占据了新疆维吾尔自治区的南部, 养育着 825.7 万人. 流域内现有耕地 $2044 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 多年平均地表水天然径流量 $3.98 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 主要由高山区冰雪融水和降水补给. 因此, 从水文学角度讲, 塔里木河流域是一个封闭的集水区, 是一个在空间上靠近中国最大沙漠——塔克拉玛干沙漠的独特的淡水生态系统.

塔里木河干流自身不产流, 全长 1321 km, 历史上曾有九大水系汇入塔里木河干流, 目前的车尔臣河、克里亚河、迪纳河、喀什噶尔河、开都河-孔雀河、渭干河等相继与塔里木河干流失去地表水利联系. 和田河只在每年的 7~9 月洪水期才有水量进入塔里木河, 叶尔羌河 1986~2002 年 17 年中, 仅有一年 (1994 年) 在洪水期有水补给塔里木河, 其余 16 年均无水输入塔里木河干流. 目前, 在汇入塔里木河干流的三源流中, 阿克苏河是塔里木河干流水量的主要补给来源, 补给量占 73.2%, 和田河为 23.2%, 叶尔羌

河只占 3.6%^[7].

在过去 50 年里,塔里木河流域在资源开发和经济发展的同时,生态环境发生了显著变化,尤其表现为水资源开发过程中生态与经济的矛盾日益突出,进入塔里木河干流的径流量逐年减少,由 20 世纪 60 年代的 $51.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 90 年代的 $42.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少约 $9.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均每年以 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 速率递减,到达塔里木河下游恰拉水文站的水量从上世纪 60 年代的 $1.353 \times 10^9 \text{ m}^3$ 减少到 90 年代的 $2.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,40 年里减少了 80%,塔里木河下游 321 km 河道断流,河流尾间湖泊相继干涸^[7].

伴随着研究区经济的迅速发展,与变化的水文现象相联系的潜在的生态变化受到了社会及政府各部门持续的关注.为了恢复和重建塔里木河下游受损的生态系统,自 2000 年以来,已经四次从中国最大内陆淡水湖泊——博斯腾湖调水,通过大西海子水库向塔里木河下游断流河道输水.这种以恢复生态为目的的向塔里木河下游输水为我们检测一定输水量条件下生态系统的可能恢复状况提供了一个机会^[8].

本研究采用流域温度、降水和径流的数据,着重对气候变化与可获得水资源量之间的关系进行研究.由于塔里木河流域占新疆全区面积的 2/3 还多,并且气候变化的影响面积很大,因而整个新疆的降水和温度数据都被采用(77 个气象站的温度数据和 61 个雨量计的降水值).图 1 和 2 分别显示了新疆年平均气温和降水量的多年变化情况.由图可以清楚看到,这两种时间序列的单调趋势和跳跃性变化都很明显.径流反映流域内的水文响应关系,为了分析径流的

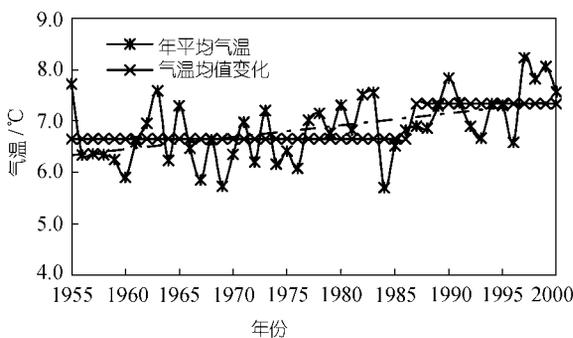


图 1 新疆年平均气温多年变化

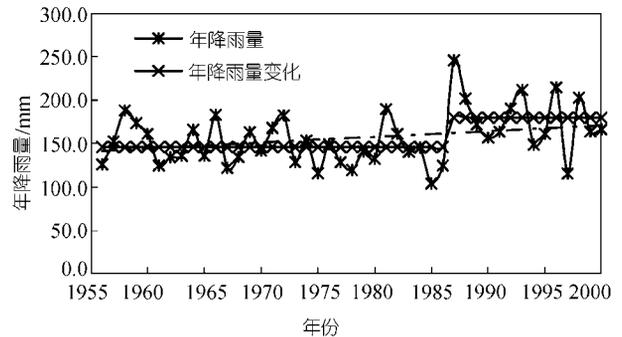


图 2 新疆年降水量多年变化

长期趋势,采用了来自塔里木河流域三大源流——阿克苏河、叶尔羌河、和田河径流量的 3 个时间序列.表 1 和 2 分别是新疆年平均气温与降水量时间序列统计和塔里木河三源流径流量时间序列的基本统计结果,其中包括平均值、标准差、离势系数、偏态系数、最小值、最大值和取值范围.

表 1 塔里木河流域气温与降水量时间序列统计

统计量	气温/	降水量/mm
平均值	6.86	156.65
标准差	0.63	30.34
离势系数	0.09	0.19
偏态系数	0.13	0.69
最大值	8.23	245.58
最小值	5.71	104.36
范围	2.52	141.21

表 2 塔里木河三源流径流量时间序列统计($\times 10^8 \text{ m}^3$)

统计量	阿克苏河	叶尔羌河	和田河
平均值	74.21	73.17	43.59
标准差	10.03	12.41	8.90
离势系数	0.14	0.17	0.20
偏态系数	1.09	0.33	0.60
最大值	101.54	105.14	68.92
最小值	58.21	50.53	24.49
范围	43.33	54.61	44.43

3 气候变化的检测

在干旱区地区,水资源和生态系统尤其容易受到气候变化的影响.对于大面积的、复杂的和经过较大改变的塔里木河流域生态系统,通过对气候学和水文过程的长期观测可以了解到气候变化的潜在影

响, 因为气候变化将影响流域的总水量和径流的变化, 而长期的气候变化引起的水文变化将对社会、经济和生态环境产生影响。许多水文学家进行过关于气候变化对水文学和水资源影响的研究。Muttiah等^[9]于 2002 年得出结论, 认为在整个 20 世纪, 美国的平均温度已升高了 0.6 , 降水也增加了大约 5%~10%, 主要是由于强暴雨的增加; Xu等¹⁾于 2003 年通过对中国降水的可能性长期趋势研究, 认为实测降水系列表现出了明显的减少趋势。从地理学角度讲, 降水减少趋势集中在中国北方地区, 包括松辽河、海河、淮河和黄河流域, 而降水增加趋势主要集中在中国南方地区, 包括长江、珠江和东南地区。由于中国西部数据有限, 尤其新疆和塔里木河流域的长期趋势是增加还是减少尚不清楚, 有关研究报道也较少。

3.1 温度时间序列的长期趋势检验

本研究通过参数和非参数方法检验了新疆全区年平均温度的长期趋势(表 3), 参数 t 检验和非参数 Mann-Kendall 检验都拒绝了 H_0 假设, 表明温度增加趋势很明显, 显著水平为 5%。对 1955~2000 年 77 座水文气象站年平均温度的变化研究表明, 在过去 50 年里, 研究区内温度几乎升高了 1 , 这意味着空气中水汽的容量增加了 5%~6%^[10]。因此, 由于温度升高, 蒸发量也相应增加。这也意味着在过去几十年里, 研究区内由于温度上升, 相当多的淡水可能会通过蒸发而损失。

3.2 降水时间序列的长期趋势检验

对降水长期趋势的检测结果表明(表 3), 尽管 t 检验拒绝了 H_0 假设, Mann-Kendall 检验以显著性水平为 5%接受了 H_0 , 参数和非参数检验都表明了降水的增加趋势。降水量的增加部分地减弱了温度升高的影响, 温度升高也增加了蒸发量并导致了河流径流和水量供给的减少。温度的升高归因于全球变暖, 但降水的增加一方面与全球变化有关, 另一方面与流域内兴修平原水库、水面增加导致蒸发量增加、从而加速了水文循环过程有关。

表 3 气温与降水量时间序列单调趋势检验^{a)}

项目	t -test				Mann-Kendall test		
	0	1	T_c	H_0	Z_0	H_0	
气温	6.313	0.0233	15.38	R	3.428	0.0252	R
降水量	141.22	0.6706	23.61	R	1.702	0.6883	A

a) R 为拒绝, A 为接受。显著性水平 $\alpha = 0.05$

降水是产生河流径流的一个重要因素。研究区内降水的时空分布不均衡。在汛期, 降水充足; 在非汛期, 降水缺乏。其表现为, 从 5 月到 9 月, 7 月为降水最大月, 7~8 月的降水量几乎占全年的一半。从 11 月到次年 3 月的枯季, 降水稀少。为了进一步调查研究区内降水的时间分布, 对 20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代这几个明显时期作了进一步验证, 通过对 1950~2000 年的年平均降水与 20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代 3 个时期内年平均降水的差值与前者的比值分析可见, 研究区内严重的水资源短缺开始于 20 世纪 70 年代, 20 世纪 70 年代存在明显的下降趋势, 而在 20 世纪 80 年代后期到 2000 年, 研究区降水呈现出了明显的增加态势, 反映了在过去二、三十年里, 研究区内气候是在向暖湿方向变化。同时也表明, 发生于 20 世纪 70 年代的塔里木河三源流(阿克苏河、和田河、叶尔羌河)输入塔里木河干流的水量减少不仅仅由人类活动造成, 也有气候变化的因素。而 80 年代到 90 年代, 阿克苏河、和田河、叶尔羌河三源流输入塔里木河干流水量的大幅度减少以及塔里木河下游河道的不断干涸主要是由源流区水资源开发强度加大以及上游水库的拦蓄所造成。

需要注意的是, 在对温度和降水时间序列的长期趋势的检测中, 温度和降水时间序列的两种记录都显示出在 1986 年附近有一个跳跃性改变(见图 1, 2)。表 4 列出了这两个时间序列的主要数据。由表 4 可见, 两个子样本的平均值确实有一个跳跃。表 5 给出了 Mann-Whitney 检验的结果。有趣的是, 对于两个时间序列, H_0 假设都以显著性水平为 5% 被拒绝。换句话说, 对于温度和降水时间序列, 1986 年附近都发生了明显的跳跃式变化。Franks^[11]在欧洲、Xu^[12]于日本也发现了相似的变化。这种跳跃式变化是否缘于气

1) Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Long-term trends of precipitation in China and its association with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). J Hydrol (in press)

候变化还需要对气候物理学作进一步分析,产生这种跳跃式变化的物理机制也有待于深入调查和研究.

表 4 气温与降水量的时间序列划分

	序号	时间序列	记录长度	均值	标准差	离势系数
气温	1	1955~1986	32	6.65	0.56	0.08
	2	1987~2000	14	7.34	0.51	0.07
降水量	1	1956~1986	31	146.2	22.63	0.15
	2	1987~2000	14	179.7	33.20	0.18

表 5 气温与降水量时间序列的 Mann-Whitney 式检验结果

气温				降水量			
序列		检验		序列		检验	
n_1	n_2	Z_c	H_0	n_1	n_2	Z_c	H_0
32	14	3.342	R	31	14	2.550	R

3.3 径流流量时间序列的长期趋势检验

Chiew等^[13]曾指出降水的变化会被放大,并反映在径流上,同样,观测径流变化或气候变化要比降水和其他气候方面的变量更容易.河流径流是降水、蒸发和其他水循环组成成分的合成.对应于研究区内的降水类型,一些小河流的径流表现出间断的特点.对径流长期趋势的检验由于大量的零数据值而出现困难.因此,在本项研究中,采取了观测年平均径流值,并利用了1950~2000年塔里木河三源流的年径流时间序列.阿克苏河、叶尔羌河、和田河等塔里木河三源流的标准化径流量示于图3.由观测和计算结果可知,阿克苏河和叶尔羌河径流显示了增加趋势,而和田河有细微的下降.

表6是 t 检验和 Mann-Kendall 检验的结果.由表6可见,阿克苏河的增长趋势明显,置信度水平达95%.叶尔羌河也表现为增加趋势,而和田河的径流

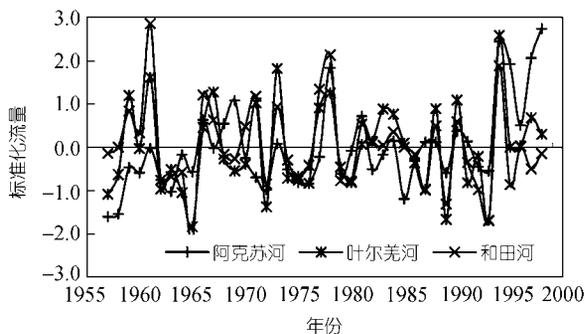


图 3 塔里木河三源流标准化后的径流量变化

表 6 塔里木河三源流各支流时间序列检验

河流	t -test			Mann-Kendall test		
	β_0	β_1	T_c	H_0	Z_0	H_0
阿克苏河	64.868	0.4344	14.049	R	3.327	0.3700 R
叶尔羌河	71.072	0.0954	66.654	R	0.649	0.1113 A
和田河	46.238	-0.1230	37.840	R	-1.301	-0.1123 A

却呈轻微下降的走向,但两者的趋势都不明显.

3.4 温度、降水与厄尔尼诺-南方涛动间的联系

厄尔尼诺-南方涛动是造成气候和水文异常的主要原因,因为厄尔尼诺与水文波动之间存在着多种联系. Mechoso等^[14]于1992年就发现了在Negro和乌拉圭河流域ENSO与径流间的关系.一般说来,径流的消极异常与赤道附近太平洋的冷阶段相关联,而积极的异常则与热阶段有关. Bordi等^[15]于2001年也发现了相似的关系.本文对研究区内厄尔尼诺-南方涛动与水文过程的关系进行了研究,表7是SOI与降水/温度时间序列间的Pearson相关系数和Kendall的tau,它表明参数和非参数检验都接受 H_0 假设,即在SOI与降水/温度时间序列间没有任何明显的关联.表8给出了塔里木河三源流3个径流时间序列的计算结果,该结果也没有显示出与SOI时间序列间有任何明显的相关.这也表明研究区内温度、降水和径流变化可能在ENSO阶段与当地气候因素间有复杂联系的结果.

为了探讨水文过程与ENSO冷、暖、中性时期的可能联系,水文时间序列被进一步划分成了三个样

表 7 SOI与降水气温比间的Pearson互相关系数和

项目	Mann-Kendall τ_a/τ_b				
	Pearson		Kendall		
	r_c	H_0	τ_a/τ_b	Z_c	H_0
气温	-0.191	A	-0.122	-1.184	A
降水量	-0.163	A	-0.068	-0.646	A

表 8 SOI和三支流流量间的Pearson互相关系数和

河流	Mann-Kendall τ_a/τ_b				
	Pearson		Kendall		
	r_c	H_0	τ_a/τ_b	Z_c	H_0
阿克苏河	-0.208	A	-0.116	-1.073	A
叶尔羌河	0.041	A	0.083	0.774	A
和田河	0.125	A	0.134	1.235	A

本, 每一个都与冷、暖、中性年份相对应。结果表明, 当赤道附近的太平洋上发生暖事件时, 研究区内的降水没有表现出高于或低于平均值的任何趋势。在冷时期, 径流没有表现出与其他两个时期不同的明显趋势。这说明, 在很大程度上, ENSO 事件对研究区内的气候影响很小。

4 结论与讨论

(1) 本文运用参数和非参数方法对研究区内的温度、降水和径流时间序列的可能性长期趋势进行了检验。结果表明, 温度时间序列在 5% 的显著性水平下表现出单调增加的趋势。塔里木河上游三源流的年径流量除和田河表现出轻微减少趋势外, 叶尔羌河和阿克苏河的径流均呈增加趋势, 其中阿克苏河表现出明显的单调增加的趋势, 年平均降水以每 10 年增加 6.8 mm 的幅度呈增长趋势; 气候变化引起了塔里木河源流径流的增加, 但人类活动诸如地表水的过度耗用导致了进入塔里木河干流和干流自身径流的减少。值得注意的是, 在 1986 年附近温度、降水的时间序列都发生了跳跃式变化, 这是否源于气候变化还有待于结合气候学分析在内的调查和进一步研究, 而 20 世纪 80 年代中期以来中国西北许多地区的气候转型问题已引起了众多学者的关注^[16]。

(2) 水文时间序列与 SOI 间的相关分析表明, 这些时间序列与 ENSO 间不存在任何明显的联系。在 ENSO 不同时期的温度、降水和径流没有差别。在过去几十年里, 研究区的气候似乎正在向温暖方向发展, 但降水量的增加趋势在统计上不明显。塔里木河干流径流的递减趋势主要是由于人类活动所造成。ENSO 对研究区内气候的潜在影响可能是轻微的。这种单调和跳跃式变化的趋势是否与气候系统的一些数十年周期变化之间存在某种关系还需进一步研究。

(3) 塔里木河流域地处我国西北干旱区, 流域的生态恢复与保育是以水过程为主线、强化水管理为前提的。为此, 提出如下改善环境的对策: 一是提高公众对生态和水资源的认识, 强化水资源管理, 加强生态保护意识; 二是塔里木河三源流灌区要大力发展节水灌溉农业, 优化和调整种植结构, 塔里木河干流区要加强河道治理, 提高管控水能力; 三是控制地下

水的开采和对地表水的使用, 加强水资源保护, 防止水环境污染; 四是协调好水资源开发过程中上游与下游的关系, 生产、生活用水与生态用水的关系, 塔里木河三源流要确保一定数量水输入塔里木河干流, 而塔里木河干流要确保一定数量的生态用水输入塔里木河下游。

参 考 文 献

- Boehmer K, Memon A, Mitchell B. Towards sustainable water management in Southeast Asia experiences from Indonesia and Malaysia. *Water International*, 2000, 25(3): 356~377
- Xu C Y. Modelling the effects of climate change on water resources in central Sweden. *Water Resour Mgmt*, 2000, 14(3): 177~189[DOI]
- Gan T Y. Reducing vulnerability of water resources of Canadian Prairies to potential droughts and possible climate warming. *Water Resour Mgmt*, 2000, 14(2): 111~135[DOI]
- Sullivan C. The potential for calculating a meaningful water poverty index. *Water International*, 2001, 26(4): 471~480
- Muttiah R S, Wurbs R A. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 2002, 27(3): 407~419
- Giannini A, Cane M A, Kushnir Y. Interdecadal change in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic Oscillation. *J Climate*, 2001, 14: 2867~2879[DOI]
- 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护. *地理学报*, 2003, 58(2): 215~177
- 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. *地理学报*, 2003, 58(4): 542~549
- Muttiah R S, Wurbs R A. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 2002, 27(3): 407~419
- Philip G B, Biney C A. Management of freshwater bodies in Ghana. *Water International*, 2002, 27(4): 476~484
- Franks S W. Assessing hydrological change: deterministic general circulation models or spurious solar correlation. *Hydrol Process*, 2002, 16: 559~564[DOI]
- Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Detection of monotonic trend and step changes for Japanese precipitation. *J Hydrol*, 2003, 279(1-4): 144~150[DOI]
- Chiew F, Whetton P, McMahon T. Detection of climate change in recorded runoff volumes in South-East Australian rivers. *International J of Climatol*, 1995, 13: 643~653
- Mechoso C R, Iribarren G P. Streamflow in Southeastern America and the Southern Oscillation. *J of Climate*, 1992, 5: 1535~1539[DOI]
- Bordi I, Sutera A. Fifty years of precipitation: Some spatially remote teleconnections. *Water Resour Mgmt*, 2001, 15(4): 247~280[DOI]
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 62~64