塔里木河流域水资源利用及其变化趋势分析

叶 茂 徐海量 宋郁东

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011. E-mail: yemao1111@163.com)

摘要 基于塔里木河流域8个气象站和15个水文站的长期观测资料, 采用回归分析、时间序列分析和非参数检验的方法对塔里木河流域水资源利用及其变化趋势进行了研究, 重点分析了1994~2003年10年流域水资源利用及变化趋势. 分析和检验结果显示: 塔里木河流域近40年源流来水量呈现增加的趋势, 特别是在近10年源流水量的增加更为明显, 说明随着全球气候的变化塔里木河源流区的水情得到了好转. 但在近10年三源流来水量增加近 25×10^8 m^3/a 情况下, 源流补给干流的水量只增加了不足 1×10^8 m^3/a, 特别是干流沿程各站点的径流量仍呈显著的线性递减趋势, 表明塔里木河源流连续10年的丰水期并没有改变干流环境恶化的局面.

关键词 塔里木河流域 水资源利用 变化趋势 Kendall秩次检验

塔里木河流域(以下简称塔河流域)位于中国西部干旱区, 是中国最大的内陆河流域, 具有自然资源丰富和生态脆弱的双重特点. 其特殊的自然地理和水资源条件决定了水在社会经济发展、生态建设和环境保护中的重要地位. 为此, 国内外许多学者关于塔河流域的水资源问题阐述了各自的观点和看法, 并发表了大量的研究成果[1~12]. 尤其是近几年随着全球变化对区域生态与自然环境影响研究的不断深入, 许多学者列举了西北气候由冷干向暖湿转型的例证[13~16], 并对塔河流域的水资源变化进行了预测和分析[17~21]. 然而, 从全流域角度基于最新长时间序列分析水资源利用及其变化趋势很少涉及. 鉴于干旱区流域特殊的水文过程以及水资源对环境演变的重要性, 本文采用Kendall 迭次检验方法, 基于1957~2003年最新长时间序列进行分析了塔河流域源流区和干流区水资源利用和变化趋势, 讨论了影响流域水资源变化的气候因素, 并对干流出现严重水资源短缺问题的原因进行探讨, 旨在为今后塔河流域生态整治和提供科学依据.

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

塔河流域(图 1)历史上包括塔里木盆地周边聚流的9大水系144条河流和塔里木河干流, 由于人类活动和气候变化的影响, 目前塔里木河干流上游有地表水联系的只有和田河、叶尔羌河和阿克苏河三条源流. 此外, 从1976年起博斯腾湖经孔雀河向塔里木河下游调水, 形成了目前塔里木河"四源一干"的格局.

1.2 研究方法

将塔河流域15个水文站(1957~2003年)和8个气象站(1961~2002年)的资料进行回归分析、时序分析和 Kendall 秩次相关检验, 分析流域水资源利用特点和变化趋势.

Kendall 秩次相关检验方法对非独立的时间序列和随机正态分布变量非常有用, 是水文学和气象学研究中较常采用的非参数检验方法[22,23], 它能直观地表现时间序列的年度变化趋势, 因此本文采用此方法分析塔河流域的年径流变化和水资源利用变化趋势. 基本方法是:首先, 利用 Kendall 秩次相关检验法来检验塔河源流及干流各径流序列变化趋势. 为此对上述各径流序列 X_1, X_2, X_3, …, X_n; 先确定所有对观测值(X_i, X_j; $j > i$)中的 $X_i < X_j$ 出现个数(P_i), 顺序的(i, j)的子集是($i = 1, j = 2, 3, 4, \cdots, n$), ($i = 2, j = 3, 4, 5, \cdots, n$), ($i = n-i, j = n$). 与此种检验相关的统计量为:

$$Z_c=\frac{T}{\sqrt{\mathrm{Var}(T)}}, \tag{1}$$

其中,

$$\mathrm{Var}(T)=\frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}, \tag{2}$$

$$T=\frac{4\sum Pi}{n(n-1)}-1. \tag{3}$$

统计量 T 可根据各年径流序列, 利用(1)式来求得. 当 n 增加时, Z_c 很快收敛于标准化正态分布, 给定显著水平(a), 可在正态分布表中查出临界值 $Z_{ca}/2$, 当$|Z_c| < Z_{ca}/2$ 时序列趋势不显著, 若$|Z_c|>Z_{ca}/2$ 表示序列的趋势显著. 当统计量 Z_c 为正值, 说明序列有上升趋势; Z_c 为负值, 则表示有下降趋势.

2　塔里木河流域源流区水资源利用及变化趋势

2.1　源流区径流量变化趋势

塔里木河自身不产流，为纯耗散型内陆河[12]，水资源主要依靠源流补给. 多年统计资料显示:源流区出山口径流量除和田河略微减少外，其他河流均增加，其中阿克苏河增幅最明显(图 2). 20 世纪 90 年代径流量与 60 年代相比，其中，和田河同古孜洛克站径流量减少 1.35×10^8 m^3，减幅达 5.9%；乌鲁瓦提站减少 1.19×10^8 m^3，减幅达 5.6%；阿克苏河协和拉站年径流量增加 9.04×10^8 m^3，增幅达 19.86%；沙里桂兰克增加 2.96×10^8 m^3，增幅为 10.6%；叶尔羌河卡群站增加 5.51×10^8 m^3，增幅为 8.7%；开都河大山口站 20 世纪 90 年代与 70 年代相比，增加 9.27×10^8 m^3，增幅达 33.6%.

对四源流径流量的变化趋势进行 Kendall 秩次检验(表 1). 结果表明，同古孜洛克和乌鲁瓦提水文站的多年径流量是微递减的，但是由于 $Z_c > -1.96$，说明和田河径流量递减的趋势在 $a = 0.05$ 水平上不显著，而其他站的年径流量基本呈递增趋势，其中，协和拉、沙里桂兰克和大山口的 Z_c 均大于检验的 $Z_{ca}/2$ 值，表明开都河和阿克苏河的出山口水量在 $a = 0.05$ 水平上为显著递增的趋势.

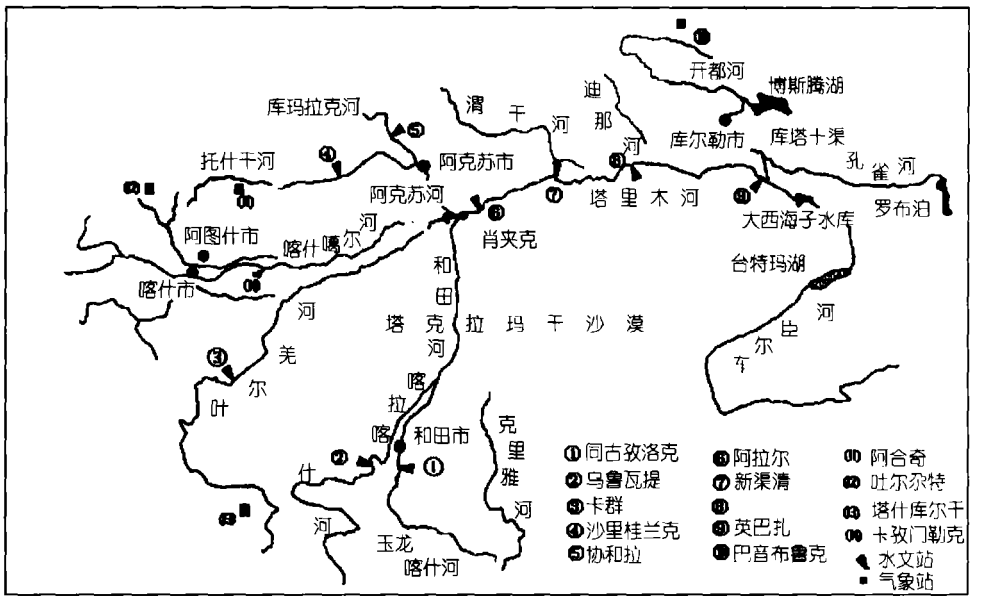


图 1　塔里木河流域水系示意图

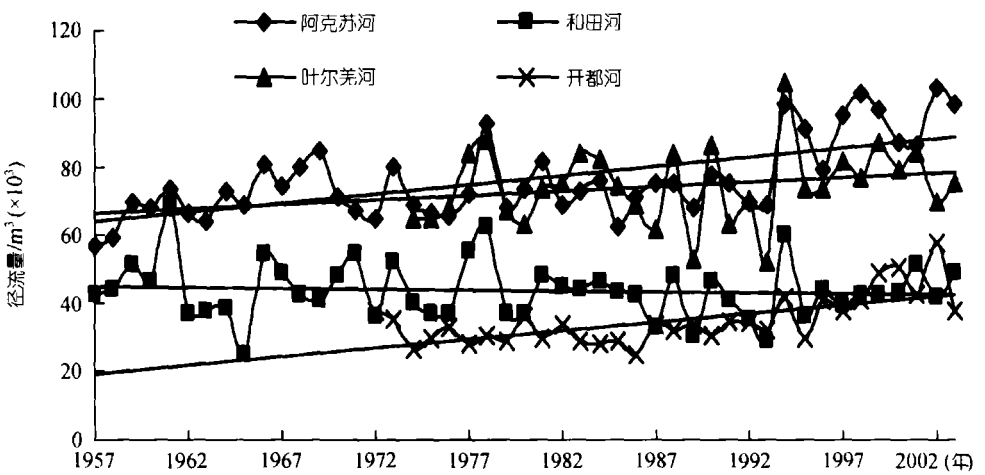


图 2　塔里木河流域主要源流 1957~2003 年径流量变化

这一递增的趋势在1994~2003年近10年内表现得更为突出(表2). 表2显示:阿克苏河、和田河和叶尔羌河近10年平均来水量比多年平均来水量增加了25.163×10^8 m^3/a, 其中, 对塔河干流影响最大的阿克苏河10年平均来水量比多年平均增加17.074×10^8 m^3, 根据频率曲线计算的来水频率为2.5%, 说明这一时期属特丰来水时段; 而和田河、叶尔羌河的来水量也分别比多年平均多1.296×10^8 m^3和6.793×10^8 m^3, 对应的来水频率曲线分别为38%和10%, 属偏丰时段和和丰水时段. 对塔里木河下游生态输水影响较大的开都河, 近10年的水量也比多年平均高出7.802×10^8 m^3, 这说明近10年塔河流域源流区水分条件出现了明显好转.

2.2 源流区水资源利用及其对干流区的补给

从源流区近40年水资源利用的统计结果看, 和田河、阿克苏河和叶尔羌河多年平均水资源利用量分别占径流量的75.4%, 63.2%和96.2%. 并且水资源利用量仍呈上升的趋势(图3).

为了更清晰地反映源流区水资源利用量的变化特点, 在此采用Kendall秩次检验的方法分析了源流区不同河流的水资源利用变化趋势(表3). 从表3看, Z_c值从和田河、叶尔羌河到阿克苏河不断增加, 其中叶尔羌河和阿克苏河Z_c分别为3.078和5.6215大于1.96, 说明这两条河流在各自小流域内的水资源利用量均是显著递增的趋势.

虽然源流区的来水量是增加的, 但是由于源流水资源利用量也明显增加, 因此补给干流的总水量并未有明显的变化, 而从补给干流水量占总来水量的比例看, 三源流反而是减少的(表4). 其中, 叶尔羌河流域补给干流水量减少最为明显, 多年平均补给

表1 塔里木河流域源流区年径流量及变化趋势(1957~2003)

水系	水文站	多年平均径流量 /$m^3(\times10^8)$	$N(t)$	变化趋势	显著性(0.05)	Z_c	显著性检验结果
和田河	同古孜洛克	22.27	$-0.0456t+23.365$	微递减	不显著	-0.5777	拒绝
	乌鲁瓦提	21.39	$-0.0211t+21.894$	微递减	不显著	-0.871	拒绝
阿克苏河	协和拉	48.67	$0.3265t+40.675$	递增	显著	4.411	接受
	沙里桂兰克	27.67	$0.1908t+23.001$	递增	显著	3.824	接受
叶尔羌河	卡群	65.43	$0.1116t+62.75$	递增	不显著	1.201	拒绝
	玉孜门勒克	8.7	$0.0337t+7.6079$	微递增	不显著	3.503	接受

表2 塔里木河流域源流区10年的径流量变化

河名	10年平均径流量 $m^3(\times10^8)$				1994~2003年10年平均/$m^3(\times10^8)$		近10年来水相应频率[a]
	1960s	1970s	1980s	1990s	10年平均	比多年平均增加[b]	
和田河	43.97	45.84	41.74	41.44	44.953	1.296	38%
阿克苏河	73.37	71.68	72.46	85.37	93.571	17.074	2.5%
叶尔羌河		72.90	72.00	77.03	80.581	6.793	10%
开都河	27.61	27.61	30.92	36.88	42.63	7.802	

a) 对应于1956~1998年的资料所作频率曲线, 供参考; b) 多年平均值为1956~2003年资料求得

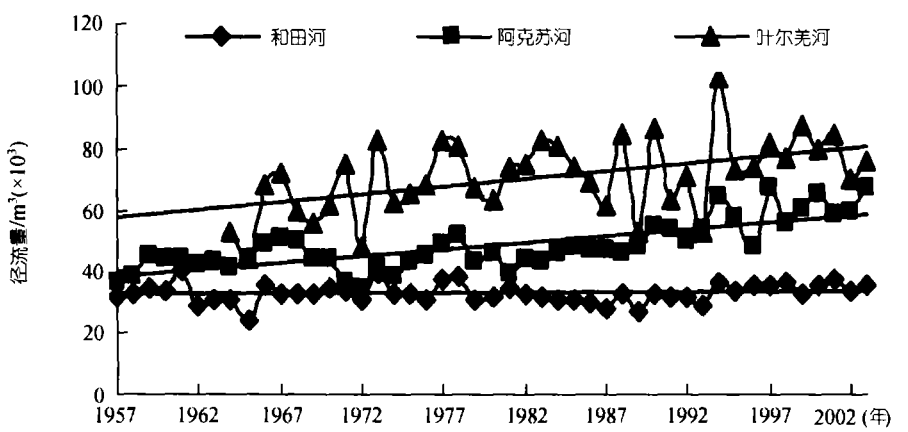


图3 塔里木河流域主要源流水资源利用变化趋势

表 3　塔里木河流域三源流水资源利用变化趋势及其检验(1957~2003)

河名	多年平均耗水量/m^3($\times 10^8$)	$N(t)$	变化趋势	显著性(0.05)	Z_c	显著性检验结果
和田河	32.923	$0.032t + 32.154$	微递增	不显著	1.182988	拒绝
阿克苏河	48.312	$0.4477t + 37.566$	递增	显著	5.6215	接受
叶尔羌河	70.965	$0.4985t + 57.256$	递增	显著	3.07873	接受

表 4　多年平均和 10 年平均的三源流补给干流水量

河名	三源流补给干流水量			
	补给水量/m^3($\times 10^8$)	比例/%	10 年平均补给水量/m^3($\times 10^8$)	比例/%
和田河	10.734	24.59	9.72	21.43
阿克苏河	28.185	36.84	31.46	35.47
叶尔羌河	2.823	3.83	0.22	0.24

干流水量仅为 2.823×10^8 m^3, 从来水时间看, 在近 20 年内只有 1994 年特大洪水时期叶尔羌河才有水补给干流. 而补给干流水量最大的阿克苏河, 补给干流占总径流量的比例比多年平均下降 1.37%, 和田河这一比例也下降 3.26%, 这些数据说明源流区水资源增加的趋势要小于源流区水资源利用增加的趋势. 同时, 即使源流在近 10 年来水量平均增加 25.163×10^8 m^3 的情况下, 干流阿拉尔的径流量 10 年平均来水量比多年平均仅增加 0.9983×10^8 m^3, 不足径流量增加的 3%, 表明源流来水增加对塔里木河干流来水增加的影响并不大. 那么在这种情况下, 塔里木河干流不同河段的径流量又是如何变化的?

3　干流区水资源利用及变化趋势

3.1　干流区径流量变化趋势

塔里木河干流径流量在 1957~2003 年的长期时间序列上基本是以年 1780×10^8 m^3 的速率递减. 从回归分析的趋势项看, 斜率从阿拉尔的 0.178, 新渠满的 0.266 到英巴扎的 0.346(恰拉受输水影响略)不断增大, 说明干流沿程径流量不断下降, 其递减的速率从上而下不断增加, 并且沿程 4 个站点径流的年际变化趋势要大于干流来水减少的趋势(图 3). 为此, 对图 4 的径流资料进行非参数分析, 结果见表 5.

表 5 列出干流沿程各水文站径流量时序分析的结果. 虽然恰拉在 2000 年接受博斯腾湖输水影响径流量出现反弹, 但是 4 个站点径流量在近 47 年内基本还是表现为明显的下降趋势, 显著性程度 $U/U_{\alpha/2}$ 均小于−1, 表明呈显著递减的趋势, 而从显著性 F 值(对应的是在显著性水平下的 F_α 临界值, 恰拉取 1957 年到 2000 年, 回避输水的影响)看, 除阿拉尔递减趋势为非线形的显著性 F 值为 0.105, 表明阿拉尔径流量在近 47 年内呈线形递减的概率为 0.895 外, 其余 3 个水文站的观测结果均呈现显著的线形递减趋势, 并且均满足 $P\leqslant0.001$ 水平, 表明径流量随年际递减的线形趋势非常显著, 即 $N(t) = a + bt$, $b < 0$, 同时愈往下游衰减趋势愈明显. 表 5 中$|b|/N$(1957)表示径流量年递减率占各站 1957 年趋势径流量的比值, 它直观地表明了以 1957 年线性趋势项的年径流量为基准, 年递减率从阿拉尔站的 0.36%增加到恰拉站的 2.09%, 此即在干流来水量逐年减少的情况下发生河流逐渐溯流干涸的原因.

3.2　干流区水资源利用

塔河干流沿程各站径流量大幅度递减可以从干流不同河段水资源利用量的变化趋势来进行解释(表 6). 塔里木河上游上段和下段平均耗水量占干流总耗水量的 18.08%和 18.76%, 也即上游区消耗流域水分的 36.85%; 中游区耗水占干流的 49.95%, 是干流最大的耗水量区段; 因进入下游水量少, 其区间耗水量也少. 下游年平均消耗水分仅 6.105×10^8 m^3(考虑了生态输水的 13.8×10^8 m^3), 占干流耗水的 13.2%. 这也正是塔河下游出现严重生态退化的一个重要原因.

对各区段水资源利用分析, 上游上段(阿拉尔至新渠满)作为主要的农业开发区, 伴随着本地区农业生产规模的不断扩大, 水资源消耗量在近 50 年时间内以每年 1619×10^4 m^3 的速率在增加、随之带来的土地盐渍化问题日益严重; 中游段事主要的牧业区和天然胡杨林区, 该段由于大量泥沙的淤积造成河道堵塞而形成面积广阔的滞洪区、是塔里木河耗水量最大的河段, 由于来水量的减少, 本段耗水量是以年 3457×10^4 m^3 的速率在减少. 所以说, 干流上游段水资源利用以年 1619×10^4 m^3 增加的速率而加剧了中下

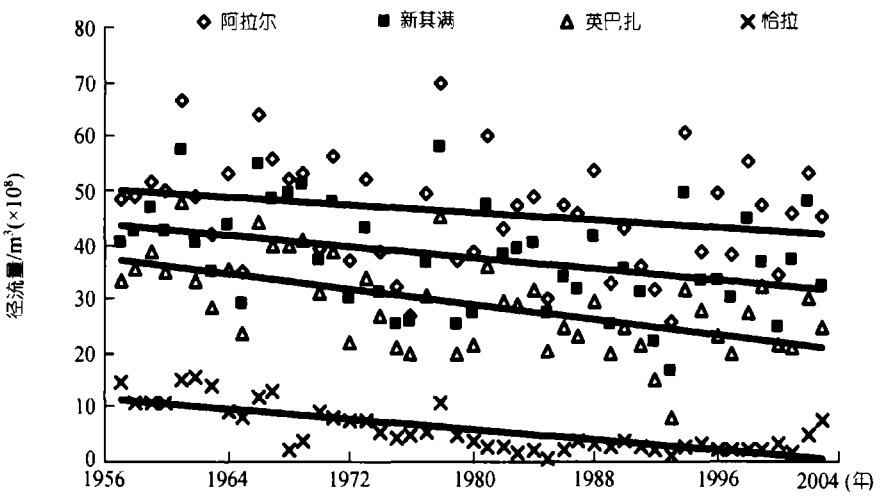


图 4 塔里木河干流水文站年径流量变化趋势

表 5 塔里木河干流主要水文站年径流量变化趋势

测站	年数	多年平均径流量 /m^3(×10^8)	$N(t)$ /m^3(×10^8)	$\|U\|/U_{\alpha/2}$	F 值	N(1957 年) /m^3(×10^8)	$\|b\|/N$ (1965)
阿拉尔	47	45.86	50.136–0.178t	–1.165	0.105	49.958	0.003563
新渠满	47	37.50	43.88–0.266t	–1.249	0.0094	43.614	0.006099
英巴扎	47	28.91	37.20–0.346t	–1.914	3.37×10^{-5}	36.854	0.009388
恰拉	45	5.81	11.46–0.235t	–2.728	9.56×10^{-12}	11.225	0.020935

表 6 塔里木河不同河段耗水量及变化趋势(1957~2003)

河段	多年平均耗水量/m^3(×10^8)	占总耗水量的比例/%	$N(t)$	变化趋势
塔里木河上游上段	8.361	18.08	0.0004t + 0.0338	微递增
塔里木河上游下段	8.676	18.76	0.0003t + 0.0262	微递增
塔里木河中游	23.094	49.95	–0.0003t + 0.0647	微递减
塔里木河下游	6.105	13.20		

游水量减少的速率.

干流上游水资源的低效利用是造成耗水量不断增加的一个重要原因，由于大量利用地表水造成的土壤次生盐渍化严重，这可从塔里木河干流单位面积毛灌溉水量远大于流域平均水平和新疆平均的毛灌溉水量水平得以验证，若通过节水措施，将干源流综合毛灌溉定额降低 10%就可节约水量 15.51×10^8 m^3，如果塔河干流提高到全流域平均水平，那么单塔里木河干流区每年就可节约用水 13.24×10^8 m^3，几乎等于塔里木河下游 5 次生态输水的总水量[27].

4 讨论

4.1 源流区径流量增加与本区气候变化的关系

对塔河源流区山地降水和气温的变化进行分析，源流区将水量和气温总体上呈增长趋势(表 7 和表 8). Kendall 秩次检验降水变化趋势的结果，所有的 $Z_c > 0$，说明塔河流域源流的降水总体是增加的，但是只有阿合齐的 $Z_c > Z_{c\alpha}/2$(这里 $\alpha = 0.05$，查表得到此时的 $Z_{c\alpha}/2 = 1.96$)，表明这一单调上升的趋势只有这 3 站可以通过概率 95%水平的检验. 与降水增加同步，塔河流域山区气温总体上也呈波动上升趋势. Kendall 秩次检验这一趋势，除巴音布鲁克站外，其他各站气温都通过了概率 95%水平的检验.

塔河流域源流区降水和气温均不同程度增加，这与许多学者提出在全球变暖的大背景下，中国西北地区降水和气温出现升高的趋势是吻合的. 随着降水的增加和温度升高引起的冰雪融水量的增加，塔河流域源流区(开都河主要考虑对塔里木河下游生态输水有重要影响)的径流量也出现变化. 但根据对源流区降水的 Kendall 秩次检验看，除阿合奇外，其余均不显著，这点说明目前的资料还不能得出塔里木河源流区已出现显著的气候转型的结论，或者说这种降水增加的结论在 $\alpha = 0.05$ 水平上还不能成立. 因此，还需要我们在这方面开展更多的工作来深入

表 7　塔里木河流域源流区山地降水变化及趋势检验

气象站	海拔/m	平均降雨量/mm	$N(t)$	变化趋势	Z_c	显著性检验(0.05)
塔什库尔干	3094	70.036	$0.2634t + 64.373$	微递增	0.726	拒绝
吐尔尕特	3507	241.174	$0.9877t + 219.94$	微递增	0.899	拒绝
阿合奇	1986	20.664	$2.1677t + 160.06$	递增	2.438	接受
巴音布鲁克	2459	276.402	$0.3936t + 267.94$	微递增	0.163	拒绝

表 8　塔里木河流域源流区山地温度变化及趋势检验

气象站	海拔/m	平均温度/℃	$N(t)$	变化趋势	Z_c	显著性检验(0.05)
塔什库尔干	3094	3.6	$0.0275t + 2.954$	递增	2.169	接受
吐尔尕特	3507	−3.4	$0.0298t - 4.037$	递增	2.415	接受
阿合奇	1986	6.4	$0.0205t + 5.9755$	递增	2.328	接受
巴音布鲁克	2459	−4.5	$0.006t - 4.6664$	微递增	0.214	拒绝

研究和揭示气候与径流的关系.

4.2　近 10 年流域水情的好转并未解决水资源利用紧张的局面

虽然源流区三源流在近 10 年处于偏丰时段, 平均水资源利用量比多年平均增加 23.08×10^8 m^3, 但三源流补给干流的水量仅占总来水量的 2. 2%, 即源流多来水的 97%已在源流区就被消耗和利用了. 如果这 3 条源流都是正常来水年(47 年平均)的来水量, 而水资源利用以近 10 年平均消耗水量来计算, 和田河每年补给塔河干流的水量为 8.34×10^8 m^3, 阿克苏河为 14.23×10^8 m^3, 而叶尔羌河不但将无水补给塔里木河而且还将缺水 6.26×10^8 m^3[24]. 如此情况出现, 不仅塔里木河干流, 连叶尔羌河流域也将出现严重的生态安全问题.

文献[15]和徐海量[1)]分析了干流上、中、下游温度、降水与水资源变化的关系, 得出干流区降水和温度增加不是干流径流减少的原因, 说明气候变化对干流影响是有限的. 造成干流来水量减少的主要原因是源流区自身水资源利用增加, 源流区开荒屡禁不止, 高耗水作物种植面积居高不下, 大量挤占生态用水. 据统计, 塔河流域上游三源流灌溉区的灌溉面积从 1950 年的 34.8×10^4 hm^2 增加到 2000 年的 125.7×10^4 hm^2, 三源流灌区用水量从 20 世纪 50 年代的 50×10^8 m^3 增加到 2000 年的 155×10^8 m^3, 用水增长了近 2 倍. 源流区能否建设高效节水农业, 能否把水节下来, 放下去是维系塔河生态稳定的根本所在. 与此同时, 四源流灌区耕地盐渍化普遍发生, 盐碱化耕地面积占灌区总面积的 37.4%, 并有进一步发展的趋势. 因此在塔河源流区如果没有灌区耕地盐碱化的治理, 节水也将难以实施.

4.3　源流和上游用水大幅度增加导致中下游水资源紧缺及生态安全问题突出

源流区和上游用水大幅度增加使塔里木河本来就十分紧张的水资源供求矛盾更加突出, 加剧了下游水量减少的趋势(图 5 和图 6). 图 5 和图 6 是将整个流域分为源流和干流上游及中游与下游两部分来分析, 从源流和干流上游的用水量看, 在近几十年来塔里木河源流和干流上游段的总用水量是显著递增的趋势, 这点可用 $y = 1.2946x + 144.03$ 线性方程组来描述, 从方程的相关性 $R^2 = 0.4346$ 和 $P < 0.01$ 看, 说明它们递增的趋势非常显著; 而对应源流和干流上游用水量递增的是塔里木河中下游来水量的日益递减, 与之对应的是中下游用水量的不断减少, 考虑到塔里木河下游由于流域水文过程完整性丧失后出现了一系列严重的生态问题; 同样, 随着塔里木河中游来水量的不断减少, 塔里木河中游已变成季节性断流的河段, 随着这一局面的继续, 那么塔里木河中游的生

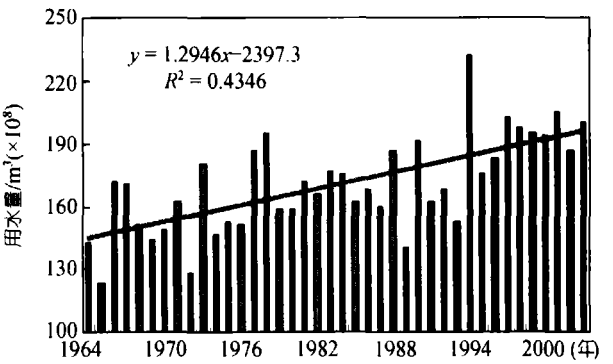


图 5　塔里木河上游和源流用水量

1) 徐海量. 干旱区流域水文过程与生态环境的耦合关系研究——以塔里木河流域为例. 新疆农业大学博士论文, 2005. 30—39

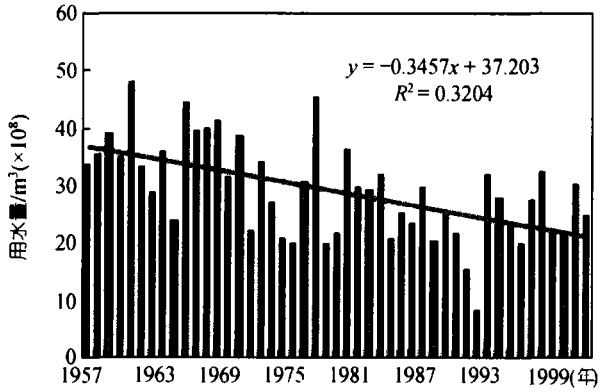


图6 塔里木河中下游用水量

态问题将更加严峻, 这对于中游段面积广阔的以胡杨为主要建群种的荒漠河岸林将是一个极大的威胁[25]. 因此, 今后我们不仅要继续关注塔里木河下游的生态恢复和重建工作而且要高度重视塔里木河中游的生态保护工作, 从某种意义上说, 这可能比下游的生态问题更敏感.

5 结论

(i) 塔河流域水资源在近 40 年呈增加趋势, 这一现象在 1994~2003 年表现更加突出. 三源流中阿克苏河为特丰来水时期, 叶尔羌河为丰水时期, 而和田河也是偏丰时期, 说明塔河流域水资源形成区的水情出现好转.

(ii) 三源流在近10年水量比多年平均水量增加了 25.163×10^8 m^3, 但是干流近 10 年平均来水量仅比多年平均来水量只增加 0.9985×10^8 m^3, 占总来水量的 2.2%, 表明源流来水增加对塔河干流影响很微弱.

(iii) 在径流开发利用区, 由于源流和干流上游耕地不断增加, 水资源被大量利用, 导致干流水量逐年减少, 由此带来干流出现了一系列的生态问题, 说明如何协调源流与干流、干流上中下游用水的关系是解决塔里木河生态问题的关键.

(iv) 塔河流域水资源不合理利用是导致水资源利用紧张和生态问题突出的根本原因. 因此如何转变流域水资源利用方式, 建立节水型经济是实现生产、生活和生态三水的合理配置和高效利用的关键所在.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 30470329)和中国科学院西部之光项目资助.

参 考 文 献

1 Feng Q, Endo K N, Cheng G D. Towards sustainable development of the environmentally degraded arid rivers of China——a case study from Tarim River. Environ Geol, 2001(4): 229—238
2 Song Y D, Wang R H, Peng Y Sh. Water resources and ecological conditions in the Tarim Basin. Science in China, Series D, 2002(45): 11—17
3 Pan X L, Chao J. Theory of stability, and regulation and control of ecological system in oasis. Global Planet Change, 2003(3): 287—295
4 Zhu R P, Gao Q Zh, Qu J J, et al. Environmental changes of oasis at southern margin of Tarim Basin, China. Environmental Geology, 2003(44): 639—644
5 Zhang H, Wu J, Wang A. preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China. J Arid Environ, 2003(55): 545—553
6 Zhu Y H, Wu Y Q, Drake S. A survey: obstacles and strategies for the development of groundwater resources in arid inland river basins of western China. Journal of arid Environments, 2004, (59): 351—367
7 宋郁东, 樊自立, 雷志栋. 中国塔里木河流域水资源与生态问题研究. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1999. 398—399
8 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析. 中国科学, D 辑, 2004, 35(5): 475—482
9 雷志栋, 甄宝龙, 尚松浩, 等. 塔里木河干流水资源的形成及利用问题. 中国科学, E 辑, 2003, 33(5): 473—481
10 徐海量, 叶茂, 宋郁东, 等. 塔里木河流域水文过程的特点初探. 水土保持学报, 2005, 19(2): 156—170
11 徐海量, 陈亚宁, 杨戈. 塔里木河下游生态输水对天然植被的影响. 环境科学, 2003, 24(4): 18—22
12 杨青, 何清. 塔里木河流域的气候变化、径流量及人类活动间的相互影响. 应用气象学报, 2003, 14(3): 309—321
13 Yang B, Shi Y F, Achim B, et al. Evidence for a warm-humid climate in arid northwestern China during 40~30 ka BP. Quaternary Science Reviews, 2004, 26(6): 1—12
14 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步讨论. 冰川动土, 2002, 24(3): 219—226
15 张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映. 冰川冻土, 2003, 25(2): 183—187
16 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响. 干旱区地理, 2002, 25(3): 194—200
17 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响. 中国科学, D 辑, 2004, 3(11): 1047—1053
18 胡汝骥, 王东亮, 冯国华, 等. 怎能让塔里木河下游干涸的悲剧重现中游地区——2002 年塔里木河流域 3 条源流区间耗水评析. 干旱区研究, 2004, 21(3): 199—203
19 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 塔里木河源流水资源变化趋势预测. 冰川动土, 2003, 25(6): 708—711
20 王顺德, 王彦国, 王进, 等. 塔里木河流域近 40a 来气候、水文变化及其影响. 冰川动土, 2003, 25(3): 315—320
21 海米提·依米提, 塔西甫拉提·特依拜, 熊黑钢. 内流河流域水资源利用对径流年际年内变化影响的分析——以塔里木河流域为例. 地理研究, 2000, 19(3): 271—276
22 Kendall M G. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 1975. 10—35
23 Van B G, Hughes J P. Nonparametric tests for trend in Water quality. Water Resources Research, 1984, 20(1): 127—136
24 Xu H L, Ye M, Song Y D. The dynamic variation of water resources and its tendency in Tarim river basin. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(4): 467—474
25 王让会, 樊自立. 利用遥感和 GIS 研究塔里木河下游阿拉干地区土地沙漠化. 遥感学报, 1998, 2(2): 137—142

(2005-07-21 收稿, 2006-01-16 收修改稿)