

# 塔里木河干流水资源的形成及其利用问题\*

雷志栋 甄宝龙 尚松浩 杨诗秀 丛振涛

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

张发旺 毛晓辉 周海鹰

(新疆塔里木河流域管理局, 库尔勒 841000)

**摘要** 新疆塔里木河干流是典型的干旱区内陆河, 自身不产流, 水资源全部依靠其源流补给, 为纯耗散性河道. 采用时间序列分析方法对塔里木河干流上游三源流(阿克苏河、叶尔羌河、和田河)的年径流量动态变化进行了分析, 建立了源流区的耗水模型, 对源流区来水及耗水的增加趋势给出了定量结果. 分析了干流各测站年径流量的变化趋势, 从而粗略推算了现状条件下各站发生间歇性断流的时段. 建立了干流区耗水模型, 分析了干流上、中游各段耗水特点, 得出了各段耗水随干流来水减少而减少、因人类活动而增加的定量关系.

**关键词** 塔里木河 水资源形成 水资源利用 耗水模型 时间序列分析

新疆塔里木河(以下简称塔河)流域是我国第一大内陆河流域, 是一个封闭的内陆水循环和水均衡的水文区域, 自西向东绕塔克拉玛干大沙漠贯穿地处天山山脉南侧和昆仑山北麓的塔里木盆地(图 1). 塔河流域历史上在地域上包括塔里木盆地周边向心聚流的九大水系和塔里木河干流, 流域面积约为  $102 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括沙漠面积). 塔河干流从肖夹克至台特马湖全长 1321 km, 为纯耗散型内陆河, 自身不产流, 其水资源全部来自其源流的补给. 现今上游仅有阿克苏河、和田河和叶尔羌河三源流向干流供水, 1976 年后通过库塔干渠将孔雀河水调入塔河下游区. 塔河干流水量组成如表 1 所示.

水土资源的不合理开发利用会导致严重的生态环境问题, 国外已有先例<sup>[1]</sup>. 由于塔河源流对干流补给水量的减少, 干流上中游段无序低效的水土开发, 致使塔河干流面临着严重的生态环境问题. 尾闾湖泊罗布泊和台特马湖相继干涸, 塔里木河流程缩短 266 km, 具有战略意义的下游绿色走廊濒临毁灭, 塔里木河干流下游绿色走廊的生态环境问题已成为举世瞩目的重大生态环境问题<sup>[2]</sup>. 问题的焦点是源流区和干流区的经济社会可持续发展与生态环境保护的协调, 而其核心是水资源的合理配置及其高效利用. 研究塔河干流水资源的形成及消耗规律是非常必要的.

## 1 塔里木河源流来水、耗水及干流来水的动态趋势分析

对塔河干流年径流的形成及动态变化趋势进行分析, 重点只考虑上游阿克苏河、和田河和

2000-07-05 收稿, 2001-03-12 收修改稿

\* 国家“九五”攻关项目(96-912-02-02)和国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1999043500)资助

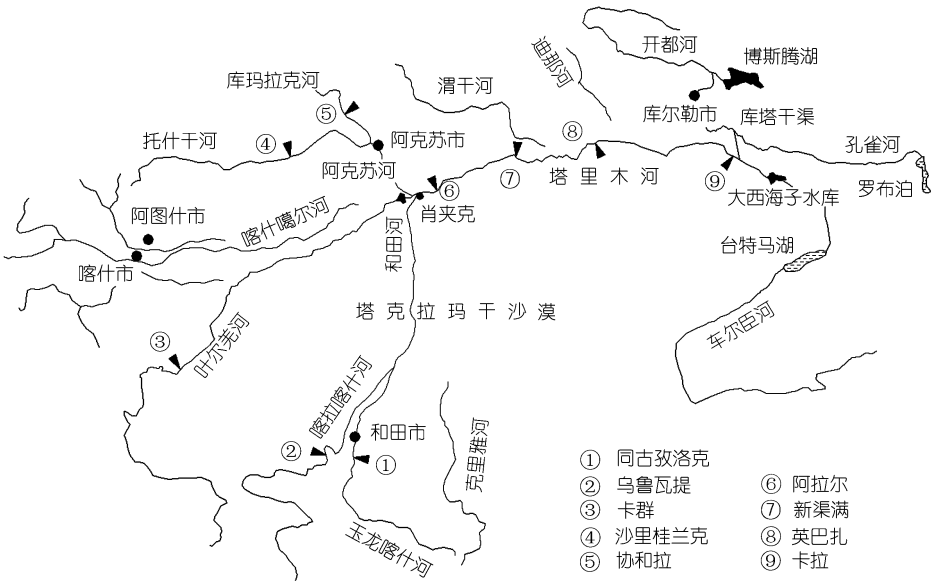


图 1 塔里木河流域示意图

表 1 塔河干流现状来水量组成(1981~1993 年)

| 水系                          | 塔里木河干流 | 水量组成  |      |       |      |
|-----------------------------|--------|-------|------|-------|------|
|                             |        | 阿克苏河  | 叶尔羌河 | 和田河   | 孔雀河  |
| 水量 $\times 10^8/\text{m}^3$ | 45.11  | 33.58 | 0.23 | 9.18  | 2.12 |
| 比例/%                        | 100    | 74.44 | 0.51 | 20.35 | 4.70 |

叶尔羌河 3 条源流, 并只涉及其主要产水支流.

各源流的产流区均在山区. 源流出山径流量部分消耗于绿洲陆面蒸发, 部分转化为穿行于荒漠地带的下游河道(叶尔羌河下游近 200 km、和田河下游 320 km)及两岸植被的生态耗水, 其余部分连同少量的农田排水汇入塔河干流, 构成干流来水量, 并最终转化为干流区农业用水和生态用水.

对源流来水的动态变化采用时间序列方法进行分析<sup>[3,4]</sup>. 由于受气象及人类活动等各种确定性和不确定性因素的影响, 河道年径流量的多年变化过程十分复杂. 采用时间序列分析中的组合模型, 将年径流系列 $\{W_t\}$ 分解为确定性的趋势项 $\{N_t\}$ 和周期项 $\{P_t\}$ 、非确定性的平稳随机成分 $\{S_t\}$ 和残差 $\{\varepsilon_t\}$ , 即

$$W_t = N_t + P_t + S_t + \varepsilon_t. \tag{1}$$

首先, 对年径流系列进行 Kendall 秩次相关趋势检验, 以检验有无显著的趋势, 并进行序列是否为线性趋势检验, 得出其趋势项 $\{N_t\}$ . 将原系列减去趋势项后, 得到的新序列 $\{W_t - N_t\}$ 进行周期性的检验识别, 并用 Fourier 级数进行拟合得其周期项 $\{P_t\}$ . 然后, 对由原系列减去趋势项和周期项的随机系列 $\{W_t - N_t - P_t\}$ 进行相依性检验后, 采用  $p$  阶自回归模型  $AR(p)$ , 得出平稳随机项 $\{S_t\}$ , 最终所剩应是随机独立的残差 $\{\varepsilon_t\}$ .

1.1 塔里木河上游三源流流入盆地年径流量的时间序列分析

对阿克苏河、叶尔羌河及和田河三源流的 5 个出山口测站(见图 1)1957~1995 年的 39 年径

流系列以及 5 个测站年径流量之和的系列进行时间序列分析，分别得到年径流的趋势项  $N(t)$ 、周期项  $P(t)$  和平稳随机项  $S(t)$ (采用  $AR(2)$ 模型). 本文重点分析年径流量的趋势变化，为简化，以下在时间序列分析中将不列出周期项与随机项的分析结果。

表 2 列出了塔河源流出山口径流量及其变化趋势(1957 年为起始年,  $t = 1$ ). 可以看出，源于天山的河流(阿克苏河支流)年径流量具有逐年增加的趋势，而源于昆仑山-喀喇昆仑山的河流其年径流多年呈平稳或不明显的递减趋势。由于径流为山区降水及冰雪融化形成，其动态变化趋势有待今后从成因上作进一步分析。

表 2 塔河源流出山口径流量及其变化趋势(1957~1995 年)

| 水系   | 河流    | 水文站   | 平均径流量 $\times 10^8/\text{m}^3$ | 趋势项 $N(t)$       | 变化趋势 | 显著性(5%) |
|------|-------|-------|--------------------------------|------------------|------|---------|
| 阿克苏河 | 库玛拉克河 | 协合拉   | 46.33                          | $42.49 + 0.192t$ | 递增   | 显著      |
|      | 托什干河  | 沙里桂兰克 | 26.34                          | $24.46 + 0.094t$ | 递增   | 显著      |
|      | 合计    |       | 72.67                          |                  |      |         |
| 叶尔羌河 | 叶尔羌河  | 卡群    | 64.65                          | $63.51 + 0.057t$ | 微递增  | 不显著     |
| 和田河  | 玉龙喀什河 | 同古孜洛克 | 22.18                          | $24.30 - 0.106t$ | 递减   | 显著      |
|      | 喀拉喀什河 | 乌鲁瓦提  | 21.54                          | $22.06 - 0.026t$ | 微递减  | 不显著     |
|      | 合计    |       | 43.72                          |                  |      |         |

对三源流五测站年径流总和进行时序分析，结果具有逐年递增的趋势，其线性趋势项为

$$N(t) = 176.77 + 0.216t. \tag{2}$$

五站的实测年径流总和及其线性趋势项如图 2 所示。

1.2 塔里木河干流年来水量的动态趋势分析

对塔河干流的上游控制站(阿拉尔站) 1957~1995 年的年径流量进行时间序列分析，结果表明塔河干流来水量有明显的递减趋势，其线性趋势项结果如下(1957 年为  $t$  的起始年):

$$N(t) = 52.37 - 0.321t. \tag{3}$$

表 3 列出每 9~10 年实测的阿拉尔年平均径流量和按(3)式线性递减趋势计算的相应年平均径流量，从 20 世纪 50~60 年代至 80~90 年代平均年来水量减少了  $8\sim 10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。如前所述，各源流山区来水量没有减少，塔河干流来水量的减少必然是由于源流区耗水量增大造成的，以下将对源流区耗水作一总体分析。

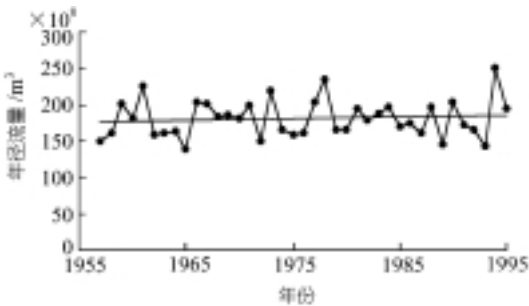


图 2 三源流五测站年径流总和系列及线性趋势

表 3 阿拉尔站 1957~1995 年各时段平均年径流量

| 时段            | 年数 | 平均年径流量 $\times 10^8/\text{m}^3$ |        |
|---------------|----|---------------------------------|--------|
|               |    | 实测                              | 线性趋势估计 |
| 1957 ~ 1965 年 | 9  | 49.27                           | 50.77  |
| 1966 ~ 1975 年 | 10 | 47.44                           | 47.72  |
| 1976 ~ 1985 年 | 10 | 45.63                           | 44.51  |
| 1986 ~ 1995 年 | 10 | 41.50                           | 41.30  |

### 1.3 源流区耗水量的分析

塔河干流上游三源流除图 1 所示 5 个主要支流外,尚有一些较小的山区支流,其水量出山口后均在源流的平原绿洲内消耗殆尽,在涉及塔河干流来水分析中,可将其忽略.以下分析中以三源流五站年径流量之和  $WRI$  近似为源流年来水量,其值与阿拉尔站年径流量  $WAL$  之差 ( $WRI - WAL$ ) 近似为源流耗水量  $WRC$ .

塔河干流阿拉尔年来水量实测值为  $WAL$ ,可由下列水量平衡方程得其计算值  $WAL^*$ :

$$WAL^* = WRI - WRC. \quad (4)$$

源流区的耗水量  $WRC$  由源流区绿洲(阿克苏、叶尔羌、和田)耗水量及叶尔羌河、和田河下游河道生态耗水组成.山区来水量大时,灌区引用水量较多,下游河道耗水量亦多,故源流区耗水量与其山区来水量  $WRI$  有关.由于源流区的社会经济发展,水土资源不断开发利用,其耗水量又是随时间增加的.因此,建立一个简化的源流区耗水量线性模型:

$$WRC = K_1 WRI + K_2 t. \quad (5)$$

由(4)和(5)式可以得到

$$WAL^* = (1 - K_1) WRI - K_2 t. \quad (6)$$

根据 1957~1995 年实测的  $WAL$  和  $WRI$  采用最小二乘法拟合,得到  $K_1 = 0.702$ ,  $K_2 = 0.396$ .故源流区年耗水量  $WRC^*$  与阿拉尔年径流量  $WAL^*$  为(1957 年为起始年)

$$WRC^* = 0.702 WRI + 0.396t, \quad (7)$$

$$WAL^* = 0.298 WRI - 0.396t. \quad (8)$$

(7)与(8)式分别为源流区年耗水量  $WRC^*$  与阿拉尔年径流量  $WAL^*$  的简化计算模型.图 3 为源流区耗水量  $WRC$  的实测值( $WRI - WAL$ )和(7)式计算值的比较,计算值与实测值吻合良好,其相对

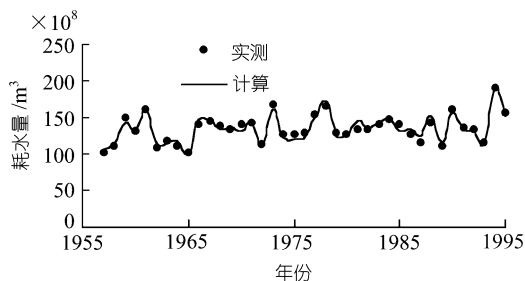


图 3 源流区耗水量实测值  $WRC$  和计算值  $WRC^*$  比较

误差绝对值为 0.04%~9.04%.根据(8)式,由源流区年径流量  $WRI$  和年序  $t$  可以推算阿拉尔站的年径流量  $WAL^*$ ,与实测值相比,其相对误差绝对值为 0.11%~31.54%,平均 9.89%.

源流区耗水量一方面随源流区的年来水量大小而变化,同时又逐年增加.综合源流区耗水量两方面因素的影响,其逐年增加的趋势将更为明显.由(2)和(7)式,可得出源流区耗水量  $WRC$  的趋势项:

$$N(t) = 0.702 (176.77 + 0.216t) + 0.396t = 124.09 + 0.548t. \quad (9)$$

上式表明,源流区耗水约每年递增  $0.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ .

## 2 塔里木河干流沿程各站年径流量动态趋势分析

塔河干流上有阿拉尔、新渠满、英巴扎和卡拉 4 个水文测站(图 1),其中阿拉尔~新渠满为塔河干流上游上段,河段长约 189 km;新渠满~英巴扎为上游下段,河段长约 258 km;英巴扎~卡拉为中游段,河段长约 398 km;卡拉以下至台特玛胡为下游段,长约 428 km.

### 2.1 塔河干流年径流量动态趋势分析

对干流四站 1957(或 1965)~1995 年的径流量进行时序分析,其变化趋势如表 4 和图 4 所示.表中趋势显著性程度均大于 1,表明塔河干流各站的年径流量都存在着明显的减少趋势,即

$N(t) = a + bt, b < 0$ , 同时愈往下游线性衰减趋势愈明显. 表中  $|b|/N(1965 \text{ 年})$  表示径流量年递减率占各站 1965 年趋势径流量的比值, 它直观地表明了以 1965 年线性趋势项的年径流量为基准, 年递减率从阿拉尔站的 0.65% 增加到卡拉站的 3.18%, 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.

表 4 塔河干流各站年径流量变化趋势<sup>a)</sup>

| 测站  | 起始( $t=1$ )<br>年份 | 年数 | 平均径流量<br>$\times 10^8/\text{m}^3$ | 趋势项 $N(t)$<br>$\times 10^8/\text{m}^3$ | 显著性程度 | $N(1965 \text{ 年})$<br>$\times 10^8/\text{m}^3$ | $ b /$<br>$N(1965 \text{ 年})$ |
|-----|-------------------|----|-----------------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------------------------------------|-------------------------------|
| 阿拉尔 | 1957              | 39 | 45.87                             | $52.37 - 0.321 t$                      | 1.01  | 49.48                                           | 0.0065                        |
| 新渠满 | 1957              | 39 | 38.12                             | $46.16 - 0.402 t$                      | 1.38  | 42.54                                           | 0.0094                        |
| 英巴扎 | 1957              | 39 | 29.73                             | $38.83 - 0.455 t$                      | 2.00  | 34.74                                           | 0.0131                        |
| 卡拉  | 1965              | 31 | 5.31                              | $10.50 - 0.324 t$                      | 3.87  | 10.18                                           | 0.0318                        |

a) 表中趋势显著性程度以  $|T|/t_{\alpha/2}$  表示, 其中  $T$  为年径流系列线性趋势检验统计量,  $t_{\alpha/2}$  是给定显著水平  $\alpha = 5\%$  下的  $t$  分布特征值.

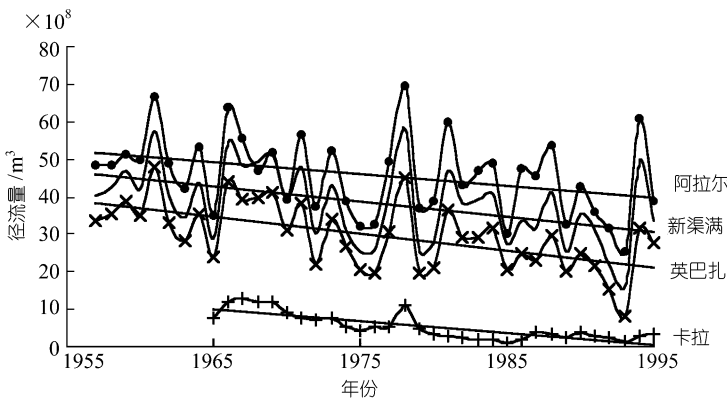


图 4 塔河干流各站年径流量  $W$  及其趋势

2.2 塔河干流间竭性河道断流的推算

由于塔河干流来水量的减少及河段耗水量的存在, 若不采取措施必然发生自干流尾间溯流而上的河道断流或干涸. 对某一河道断面而言, 年径流量一般经历逐年减少-间竭性断流-永久断流 3 个阶段. 间竭性断流, 是指大水年有径流, 中小水年无径流的不稳定状况. 塔河干流各站年径流的趋势分析是在 1957(1965)~1995 年的干流来水量及干流耗水的现状情况下得出的. 若维持现状, 由各站的趋势项可粗略推算其间歇性断流可能发生的时间. 考虑到干流各站径流量的谐波周期为 5, 10(9, 11)和 14 a, 现状条件下塔河干流发生间竭性断流时间初步推断如下: 卡拉站 2000~2020 年, 英巴扎站 2050~2070 年, 新渠满站 2075~2095 年, 阿拉尔站 2120~2140 年.

3 塔里木河干流河道耗水分析

3.1 塔河干流河道耗水概况

塔河干流的河道耗水量包括河道的蒸发、渗漏和汛期漫溢等, 主要为沿河两岸生态植被的耗水. 单位河长耗水量综合地反映了河段内河道的特征、河道输水能力、河道两侧漫溢所达地域的地形、地貌及生态植被状况. 单位河长耗水量是一可比的参数指标.

根据实测径流资料计算, 1966~1995 年各河段平均年耗水量及单位河长耗水量如表 5.

塔河干流上、中游段每年耗水近  $4 \times 10^9 \text{ m}^3$  (1966~1995 年), 每公里河段年耗水量  $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ . 单位河长平均年耗水量上游段为  $3.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 中游段为  $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 中游河段为上游河段的 1.57 倍, 从减少河段耗水而言, 中游河段应是重点治理河段.

表 5 塔河干流各段平均年耗水量及单位河长耗水量(1966~1995 年)

| 河段                                                    | 上游段     |         |         | 中游段    | 上中游段   |
|-------------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
|                                                       | 上段      | 下段      | 合计      |        |        |
|                                                       | 阿拉尔-新渠满 | 新渠满-英巴扎 | 阿拉尔-英巴扎 | 英巴扎-卡拉 | 阿拉尔-卡拉 |
| 河长/km                                                 | 189     | 258     | 447     | 398    | 845    |
| 平均年耗水量 $\times 10^8/\text{m}^3$                       | 7.85    | 8.74    | 16.59   | 23.04  | 39.63  |
| 单位河长耗水量 $\times 10^4/\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ | 415     | 339     | 371     | 579    | 469    |

3.2 塔河干流耗水量影响因素及趋势分析

3.2.1 塔河干流耗水量影响因素

塔河干流是自然耗散性河道, 近代受人类活动的影响、引水垦荒发展了部分农田, 但仍以生态植被用水为主. 影响塔河干流耗水量的主要因素有河道来水量、河道特性及人类活动.

(i) 塔河干流上中游多为宽浅型游荡性河道, 干流上游段河道比降为  $1/7500 \sim 1/3700$ , 河床下切深 2~4 m. 中游段河道比降  $1/8000 \sim 1/5500$ , 河床下切 1~3 m. 随着河道来水量的加大, 其蒸发渗漏损失加大, 特别是洪水期漫溢量加大. 因此, 河段耗水量随河道来水量的增加而加大, 由于塔河干流来水量呈递减趋势, 因此干流的耗水量也有递减的趋势.

(ii) 塔河干流来水为含沙水流, 现有测量资料表明, 阿拉尔站年输沙  $2.431 \times 10^8 \text{ t}$ , 沿河逐渐淤积, 至新渠满站年输沙  $1.870 \times 10^8 \text{ t}$  (每公里河段淤积  $2.97 \times 10^5 \text{ t}$ ), 至卡拉站含沙量已极少, 基本上为清水. 随着塔河干流来水量的减少, 水流挟沙能力降低, 将使得河道淤积抬高, 从而增大河道漫溢量. 从这方面而言, 干流耗水量有增大的趋势.

(iii) 随着人口增加及当地经济社会发展, 近 30 多年来沿河修渠、建库及开口引水发展灌溉, 人类活动造成了干流耗水量的增加.

从以上分析, 塔河干流耗水量有增大趋势的因素, 也有减少趋势的因素. 为简化并便于分析, 塔河干流某段耗水量  $WC$  与该段来水量  $WX_1$  关系可表示如下:

$$WC = k_w WX_1 + k_t t, \tag{10}$$

其中, 第 1 项表示耗水量与来水量的关系, 隐含了随来水量的递减而减少的趋势, 第 2 项是考虑耗水量的增加趋势. 上述表达方式仅是在一定来水条件及一定时段内适用, 如当河段来水  $WX_1 = 0$  或很少时,  $WC = k_t t$  显然不合理. 在采取工程及管理措施后,  $k_t t$  的趋势也会有改变.

3.2.2 根据干流各站年径流趋势建立河段耗水量与来水量关系

记阿拉尔、新渠满、英巴扎和卡拉四站年径流量分别为  $WAL$ ,  $WXQ$ ,  $WYB$  和  $WQL$ . 任一河段耗水量  $WC$  为其上断面水量  $WX_1$  与下断面水量  $WX_2$  之差, 根据(10)式有

$$WX_1 - WX_2 = k_w WX_1 + k_t t. \tag{11}$$

因此, 可由  $WX_1$  和  $WX_2$  的时间序列趋势项(表 4), 推求出该河段  $k_w$  和  $k_t$ , 其结果为(以 1965 年为起始年):

$$WC_1 = 0.138 WAL + 0.125 t \text{ (上游上段)}, \tag{12}$$

$$WC_2 = 0.181\ WXQ + 0.126\ t\ (\text{上游下段}),$$

(13)

$$WC_3 = 0.702\ WYB + 0.128\ t\ (\text{中游段}),$$

(14)

$$WC = 0.789\ WAL + 0.256\ t\ (\text{上中游段}).$$

(15)

表 6 为各河段平均年耗水量的实测值和计算值. 根据各河段耗水量, 由阿拉尔年径流量可推出新渠满、英巴扎及卡拉各站年径流量. 总体看, 计算值和实测结果符合较好, 说明用(11)式描述 1966~1995 年河段耗水量是可行的.

表 6 各河段平均年耗水量实测值与计算值(×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

| 年段          |    | 河段平均年耗水量         |      |       |       | 测站年平均水量 |         |             |                 |         |
|-------------|----|------------------|------|-------|-------|---------|---------|-------------|-----------------|---------|
|             |    | 上游上段             | 上游下段 | 中游段   | 上中游段  | 阿拉尔     | 新渠满     | 英巴扎         | 卡拉              | 卡拉      |
|             |    | (1)              | (2)  | (3)   | (4)   | (5)     | (6)     | (7)         | (8)             | (9)     |
| 1966~1975 年 | 实测 | 5.39             | 8.29 | 27.76 | 38.45 | 47.44   | 42.05   | 33.76       | 9.00            | 9.00    |
|             | 计算 | 7.36             | 8.43 | 24.92 | 39.09 |         | 40.08   | 31.65       | 6.73            | 8.35    |
| 1976~1985 年 | 实测 | 8.64             | 8.63 | 24.43 | 41.70 | 45.63   | 36.98   | 28.35       | 3.92            | 3.92    |
|             | 计算 | 8.36             | 8.77 | 23.00 | 40.23 |         | 37.27   | 28.50       | 5.50            | 5.40    |
| 1986~1995 年 | 实测 | 9.51             | 9.30 | 19.93 | 38.74 | 41.50   | 31.99   | 22.69       | 2.76            | 2.76    |
|             | 计算 | 9.04             | 9.13 | 20.91 | 39.53 |         | 32.46   | 23.33       | 2.42            | 1.97    |
| 1966~1995 年 | 实测 | 7.85             | 8.74 | 23.04 | 39.63 | 44.86   | 37.00   | 28.27       | 5.23            | 5.23    |
|             | 计算 | 8.25             | 7.78 | 22.95 | 39.61 |         | 36.60   | 27.82       | 4.87            | 5.24    |
| 备注          |    | 计算值由(12)~(15)式推算 |      |       |       |         | (5)-(1) | (5)-(1)-(2) | (5)-(1)-(2)-(3) | (5)-(4) |

3.3 塔河干流耗水量趋势及特性分析

3.3.1 塔河干流耗水量变化趋势分析

表 6 说明塔河干流耗水量上游段(上段及下段)有递增的趋势, 中游段有递减的趋势, 上中游全段趋势不明显. 塔河干流耗水既有递减趋势的因素, 也有递增趋势的因素, 最终是两种因素综合作用的结果. 只有通过两方面因素的分析, 方能对有的河段耗水量递增、有的河段递减及全河段增减趋势不明显作出解释.

由(10)式表示的河段耗水量  $WC$  中, 因来水量  $WX_1$  有递减趋势, 故  $k_w WX_1$  反映出耗水量递减, 而  $k_t t$  反映出人为和自然因素引起的耗水量的递增. 表 7 列出了 1966~1995 年的 30 年中各河段的耗水量增减趋势的分析结果, 是按(12)~(15)式估算的.

表 7 1966~1995 年各河段平均年耗水量增减趋势(×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)

| 影响因素                   | 上游上段    | 上游下段    | 中游段    | 上中游段 |
|------------------------|---------|---------|--------|------|
|                        | 阿拉尔-新渠满 | 新渠满-英巴扎 | 英巴扎-卡拉 | 合计   |
| 由于来水量递减, 平均每年耗水量的减少量   | 443     | 728     | 3194   | 4365 |
| 由于自然和人为因素, 平均每年耗水量的增加量 | 1250    | 1260    | 1880   | 4390 |
| 综合作用下平均每年耗水量的增(+)减(-)量 | +807    | +532    | -1314  | +25  |

上游两段因来水量递减而减少的耗水量小于因人为与自然原因增加的耗水量, 综合结果两河段耗水量平均年增加分别约为 8 和  $5.3 \times 10^6\ m^3$ . 中游段由于来水量减少而引起的耗水量减少量大于因人为与自然原因而增加的耗水量, 综合结果该段耗水量平均减少约  $1.3 \times 10^7\ m^3$ . 上中游合计耗水量平均每年增加约  $2.5 \times 10^5\ m^3$ , 不十分明显. 无论河段耗水量综合结果是增

加、减少或是增减不明显,干流自身人为及自然因素形成的河道耗水量(逐年递增)是不容忽视的,因此塔河干流的整治及加强用水管理势在必行。

### 3.3.2 塔河干流各段耗水特性比较分析

单位河长耗水量  $w = WC/L$  ( $L$  为河段长)是反映河道耗水量的综合性指标。现根据(12)~(15)式表示的河段耗水量  $WC$  和河段来水量  $WX$  关系,得出各河段单位河长耗水量  $w(10^8 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{a})$  表达式如下:

$$w_1 = 0.000730 \text{ WAL} + 0.000661 t \text{ (上游上段)}, \quad (16)$$

$$w_2 = 0.000702 \text{ WXQ} + 0.000488 t \text{ (上游下段)}, \quad (17)$$

$$w_3 = 0.001764 \text{ WYB} + 0.000472 t \text{ (中游段)}, \quad (18)$$

$$w = a \text{ WX} + bt \text{ (一般式)}, \quad (19)$$

式中,  $a = \partial w / \partial WX$  可称为单位河道耗水比率,表示河段来水量增加,引起的河段耗水量增加的比值。上游两段的耗水比率  $a$  比较接近,说明河道耗水特性相近。中游段的耗水比率  $a$  为上游段的 2.4~2.5 倍,表明在河段来水量(或来水量增量)相同时,中游河段的河宽及漫溢形成的水量损失较上游要严重。 $b$  反映了干流本身人为及自然因素的影响,其单位河长耗水率的逐年递增的趋势,各河段大体相近、上游上段相对为大。若考虑河道淤积对增加上游河段耗水量的影响,人为活动对河道耗水量的增加显然在中游河段的强度要比上游河段为大。从干流各段耗水特性比较分析,中游河段亦是整治的重点河段。

## 4 结论

(i) 根据 1957~1995 年的源流和干流水文资料分析,提出了塔里木河干流水资源形成的趋势特点和定量结果。从趋势变化上来看,上游三源流来水量年递增  $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,源流区耗水每年递增  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,干流上游阿拉尔来水每年递减  $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。上游源流区年来水量逐年递增的趋势对塔河干流径流的衰减起到了一定程度上的减缓作用。

(ii) 塔河干流各站的年径流量都存在着明显的减少趋势。按现状条件对干流各站发生间歇性断流的时间进行了预测,其中卡拉为 2000~2020 年,英巴扎 2050~2070 年,新渠满 2075~2095 年,阿拉尔 2120~2140 年。

(iii) 塔河干流上中游段年耗水近  $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ (1966~1995 年),每公里河长年耗水量  $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。单位河长平均年耗水量上游段  $3.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,中游段  $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,为上游河段的 1.57 倍。从减少河段耗水而言,中游河段是重点防治河段。

(iv) 塔河干流的耗水因源流来水减少而减少、因人为因素而增加。对塔河干流各段耗水的趋势进行了分析,在源流补给减少情况下,上游段有逐年增加的趋势,年增加  $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ;中游段有减少的趋势,年递减也为  $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ;上中游河段总耗水减少趋势不明显。

(v) 塔河干流上中游段人为因素造成的耗水量增加趋势不容忽视,平均每年增加耗水量  $4.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,其中中游段  $1.88 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。加强塔河干流整治及强化管理势在必行。

## 参 考 文 献

- 1 Bedford D P. International management in the Aral Sea Basin. Water International, 1996, 21(2): 63~69
- 2 毛德华, 韩德麟, 张发旺, 等. 塔里木河流域水资源、环境与管理. 北京: 中国环境科学出版社, 1998
- 3 Pandik S M, 吴宪民. 时间序列及系统分析与应用. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 4 杨应钦, 顾 岚. 时间序列分析与动态数据建模. 北京: 北京工业学院出版社, 1986