

# 利用树轮资料重建黑河近千年来 出山口径流量\*

康兴成 程国栋 康尔泗 张其花

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要** 依据黑河上游流域内获取的树木年轮样本和该河上游及出山口水文站径流资料, 利用树木年轮水文学的原理和方法, 建立了年轮年表. 年表与河流径流量的相关关系, 重建了黑河上游及出山口径流. 得出在距今 1319 a 以来, 黑河莺落峡出山口最大年径流量为  $26.74 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 最小为  $6.44 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 年际变率  $C_v = 4.17$ , 多年平均为  $15.284 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ . 特枯、偏枯水年以及平水年、特、偏丰水年出现的概率分别为 18.9%, 23.9%, 20.5%, 19.0%, 17.7%. 相对而言, 枯水年稍多一些. 持续 5 a 以上的枯水段出现过 37 次, 共 358 a, 持续最长的枯水段达 22 a; 丰水段为 38 次, 共 390 a, 最长达 39 a. 这两种现象仅占总数的一半, 另一半是 2~3 a 间的丰、枯水循环和平水期. 小周期循环是出山口径流量的主要变化方式. 同时也有较明显的中、长周期变化. 据历史文献记载中所描述张掖(原甘州)旱涝灾害与出山口年径流量的对比中, 旱灾的吻合率高达 80% 以上. 而涝灾也在 60% 以上. 从中长周期的变化趋势来看, 目前在全球气候变暖背景下, 出山口径流量正处在一个百年尺度的丰水期中. 这一结果是目前我国在利用树木年轮重建千年以上长度水文资料的首例工作. 它为黑河流域经济发展、生态环境保护以及合理利用地表水资源提供重要科学依据.

**关键词** 树木年轮 径流量 降水量 变化趋势

利用树木年轮来探讨干旱区降水历史和河流径流量变化是科学家们常用的方法之一<sup>[1~5]</sup>. 但重建的历史时间多数在 300 a 左右, 少数可达 500 a 左右. 黑河位于甘肃河西走廊中部, 是一条典型的内陆河流. 它的干流源于青海省, 到张掖的莺落峡出山. 流经的区域主要有高山冰雪冻土带, 山区森林带, 山前农田灌溉带和下游荒漠带. 山区是该河流径流的形成区. 本文利用山区森林带中树木年轮资料来重建距今 1320 a 以来该河出山口径流量, 研究流径流量的变化历史, 从而为合理开发利用水资源, 发展黑河流域经济和生态环境保护提供一些科学依据.

## 1 树轮年表的建立

图 1 给出了树木年轮样品采集点和水文、气象站点位置. 寺大隆样点位于甘肃省肃南县西水乡境内的寺大隆林场中, 约北纬  $38^\circ 36'$ , 东经  $99^\circ 52'$ , 海拔高度 3100 ~ 3500 m, 该点上共采集了 30 棵生长良好的活树, 每树从不同方向取 2 芯, 计 45 个树芯样(个别树只取了 1 芯)参与

2001-09-24 收稿, 2002-02-04 收修改稿

\* 国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 49731030)

了交叉定年; 扎马什克样点位于青海祁连县八宝乡扎马什克东沟, 约北纬  $38^{\circ}12'$ , 东经  $100^{\circ}17'$ , 海拔高度 3200~3500 m, 该点上采集了 28 棵生长良好的活树. 每树 2 芯, 共 56 芯参与交叉定年. 树种均为祁连园柏(*Sabina Prezewalskii*). 取样完全按照国际树木年轮研究所遵循的原则、技术和方法进行<sup>[6,7]</sup>. 依据树木年轮分析的程序和步骤<sup>[7]</sup>, 对树芯样本首先进行了预处理及定年, 继之用精度 0.01 mm 读数仪进行了年轮测宽, 并应用 COFECHA 计算机程序对交叉定年进行了检验. 结果见表 1. 表中 *R* 代表各序列与主序列相关系数平均值; *RT* 为树间相关系数; *MS* 为平均敏感度; *SD* 代表平均标准差; *AUP* 为样本总体代表性, *AP* 为第一主分量的解释方差; *AC* 为平均一阶自相关系数; *SR* 为样本信噪比, *WK* 为偏度, *KT* 为峰度. 将表 1 中的数据与内蒙古阴山地区的结果<sup>[8]</sup>相对照, 除敏感度系数和第一主分量解释方差偏小外, 其余参数差别不十分明显. 这一差异的存在可以说是正常的. 因为两地海拔高度有着明显的差别, 阴山地区树木样品的海拔只有 2300 m, 而祁连山中部则在 3300 m 左右. 海拔高度相差 1000 m, 其气候特点就有很大差异. 反映在年轮分析参数上稍有差别, 是正常现象.

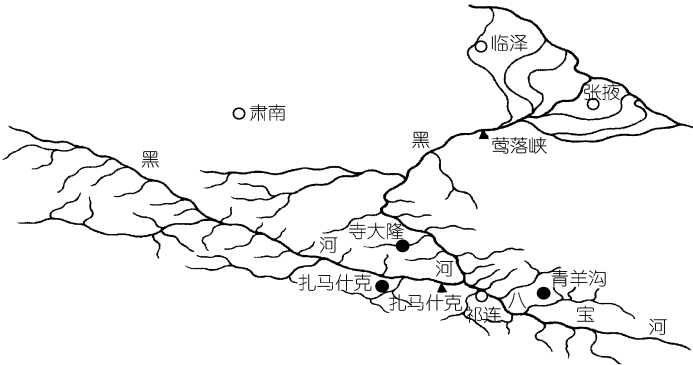


图 1 采样点及水文、气象站点位置示意图  
● 树轮样点; ▲ 水文站; ○ 气象站

表 1 采样点树轮样本序列平均统计特征

| 样 点  | 样本数 | <i>R</i> | <i>RT</i> | <i>MS</i> | <i>SD</i> | <i>AUP</i> | <i>AC</i> | <i>AP</i> / % | <i>SR</i> | <i>WK</i> | <i>KT</i> |
|------|-----|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 寺大隆  | 45  | 0.58     | 0.40      | 0.22      | 0.29      | 0.93       | 0.84      | 38.27         | 15.52     | 2.35      | 12.19     |
| 扎马什克 | 56  | 0.61     | 0.41      | 0.23      | 0.52      | 0.94       | 0.86      | 38.69         | 17.26     | 1.74      | 6.35      |

图 2 给出了寺大隆和扎马什克标准年轮年表序列以及该地区年轮年表交叉定年后的相互对照情况. 标准年轮年表序列是通过 ARSTAN 计算程序在剔除树轮生长趋势后建立的 ARS 年表. 其中, 寺大隆年表共有 30 棵树参与计算, 扎马什克年表有 28 棵树. 图中左边坐标为年轮指数值, 右边坐标为样本数. 图中青羊沟年表是取自附近地区的另一个标准年轮年表<sup>1)</sup>. 图中的 A, B, C, D, E, F 字母分别表示 3 个标准年中, 年轮宽窄变化相对较为一致的部分. 从图中可看到, 3 个年表中年轮生长的宽度, 在一些年份是一致的, 在一些年份是不同的. 这说明, 这个地区树木生长有共性, 也有个性. 共性说明在该地区气候背景一致的情况下(下面将对此有专门的讨论), 支配树木生长的基本要素是相同的. 个性说明局地气候及其他影响因素也是不可

1) 康兴成, 程国栋, 陈发虎, 等. 祁连山中部近千年来的旱涝变化

忽略的. 由此对照, 说明在这 3 个点上年表的定年是准确和合理的. 因为在 3 个独立的样点上, 各自独立经过交叉定年后, 在一些关键年份, 年轮生长的宽窄变化趋势能达到基本一致, 绝非偶然, 是这一地区树木生长的共同性. 因此, 对寺大隆年表中 1270 年以前部分, 虽然样本量较少, 但我们仍然给以了保留, 主要的理由就在于几个点年表间的相互对照, 有较好的一致性, 具有一定保留价值. 对扎马什克年表中 1420 年以前部分, 也有着同样的理由给予以了保留.

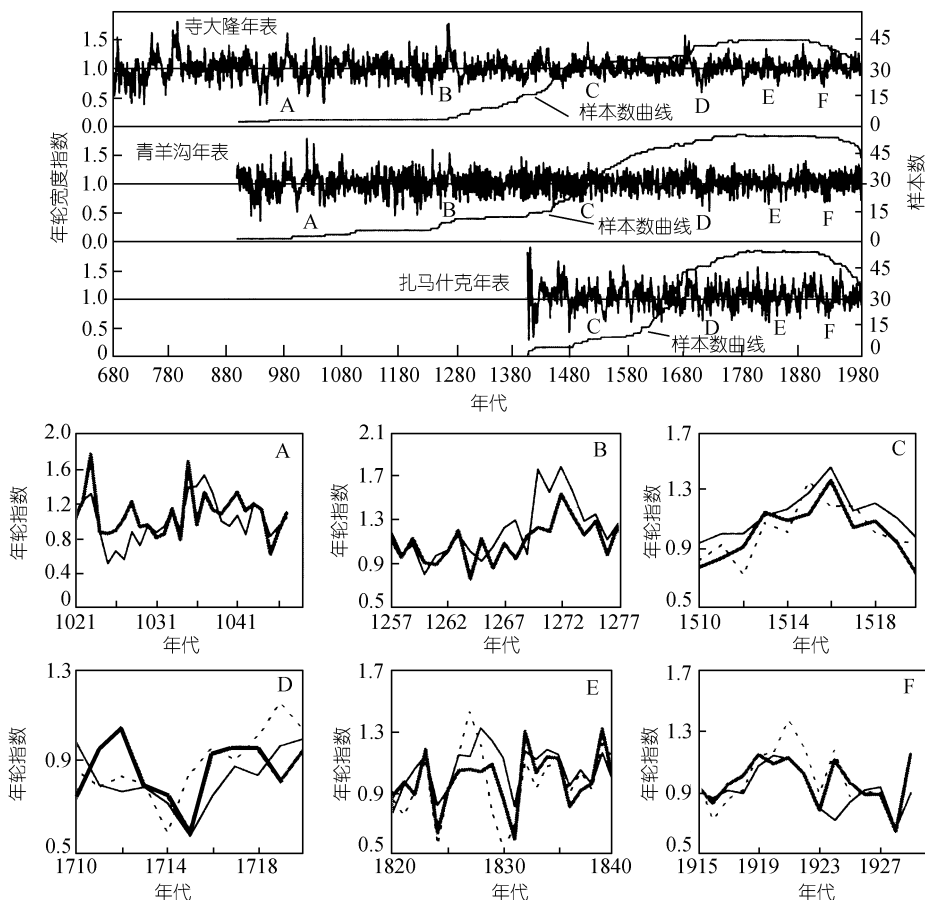


图 2 标准年年间对比

A~F 分别为不同时段 3 个年表间的对比, 细线为寺大隆年表, 粗线为青年沟年表, 点虚线为扎马什克年表

## 2 相关分析

在进行径流、降水与年表间相关统计时, 首先要考虑研究区气候上的一致性, 力求气象和水文站点与采样点同属一个流域或者一个气候区中, 而且距离越近越好, 具体位置见图 1 所示. 同时还要考虑选择水文气候资料序列长的站点以保证响应函数的稳定性. 因此, 选择了扎马什克水文站(在黑河上游山区中): 海拔高度 2780 m, 流域面积 4589 km<sup>2</sup>. 莺落峡水文站(在出山口): 海拔高度 1620 m, 流域面积 10009 km<sup>2</sup>. 祁连气象站(为山区降水的代表), 海拔高 2789 m, 张掖气象站(为出山口地区降水的代表), 海拔高度 1620 m.

表 2 给出了上述 4 站点之间的相关系数, 除了张掖降水量与扎马什克流量之间的相关性稍差外, 其余的相关系数检验均达  $\alpha = 0.05$  的信度水平. 莺落峡流量与祁连和张掖降水量之间以及祁连与张掖降水量之间的相关系数, 说明黑河出山口以上地区气候的一致性较好. 同时表明, 出山口水文站流量与降水的关系与海拔高度也有关系. 也说明黑河山区降水对出山口流量的影响程度较大. 而出山口径流量不但代表了黑河上游的水文状况, 也反映了山区降水的状况.

表 2 山区与出山口地区降水量与流量相关统计

|        | 祁连降水 | 张掖降水 | 扎马什克流量 | 莺落峡流量 |
|--------|------|------|--------|-------|
| 祁连降水   | 1    | ---- | ----   | ----  |
| 张掖降水   | 0.45 | 1    | ----   | ----  |
| 扎马什克流量 | 0.38 | 0.20 | 1      | ----  |
| 莺落峡流量  | 0.51 | 0.38 | 0.82   | 1     |

年表与流量之间的相关关系是径流量重建的关键. 图 3 给出了年表与年平均流量的单相关分析结果. 从图中的结果来看, 它们的相关性较好. 这一结果是经过单相关普查分析及相关函数分析得出的<sup>1)</sup>. 在两种相关分析过程中, 虽然发现 6~8 月平均流量与年表的关系更好一些. 但考虑到还有 4, 10, 11, 12 月份的流量与年表的关系也不错. 因此, 用平均年径流量与年轮年表建立方程来表征径流量的变化.

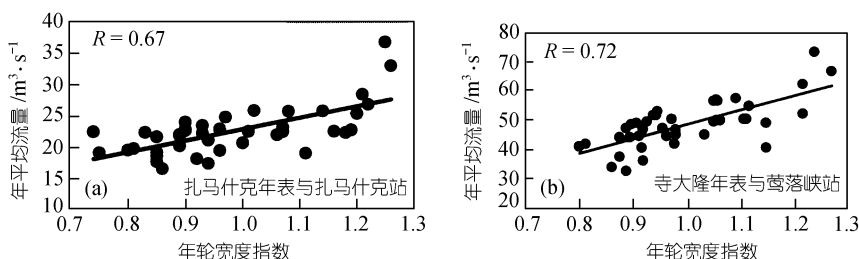


图 3 年表与径流量的相关分析

这种相关结果表明, 在一年中, 年轮生长宽时, 流量大. 而流量大是由降水量多而产生的. 降水与径流量的关系表 2 的结果已清楚的表明. 降水与树木生长的关系则是冬季的降水对土壤保墒有着良好作用; 春季降水是树木早日反青的保证; 夏季降水是树木快速生长的必须条件; 秋季降水则为树木越冬打下基础. 但各个季节不是每月都可能有效. 应该有所差别, 才是正常的现象. 我们分析的结果也说明了这一推理. 当然, 树木生长还与温度及地下水位等都有关系, 这是我们有待进一步探讨的问题. 在本文中, 我们从开始取样到最后的的结果, 都以重建径流量为主要目标, 具体作法上也参照了文献[1~4]中的一些细节.

### 3 径流量的重建

重建径流量是把树木年轮的径向生长参数, 定量地转化成历史上该流域径流量的变化. 并进行径流量的趋势分析. 一般来说, 这一过程分为 3 步: 一是寻找最佳重建时段(季节); 二

1) 康尔泗, 程国栋等主编. 中国西部干旱区水资源及出山口径流. 北京: 科学出版社 (出版中)

是建立径流与年表的回归方程及校准分析; 三是验证分析, 交叉检验所建立的回归方程。

对于最佳时段的选择, 根据相关普查分析和响应函数分析<sup>1)</sup>结果, 用年表直接重建其年径流量较为理想。因为, 直接重建其年径流量一方面可以减少由于多次回归统计而造成的计算过程中误差增大等不利因素, 还可对我们分析其年径流变化趋势带来方便。

对校准分析和验证分析, 我们所选站点的记录年代均在 40 a 以上。因此, 选择了 30 a 为校准期, 10 a 为验证期。莺落峡站 1956~1965 年为验证期, 1966~1997 年为校准期。重建流量选用的年表及回归分析结果如表 3 所示。表中  $S$  为标准差;  $R^2$  是重建变化量与实测值相关系数的平方;  $F$  为检验所有回归系数为零时的  $F$  分布值;  $P$  为在所对应的  $F$  值下小概率事件的发生概率。

表 3 重建流量选用的年表及回归结果

| 样点   | 年表    | $S$  | $R$  | $R^2$ | $F$   | $P$   |
|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 寺大隆  | SDL97 | 6.01 | 0.74 | 0.55  | 11.05 | 0.008 |
| 扎马什克 | JMS97 | 2.91 | 0.71 | 0.50  | 13.2  | 0.001 |

回归方程计算值与实测值的拟合程度较好(图 4)。其中, 计算值的平均为  $48.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , 标准差为 6.06, 而实测值的平均为  $48.14 \text{ m}^3/\text{s}$ , 标准差 7.06。拟合值与实测值 41 a 的相关系数为 0.74, 而 1956~1965 年这 10 a 的验证期, 其计算值与实测的相关系数为 0.81。计算值平均为  $48.91 \text{ m}^3/\text{s}$ , 实测值的平均为  $48.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 。所以, 用重建后的结果来表证出山口年径流的历史变化是可信的。

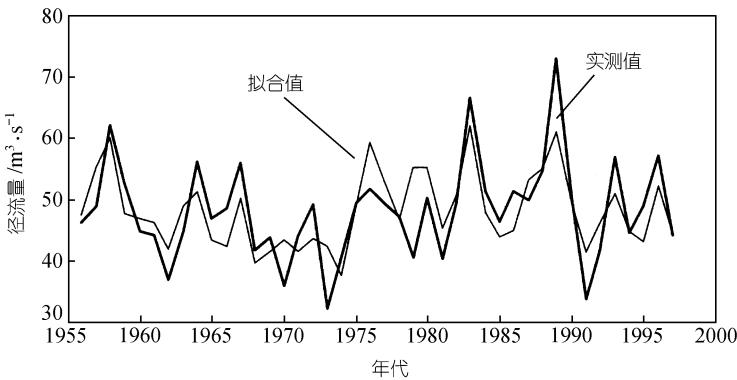


图 4 莺落峡实测流量与重建值对比

同样的方法和步骤对扎马什克站年平均流量的实测值与计算值的比较。计算值的平均为  $22.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , 标准差为 3.09, 实测值的平均为  $22.57 \text{ m}^3/\text{s}$ , 标准差 3.89。计算值与实测值 40 a 的相关系数为 0.66, 而 1957~1966 年这 10 a 的验证期, 其计算值与实测的相关系数为 0.68。计算值平均为  $22.36 \text{ m}^3/\text{s}$ , 实测值的平均为  $24.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 用重建后的结果来表证黑河上游年流量的历史变化也是可行的。

4 径流量变化周期和趋势

4.1 丰、枯水期

图 5 是重建的黑河上游及出山口地区年径流量逐年值, 按照模比系数( $K_p =$  某一年的年径

1) 见 678 页脚注

流量/多年平均径流量)来划分丰水、平水和枯水年,即:

|                     |      |
|---------------------|------|
| $K_p > 1.16$        | 特丰水年 |
| $1.16 < K_p > 1.06$ | 偏丰水年 |
| $1.06 < K_p > 0.95$ | 平水年  |
| $0.95 < K_p > 0.84$ | 偏枯水年 |
| $K_p < 0.84$        | 特枯水年 |

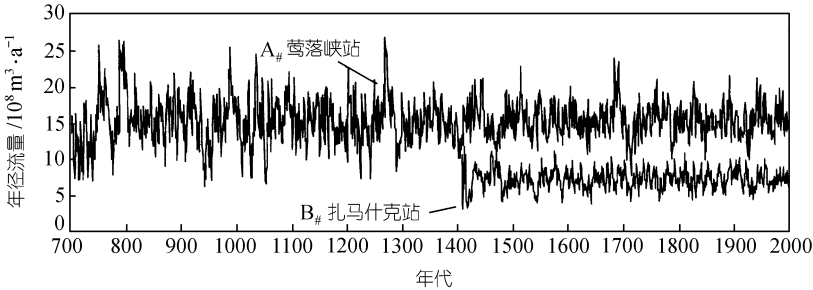


图 5 黑河上游及出山口年流量逐年变化曲线

黑河出山口年径流量重建序列的变差系数  $C_v = 4.17$ ,多年平均年径流为  $15.28 \times 10^8 \cdot \text{m}^3/\text{a}$ , 其中,最大年径流量可达  $26.7 \times 10^8 \cdot \text{m}^3/\text{a}$ , 最小为  $6.4 \times 10^8 \cdot \text{m}^3/\text{a}$ , 由此来看出山口径流量的年变幅是大的. 表 4 是莺落峡站丰水、平水、枯水年各出现的年数及所占总年数中的百分比, 其中,特丰水年与特枯水年发生的概率几乎相同, 而偏枯水年出现的概率相对较多一些. 在具体统计其丰水、平水、枯水段时,在上述标准的基础上,考虑到既然是“段”, 那这个“段”至少是连续出现偏丰水年(或者偏枯水年)在 5 a 或 5 a 以上者. 少于 5 a 在此统计中暂不作为一个“段”来计算. 同时在这里只计算丰水、枯水段, 而不统计平水段. 得到枯水段 37 次, 共 358 a, 平均每个枯水段约为 10 a, 年径流量为  $12.57 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ . 占总数的 27.14%. 最长的枯水段持续 21 a, 共有 3 次, 分别发生在 8 世纪初、10 世纪中和 14 世纪末至 15 世纪初期, 这期间的年径流量分别为  $11.27 \times 10^8$ ,  $10.98 \times 10^8$ ,  $12.87 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ . 除此之外, 长达 10 a 以上的枯水段还有 12 次; 年径流量最小的枯水段是 1051~1057 年和 938~958 年期间, 年径流量分别为  $9.64 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  和  $10.98 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ , 比历年平均年径流  $15.28 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  值要少近三分之一. 而丰水段为 38 次, 共 390 a, 平均 10 a, 年径流量为  $18.01 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ . 占总数的 29.57%. 最长的丰水段持续达 25 a, 发生在 13 世纪中后期, 这期间的平均径流为  $18.66 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ . 另外有 1 次长达 23 a 的丰水段, 发生在 8 世纪中后期. 除此之外, 长达 10 a 以上的丰水段还有 13 次之多; 年径流量最大的丰水段是 679~685 年和 790~804 年期间, 年径流量分别为  $22.85 \times 10^8$  和  $22.75 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ , 比历年平均年径流多近 150%.

表 4 莺落峡、扎马什克站丰水、枯水年出现概率

|       | 特丰水年数/百分比 | 偏丰水年数/百分比 | 平水年数/百分比  | 偏枯水年数/百分比 | 特枯水年数/百分比 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 莺落峡站  | 251/19.20 | 234/17.74 | 270/20.47 | 315/23.88 | 249/18.88 |
| 扎马什克站 | 121/20.51 | 109/18.47 | 103/17.46 | 139/23.56 | 118/20.00 |

黑河上游扎马什克水文站近 600 a 来逐年径流量重建结果(如图 5)计算得到该站年径流量的  $C_v = 3.78$ , 多年平均年径流为  $7.10 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ . 其中,最大年径流量可达  $11.68 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ , 最小

为  $3.02 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ . 因此, 该站径流量的年变幅也是很大的. 该站特丰水年和特枯水年出现的概率差别不大(表 4), 而偏枯年所占比率稍高一些. 这与出山口的丰、枯水年出现的情况相似. 这说明山区与出山口径流量的变化有着一定的相似性和同步性.

扎马什克站年径流量重建序列中, 枯水段有 18 次, 共有 179 a, 平均每段为 10 a, 平均径流量为  $5.90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 占总年数的 30.34%. 最长的枯水段为 18 a, 发生在 17 世纪中期, 这期间的平均年径流量为  $5.95 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 次长的枯水段为 17 a, 出现在 20 世纪中期. 除此之外 10 a 以上的枯水段还有 7 次; 年径流量最小的枯水段是 1416~1427 年期间, 年径流量为  $4.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ . 而丰水段 19 次, 共计 155 a, 占总年数的 26.27%, 平均每段 8 a, 平均年径流量为  $8.32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 最长的丰水段为 26 a, 出现在 19 世纪末至 20 世纪初期. 这期的年径流量为  $8.20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 次长丰水段为 16 a, 发生在 15 世纪中期. 除此之外 10 a 以上的丰水段还有 2 次; 年径流量最大是 1460~1465 年期间, 年径流量为  $9.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ .

图 6 给出了近 600 a 来黑河出山口以上两测站径流量累积距平曲线. 可看出, 黑河上游与出山口之间径流量变化趋势有相同部分, 但也有不同之处. 仔细分析相同部分居多, 不同之处较少. 如从 1515~1760 年, 这段时期两曲线的变化趋势基本一致, 而变化幅度有别; 另外是 1860 年至现今的这段时期. 它们也是变化趋势相似, 而发生的时间有别. 当然, 不同之处也很明显, 如两曲线的变化幅度及强度是不同的, 上游地区(扎马什克站)径流的变幅远大于出山口处. 这一点可能与我们前面在径流量和降水量背景分析中指出的山区中降水量的年变幅较大有关, 因为这一区域降水量变幅较大, 而汇流面积又相对较小, 使径流量的变化幅度增大, 也应是理解的. 另外所存在的不同之处是两站径流量之间峰值与谷值的相对变化趋势, 如 1410~1513 年, 扎马什克径流量为峰值, 莺落峡站径流量则为谷值. 其次还有 1760~1814 年和 1827~1858 年间. 这一原因除了两测站间汇流面积有差别外, 扎马什克站只是黑河上游的一个分支, 而莺落峡站则包含有黑河另一个分支的流量在内, 也可能是上述差别的原因.

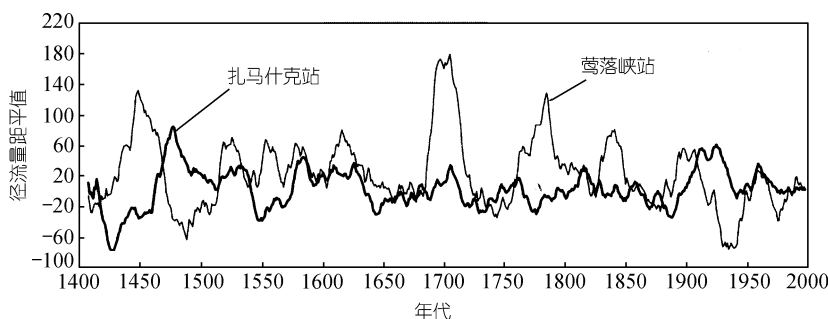


图 6 扎马什克和莺落峡站近 600 a 来径流量累积距平曲线

## 4.2 周期变化

从前面的统计分析中看到, 黑河径流量有着明显的周期性变化. 因此, 用功率谱分析莺落峡站近 1320 a 来的径流量(图 7), 从图中可看到 263, 219, 165, 131, 110 a 的长周期和 94, 82, 57, 42, 35, 28, 24, 21, 18, 15, 11, 9, 5, 3 a 的中短周期较为明显. 同样的方法对扎马什克站径流分析得出: 118, 77, 59, 45, 36, 28, 24, 21, 16, 11, 9, 5, 3 a 的周期为显著周期. 从这两个测站径流量中所得周期来看, 在中短周期方面, 有着较好的同步周期. 特别是 21 a 和 11 a 长度的周期, 与太

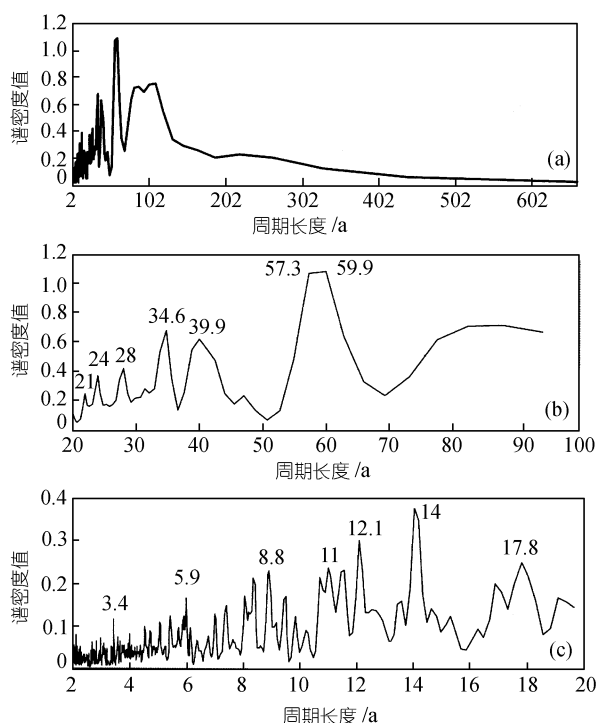


图7 莺落峡站径流量功率谱分析图  
(a) 2~660 a 段; (b) 20~100 a 段; (c) 2~20 a 段

中的旱涝变化与我们所得结果的比较情况。

据甘肃水旱灾害<sup>[10]</sup>和西北灾荒史<sup>[11]</sup>中对张掖(原名甘州)或者是河西的水、旱灾害记载,从1008~1932年间,共有52次水旱灾害记录,其中,直截记述张掖有旱灾和水灾的42次,描述“河西”地区成灾的有10次。其中,描述旱灾的有26次;描述水灾的有26次。将这些记述与我们恢复的出山口径流量逐个来对照,结果如表5所示。表中年径流量由距平值来表示,其值大表明大气降水相对多,所产径流量也多,形成水灾的可能性大;其值小,说明大气降水相对少,河流径流也小,造成旱灾的可能性大。从表中数字说明,在26次旱灾与径流距平对比中,负距平为21次,正距平为5次,即80.8%是负距平对应于旱灾;19.2%是正距平对应干旱。在26次水灾与距平值的对应中,有10次是负距平,占水灾总数的38.5%;16次为正距平,为61.5%。历史文献记载虽有一定的局限性,既不连贯,又无具体强度阐述,多数是某地“遭旱灾,民饥或贫,免税或免征粮”等,而且时多时少。但它仍是一种当时当地实际情况的反映,是一种对自然现象所造成灾害的定性概述。对河西地区来说,旱灾表明了大气降水少,河流径流的减少。水灾代表着大气降水多而河流径流量大。由此来看,历史文献记载与出山口年径流量对比反映出,两者之间存在有比较好的对应关系,尤其是旱灾,吻合程度高达80%以上。可是也有个别年份既在旱灾中有记录,同时又在水灾中有描述,如1764年和1780年。我们将这两年根据记载情况分别作了处理,前者作为水灾年,后者为旱灾年。上述的对比分析也是对年轮水文学研究结果的一种定性方面的验证。

阳黑子的周期变化相同。应是引起重视的一种周期变化。其他周期变化也在全球不同地区降水周期中有所对应<sup>[9]</sup>。

### 4.3 变化趋势

经过上面的一系列分析,我们初步了解到黑河出山口以上径流量的大体变化状况。近1320 a来该流域的变化幅度在 $(26.7\sim 6.4)\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 之间。也就是说,年径流量最大值与最小值相差可达4倍之多。从40 a来实测年径流量的变化幅度看,最大年径流量为 $22.96\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,最小为 $10.18\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,相差一倍多一些。但是,这40 a在1320 a期间,只是很小的一部分,而且这个时期又处在一个相对丰水期中。

黑河是一条内陆河,它的水源主要依靠源头的高山冰川和流域区中的大气降水。也就是说,气候变化对径流的影响是十分明显的。而径流量的变化对一个干旱频繁发生的河西地区来说,更加敏感。因此,在历史上,有很多关于旱涝的记载。现我们就来看看历史文献的记述

表 5 文献记载的水旱灾害与莺落峡年径流距平值的对比

| 旱 灾  |          |        | 水 灾  |          |        |
|------|----------|--------|------|----------|--------|
| 年代   | 文 献 记 载  | 年径流距平值 | 年代   | 文 献 记 载  | 年径流距平值 |
| 1008 | 河西夏境旱, 饥 | -2.79  | 1459 | 甘州水灾流移四出 | -0.84  |
| 1040 | 河西夏旱     | -0.94  | 1649 | 甘州水灾     | 1.16   |
| 1042 | 河西秋七月大旱  | -2.31  | 1671 | 甘州左右卫水灾  | -0.39  |
| 1143 | 河西三月、夏旱  | 1.5    | 1738 | 甘州水灾为患   | -1.39  |
| 1176 | 河西秋七月旱   | 0.16   | 1749 | 甘州遭水灾    | 1.61   |
| 1223 | 河西五月、夏大旱 | -5.12  | 1756 | 甘州水灾     | 1.75   |
| 1226 | 河西旱      | -1.67  | 1757 | 甘州水冲崩地亩  | 3.06   |
| 1288 | 甘州夏、九月旱  | -1.15  | 1758 | 甘州水灾     | 4.18   |
| 1453 | 甘州卫夏旱    | -1.24  | 1760 | 甘州水冲地亩成灾 | 2.08   |
| 1460 | 甘州卫夏旱    | -2.75  | 1761 | 甘州水冲地亩成灾 | 3.78   |
| 1478 | 甘州卫旱     | -0.54  | 1762 | 甘州水灾     | 5.67   |
| 1490 | 甘州六月旱    | 4.24   | 1764 | 甘州水冲地亩成灾 | -0.05  |
| 1505 | 甘州九月旱、饥  | -0.75  | 1766 | 甘州水冲地亩成灾 | -0.88  |
| 1506 | 甘州四月夏旱   | -2.84  | 1768 | 甘州水灾     | 0.06   |
| 1520 | 甘州旱灾     | -0.5   | 1771 | 甘州水灾民贫   | -0.23  |
| 1538 | 甘州旱灾     | -2.13  | 1774 | 甘州水冲地亩成灾 | -0.06  |
| 1544 | 甘州七月旱免税  | -1.48  | 1778 | 甘州秋雨过多成灾 | 0.04   |
| 1568 | 河西旱饥     | -1.75  | 1803 | 甘州河水涨水灾  | -1.39  |
| 1713 | 甘州夏秋荒旱   | -4.09  | 1824 | 甘州水灾     | 2.45   |
| 1763 | 甘州旱民饥    | 0.78   | 1826 | 甘州水灾     | 2.08   |
| 1765 | 河西旱灾民饥   | 1.97   | 1829 | 甘州水灾     | 4.58   |
| 1771 | 甘州旱灾     | -0.23  | 1833 | 甘州水灾     | 2.31   |
| 1777 | 河西旱灾     | -0.05  | 1844 | 甘州水灾     | -0.12  |
| 1780 | 张掖旱灾     | -0.03  | 1879 | 临泽洪水暴涨冲田 | 2.55   |
| 1845 | 张掖旱灾     | -1.19  | 1922 | 张掖水患成灾   | 0.63   |
| 1932 | 张掖大旱(春夏) | -1.94  | 1926 | 张掖水灾     | -1.9   |

如果将出山口径流量再变换一种统计方法, 以 30 a 为一个统计单元, 来看其变化趋势, 结果如图 8(a)所示。图中细线为历年平均值, 假如高于均值为丰水期, 低于均值为枯水期。由图中的曲线清楚反映出, 径流量最大值出现在 13 世纪中后期, 最小值出现在 8 世纪中期。最长的丰水期是 8 世纪中期至 10 世纪中期间, 最长的枯水期发生在 19 世纪初至 20 世纪初。小冰期以来的这段时期, 该区径流量是枯水期长于丰水期。从整体的变化趋势来看, 这 1320a 期间丰水期与枯水期大体相等。目前的变化趋势很相似于 16 世纪初的形式, 正处在一个由丰水期向枯水期的过渡时期。

另外, 从图中的曲线变化还可看出, 径流量由丰水期(或者枯水期)向枯水期(或者丰水期)

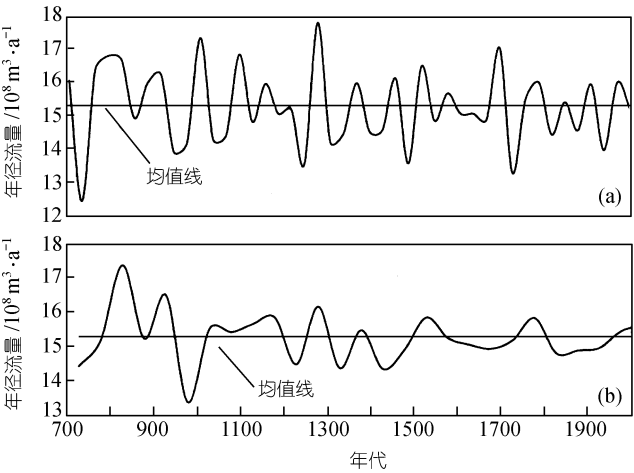


图 8 出山口径流量 30 年(a)和 50 年平(b)均变化曲线

图 8 出山口径流量 30 年(a)和 50 年平(b)均变化曲线

的转换较快,变化剧烈.

## 5 结论与讨论

黑河出山口径流量近 1320 a 来有明显的周期性变化. 有百年以上尺度的长周期, 如 263, 216, 165 和 110 a 等; 也有几十年或几年时间尺度的中短周期, 如 82, 57, 42, 34, 24, 21, 18, 11, 9, 5 和 3 a 等. 其中, 11 和 21 a 周期是与著名的太阳黑子的活动周期相一致. 24 和 35 a 的周期也是很显著的降水周期. 这些周期现象说明, 出山口径流量的变化有着一定规律可循. 而这些周期长度不同程度的在全球范围内都有所对应<sup>[9]</sup>.

近 1320 a 来黑河出山口年径流量最大为  $26.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 最小为  $6.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ .  $C_v = 4.17$ , 多年平均为  $15.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 标准差为 9.78. 从 41a 来实测径流量来看, 最大年径流量为  $22.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 最小为  $10.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,  $C_v = 2.06$ , 多年平均为  $15.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 标准差为 8.01. 这些基本数据反映出, 重建值与实测值之间, 除  $C_v$  值差异较大, 说明年际变幅相差明显外, 其余数值重建值与实测值之间差别都不明显. 就实测值的数据来说, 41 a 在 1320 a 期间, 只是很小的一部分, 而且这一部分又是处在一个相对的丰水期中. 因此, 重建序列与实测序列的  $C_v$  值相差较大.

从历史文献记载中所描述的张掖(原甘州)旱涝灾害与出山口年径流量的对比分析中可看到, 对旱灾来说, 两者的吻合率高达 80% 以上. 而涝灾也在 60% 以上. 这一结果不仅可以将历史文献中定性的旱涝记载定量化, 而且也是对我们重现出山口径流量历史变化的一种佐证.

在距今 1320 a 来, 特枯、偏枯水年以及平水年、特丰水年、偏丰水年出现的概率都有在 20% 左右, 相互之间的差别在 5% 的左右. 相对来说, 将平水年除外, 特枯水年+偏枯水年=42.78%, 而特丰水年+偏丰水年=36.76%. 明显是枯水年稍多一些. 对丰水段和枯水段出现情况来看, 枯水段出现 37 次, 枯水年 358; 而丰水段有 38 次, 丰水年 390. 显然是丰水段相对较长. 但这两种现象为 748 a, 只占总长度的 56.71%. 持续 5 a 以上的丰、枯水期仅占总数的一半稍多, 而在 2~3 a 间的丰、枯水及平水期的循环几乎将占总数的一半. 可以说, 小周期的循环是出山口径流量的主要变化方式.

从百年时间尺度来看, 图 8(b)给出了山口径流量 50 a 为一个单元的统计结果. 从图中可清楚地看到, 丰水期有 6 次(包括目前), 枯水期有 7 次(包括开始期); 11 世纪初至 12 世纪末的丰水期, 正是中世纪暖期所发生的时期<sup>[12~14]</sup>. 而 16 世纪中期至 18 世纪中期的枯水期则正好处在小冰期期间<sup>[15~17]</sup>. 目前全球气候正处在一个相对温暖期. 而出山口年径流量也呈现出一个百年尺度的丰水期. 所以, 现阶段径流量相对较大是有一定背景原因的. 上述的对应关系表明, 对冰雪融水占一定比例子的河流来说, 暖期期间温度的升高冰雪融水补给增大, 造成径流量偏大是正常的, 而冷期期间温度降低使冰雪融水补给减少, 径流偏小也属合理. 就一般来讲, 暖期期间的大气降水相对也比冷期期间的大气降水为多.

**致谢** 博士生陈拓参加了野外的取样, 硕士生汶林科进行了部分样品的读数工作. 在野外取样中, 得到了青海省祁连山林场, 甘肃省祁连山自然保护管理局, 甘肃省张掖林业局寺大隆林场领导的大力支持和协助. 在此一并表示感谢.

## 参 考 文 献

- 1 Smith P, Stockton W. Reconstructed stream flow for the salt and verde rivers from tree-ring data. *Water Resources Bulletin*, 1981, 17(6): 939~947
- 2 Meko M. Drought history in the western great plains from tree rings, International Symposium on Hydrometeorology. Washington: American Water Resources Association, 1982. 321~326
- 3 Meko M, Stockton W, Boggess W R. The tree-ring record of severe sustained drought. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(5): 789~801
- 4 Meko M, Graybill A. Tree-ring reconstruction of upper gila river discharge. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(4): 605~616
- 5 李江风, 袁玉江, 周文盛, 著. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1989. 1~192
- 6 Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago, Illinois: University of Chicago Press, 1968. 21~24.
- 7 Fritts H C. *Tree Ring and Climate*. London: Academic Press, 1976. 3~500
- 8 刘 禹, 马利民. 树轮宽度对近 376 a 呼和浩特季节降水的重建. *科学通报*, 1999, 44(18): 1986~1992
- 9 气象科技编辑部. 国外科研中关于气候变迁的各种周期. *气象科技*, 1975, (2): 42~43
- 10 甘肃水旱灾害编委会. 甘肃水旱灾害. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 59~405
- 11 袁 林, 著. 西北灾荒史. 兰州: 甘肃人民出版社, 1994. 323~951
- 12 Hughes K, Diaz F. The Medieval Warm Period [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994. 110~198
- 13 张德二. 我国“中世纪温暖期”气候的初步推断. *第四纪研究*, 1993, (1): 7~15
- 14 康兴成, 张其花, Graumlich J, 等. 青海都兰过去 2000 a 来的气候重建及其变迁. *地球科学进展*, 2000, 15(2): 215~221
- 15 姚檀栋, 谢自楚, 武筱龄, 等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. *中国科学, B 辑*, 1990, (11): 1196~1201
- 16 康兴成. 小冰期以来高原亚洲地区的气候变化. *冰川冻土*, 1996, 18(special issue): 289~295
- 17 康兴成. 祁连山历史时期气候变化探讨. *中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊*, 1992, (第七号): 54~63