

1956~2004年长江源区河川径流量的变化特征

时兴合¹, 秦宁生¹, 许维俊², 杨贵林³, 刘青春¹, 燕华云³, 汪青春¹, 冯蜀青¹

(1 青海省气候中心, 青海 西宁 810001; 2 青海省气象局, 青海 西宁 810001; 3 青海省水文水资源勘察局, 青海 西宁 810001)

摘要: 利用 1956~2004年长江源区水文和气象台站观测的流量、气温、降水资料, 用气候诊断方法分析了该地区径流量的季节和年代际变化特征以及突变特点。结果表明: 近 50 a来长江源区月平均最大、最小和雨季、年及年较差流量均呈减小的趋势, 月平均最小和最大流量分别出现在 2月和 7~8月, 20世纪 60和 80年代的单峰峰值出现在 7月, 1970年代、1990年代的单峰峰值出现在 8月, 近 14 a直门达水文站年径流共减少了 $96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。雨季平均流量的距平基本经历了一个“正-负-正-负”的历史变化过程, 雨季和过渡季节降水量、季节积雪融水量和高山冰雪融水量所形成的总流量呈下降趋势。枯季和雨季平均流量均经历了 3次明显的转折, 并具有 10~12 a 6~8 a 和 3 a的共同变化周期。

关键词: 径流量; 变化; 特征; 研究; 长江源区

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

青海省境内的长江流域包括杂多县的西部、治多县、称多县、曲玛莱县、玉树县、斑玛县及唐古拉山乡大部, 境内干流长 1 595.1 km, 流域面积 $15.85 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占三江源总面积的 43.6%。其正源水系发源于唐古拉山脉主峰各拉丹东雪山的沱沱河, 与发源于唐古拉山东段霞舍日阿巴山的当曲汇合后称通天河, 继而与发源于可可西里山的楚玛尔河汇合, 构成长江源区水系的基本布局。源区径流的补给除天然降水外, 还有冰川融水^[1]。

在青藏高原大江河径流量演变研究方面, 赖祖铭、林承坤、靳立亚、杨建平等认为, 青藏高原江河流域的年径流量自 20世纪 60年代中期以来呈现出下降趋势^[2], 径流量与降水量的关系密切, 年际径流分配均匀, 流量变化幅度在全国不同气候带的大河中属最小^[3]。通天河月平均流量具有很好的持续性, 尤其是 7~12月, 其显著落后自相关可达 4~6个月以上, 近 45 a来通天河流量经历了小-大-小

的演变过程^[4]。长江源区各拉丹东 1969~2000年冰川总面积减少了 1.7%, 而黄河源区阿尼玛卿山冰川面积减少是长江源区的 10倍^[5]。长江上游流域夏季降水量减少、年平均气温升高和蒸发增大引起的气候干旱化趋势是造成径流量减少的主要原因^[6,7]。长江源区比黄河源区寒冷而干燥, 年径流量仅为黄河源区的 60%, 丰水年与枯水年比例基本相当^[8]。直门达水文站以上长江干支流的广大集水区域, 是长江源区的重要水源涵养区, 40多年间年径流基本稳定, 但 1990年代径流量比 1980年代偏小^[9]。

在气候变化与水资源响应研究方面, 施雅风认为, 中国西北干旱区地表水资源主要孕育于 6大山系, 分为积雪、冰川、河流、湖泊 4类, 20世纪正处于气候暖干化、水资源萎缩过程中, 但全新世大暖期高湖面和其他证据指示当时水资源较现代丰富, 小冰期冰川、径流量与湖泊水量也比现代为多^[10]。谢昌

收稿日期 (Received date): 2006-09-29; 改回日期 (Accepted): 2007-05-11。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点 (40599424)和面上 (40465002)基金项目; 中国气象局气候变化专项 (CCSF2007-28)的共同资助。[Key with face on project of National Natural Science of China, No. 40599424, NO. 40465002 Climate Change Vital Item Meteorological Bureau of China, NO. CCSF2007-28]

作者简介 (Biography): 时兴合 (1963-), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 主要从事高原气候诊断和预测方面的研究。[Shi Xinghe (1963-), male, the Han nationality born in Ledu County of Qinghai, senior engineer, mainly study on climate diagnosis and forecast in the plateau. Email: shixinh@tom.com]

卫等认为,江河源区水文气象序列的变化周期基本在 22 a 16~17 a 11 a 7~8 a 5~6 a 和 2~3 a 左右的时间尺度上浮动,天体运动直接影响降水和气温的周期变化,进而在一定的下垫面条件下,影响径流的周期变化^[11,12]。47 a 来长江源区平均升温 0.61℃,径流量在 1990 年代呈现出较强的枯水期,气候变暖加剧了冰雪的消融,以冰雪融水补给为主的河流在气温升高的背景下径流量出现了较大幅度的增长^[13]。

青海高原地区 1990 年代以来的暖干化趋势,使得三江源区(黄河、长江、澜沧江均发源于青海省青南地区)冰川退缩、冻土退化、湖泊萎缩、草场退化、土地荒漠化、水土流失、生物多样性遭受破坏^[14-22],而这些生态环境问题都与水循环和水资源有关。本文利用长江直门达以上(简称长江源区,以下同)地区的水文、气象资料,着重分析不同季节河川径流的演变规律、水循环机理和对区域气候变化的响应,以为长江源区的经济建设和生态保护提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

利用长江源区(32~37°N, 87~98°E) 5 个气象台站(沱沱河、五道梁、治多、曲麻莱、玉树) 1956~2004 年的 1~12 月逐月降水、气温和 4 个水文站(沱沱河、楚玛尔、雁石平、直门达)同期的逐月流量资料(资料由青海省气候中心和水文水资源勘测局提供)。

1.2 计算方法

1.2.1 变差系数 v

计算式如下^[23]

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中 x_i 为样本第 i 年序列值, \bar{x} 为序列的多年平均值, σ 为标准差。

1.2.2 流量模比系数 Q^0

计算式为^[24]

$$Q^0 = \frac{Q_i}{Q_j} \quad (4)$$

式(4)为某时段流量 Q_i 与另一时段流量 Q_j 的比值。

1.2.3 地表蒸发量的计算

公式为^[24]

$$\text{蒸发量} = \frac{3100R}{3100 + 1.8R^2 \exp\left(\frac{-34.4T}{235 + T}\right)} \quad (5)$$

式中 R 为月降水量, T 为月平均气温。

计算冬季、雨季和过渡季节降水、气温和河川流量的历史序列,利用计算的要素时间序列,以时间为自变量,要素为因变量,建立一元回归(方程略)或 N 阶回归曲线模拟方程。计算模拟序列与原序列的相关系数、气候变化倾向率以及各年代的平均值,比较其变化的特征。用气候诊断方法分析降水和河川流量的历史演变规律和年代际变化特征,探讨河川流量对区域气候变化的响应过程。

趋势方程中, $b_1 \times 10$ 称为变化倾向率,单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 或 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot 10\text{ a})$ 、 $\text{mm}/(10\text{ a})$, b_1 值的符号反映上升或下降的变化趋势, $b_1 < 0$ 表示在计算时段内呈下降趋势, $b_1 > 0$ 表示呈上升趋势。 b_1 绝对值的大小表示其上升、下降的程度^[23]。

2 流量变化的统计事实

2.1 流量的年代际变化

文献[24]用 REOF 旋转方法将青海高原的气温和降水分为 6 个气候区域,其中长江源头雁石平、得列楚卡、沱沱河和楚玛尔河(五道梁)水文站属于同一气候区域,长江源头以下治多、曲麻莱、玉树及直门达水文站属于同一气候区域。依据长江源区不同地段水文站的主要水文特征和地理位置以及气候区域特征,将长江源头雁石平、得列楚卡、沱沱河、楚玛尔河水文站以上称为上游区,简称 1 区,雁石平、得列楚卡、沱沱河、楚玛尔河水文站以下—直门达水文站称为下游区域,简称 2 区。

表 1 是长江源区各站水文的统计特征。可以看出,1 区西源、南源、北源年平均流量分别为 7.88 m^3/s 、46.06 m^3/s 、2.35 m^3/s 2 区年平均流量为 66.26 m^3/s 1 区北源、西源、南源年平均流量分别占长江源区年平均总流量的 2%、6%、38%, 2 区年平均流量占长江源区年平均总流量的 54%。

从直门达水文站年平均流量年代际变化直方图(图 1a)可以看出,20 世纪 50~80 年代年平均流量呈波动性的上升趋势,1990 年代至 21 世纪的前 5 a 年平均流量呈下降趋势,1960~1990 年代的平均流

量分别为 $413 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $371 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $442 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $353 \text{ m}^3/\text{s}$ ，其距平基本经历了一个“正(偏丰)–负(偏枯)–正(偏丰)–负(偏枯)”的变化过程。从 10 a 尺度看，1990 年代是年平均流量的最枯时段，最丰时段是 1980 年代。以 1971~ 2000 年长江源区年平均流量的 30 a 均值为基准，地表径流 20 世纪 90 年代累计减少了 $111 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，21 世纪前 4 a 累计增加了 $12.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，近 14 a 共减少了 $98.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 1 长江源区各站水文的统计特征

Table 1 Each station statistics characteristic of the hydrology in the source regions of the Yangtze River

河名	水文站名	集水面积 (km^2)	年平均 流量 (m^3/s)	年径流量 (10^8 m^3)	离水文站最近的 气象观测站
沱沱河(西源)	沱沱河	15 924	25.04	7.88	沱沱河
尔尔曲(南源)	得列楚卡	4 166	24.63	7.76	沱沱河
布曲(南源)	雁石平	4 538	24.91	7.86	沱沱河
当曲(南源)	/	26 076	96.46	30.44	沱沱河
楚玛尔河(北源)	楚玛尔河	9 388	7.46	2.35	五道梁
通天河	直门达	158 500	388.63	122.56	玉树县

注: * 数据是依据文献^[1]的数据计算而得

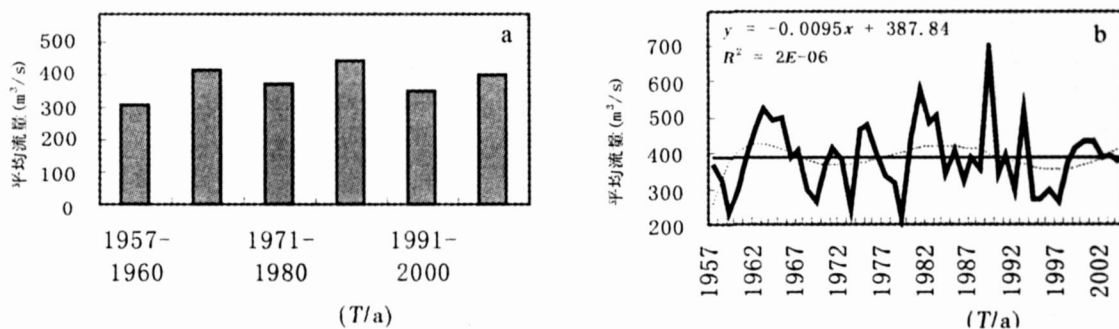


图 1 直门达水文站年平均流量年代际变化

(a) 直方图和年代际变化, (b) 曲线(虚线为曲线模拟, 直线为线性趋势, 折线为实测值, 以下同)

Fig 1 The interdecadal change histogram (a) and the interannual curve (b) of average runoff in Zhimen hydrology station(Dashed line is curve simulated, straight line is linear trend, broken line is the observed below together)

从直门达水文站年平均流量年代际变化的曲线(图 1b)可以看出, 年平均流量年际之间的振幅变换比较频繁, 偏丰与偏枯之间的转换时间较短, 最长的也只有 4~ 5 a 的时间。年平均流量持续偏丰时段出现在 20 世纪 60 年代中期和 80 年代前期, 持续偏枯时段分别出现在 1960 年代末至 1970 年代前期、1970 年代后期、1990 年代中后期, 年平均流量与雨季平均流量的年际变化趋势一致。年平均最大流量出现在 1989 年, 为 $685 \text{ m}^3/\text{s}$ 其最小出现在 1979 年, 为 $221 \text{ m}^3/\text{s}$ 最大和最小相差 3.1 倍。年平均流量的气候变化倾向率为 $-0.095 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 。

计算得出, 长江源区直门达水文站 1957~ 2004 年各年代平均流量均为单峰型(夏季峰), 其中

1960 和 1980 年代单峰峰值出现在 7 月, 平均流量分别为 $1220 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1332 \text{ m}^3/\text{s}$ 。1957~ 1960 年代、1970 年代、1990 年代和 2001~ 2004 年代单峰峰值出现在 8 月, 平均流量分别为 $821 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $944 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $891 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1086 \text{ m}^3/\text{s}$ 。长江源区直门达水文站 7、8 月平均流量与同期降水量(平均气温)的相关系数分别为 0.53、0.59(–0.06、0.22), 其中, 7、8 月平均流量与同期降水量(平均气温)的相关值通过了 0.001(没有通过 0.10)的显著性水平检验, 可以看出, 以冰川融水量和降水量为混合补给的 8 月峰值偏小, 而以降水量为主要补给的 7 月峰值偏大。

计算得出, 长江源区直门达水文站 1957~ 2004 年月平均流量的年较差呈逐步减小的趋势, 其气候

变化倾向率为 $-19.251 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 。最大年较差出现在 1965 年, 为 $2.059 \text{ m}^3 / \text{s}$ 最小出现在 1979 年, 为 $481 \text{ m}^3 / \text{s}$ 二者相差 4.28 倍。1960~1990 年代平均流量的年较差分别为 $1.306 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $948 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $1.356 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $1.007 \text{ m}^3 / \text{s}$ 也基本经历了一个“大-小-大-小”的变化过程。同时也进一步说明, 1990 年代月最大流量或洪峰值均比 1960 年代、1980 年代偏小。

2.2 流量的季节变化

2.2.1 月平均流量的变化特征

计算得出, 长江源区 1 区月平均流量, 2~8 月呈逐步上升趋势, 9 月~次年 1 月呈下降趋势, 8 月最大, 2 月最小。长江源区 2 区月平均流量, 2~7 月呈逐步上升趋势, 8 月比 7 月和 9 月小, 9 月~次年 1 月呈下降趋势, 最小出现在 2 月, 最大出现在 7 月。1 区、2 区月平均流量, 最小出现的时间一致, 最大出现时段相差一个月。最大平均流量出现时段不同的原因是由河川流量的补给源不同造成的。月平均气温, 1 区和 2 区 7 月最大、8 月次大。月降水量, 1 区 7 月最大、8 月次大, 2 区玉树县 6 月最大、7 月次大, 2 区曲麻莱和治多县 7 月最大、6 月次大。1

区是以降水和冰川融水为补给源的河流, 每年 7 月下旬和 8 月上旬长江源头冰川区的气温达到最高, 此时冰川大量融化与降水量混合形成可观的河川流量; 2 区是以降水量为主要补给源的河流, 所以和月最大降水量出现的时间一致。

从直门达水文站 1957~2004 年月平均最大 (图 2a) 和最小 (图 2b) 流量年际变化曲线可以看出, 月平均最大流量偏大 (偏小) 的次年, 月平均最小流量也偏大 (偏小), 它们之间的相关系数值为 0.64 并且通过了 0.001 的显著性水平检验。1960~1990 年代月平均流量, 最大分别为 $1.371 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $1.009 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $1.422 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $1.064 \text{ m}^3 / \text{s}$ 最小分别为 $65 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $61 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $67 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、 $56 \text{ m}^3 / \text{s}$ 最大和最小基本经历了一个“多-少-多-少”的历史变化过程。月平均最大流量的极大值出现在 1965 年, 为 $2.130 \text{ m}^3 / \text{s}$, 而其极小值出现在 1973 年, 为 $528 \text{ m}^3 / \text{s}$ 极大和极小值相差 4.04 倍。月平均最小流量的极大值出现在 1976 年, 为 $83 \text{ m}^3 / \text{s}$, 而其极小值出现在 1960 年, 为 $45 \text{ m}^3 / \text{s}$ 极大和极小值相差 1.84 倍。月平均最大和最小流量的变化倾向率分别为 $-19.942 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $-0.692 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 。

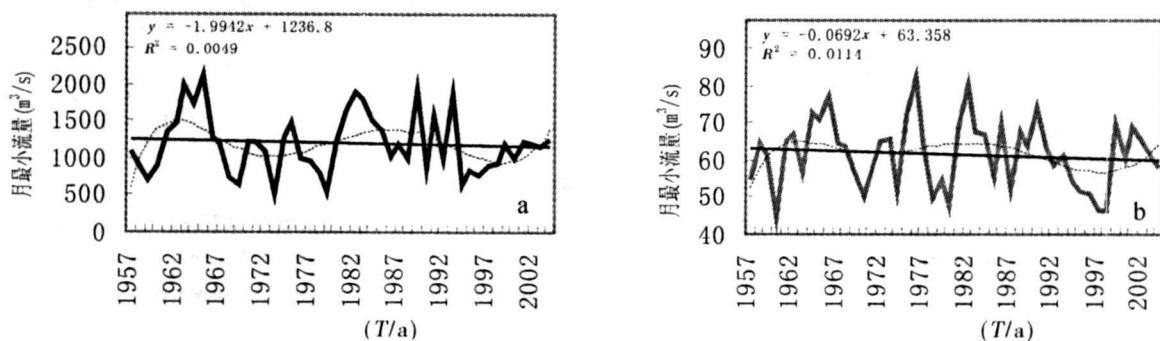


图 2 直门达水文站月平均最大 (a) 和最小 (b) 流量年际变化曲线

Fig 2 The interdecadal variation curves of themonth maximal runoff (a) and the minimal runoff (b) in Zhimen hydrology station

计算得出, 1957~2004 年直门达水文站平均流量变化的倾向率 2~6 月和 11 月为正, 1 月、7~10 月和 12 月为负。其中, 11 月、2~4 月分别为 $+0.334 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $+0.403 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $+0.801 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $+0.029 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 5~6 月分别为 $+6.983 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $+41.349 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 7~10 月分别为 $-26.440 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $-7.406 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $-10.560 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $-5.517 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 1 月和 12 月分别为 $-0.289 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $-1.068 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 减少幅度 1

月最小、7 月最大, 增加的幅度 6 月最大、4 月最小。直门达水文站月平均流量与年代的相关系数值均没有通过 0.05 的显著性水平检验。

2.2.2 各季流量的变化特征

统计长江源区不同地段 $> 0^\circ\text{C}$ 积温和雨季的开始日期和结束日期得出, 6~9 月大部地段存在明显的正积温区, 玉树 3 月上旬、沱沱河 4 月下旬少数年份存在正积温区, 五道梁 5 月、玉树 11 月少数年份存在正积温区。5 月中旬雨季从玉树县开始, 6 月中旬到达长江源头。相反, 9 月上旬长江源头地区雨

季结束, 9月下旬南撤到玉树县。4月上旬是历史上雨季出现最早的日期, 而雨季结束最晚的日期出现在 10月中旬。依据长江源区不同地段 $> 0^{\circ}\text{C}$ 积温的开始日期和结束日期、雨季开始日期和结束日期以及雁石平、得列楚卡、沱沱河、楚玛尔河、直门达水文站月际流量变化特征, 将长江源区河川流量分成 4 个季节来讨论其变化的特点, 其中, 6~ 9 月和 11 月至次年 4 月分别为雨季和枯季, 5 月和 10 月为过渡季节。

从直门达水文站枯季 (图 3a)、过渡季节 5 月 (图 3b)、雨季 (图 3c)、过渡季节 10 月 (图 3d) 平均流量年际变化曲线可以看出, 枯季平均流量, 1956~ 1960 年偏枯, 20 世纪 60~ 70 年和 2001~ 2004 年接

近多年平均值, 1980 年代偏丰, 1990 年代偏枯。过渡季节 5 月平均流量, 1980 年代偏丰, 其他年代均偏枯。雨季平均流量, 1957~ 1960 年代、1970 年代、1990 年代偏枯, 1960 年代、1980 年代和 2001~ 2004 年偏丰。过渡季节 10 月平均流量, 1957~ 1960 年代、1990 年代偏枯, 1970 年代接近多年平均值, 1960 年、1980 年代和 2001~ 2004 年偏丰。20 世纪 60~ 90 年代, 枯季和雨季平均流量的距平分别经历了“正-正-正-负”和“正-负-正-负”的历史变化过程, 过渡季节 5 月和 10 月平均流量的距平分别经历了“负-负-正-负”和“正-负-正-负”的历史变化过程。枯季、雨季和过渡季节平均流量 1980 年代偏丰、1990 年代偏枯的特征比较明显。

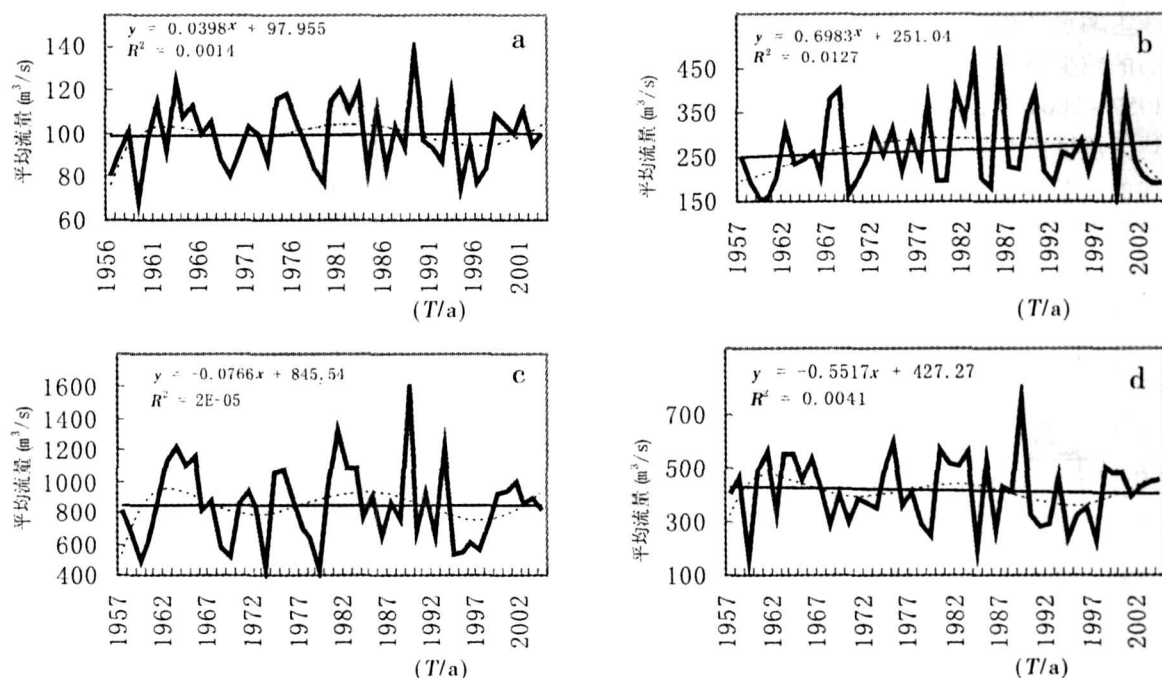


图 3 直门达水文站枯季 (a)、过渡季节 5 月 (b)、雨季 (c)、过渡季节 10 月 (d) 平均流量年际变化曲线

Fig 3 The interannual change curves of average runoff in dry season (a), in rainy season (b), in May (c) and in October (d) in Zhinenda hydrology station

计算得出, 直门达水文站枯季和过渡季节 5 月平均流量的变化倾向率均为正值, 分别为 $+ 0.398 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $+ 6.983 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 雨季、过渡季节 10 月的变化倾向率分别为 $- 0.766 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $- 5.517 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 。各季节平均流量与年代的相关系数值均没有通过 0.05 的显著性水平检验。

计算得出, 1956~ 2004 年枯季、雨季和过渡季节 5 月及 10 月均方差的变差系数分别为 0.15、

0.29、0.32、0.29。枯季变差系数最小, 过渡季节的 5 月变差系数最大。这说明枯季平均流量年际之间的波动幅度小, 比较稳定, 而雨季、过渡季节 5 月和 10 月平均流量年际之间的波动幅度大, 不稳定。0.15~ 0.32 的变差系数也说明, 长江源区的干流是以雨水、冰川融水、季节性融雪水和地下水为主要补给源的季节性河流^[25, 26]。

1957~ 2004 年直门达水文站雨季和过渡季节 (5~ 10 月) 与枯季 (11 月至翌年 4 月) 平均流量模

比系数的年际变化曲线(图 4a)呈下降趋势,这与雨季和年平均流量的变化趋势完全一致。长江源区 5~10月、11月~翌年 4月降水量(平均积雪量、平均气温和流量)的气候变化倾向率分别为 $2.481 \text{ m}/(10 \text{ a})$ 、 $1.585 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ ($-3.479 \text{ cm}/(10 \text{ a})$)、 $7.045 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $0.226 \text{ }^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、 $0.174 \text{ }^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 和 $-0.266 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 、 $0.398 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 11月至翌年 4月降水量与年代(5~10月平均气温与年代)的相关值通过了 0.05 的显著性水平检验。这说明,枯季降水量增加以及 5~10月平均气温变暖比较明显。5~10月降水量虽然有所增加,但同期气温升高,使得地表的蒸(散)发量迅速增加,消耗了地表的大量水分,使得河川的产流量下降,径流量减少。这也说明,1957 年以来,5~10月降水量、季节积雪融水量和高山冰雪融水量所形成的总流量呈微弱的减少趋势。

1957~2004 年直门达水文站 5~7 月与 8~10 月平均流量模比系数的年际变化曲线(图 4b)呈逐步增加的趋势,长江源区 5~10 月各月降水量(平均积雪量和平均气温)的气候变化倾向率分别为

1. $368 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 、2. $727 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 、-2.920 $\text{mm}/(10 \text{ a})$ 、0.475 $\text{mm}/(10 \text{ a})$ 、0.596 $\text{mm}/(10 \text{ a})$ 、0.219 $\text{mm}/(10 \text{ a})$ ($-2.950 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $-3.190 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $-0.241 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $-0.250 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $-3.244 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 、 $-4.042 \text{ cm}/(10 \text{ a})$)和 0.109 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、0.311 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、0.180 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、0.220 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、0.291 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$ 、0.244 $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$, 6月、8~9月平均气温和 6月、9月平均积雪量与年代的相关值通过了 0.05 的显著性水平检验,这说明,6月、8~9月气温变暖以及 6月、9月平均积雪量减少比较明显。1957 年以来,5~6月和 8~10月降水量、5~10月地表蒸发量(气温升高导致)呈增加的趋势,7月降水量和 5~10月平均积雪量呈减少(气候变暖液态降水相对增加、固态降水相对减少)的趋势。综合看来,5~6月降水量增加占据了优势,使得产流量增大,7~10月蒸发量增加和积雪量减少占据了优势,使得产流量减少。这也说明,春季至初夏的混合型降水量增加是 5~7 月与 8~10 月平均流量模比系数逐步增大的主要成因。

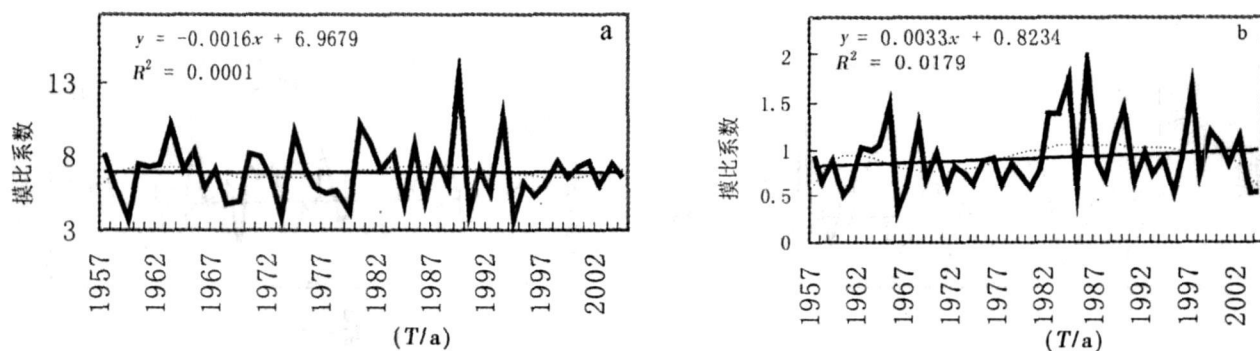


图 4 1957~2004 年直门达水文站雨季和过渡季节与枯季

(a) 5~7 月与 8~10 月, (b) 平均流量模比系数的年际变化曲线

Fig 4 The interannual change curves of the ratio of the runoff in rainy season and that in dry season

(a) the runoff from May to July and that from August to October, (b) in ZhM enda hydrology station from 1957 to 2004

2.2.3 各季流量的突变及异常分析

从 1957~2004 年直门达水文站雨季和过渡季节 10 月平均流量累计距平的年际变化曲线可看出,雨季平均流量(图 5a 粗线),1961、1981、1999 年从偏枯阶段转入偏丰阶段,1958、1968、1994 年从偏丰阶段转入偏枯阶段。过渡季节 10 月平均流量(图 5a 细线),1960、1980、1998 年从偏枯阶段转入偏丰阶段,1968、1990 年从偏丰阶段转入偏枯阶段。从 1957~2004 年直门达水文站枯季、过渡季节 5 月平

均流量累计距平的年际变化曲线可看出,枯季平均流量(图 5b,粗线),1961、1981、1998 年从偏枯阶段转入偏丰阶段,1968、1990 年从偏丰阶段转入偏枯阶段。过渡季节 5 月平均流量(图 5b 细线),1967 年从偏枯阶段转入偏丰阶段,1958、2001 年从偏丰阶段转入偏枯阶段。

利用伽玛(Gamma)分布函数,依据 5 级(流量 < 10% 为显著偏枯,流量在 10%~29% 为偏枯,流量在 30%~69% 为正常,流量在 70%~89% 为偏

丰, 流量 $\geq 90\%$ 为显著偏丰) 划分方案计算得出, 枯季 1983 年、1986 年、1998 年为地下流量显著上涌的特征年, 1959~ 1960 年为地下流量显著下渗的特征年。雨季 1989 年为地表流量的显著偏丰年, 1959 年、1973 年、1979 年为地表流量的显著偏枯年。过

渡季节的 5 月, 1989 年为地表融雪融冰水的显著偏丰年, 1959 年为地表融雪融冰水的显著偏枯年。过渡季节的 10 月, 1989 年为地表融雪融冰水及雨季滞留雨水的显著偏丰年, 1959 年为地表融雪融冰水及雨季滞留雨水的显著偏枯年。

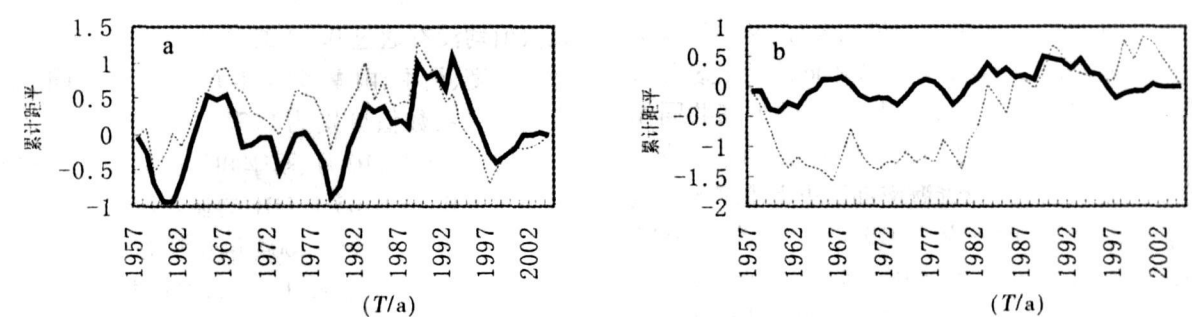


图 5 1957~ 2004 年直门达水文站雨季 (图 a 粗线)、过渡季节 10 月 (图 a 细线) 和枯季 (图 b 粗线)、过渡季节 5 月 (图 b 细线) 平均流量累计距平的年际变化曲线

Fig 5 The interannual change curves of the average accumulated runoff to themean in rainy season (the heavy line in figure a), in November (a fine line in figure a), in dry season (the heavy line in figure b), in April (the fine line in figure b) in ZhM enda hydrogy station from 1957 to 2004

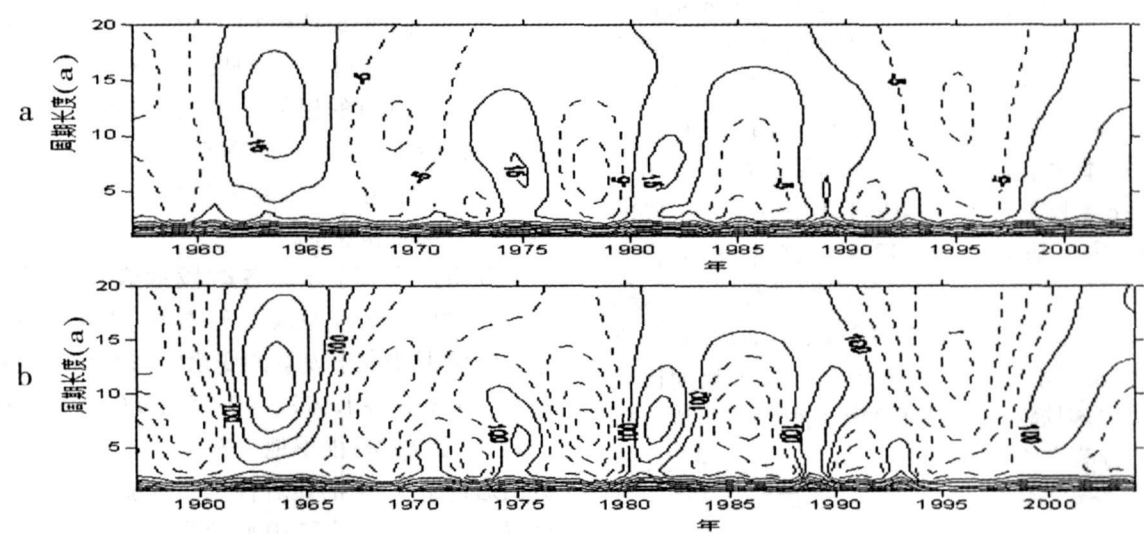


图 6 1956~ 2004 年直门达水文站枯季 (a)、雨季 (b) 平均流量的小波变换图

Fig 6 The periodic variation of average runoff in try season (a) and in rainy season (b) in Zhim enda hydrology station from 1956 to 2004

2.2.4 枯季和雨季流量的周期变化特征

图 6 给出了直门达水文站枯季和雨季平均流量的小波变换图。图中横坐标为时间参数, 纵坐标为周期长度, 等值线为小波系数^[27], 虚线是负值, 表示平均流量偏小, 实线是正值, 表示平均流量偏大。1956~ 2004 年枯季 (图 6a) 和雨季 (图 6b) 流量经历了 3 次明显的转折, 转换的进程基本相同。图 6b 中反映出在不同阶段的同一周期振荡以及同一阶段的不同周期振荡所表现出来的强弱程度是不一样的。

在 10 a 及以上相对较大的时间尺度上, 1957~ 1960 年、1968~ 1980 年、1994~ 1998 年基本上均表现为负位相, 说明雨季河川流量处于偏枯期; 而 1961~ 1967 年、1981~ 1991 年、1999~ 2004 年基本上均表现为正位相, 说明长江源区雨季流量处于偏丰期。同时, 由于小尺度振荡的伴随, 在大尺度的振荡中, 也会出现个别相对偏枯或偏丰的时段。但总体上看, 近 49 a 长江源区雨季流量枯、丰交替的特征非常明显, 经历了 5 个枯、丰交替的阶段, 其突变点为:

1961年、1968年、1981年、1994年、1999年,转换过程基本为“枯-丰”型。而在10 a以下相对较小的时间尺度上,长江源区近49 a雨季流量变化比较复杂,则增加了更多的相对枯、丰交替阶段和突变点。1957~1960年、1968~1973年、1976~1980年、1984~1987年、1994~1998年几乎在所有周期上均表现为负位相,不同周期的振荡同位相叠加,从而形成了雨季强的枯水阶段。在其他阶段不同周期上表现为不同的位相,这些不同周期不同位相的振荡共同作用时,就会出现不同程度的相互抵消,因而未形成雨季强的枯水阶段。对应青海南部历史上出现的严重大旱年:(1959年、1968年、1979年、1996年和1997年)来看,则都出现在上述雨季强的枯水阶段中。从长江源区最近几年的雨季流量变化来说,其较大尺度的周期变化处于较强的偏丰期,而较小尺度的周期变化则处于较强的偏枯期。

从图6b中还可以看出,不同的时间尺度以及不同的阶段,它的周期变化也不尽相同。对于10 a及以上相对较大的时间尺度,10~12 a和16 a左右的周期较为明显;而对于10 a以下相对较小的时间尺度,6~8 a和3 a左右的周期突出。1957~1960年雨季枯水阶段的主要周期振荡基本为16 a 1968~1980年雨季枯水阶段的主要周期振荡基本为10~12 a 6~8 a和3 a 1994~1998年雨季枯水阶段的主要周期振荡基本为10~12 a。文献[24]对青海南部降水量和冬季平均积雪的周期进行了分析,结果表明,长江源区汛期降水的3 a和6 a周期、冬季平均积雪及降水的3 a 5~6 a 11~12 a周期比较明显。林振耀等对青藏高原的平均气温进行谱分析后指出,青藏高原气温3~5 a 10 a左右的周期比较明显^[28],降水、积雪、气温的这些周期振荡于3 a左右、6~8 a 10~12 a流量的周期振荡基本对应。这说明,长江源区流量的周期振荡主要是由降水、积雪和气温的周期振荡引起的。

枯季(图6a)平均流量的小波变换图所揭示的变化规律与雨季基本相同,和雨季的最大区别在于近期10 a以下尺度的周期变化表现不一致,即近几年枯季较大尺度和较小尺度的周期变化均处于较强的偏丰期。

3 降水、气温、蒸发变化及其对流量的影响

计算得出,1959~2004年长江源区年度、枯季、

过渡季节5月和10月降水量的气候变化倾向率为正值,分别为+2.406 mm/(10 a)、+2.319 mm/(10 a)、+1.05 mm/(10 a)、+0.265 mm/(10 a);而雨季降水量的气候变化倾向率为-1.001 mm/(10 a)。枯季降水量与年代的相关系数值通过了0.001的显著性水平检验,年度、雨季、5月和10月的相关系数值均没有通过0.10的显著性水平检验。长江源区年度、枯季、雨季、5月和10月流量与同期降水量的相关系数值分别为0.75、-0.01、0.77、0.27、0.30 其中,5月、10月、雨季和年度的相关系数值分别通过了0.10、0.05、0.001的显著性水平检验。

计算得出,1959~2004年长江源区年度、枯季、雨季、过渡季节5月和10月平均气温的气候变化倾向率均为正值,分别为+0.241 °C/(10 a)、+0.239 °C/(10 a)、+0.249 °C/(10 a)、+0.127 °C/(10 a)、+0.248 °C/(10 a);其中,年度和雨季、枯季和过渡季节10月平均气温与年代的相关系数值分别通过了0.001和0.10的显著性水平检验。长江源区年度、枯季、雨季、5月和10月流量与同期平均气温的相关系数值分别为-0.04、-0.06、0.10、-0.04、0.25 其中,10月的相关系数值通过了0.10的显著性水平检验。枯季和过渡季节气温变化有利于季节性融雪、融冰,雨季气温变化有利于高山和高海拔地区冰川的融冰和融雪。

利用公式(5)计算各时段地表蒸发量得出,1959~2004年长江源区年度、枯季、雨季、过渡季节5月及10月地表蒸发量的变化倾向率均为正值,分别为+4.831、+1.972、+2.255、+0.701、+0.104 mm。年度、枯季、雨季地表蒸发量与年代的相关系数值通过了0.01的显著性水平检验。长江源区年度、枯季、雨季、5月和10月流量与同期地表蒸发量的相关系数值分别为0.18、-0.10、0.14、0.30、0.33 其中,5月、10月的相关系数值分别通过了0.05、0.01的显著性水平检验。

综合看来,降水量、气温、蒸发量对流量影响主要表现在三个方面,一是近49年来,过渡季节5月降水量和地表蒸发呈增加趋势,流量呈增加趋势,其中前期和同期降水量增加起到了关键的作用。二是过渡季节10月降水量和地表蒸发呈增加趋势,流量呈减少趋势,其中前期7~9月降水总量减少、地表蒸发量增加起到了关键的作用,即消耗了地表水资源量,使得9月底的流量基数偏小。三是雨季流量减少与其降水量减少、地表蒸发量增大有关。

4 结论

1. 长江源区河川月平均最小(大)流量出现在 2 月(7 月或 8 月),月平均最大、最小和年及年较差流量均呈减小的趋势。1960 和 1980 年代单峰峰值出现在 7 月,1970 年代、1990 年代单峰峰值出现在 8 月。地表径流与 1971~ 2000 年的均值相比,1990 年代累积减少了 $111 \times 10^8 \text{ m}^3$,21 世纪前 4 a 累积增加了 $12.76 \times 10^8 \text{ m}^3$,近 14 a 共减少了 $96.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2. 20 世纪 60~ 90 年代,雨季(枯季)流量呈减少(增加)趋势,枯季和雨季平均流量的距平分别经历了“正-正-正-负”和“正-负-正-负”的历史变化过程,枯季、雨季平均流量 1980 年代偏丰、1990 年代偏枯的特征比较明显。雨季和过渡季节降水量、季节积雪融水量和高山冰雪融水量所形成的总流量呈下降趋势。枯季平均流量的变差系数较小,为 0.15,雨季和过渡季节 5 月及 10 月平均流量的变差系数较大,分别为 0.29、0.32、0.29。

3. 1956~ 2004 年枯季和雨季平均流量均经历了 3 次明显的转折,不同的时间尺度以及不同的阶段,它的周期变化也不尽相同。对于 10 a 及以上(以下)相对较大(小)的时间尺度,10~ 12 a(6~ 8 a)和 16 a(3 a)左右的周期较为明显。在 10 a 及以上相对较大的时间尺度上,近 49 a 长江源区雨季流量枯、丰交替的特征非常明显,经历了 5 个枯、丰交替的阶段,其突变点为:1961 年、1968 年、1981 年、1994 年、1999 年,转换过程基本为“枯-丰”型。而在 10 a 以下相对较小的时间尺度上,近 49 a 长江源区雨季流量变化比较复杂,则增加了更多的相对枯、丰交替阶段和突变点。枯季平均流量变化规律与雨季基本相同。

参考文献 (References)

- [1] Chen Xiao-quan Gou Xin-jing Nature Sanctuary Ecosystem Environment of Three River Source[M]. Xining: Qinghai People Publishing Press, 2002: 90~ 103[陈孝全,苟新京.三江源自然保护区生态环境[M].西宁:青海人民出版社出版,2002: 90~ 103]
- [2] Lai Zu-ming Impact of climate variation on the runoff of large rivers in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(suppl): 314~ 320[赖祖铭.气候变化对青藏高原大江河径流的影响[J].冰川冻土,1996,18(增刊): 314~ 320]
- [3] Lin Cheng-kun Wu Xiao-ge A study on characteristics of runoff amount and its important significance at the Yangtze[J]. *Nature*

Magazine, 1999, 21(4): 200~ 205.[林承坤,吴小根.长江径流量特性及其重要意义的研究[J].自然杂志,1999,21(4): 200~ 205]

- [4] Jin Li-Ya Q in Ning-Sheng Mao Xiao-Lian. Features of runoff in the upper reaches of the Tongtian River and its climatic probability forecast in recent 45 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 10(2): 220~ 228[靳立亚,秦宁生,毛晓亮.近 45 年来长江上游通天河径流量演变特征及其气候概率预报[J].气候与环境研究,2004,10(2): 220~ 228]
- [5] Yang Jian-ping Ding Yong-jian Liu Shi-yin, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 595~ 602[杨建平,丁永建,刘时银,等.长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J].自然资源学报,2003,18(5): 595~ 602]
- [6] Li Lin Wang Zheng-yu Q in Ning-sheng et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 694~ 700[李林,王振宇,秦宁生,等.长江上游径流量变化及其影响因子关系分析[J].自然资源学报,2004,19(6): 694~ 700]
- [7] Ma Lan, Xu Xi Gao Yun et al. The vapor of water transport its and runoff relation of contrast analysis of the upper region Yangtze River in 1997~ 1998 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(4): 491~ 498[马岚,许熙,高云,等.1997、1998 年长江上游地区水汽输送及其与径流量之间关系的对比分析[J].应用气象学报,2000,11(4): 491~ 498]
- [8] Xie Chang-wei Ding Yong-jian, Lu Shi-yin et al. Comparison analysis of runoff change in the source regions of the Yangtze and yellow rivers[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 414~ 422[谢昌卫,丁永建,刘时银,等.长江—黄河源寒区径流时空变化特征对比[J].冰川冻土,2003,25(4): 414~ 422]
- [9] Wu Hui-yu Xiao-ga Changes of runoff and sediment in the source region of Yangtze river during the last four decades[J]. *Resources in the Environment of Yangtze River Valley*, 2002, 11(2): 175~ 178[吴豪,虞孝感.近四十年来长江源区河流水沙量的变化[J].长江流域资源与环境,2002,11(2): 175~ 178]
- [10] Shi Ya-feng Zhang Xiang-song Influence with future trend of climate variations to Northwest Dry Area of Earth's surface water resources[J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(9): 968~ 977[施雅风,张祥松.气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势[J].中国科学(B 辑),1995,25(9): 968~ 977]
- [11] Zhou Chen-chao Jia Shao-feng Yan Hua-yun et al. Changing trend of water resources in Qinghai Province from 1956 to 2000[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 27(3): 432~ 436[周陈超,贾绍凤,燕华云,等.近 50a 以来青海省水资源变化趋势分析[J].冰川冻土,2004,27(3): 432~ 436]
- [12] Ding Yong-jian Yang Jian-ping Liu Shi-yin et al. Exploration of eco-environment range in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 13(2): 178~ 180
- [13] Xie Chang-wei Ding Yong-jian Liu Shi-yin. Changes of weather

- and hydrological environment for the last 50 years in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 520~ 523[谢昌卫, 丁永建, 刘时银. 近 50年来长江—黄河源区气候及水文环境变化趋势分析 [J]. 生态环境, 2004, 13(4): 520~ 523]
- [14] Wu Haq, Yu X i-ge, Xu Gang. Response of glaciers in the source region of Yangtze River to global climate change [J]. *Geography and Territorial Research*, 2001, 17(4): 1~ 5[吴豪, 虞孝感, 许刚. 长江源区冰川对全球气候变化的响应 [J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(4): 1~ 5]
- [15] Li Ling, Zhu X i-de, Wang Q i-ng-chun, *et al*. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 27(3): 320~ 328[李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示 [J]. 冰川冻土, 2004, 27(3): 320~ 328]
- [16] Fan Q i-shun, Sha Zhan-jiang, Cao Guang-chao, *et al*. A sssessment of the influence of glacial resources on climatic changes in Qinghai Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2005, 19(5): 56~ 60[樊启顺, 沙占江, 曹广超, 等. 气候变化对青海高原冰川资源的影响评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 56~ 60]
- [17] Yang Jian-ping, Ding Yong-jian, Chen Ren-sheng, *et al*. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(3): 278~ 285[杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 278~ 285]
- [18] Wang Gen-xu, Ding Yong-jian, Wang Jian, *et al*. Land ecological changes and evolutional patterns in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 19(5): 56~ 60[王根绪, 丁永建, 王建, 等. 近 15年来长江黄河源区的土地覆被变化 [J]. 地理学报, 2004, 59(2): 163~ 173]
- [19] Pan Jing-hu, Liu Ju-ling, Wang Jian. RS/ GIS-based study on the dynamic land use change in the source areas of the Yangtze River and Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 14(3): 310~ 315[潘竟虎, 刘菊玲, 王建. 基于遥感与 GIS 江河土地利动态变化研究 [J]. 干旱区地理, 2004, 14(3): 310~ 315]
- [20] Wang Wei-yue. Construction and protection of eco-environment in the origin region of the Yangtze River [J]. *Bulletin of soil and water conservation*, 1998, 18(S1): 20~ 27[王维岳. 长江源区的生态建设 与保护 [J]. 水土保持通报, 1998, 18(S1): 20~ 27]
- [21] Yan Shui-yu, Zhao X i-feng, Wan G Shao-ling. A preliminary study on desertification in source region of Yangtze river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1996, 4(4): 411~ 415[阎水玉, 赵秀峰, 王绍令. 长江源区沙化现象初步探讨 [J]. 长江流域资源与环境, 1996, 4(4): 411~ 415]
- [22] Wu Haq, Hu X i-ge. Ecological environment in the nature preserve of the source region of Yangtze River with the delineation of its ecological functioning zones [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(3): 252~ 257[吴豪, 虞孝感. 长江源自然保护区生态环境状况及功能区划分 [J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(3): 252~ 257]
- [23] Li Dongliang, Guo Hui, Wang Wen, *et al*. Effects of sunspot cycle length and CO₂ on air temperature along Qinghai-Xizang railway and air temperature trend prediction [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47 (suppl): 131~ 141
- [24] Wang Jiang-shan, Li X i-fu. Weather and climate of Qinghai [M]. Beijing: Meteorological Press, 2004, 300~ 315[王江山, 李锡富. 青海天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2004, 300~ 315]
- [25] Shi Ya-feng. Impacts extraordinary climate on water resources of the West-North and of China [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1995, 127~ 141[施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响 [M]. 济南: 山东科学出版社, 1995, 127~ 141]
- [26] Wang Gen-xu, Li Qi, Cheng Guo-dong, *et al*. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 346~ 351[王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40年来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应 [J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 346~ 351]
- [27] Wang Xi-jian, Tang Hong-yu, Zhan Jing-hua. The evolution characteristics and wavelet analysis of spring precipitation in the east of Qinghai in recent 40 years [J]. *Meteorological*, 2006, 32(5): 41~ 45[王希娟, 唐红玉, 张景华. 近 40年青海东部春季降水变化特征及小波分析 [J]. 气象, 2006, 32(5): 41~ 45]
- [28] Tang Ma-cang, Cheng Guo-dong, Lin Zheng-yao. Contemporary Climatic Variations over Qinghai-Xizang Plateau and Their Influences on Environments [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998, 140~ 150[汤懋仓, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化研究及对环境的影响 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1998, 140~ 150]

The Variations Characteristic of the Runoff in the Source Regions of the Yangtze River from 1956 to 2004

SHI Xinghe¹, QIN Ningsheng¹, XU Weijun², YANG Guiling³, LU Qingchun¹,
YAN Huayun³, WANG Qingchun¹, FENG Shuqing¹

(1. Climate Center of Qinghai Province, Xining 810001, China; 2. The Meteorological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China;

3. Hydrology and Water Resource Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract Using the material of hydrology in the Source Regions of the Yangtze River and the runoff, the temperature, and the precipitation observed in meteorological stations from 1956 to 2004, the intermonthly and interdecadal evolution characteristics of the runoff and the sudden change characteristic in the area are analyzed by the climatic diagnosis method. The result indicates that for the recent 50 years the monthly mean maximum runoff with the minimum runoff and the runoff in rainy season, years with range of years runoff appears the reduce (or drop) tendency. The monthly mean maximum runoff and the minimum runoff respectively have appeared in February and July to August; the monthly mean runoff in 1960s and 1980s single peak value have appeared in July, in 1970s and 1990s single peak value have appeared in August, and from 1991 to 2004 the runoff accumulations for the 14 years reduced 9.6 billion m³. The runoff anomaly in rainy season has basically experienced the historical change process of " positive-negative-positive-negative ", and in rainy season and in the transition season the total quantity of the precipitation, the total runoff of the formation season snow melt water amount and the ice-snow melt water amount on the mountains appears the drop tendency. The runoff in dry season and that in rainy season have experienced obvious transition for 3 times respectively. The runoff in dry season and that in rainy season have remarkable cycles for 10~ 12 years, 6~ 8 years and 3 years.

Key words runoff variations characteristic research, the source regions of the Yangtze River