

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

靳立亚¹ 秦宁生² 毛晓亮^{1*}

1 兰州大学资源环境学院甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2 青海省气候资料中心, 西宁 810001

摘要 利用长江上游通天河流域直门达水文站 1957~2001 年各月平均径流量资料, 对长江水系通天河的径流量变化规律及与气候要素的关系进行了分析。结果表明, 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 年来, 通天河流量经历了小一大一小的演变过程, 期间出现过径流量的多次转折, 其中 1967 年由大变小, 径流量持续减小直到 1979 年, 长达 11 年; 1979 年径流量由小变大, 直到 1989 年达到历史 (有记录以来) 最大值, 持续时间长达 10 年; 1990 年代径流量持续减小; 从 1998 年开始, 径流量又开始表现出增大趋势; 年径流量表现出较明显的准 2 年短周期和 7.5 及 12.3 年的长周期变化; 年平均径流量与同期 6~9 月降水存在显著的正相关关系, 与气温关系不显著。对径流量丰枯划分的标准不同, 进行径流量转移概率的预报结果也不同。

关键词 通天河 径流量 气候概率预报

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0220-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Features of Runoff in the Upper Reaches of the Tongtian River and Its Climatic Probability Forecast in Recent 45 Years

JIN Li-Ya¹, QIN Ning-Sheng², MAO Xiao-Liang¹

1 *Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

2 *Climate Data Center of Qinghai, Xining 810001*

Abstract A diagnostic analysis has been performed to investigate the features of runoff in the upper reaches of the Tongtian River and its relationship with climate changes in recent 50 years by using the data of monthly mean runoff of Zhimenda hydrometric station from 1957 to 2001. It is shown that there is a good persistence for months from August to December respectively, their significant lag correlations can last more than half a year. In recent 50 years, the runoff in the Tongtian River underwent a low-high-low process, during which there were several obvious abrupt transformations of runoff. There are two continuous decrease phases of annual runoff in the periods of 1967 to 1979 and the 1990s respectively. It is an increasing phase of annual runoff from 1979 to 1989. From 1998 on wards, it appears to be an increase trend. The annual runoff in the Tongtian River has obvious periodicities of quasi-2, 7.5 and 12.3 years. Precipitation over the Tibetan Plateau in summer and autumn have obviously contribution to runoff at the same season and lag half year, while air temperature has less impact on runoff. The result of probability forecast

收稿日期 2004-04-19 收到, 2005-04-18 收到修定稿

资助项目 科技部社会公益专项基金项目 2001DIB10085 和国家自然科学基金资助项目 40275022

作者简介 靳立亚, 男, 1964 出生, 硕士, 副教授, 主要从事西北干旱区气候环境变化研究。E-mail: jinly@lzu.edu.cn

* 现为中国科学院地球环境研究所攻读硕士学位研究生

is different if the criterions of the high-low flow year of the river are different.

Key words Tongtian River, runoff, climatic probability forecast

1 引言

长江发源于中国青藏高原群峦叠嶂的唐古拉山主峰—格拉丹东雪峰西南侧的冰川。长江自沱沱河开始，经青海、西藏、四川、云南、湖北、湖南、江西、安徽、江苏和上海 10 个省、自治区、直辖市，注入东海，全长 6 300 km，是一条名符其实的“长河”，为世界第三大河。长江在青海境内自楚玛尔河、沱沱河、尕尔曲、布曲、当曲五河汇合成一股后，称为通天河。通天河处于长江上游，其径流来源主要有三：一是自然降水；二是冰雪消融；三是地下水补给。研究长江上游地区的河流径流量时变特征及其与周围气候、环境变化的关系对研究青藏高原气候变化具有一定的参考价值。近年来，不少学者对黄河上游径流量的演变特征及其成因做了很多研究^[1,2]，发现黄河上游径流量可以作为旱涝特征量来反映西北地区干旱气候的变化；并且黄河上游径流量变化与青藏高原热力作用及大气环流特征密切相关。同样发源于青藏高原的长江，由于其上游水文、气象资料相对短缺，过去研究工作较少。近年来，

随着长江源区气候资料的不断完善，陆续开展了不少研究，包括长江源区通天河流域水文特征的分析^[3]、长江源区河流水沙量的变化^[4]以及长江源区冰川对全球变化的响应^[5]等。这些研究对深入认识该区域水文气象和气候环境变化提供了基础。本文从气候学的角度，对长江水系通天河的直门达水文站径流演变规律及其与气候要素变化之间的关系做了初步研究，这对通天河径流的短期气候预测是有一定意义的。

2 资料与方法

本文所用资料为长江水系通天河流域（图 1）直门达水文站 1957~2001 年历年各月径流量和直门达上游流域多个气象站（曲麻莱、治多、扎多、玉树）1959~2000 年历年各月降水量、月平均气温、0 cm 地面温度等资料。用计算落后自相关系数分析时间序列的持续性；用距平百分率划分径流丰、枯级别；用波谱分析方法求取流量序列随时间演变的周期性；用主值函数分析径流序列随时间演变的趋势。

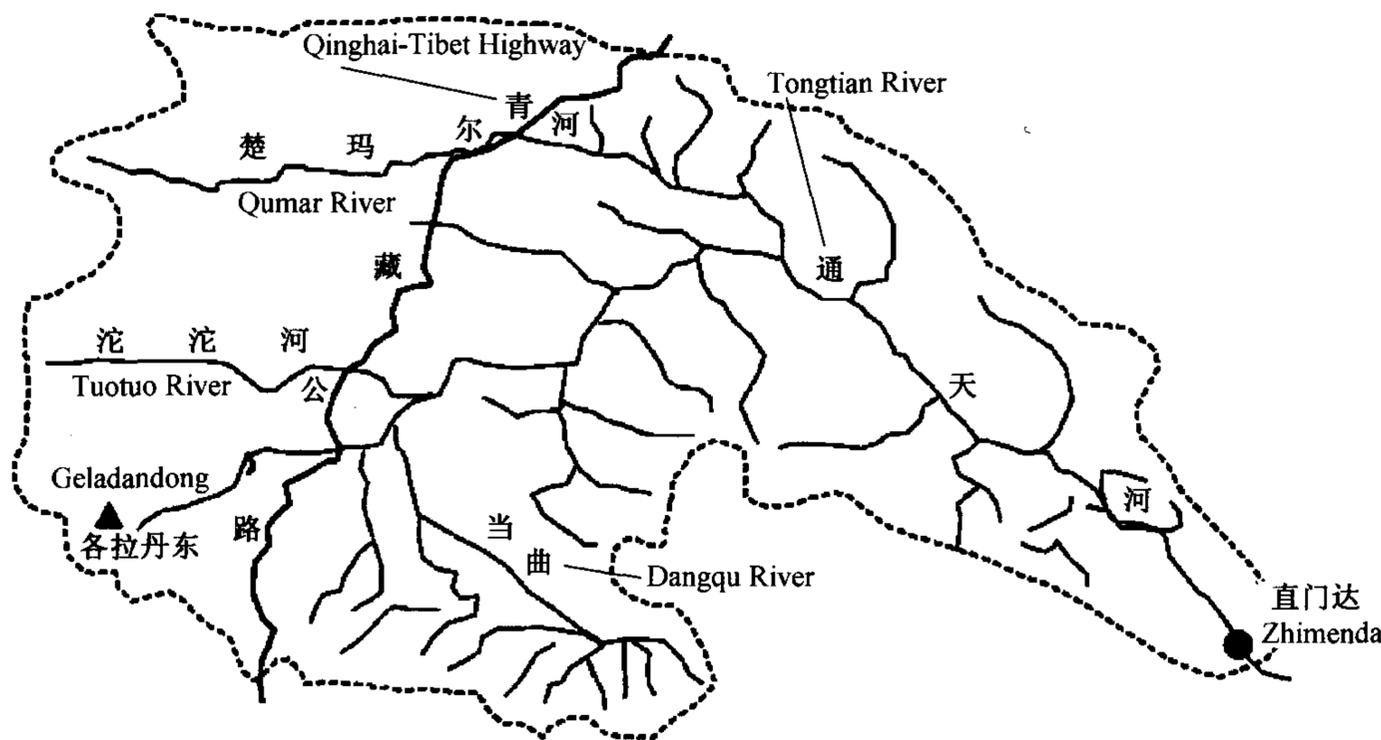


图 1 长江源头地区水系及直门达水文站位置示意图^[3]

Fig. 1 River system at the upper reaches of Changjiang River and location of Zhimenda hydrological station

3 长江水系通天河径流量的基本气候特征

3.1 持续性

用直门达水文站 1957~2001 年月平均径流量资料,分别计算了后延 1~11 个月的滞后自相关系数(表 1)。从计算结果看,3~5 月份径流量仅持续 1 个月;6 月份径流量表现出隔季相关的特点;而 7 月份径流量与当年 9 月至第二年 3 月径流量相关较明显。8 月份径流量持续相关达 7 个月;9~10 月份通天河秋季径流则最长可达 10 个月的持续性;11~12 月份径流量持续性可达 4 个月以上。总的来说,通天河径流量 7~12 月份的持续性比 1~5 月份好。

由于青藏高原不同于我国东部平原地区的独特气候特点,汤懋苍等^[6]将 10 月中旬至第 2 年 7 月初划分为高原地区的冬、春季节,而将 7 月初至 10 月中旬划分为夏、秋、前冬季节,同时指出高原主体“常年无夏、春秋相连”。参照高原地区这样的季节划分标准,我们用 6~9 月作为春秋季节(无夏)、10~5 月作为冬季。由表 1 结果可知,通天河春秋(6~9 月)和前冬(10~12 月)径流量比较稳定。这与春秋季节(6~9 月)是通天河流域主要降水时段有关;也与该时段高原区冰雪消融最多给通天河径流带来补给有关;而后冬(1~5 月)径流量的异常与该时段内降水量的偏差及

与中国西部降水资源的不稳定性^[7]有关。

3.2 年际变化

图 2 给出通天河直门达水文站年平均径流量距平及其二阶主值函数所表示的抛物线趋势(图 2a)

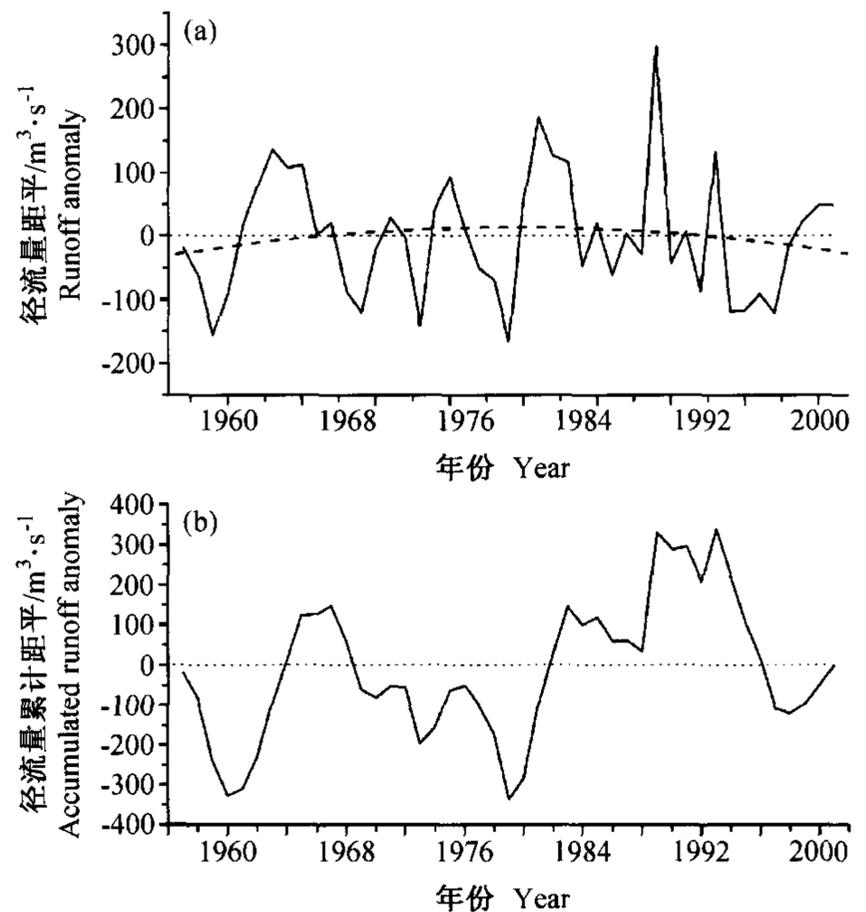


图 2 直门达水文站年平均径流量距平。(a) 径流量距平(实线)和二阶主值函数(虚线);(b) 径流量累积距平

Fig. 2 Curves of the anomalous mean annual runoff at Zhimenda hydrological station. (a) anomalous mean annual runoff (solid line) and its second order polynomial fit (dashed line); (b) accumulated anomalous mean annual runoff

表 1 直门达径流量自相关系数 ($\times 10^{-3}$)

Table 1 Autocorrelation coefficients of the runoff of Zhimenda ($\times 10^{-3}$)

滞后步长 Lag step	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	942	921	377	291	374	555	293	431	736	916	836	916
2	881	279	228	8	190	217	383	454	716	807	844	871
3	296	115	220	4	-35	285	484	562	764	805	842	852
4	218	285	171	-78	95	419	563	617	765	791	768	304
5	280	172	-85	-33	91	512	657	589	660	703	291	295
6	229	-96	0	-96	184	553	657	520	665	375	300	363
7	-136	-51	-25	-57	218	529	596	444	292	385	406	379
8	-8	-36	95	-50	213	550	583	272	473	432	369	-142
9	-44	86	109	-72	273	548	272	070	304	349	-37	72
10	84	74	48	-130	387	103	139	211	318	-54	-15	43
11	124	24	80	-168	93	231	181	198	-117	-43	-14	148

注: 0.01 显著性相关标准 $R=296 \times 10^{-3}$

Note: Correlation ($R=296 \times 10^{-3}$) is significant at the 0.01 level

和其累积距平曲线 (图 2b)。二阶主值函数可粗略地反映出近 45 年通天河径流量的总体倾向, 即低-高-低的变化趋势。累积距平曲线则反映了通天河径流量的年际变化特征及突变点。从 45 年的平均值来看, 1950 年代后期~1960 年代初, 径流量总体偏小。从 1960 初~60 年代中期, 径流量有所增大; 从 1960 年代中期以后直到 1970 年代末径流量呈波动下降趋势, 1979 年达到历史 (有记录以来) 最小值。从 20 世纪 70 年代末、80 年代初径流量开始增长, 1989 年达到历史最大值, 这种趋势一直保持到 20 世纪 90 年代初。进入 20 世纪 90 年代以后流量呈下降趋势。

进一步分析径流量累积距平图 (图 2b), 可以看到径流量的几次明显转折, 第 1 次在 1960 年, 由小转大; 第 2 次在 1967 年, 由多变少。这次转折后, 径流量持续减小直到 1979 年, 长达 11 年; 第 3 次转折发生在 1979 年, 径流量由小变大, 这一阶段径流量明显为正距平, 直到 1989 年达到历史最大值, 持续时间长达 10 年; 第 4 次转折发生在 1993 年, 径流量开始减小, 这种变化持续到 1998 年; 第 5 次转折从 1998 年开始, 径流量又开始表现出增大趋势。

3.3 季节变化

图 3 为直门达多年 (1957~2001 年) 月平均径流量逐月变化。从图 3 可以看出, 直门达径流量的枯水期在 1~3 月, 其中月平均最小径流量出现在 2 月, 丰水期在 7~9 月, 其中月平均最大径流量在 7 月, 径流量的逐月变化呈单峰型。

为了解近 45 年来季平均径流量年际变化的稳定性, 把直门达的径流量分为两个时段: 1957~

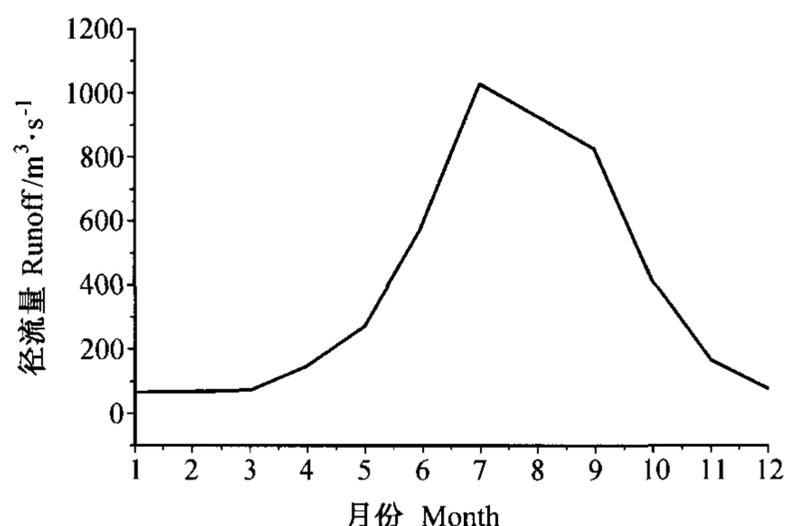


图 3 直门达多年 (1957~2001 年) 月平均径流量季节变化

Fig. 3 Curve of the mean monthly runoff during the year 1957—2001 at Zhimenda hydrological station

1979 年, 1980~2001 年; 并按照 3.1 节中对高原地区季节的划分标准, 将通天河流域全年分为 3 个季节, 即春秋 (6~9 月)、前冬 (10~12 月)、后冬 (1~5 月), 然后对不同季节平均的径流量标准化值的同号率做分段统计, 结果列于表 2。表中 I 季指春秋, II 季指前冬, III 季指后冬。由表 2 可见, 1957~1979 年不同季节的平均同号率比 1980~2001 年大。同时, 两个时间段中以春秋与前冬的同号率为最大, 达 0.70 以上。以上结果说明 45 年来春秋和前冬平均径流量相对稳定。但各季平均径流量的相关性只有春秋与前冬的相关超过 0.01 的显著性水平。而以后冬 (III 季) 到第二年春秋 (I 季) 平均径流量的相关性最小, 说明季节平均径流量存在明显的季节转换时期, 即在每年 5~6 月份。另外, 由于春秋与前冬平均径流量的相关显著, 因此若用 6~9 月平均的径流量做 10~12 月平均的径流量预报, 具有一定的参考价值。

表 2 直门达 45 年径流量距平不同时段各季节同号率及相关性

Table 2 Sign consistency check of the anomalous mean annual runoff at Zhimenda and the correlation coefficients for different seasons in the past 45 years

		季节 Season		
		I-II	I-III	II-III
同号率 Sign consistency	1957~1979	0.52	0.48	0.70
	1980~2001	0.41	0.27	0.86
相关系数 Correlation coefficient		0.207	0.078	0.769*

* 通过 0.01 的显著性检验 * Correlation is significant at the 0.01 level

3.4 周期性

本文用多窗谱分析方法^[8]对 1957~2001 年直门达站年平均径流量进行了波谱分析。图 4 给出了年平均径流量的谱分析结果, 可以看到通天河上游径流量具有较明显的 2~2.2 年短周期和 7.4 及 12.3 年的长周期变化。这一点从图 2 的距平曲线中也可看出, 几次径流量极大值年 (1963~1965、1971、1974~1975、1981~1983、1989、1993 年) 相隔 2~4、7~10 年。其中准 7 年周期与黄河上游唐乃亥水文站年径流量变化周期^[1, 2, 9]及河西走廊内陆河径流量的主要周期^[10]相一致。这种高原河流径流量变化的相似性反映了发源于青藏高原及周围高山上的江河可能受控于大范围相同气候背景因子的影响。

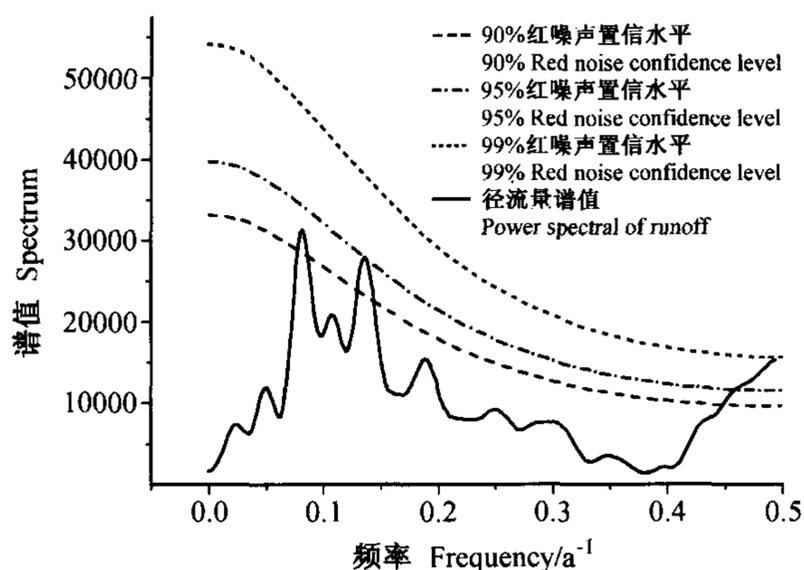


图 4 直门达水文站年平均径流量频谱分析

Fig. 4 Power spectral analysis of Zhimenda mean annual runoff

4 通天河径流量与气候因子变化的关系分析

长江上游通天河流域地处青藏高原腹地, 气候类型属高寒半干旱地区, 河流水量主要来自降水、冰川融雪和地下水补给。直门达水文站位于长江水系上游通天河流域, 径流量受人类活动影响较少, 因而径流量的年际和季节变化应与该区域气候因素的变化相关密切。本文在此对通天河径流量与其周围区域气温、降水、地面感热以及冰川融雪等气候影响因子的关系做初步分析。

4.1 径流量与降水、气温的关系

长江上游径流量主要来源之一是流域内的降水所产生的径流。由于长江上游地处青藏高原,

雨季短, 且主要集中在夏秋季节; 冬春降水量少而且多以固体降水为主。表 3 给出通天河上游流域曲麻莱的降水量以及通天河上游沿岸 3 个站点 (曲麻莱、治多、扎多) 的平均降水量与同期直门达流量的相关系数。可以看出, 降水对径流的贡献主要集中在夏秋雨季, 该地区雨季通常在 6 月至 9 月, 同期相关系数比较好的也集中在这一段 (6~9 月), 尤以 9 月最为显著, 其相关系数达到 0.753, 远远超过 0.01 的显著性水平。因此可知长江上游区域 6~9 月降水量是影响通天河径流量最主要的气候要素之一。而高原 3 个站点平均气温与 3~6 月同期径流量有弱的负相关, 但不显著。

为了揭示降水量对径流的可预报性, 进一步分析了 9 月份降水与滞后 1~11 个月径流量的相关系数。由表 4 可以看出, 当 9 月份降水量偏多时, 不仅引起当月径流量的增大, 而且对滞后 1~6 个月的流量都有显著贡献。对下游各水库而言, 准确预报 9 月份降水量是至关重要的。这一点与文献 [1] 所揭示的黄河上游径流特点相一致。

4.2 径流量与高原地面感热的关系

数值模拟研究^[11]表明, 夏季青藏高原热源变化对黄河上游径流量具有重要影响; 而冬季青藏高原地面加热场强度对春季东亚环流及河西走廊内陆河径流量有一定影响^[12]。那么高原加热场对通天河径流量是否也有影响呢? 李栋梁等^[13]的研究表明, 青藏高原中东部和南部的地面感热与地面加热场强度的变化是一致的。而地面感热与 0 cm 地温与气温之差呈正比^[14, 15]。我们利用位于青藏高原中东部同时又位于通天河流域的玉树气象站 (33°06'N, 96°45'E) 0 cm 地温 T_s 与气温 T_a 之差来表征高原地面感热, 计算了高原不同月份地面感热年际变化与直门达径流量年际变化之间的相关系数。结果发现, 高原 7、8 月份地面感热与其后 7~12 月直门达各月径流量存在显著的负相关, 而 7 月份地面感热还与 6~9 月平均径流量以及全年平均径流量也存在显著负相关, 它们的相关系数均达到 95% 置信水平。图 5 为玉树 7 月份平均地气温差与直门达 6~9 月平均径流量标准化距平。

4.3 径流量与冰川融水补给的关系

通天河径流量的主要源流来自当曲、沱沱河和楚玛尔河 3 条支流, 在这些河源区共发育现代

表 3 通天河流域降水量与同期直门达径流量的相关系数 ($\times 10^{-3}$)

Table 3 Correlation coefficients between the precipitation and the runoff ($\times 10^{-3}$)

	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
曲麻莱 Qumalai	-15	128	-204	10	242	314 *	404 *	532 *	753 *	234	49	34
3 站点平均 Average	-36	192	-85	9	209	340 *	424 *	602 *	694 *	277	6	-187

* 通过 0.01 显著性检验 * Correlation is significant at the 0.01 level

表 4 高原 9 月份降水量与滞后各时段径流量的相关系数 ($\times 10^{-3}$)

Table 4 Lag correlation coefficients between precipitation in September at Qinghai plateau and the runoff in the following months ($\times 10^{-3}$)

	滞后月份 Lag month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
曲麻莱 Qumalai	577 *	532 *	542 *	552 *	492 *	466 *	62	426 *	501 *	428 *	87	
3 站点平均 Average	536 *	460 *	527 *	494 *	422 *	461 *	139	295	426 *	414 *	41	

* 通过 0.01 的显著性检验 * Correlation is significant at the 0.01 level

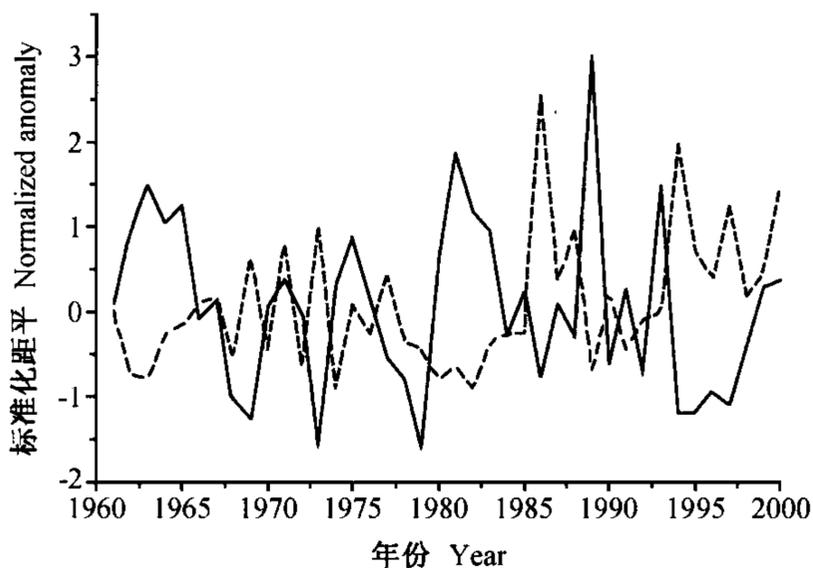


图 5 直门达 6~9 月平均径流量 (实线) 与玉树站 7 月份平均地气温差 (虚线) 标准化距平

Fig. 5 Curves of the normalized Zhimenda mean (June to September) runoff (solid line) and mean July departures of surface temperature and air temperature of Yushu (dashed line)

冰川 627 条,基本上属于大陆性冰川^[5]。由于全球气候变暖的影响,长江源区大多数冰川呈退缩状态,仅沱沱河和当曲河源冰川在 1961~1986 年间的退缩率分别达到 8.25 和 9.0 $m \cdot a^{-1}$ ^[4]。冰川退缩使冰川融雪增多,增加了河流径流的补给量。如沱沱河径流的 80% 靠冰川融雪补给,冰川进退对其径流变化影响较大。分析表明^[4],近 40 年来,沱沱河 5~10 月累计径流量的二阶主值函数呈高一低一高的变化趋势(文献 [4] 图 3),与通天河年径流量变化趋势(低—高一低)(图 2a)正好相反。对比二者的变化可以看到,作为通天河支流

的沱沱河的径流量在 20 世纪 80 年代中期以后到 20 世纪 90 年代末一直呈增加趋势,但通天河径流量却呈下降趋势。这反映了河源区冰川融水对径流量的补给虽然能够影响通天河径流量年际变化,但由于长江上游河源区降水量呈减少趋势^[16],当降水量总体上减少的速度大于冰川融水补给径流量增加的速度,那么河源区河流径流势必会出现减少趋势。通天河年径流量与沱沱河径流量变化相反的趋势正说明了这一特点,同时也反映了降水量的变化比冰川融水对径流量的影响更大一些。

5 通天河径流量的气候概率预报

统计意义上的概率分布是时间序列演变的可能性。了解其随时间变化中的概率分布,对掌握通天河径流量的气候规律及其预报具有重要意义。但在定量分析及实际业务预报中,对用径流量划分丰枯年的标准不尽一致^[1,9]。本文根据文献 [1] 和 [9] 采用的两种不同标准进行计算,并对它们的结果进行比较。

5.1 标准一

标准一是根据文献 [1] 对径流量丰枯的划分。径流量按其距平百分率 R_L 划分为几个级别,即 $R_L = (L_i - L) / L \times 100\%$,其中 $L = \sum L_i / N$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 为多年平均值, L_i 为某一时段的平均径流量, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 为样本数。 $R_L <$

-40% 枯水; $-40\% \leq R_L \leq -20\%$ 偏枯;
 $-20\% \leq R_L \leq 20\%$ 正常; $20\% \leq R_L \leq 40\%$ 偏丰;
 $R_L > 40\%$ 丰水。

根据标准一,对直门达 1957~2001 年各月及不同时段径流量级别的出现频率进行了分析(表 5)。可以看出,就上述标准而言,无论是月平均,还是时段平均,均以径流量出现正常年的频率为最大。其中年际变化相对稳定的年平均径流量出现正常年的频率占到 56%。但对年径流量贡献较大的 6~9 月来说,其径流量出现丰水年、枯水年和偏枯年级别的频率增大,其中 6~9 各月枯水年和偏枯年出现的频率之和与正常年频率(38%)相当;尤其是 7 和 9 月份,其丰水年和枯水年出现的频率之和(40%)大于正常年频率(38%)。因此,对通天河径流量预报而言,应重视 7、9 月份径流量异常(丰水年、枯水年)的预报。下面从转移概率的角度进一步分析通天河径流量的预报。

首先考虑以下情形,即当年径流正常,那么次年可能出现的概率将以哪个级别为最大?本文对 5 个级别概率转移作了分析(表 6)。结果表明,当年径流量正常而次年各月及全年径流量出现正常年级别的概率最大。但如果将丰水年和枯水年看作是异常年份,则可发现,7 月和 9 月丰水年和枯水年之和的概率(分别为 42%和 40%)都大于正常年出现的概率(分别为 36%和 38%),也就

是说,对 7、9 月份径流量而言,当年正常而次年出现异常(丰水或枯水年)的概率要大于正常年。而在气候预测中,对异常状态(丰、枯年)的预测是人们更关心的问题。

表 7、表 8 还分别给出了当年偏枯、偏丰,次年转移级别的概率。由表 7 可见,在 6~9 月份,当年偏枯而次年出现异常(丰水、偏枯之和)的概率要大于正常年,但以偏枯为主,其中 6 月份的转移概率达到 34%。由表 8 知,7 月份当年偏丰而次年出现丰水级别的概率明显大于其他级别,其转移概率达到 44%。

5.2 标准二

标准二是根据文献[9]对径流量丰枯的划分标准。径流量按其距平百分率 R_L 划分为 5 个级别,即, $R_L \leq -40\%$ 特枯; $-40\% < R_L \leq -10\%$ 枯水; $-10\% < R_L < 10\%$ 正常; $10\% \leq R_L < 40\%$ 丰水; $R_L \geq 40\%$ 特丰。

根据以上标准,对直门达 1957~2001 年各月及主要预报时段径流量再进行分析。结果表明,就标准二而言,5~12 月份,无论是月平均,还是年平均,均以枯水年出现的概率最大,均在 30%以上,其次最大可能出现的则是正常、丰水年份。与标准一相比,标准二对异常级别的定义较宽,如标准二定义 $R_L \geq 10\%$ 即为丰水年,而标准一定义 $R_L \geq 20\%$ 才为偏丰年。

表 5 直门达各月及不同时段径流量级别的出现频率

Table 5 Probability of runoff in each month and main time interval of Zhimenda

		月份 Month															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3~5	4~9	9~10	1~12
丰水年	High flow year	2	2	0	2	16	13	20	13	22	4	2	2	4	4	18	4
偏丰年	Higher flow year	9	7	2	11	9	11	4	16	4	13	18	11	13	18	9	16
正常年	Normal year	71	78	89	76	47	38	38	40	38	47	62	76	67	53	42	56
偏枯年	Lower flow year	18	13	9	11	24	20	18	20	18	16	16	11	16	18	20	22
枯水年	Low flow year	0	0	0	0	4	18	20	11	18	9	2	0	0	7	11	2

表 6 当年正常次年转移级别的概率

Table 6 Probability of each hierarch on next year based on the normal flow year

		月份 Month													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1~12	
丰水年	High flow year	2	2	0	2	11	11	26	13	23	4	3	2	5	
偏丰年	Higer flow year	8	7	2	12	9	10	5	16	4	26	14	12	15	
正常年	Normal year	72	78	89	75	57	39	36	39	38	47	67	79	57	
偏枯年	Lower flow year	18	13	9	11	19	21	18	21	19	16	14	8	20	
枯水年	Low flow year	0	0	0	0	1	19	16	12	17	8	3	0	3	

表 7 当年偏枯次年转移级别的概率

Table 7 Probability of each hierarch on next year based on the lower flow year

%

		月份 Month												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1~12
丰水年	High flow year	3	2	0	2	17	15	17	14	23	4	3	1	3
偏丰年	Higher flow year	11	7	3	6	9	13	6	19	2	28	20	6	13
正常年	Normal year	67	75	87	78	37	34	38	40	38	44	55	56	49
偏枯年	Lower flow year	19	15	10	15	30	34	20	20	20	21	20	37	33
枯水年	Low flow year	0	0	0	0	7	14	19	8	16	10	3	0	2

表 8 当年偏丰次年转移级别的概率

Table 8 Probability of each hierarch on next year based on the higher flow year

%

		月份 Month												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1~12
丰水年	High flow year	2	3	0	2	15	15	44	16	15	2	1	2	4
偏丰年	Higher flow year	10	9	3	15	12	15	0	11	5	26	34	12	23
正常年	Normal year	70	74	87	73	37	35	33	40	34	38	47	71	51
偏枯年	Lower flow year	18	15	10	10	32	19	0	20	18	13	17	14	20
枯水年	Low flow year	0	0	0	0	2	16	22	13	29	9	1	0	2

根据标准二我们也对 5 个级别径流量概率转移作了分析。由于 1~4 月正值高原冬季，径流量的预报意义不大，故这里只给出 5~12 月份的结果。计算表明，当年枯水而次年 5~12 月仍为枯水级别的概率平均在 30% 以上，其中 5 月份达 42%；当年正常而次年 5~12 月为枯水级别的概率达到 30% 以上，其中 10 月份达 42%，9 月份特枯、7 月份特丰级别都达到 25%；当年丰水而次年 5~12 月为枯水级别的概率达到 26% 以上；当年丰水而次年 10~12 月为丰水级别的概率以 10 月份最大，达到 47%，而 7 月份特丰级别达到 32%。

由以上转移概率分析可知，对通天河径流量而言，在 6~10 月份异常年份（丰、枯年）出现的概率大于正常年的概率，因此在实际业务预报中应侧重于异常年份的预报。另外，由于径流量丰枯标准划分的不同而产生了转移概率结果的差异。因此，在有关业务部门就通天河径流量制订水文预报方案过程中，应结合实际水文情况给出合理的径流量丰、枯级别划分标准，然后再进行流量预报。

6 结论

(1) 通天河上游径流具有很好的持续性，特

别是 7~10 月的径流，持续性达半年以上。

(2) 近 45 年来，通天河上游径流经历了小-大-小的演变过程，期间出现过径流量的多次转折，其中 1967 年由多变少的转折，径流量持续减小直到 1979 年，长达 11 年；另一次 1979 年径流量由小变大的转折，直到 1989 年达到历史（有记录以来）最大值，持续时间长达 10 年；1990 年代径流量持续减小；从 1998 年开始，径流量又开始表现出增大趋势。

(3) 年平均径流量呈现 2~2.2 年的短周期和 7.5 及 12.3 年的长周期变化特征。

(4) 通天河年平均径流量与同期 6~9 月降水存在显著的正相关关系。与气温关系不显著。

(5) 对径流量丰枯划分的标准不同，进行径流量转移概率的预报结果则不同。按照径流量距平百分率 $-20\% \leq R_L \leq 20\%$ 为正常、超出这一范围为异常（丰水或枯水）的标准，当年径流量正常而次年各月及全年径流量出现正常年级别的概率最大，年径流量为正常年的转移概率最大，达 57%；但对 7、9 月份径流量而言，当年正常而次年出现异常（丰水或枯水年）的概率要大于正常年。若按照径流量距平百分率 $-10\% < R_L < 10\%$ 为正常、超出这一范围为异常（丰水或枯水）的标准，则通天河径流量转移概率 5~12 月份出现枯水的概率较大。

参考文献

- [1] 李栋梁, 张佳丽, 全建瑞, 章克检. 黄河上游径流量演变特征及成因研究. 水科学进展, 1998, 9 (1): 22~28
Li Dongliang, Zhang Jiali, Quan Jianrui, Zhang Kejian. A study on the feature and cause of runoff in the upper reaches of the Yellow River. *Advances in Water Science* (in Chinese), 1998, 9 (1): 22~28
- [2] 冯建英, 姚志宗. 黄河上游径流量的长期演变特征. 人民黄河, 2000, 22 (10): 40~42
Feng Jianying, Yao Zhizong. Long-term variation of the runoff in the upper reaches of the Yellow River. *Yellow River* (in Chinese), 2000, 22 (10): 40~42
- [3] 吴豪, 虞孝感. 长江河源地区及通天河流域水文特征. 水文, 2002, 22 (1): 52~53
Wu Hao, Yu Xiaogan. Hydrological features of the stream source area of the Yangtze River and Tongtianhe River valley. *Hydrology* (in Chinese), 2002, 22 (1): 52~53
- [4] 吴豪, 虞孝感. 近四十年来长江源区河流水沙量的变化. 长江流域资源与环境, 2002, 11 (2): 175~178
Wu Hao, Yu Xiaogan. Changes of runoff and sediment in the source region of Yangtze River during the last four decades. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 2002, 11 (2): 175~178
- [5] 吴豪, 虞孝感, 许刚. 长江源区冰川对全球气候变化的响应. 地理学与国土研究, 2001, 17 (4): 2~5
Wu Hao, Yu Xiaogan, Xu Gang. Response of glaciers in the source region of Yangtze River to global climate change. *Geography and Territorial Research* (in Chinese), 2001, 17 (4): 2~5
- [6] 汤懋苍, 钟海铃, 李栋梁. 青藏铁路沿线的四季划分及其温度变化分析. 高原气象, 2003, 22 (5): 440~444
Tang Maocang, Zhong Hailing, Li Dongliang. The standard of marking off the four season along Qinghai-Xizang railway and its temperature variation analysis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, 22 (5): 440~444
- [7] 李栋梁, 彭素琴. 中国西部降水资源的不稳定性研究. 资源科学, 1992, 5: 1~8
Li Dongliang, Peng Suqin. A study of stability on precipitation resource in western China. *Resources Science* (in Chinese), 1992, 5: 1~8
- [8] 江志红, 屠其璞, 施能. 多窗谱分析方法及其在全球变暖研究中的应用. 气象学报, 2001, 59 (4): 480~490
Jiang Zhihong, Tu Qipu, Shi Neng. Multi-taper method of spectral analysis and applications in the global warming study. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, 59 (4): 480~490
- [9] 马柱国. 葛州坝、唐乃亥径流量的时变特征分析. 高原气象, 1995, 14 (1): 20~24
Ma Zhuguo. The characteristics of the temporal variation of flow-off at Tangnaihahai and Gezhouba. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1995, 14 (1): 20~24
- [10] 冯建英, 李栋梁. 甘肃省河西内陆河流量长期变化特征. 气候与环境研究, 2001, 6 (4): 478~484
Feng Jianying, Li Dongliang. Long-term change characteristics of the flow of inland river in Hexi corridor regions of Gansu Province. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, 6 (4): 478~484
- [11] 孙国武, 刘晓东, 陈葆德. 夏季青藏高原地面加热源对黄河上游流量及径流的影响. 应用气象学报, 1993, 4 (1): 22~29
Sun Guowu, Liu Xiaodong, Chen Baode. The influence of the surface heat source over the Qinghai-Xizang Plateau of summer on the flow and run-off in the upper reaches of Yellow River. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1993, 4 (1): 22~29
- [12] 李栋梁, 陈丽萍. 青藏高原地面加热场强度与东亚环流及西北初夏旱的关系. 应用气象学报, 1990, 1 (4): 383~391
Li Dongliang, Chen Liping. Surface heat intensity of Qinghai-Xizang Plateau and its relationship with general circulation over East Asia and drought in early summer in northwestern China. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1990, 1 (4): 383~391
- [13] 李栋梁, 魏丽, 李维京, 吕兰芝, 钟海玲, 季国良. 青藏高原地面感热对北半球大气环流和中国气候异常的影响研究. 气候与环境研究, 2003, 8 (1): 60~70
Li Dongliang, Wei Li, Li Weijing, Lü Lanzhi, Zhong Hailing, Ji Guoliang. The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai-Xizang Plateau on General circulation over the northern hemisphere and climatic anomaly of China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (1): 60~70
- [14] Zhao P, Chen L. The climate characteristics of surface turbulent exchange coefficients and surface heat source over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 14 (1): 13~29
- [15] 李栋梁, 李维京, 魏丽, 吕兰芝, 钟海玲, 季国良. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析. 气候与环境研究, 2003, 8 (1): 71~83
Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li, Lü Lanzhi, Zhong Hailing, Ji Guoliang. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai-Xizang Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (1): 71~83
- [16] 李林, 朱西德, 周陆生, 汪青春. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. 气象, 2004, 30 (8): 18~22
Li Lin, Zhu Xide, Zhou Lusheng, Wang Qingchun. Climatic change in regions of Sanjiangyuan natural reserve and its influence on eco-environmental system. *Meteorology* (in Chinese), 2004, 30 (8): 18~22