

黄河首曲气候变化及其对黄河断流的影响

姚玉璧^{1,2,3}, 尹东¹, 王润元^{1,2}, 张秀云², 尹国福⁴

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,

甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;

3. 甘肃省定西市气象局, 甘肃 定西 743000; 4. 甘肃省平凉市气象局, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 利用黄河首曲气候资料和黄河上游年径流量资料以及黄河下游断流资料, 分析了黄河首曲气候变化特征, 气候变化对径流量的影响, 黄河首曲气候变化与黄河下游断流的关系。结果表明, 黄河首曲大部分区域降水量年际变化呈下降趋势, 降水量的年际变化存在 2~ 4, 6~ 7, 10~ 11 a 的年周期振荡特征。黄河首曲气温年际变化趋势呈上升趋势, 增温速度均大于全国增温速度。1983 年之前气温距平以偏冷为主, 1984 年之后持续偏暖。唐乃亥年径流量存在 4~ 5, 14~ 16 a 的年际周期振荡变化。降水量年际波动曲线与径流量年际波动基本一致。1990—1999 年属高温少雨时段, 也是径流偏枯时期。黄河首曲降水量与同期黄河下游利津站断流天数曲线呈明显的反相位分布, 黄河上游关键区、敏感区气候变化对黄河水资源的影响重大。

关键词: 气候变化; 径流量; 断流; 黄河首曲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)04-0001-06

中图分类号: P467, TV147

Climate Changes over First Meander of Yellow River and Their Effects on Cutoff in Lower Reaches

YAO Yū-bi^{1,2,3}, YIN Dong¹, WANG Rong-yuan^{1,2}, ZHANG Xiū-yun², YIN Guō-fu⁴

(1. Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou

Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Laboratory of Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Meteorological Bureau of Dingxi, Dingxi, Gansu 743000, China; 4. Meteorological Bureau of Pingliang, Pingliang, Gansu 744000, China)

Abstract: By using meteorological data in the area of the first meander of the Yellow River and data of both annual runoff in the upper reaches and the cutoff in the lower reaches, climate changes in the meander area and their effects on annual runoff in the upper reaches and the cutoff in the lower reaches were analyzed. Results showed that in the meander area, annual precipitation tended to decrease and fluctuated in three periods of 2~ 4, 6~ 7 and 10~ 11 years. The mean annual temperature was remarkably greater than that of other areas in China. The departure of annual temperature was low before 1983, and high after 1984. Annual runoff of the Tangnaihais fluctuated in two periods of 4~ 5 and 14~ 16 years. The waves for annual precipitation in the meander area and annual runoff of the Tangnaihais were basically agreed. The mean annual temperature was high, sometimes, whereas annual precipitation and annual runoff were low in 1990s. The fluctuated trends of annual precipitation in the meander area and the cutoff in the lower reaches were on the contrary. The climate changes in the key and sensitive area of the upper reaches of the Yellow River greatly affect the water resources of the region.

Keywords: climatic changes; runoff; cutoff; first meander of Yellow River area

人与自然和谐发展, 是当今社会与科学发展的新理念, 全球气候变化引发了区域自然灾害频发, 气候变暖、温室效应、臭氧层破坏、森林锐减、物种灭绝、干

旱加剧、土地退化、淡水资源短缺一系列全球性的环境问题。中国的区域气候变化是全球气候变化的重要组成部分, 尤其是北方地区的气候变暖、干旱化和

收稿日期: 2005-11-18

资助项目: 中国气象局气候变化专项经费(CCSF2005-2-QH26); 甘肃省科学技术攻关计划项目(ZGS042-A44-017); 科技部科研院所社会公益研究专项(2004DIB5J192); 兰州区域气象中心开放实验室项目(Lab2002-4); 干旱气象科学基金项目(IA M2004I4)

作者简介: 姚玉璧(1962-), 男(汉族), 甘肃省通渭县人, 高级工程师, 主要从事应用气象和气候研究。E-mail: yaoyubi@163.com。

土地沙漠化在近 20 a 里显得更加突出^[1]。西北地区气候变化的研究工作已有很多^[2-7], 有人研究了黄河上游气候变化对水资源的影响^[8], 有人研究了径流量变化趋势及预测^[9], 有人就黄河断流的气候背景进行研究^[10-12]。

西北地区地广人稀, 环境严酷, 气候变化的地域性差异显著。黄河在甘肃玛曲县境内形成了一个长 433 km“U”字形的九曲第一弯, 其间, 黄河有大小支流 330 余条, 黄河从青海省流入其境内时水量仅占黄河总水量的 20%, 而流出境外时水量则占到 65%, 给黄河补充水量达 45%, 玛曲被誉为黄河的“天然蓄水池”, 这里既是黄河上游补充水量的关键区, 又是黄河水量变化的敏感区。

为此, 研究黄河上游补充水量关键区、敏感区气候变化和黄河流量变化特征, 及其对黄河断流的影响, 为黄河上游气候资源和水资源的合理开发利用, 保护黄河上游生态环境提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料

资料选用位于黄河首曲上部的久治气象站(101°29′E, 33°29′N, 海拔高度为 3 630.0 m) 1961—2004 年气象资料, 位于黄河首曲中部的红原气象站(102°33′E, 32°48′N, 海拔高度为 3 492.7 m) 和若尔盖气象站(102°58′E, 33°35′N, 海拔高度为 3 441.1 m) 1961—2000 年气象资料, 以及位于黄河首曲中下部的玛曲气象站(102°05′E, 34°00′N, 海拔高度为 3 473.2 m) 1967—2004 年气象资料, 黄河上游唐乃亥水文站 1956—2000 年流量资料, 山东利津水文站 1971—2000 年黄河断流资料。

1.2 方法

1.2.1 气候倾向率^[13] 气候要素的趋势系数变化一般用一次线性方程表示, 即

$$x_t = \hat{a}_0 - a_1 t \quad t = 1, 2, \dots, n \text{ 年}$$

$$d\hat{x}_t/dt = a_1$$

式中: $a_1 \cdot 10$ 称为气候倾向率, 单位为某要素单位(10 a), 据回归理论 $a_1 = r_{xt}\sigma_x/\sigma_t$, σ_x 是要素 x 的均方差, σ_t 为数列 1, 2, …, n 的均方差。这样, 我们就可以从气候趋势系数 r_{xt} 求出气候倾向率。

1.2.2 小波分析 小波分析是一种时、频、多分辨率分析方法是一个时间和频率的区域变换, 因而能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化。小波基(母波)的种类较多, 这里采用 Morlet 小波, 即

$$\Psi(t) = e^{-2\pi i t} \exp[-(2\pi/k^4)^2 |t|^2]$$

小波变换系数为

$$\xi(t', a) = a^{-1/2} \int f(t) \Psi^*(t/a - t'/a) dt$$

式中: $\xi(t', a)$ —— 小波系数; $f(t)$ —— 资料序列; Ψ^* —— Ψ 的共轭函数。在实际应用时常将连续小波变换离散化。

1.2.3 其它方法 本研究还采用了相关分析及回归分析等统计分析方法。

2 气候变化特征

2.1 基本气候概况

黄河首曲“U”字形弯曲部流域位于 100°50′—102°58′E, 32°48′—34°30′N, 南依巴颜喀拉山, 东抵岷山, 全流域 $4.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海拔高度在 3 300~4 500 m 之间, 年平均气温 $-2.4^\circ\text{C} \sim 1.4^\circ\text{C}$, 最热月 7 月平均气温 $8.7^\circ\text{C} \sim 11.9^\circ\text{C}$ 之间, 最冷月 1 月平均气温 $-14.8^\circ\text{C} \sim -9.2^\circ\text{C}$ 之间, 月平均气温年较差 $20.3^\circ\text{C} \sim 23.5^\circ\text{C}$ 之间。该区域年降水量 468.1~764.4 mm, 5—9 月降水量在 405.2~635.4 mm 之间, 占全年降水量的 80%~87%, 降水主要集中在 5—9 月; 冬季 12 月—翌年 2 月降水量仅占全年降水量的 1.2%~2.2%。降水量高峰值出现在 7—8 月, 月降水量均在 100 mm 以上, 各站点降水季节变化呈单峰型。该区域年太阳总辐射 5 113~5 560 MJ/m², 年日照时数 2 296.0~2 651.3 h, 年日照百分率 52%~60%。其中 12 月日照时数 206.8~241.8 h, 日照百分率达 75%~80%, 为最多月; 9 月日照时数在 148.2~178.1 h, 日照百分率为 40%~48%, 为最少月。属高寒湿润气候区。

2.2 196 年代以来的气候变化

2.2.1 降水量

(1) 趋势变化。黄河首曲降水量年际变化趋势除红原下降趋势不明显外, 其余各地年降水量呈下降趋势, 降水量变化曲线线性拟合倾向率玛曲、久治分别为 $-13.70 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, $-17.13 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ (图 1), 大于全国年降水量递减率 $[-12.69 \text{ mm}/(10 \text{ a})]$, 玛曲降水量 4 阶主值函数呈两谷一峰型, 其方程为 $y = 0.002x^4 - 0.178x^3 + 4.200x^2 - 36.154x + 698.980$, 其线性化后的复相关系数 $R = 0.35$, 通过 $\alpha = 0.01$ 检验, 久治降水量 2 阶主值函数呈抛物线型, 方程为 $y = -0.2103x^2 + 7.751x + 707.66$, 其线性化后的复相关系数 $R = 0.352$, 也通过 $\alpha = 0.01$ 检验。若尔盖降水量变化曲线线性拟合倾向率为 $-11.86 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 低于全国年降水量递减率。

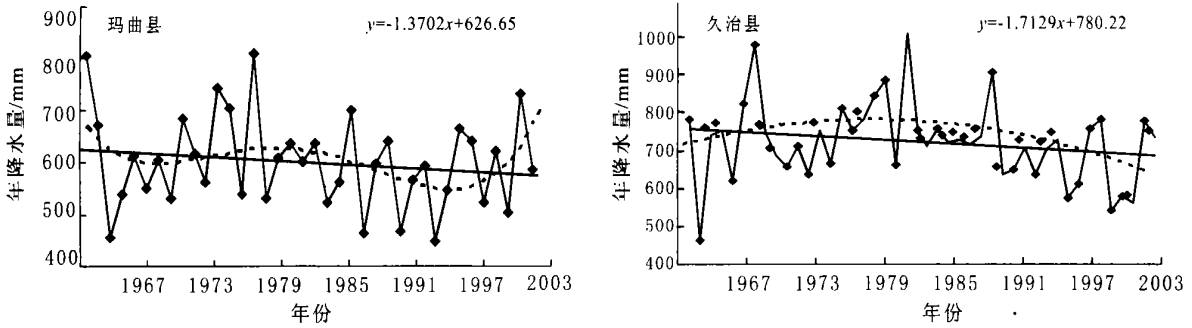


图 1 黄河首曲降水量年际变化曲线

(2) 年际距平。玛曲历年平均降水量 599.9 mm, 降水量距平百分率的年际变化在 -25% ~ 35% 之间, 相对平稳, 其中 1969—1974 年, 1991—1997 年为少雨时期, 1975—1990 年以偏多为主, 若定义年降水距平百分率 $R^* \geq 60\%$ 为特多, $60\% > R^* \geq 20\%$ 为偏多, $20\% > R^* > -20\%$ 为正常, $-20\% \geq R^* > -60\%$ 为偏少, $R^* \leq -60\%$ 为特少(下同)。则年降水量偏多的是 1967, 1978, 1981, 2003 年, 偏少的是 1969, 1990, 1993, 1996 年。其余年份 $20\% > R^* > -20\%$, 均在正常范围变化。就年代际降水距平百分率而言, 20 世纪 60 年代偏多最大, 20 世纪 70 年代次之, 其余年代略偏多, 20 世纪 90 年代偏少(表 1)。

久治历年平均降水量 741.7 mm, 降水量距平百分率的年际变化在 -35% ~ 40% 之间, 相对平稳, 其中 1961—1965 年, 1969—1972 年, 1990—2002 年为少雨时期, 1975—1989 年以偏多为主, 年降水量偏多的是 1967, 1979, 1981, 1989 年, 偏少的是 1962, 1996, 2000, 2002 年。其余年份 $20\% > R^* > -20\%$, 均在正常范围内变化。就年代际降水距平百分率而言, 1980 年代偏多最大, 1970 年代次之; 1990 年代偏少, 2001—2004 年偏少最多(表 1)。

表 1 黄河首曲各年代降水距平百分率、气温距平及流量距平百分率

要素	1960—1970—1980—1990—2001—				
	1969	1979	1989	1999	2004 年
玛曲降水距平率/ %	2.9	2.4	1.2	-5.3	1.6
久治降水距平率/ %	0.5	3.8	6.1	-7.1	-8.0
玛曲气温距平/ °C	-0.4	-0.2	0.0	0.2	1.0
久治气温距平/ °C	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.9
唐乃亥流量距平率/ %	4.5	1.6	16.7	-13.7	-

若尔盖历年平均降水量为 656.3 mm, 降水量距平百分率的年际变化在 -25% ~ 32% 之间, 处于相对平稳状态。其中 1969—1970 年, 1986—1997 年为少

雨时期, 1978—1985 年以偏多为主, 年降水量偏多的是 1961, 1966, 1968, 1984, 1998 年, 偏少的是 1965, 1987 年。其余年份 $20\% > R^* > -20\%$, 均在正常范围内变化。

红原历年平均降水量 759.1 mm, 降水量距平百分率的年际变化在 -23% ~ 31% 之间, 相对平稳, 其中 1965—1972 年, 1986—1997 年为少雨时期, 1980—1985 年以偏多为主, 年降水量偏多的是 1975, 1983, 1999 年, 偏少的是 1965, 1969, 1997 年。其余年份 $20\% > R^* > -20\%$, 均在正常范围内变化。

黄河首曲降水量距平百分率的年际变化在 -35% ~ 40%, 相对平稳。1961—1975 年, 1990—2002 年为少雨时段。1979—1989 年为多雨时段。

(3) 周期振荡特征。用小波分析方法对黄河首曲降水量的年际周期振荡特征进行分析, 由图 2 可见玛曲降水量存在 2, 4, 11~12 a 的年际周期变化, 短周期振荡中 1967—1978 年中 4 a 周期振荡明显, 1985 年后 2 a 年周期振荡明显。11~12 a 的长周期振荡一致性较好。

久治降水量存在 3, 7, 11 a 的年际周期变化, 短周期振荡中 1961—1970 年, 1985—2000 年 3 a 周期振荡明显。长周期 7, 11 a 振荡明显。

若尔盖降水量存在 2, 3, 7~8 a 的年际周期变化, 短周期振荡 1983 年以前以 2 a 周期振荡为主, 1984 年后 3 a 周期振荡为主。7~8 a 的长周期振荡具有一致性特征。

红原降水量存在 3~4, 6~7 a 的年际周期变化, 短周期振荡 1984 年以前以 3 a 周期振荡为主, 1985 年后 4 a 年周期振荡为主。6~7 a 的长周期振荡 1979 年以前以 6 a 周期振荡为主, 1980 年后 7 a 周期振荡为主。

可见黄河首曲降水量的年际变化存在 2~4, 6~7, 10~11 a 的年周期振荡特征。

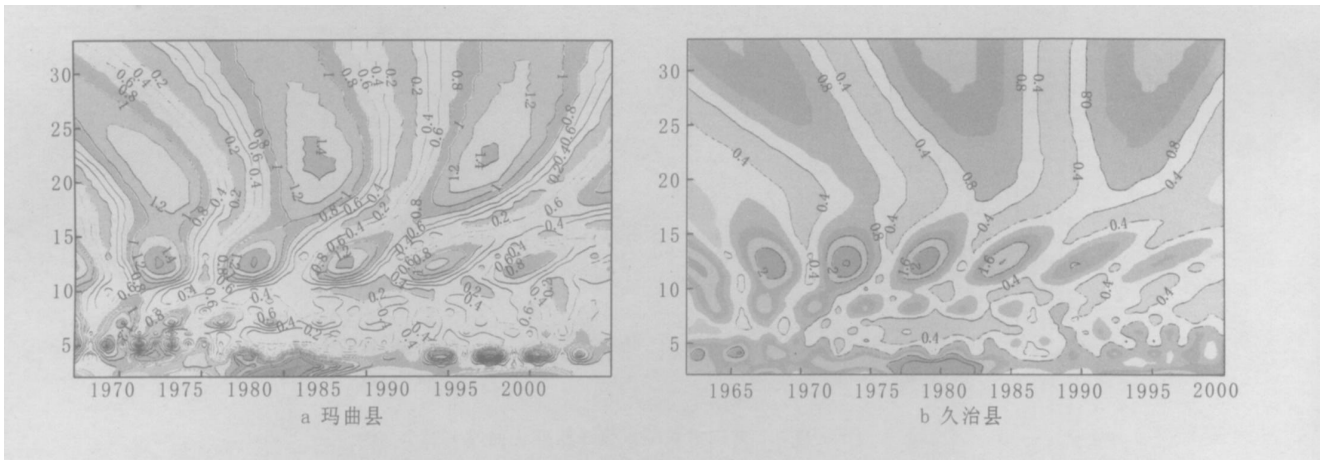


图 2 黄河首曲降水量小波分析图

2.2.2 气温

(1) 趋势变化。黄河首曲气温年际变化趋势呈上升趋势, 气温变化曲线线性拟合倾向率玛曲、久治较大, 分别为 $0.335^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, $0.337^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (图 3), 若尔盖、红原较小, 分别为 $0.224^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, $0.201^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, 增温速度均大于全国增温速度 [$0.044^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$], 玛曲气温 2 阶主值函数呈抛物线型, 方程为 $y = 0.0015x^2 - 0.0253x - 0.2246$, 其线性化后的复相关系数 $R = 0.71$, 通过 $\alpha = 0.01$ 检验, 久治降水量 2 阶主值函数呈抛物线型, 方程为 $y = 0.0002x^2 + 0.0231x - 0.6249$, 其线性化后的复相关系数 $R = 0.73$, 也通过 $\alpha = 0.01$ 检验。

(2) 年际特征。由表 1 可见, 玛曲年平均气温距平在 20 世纪 60 年代, 70 年代, 80 年代, 90 年代分别为 -0.4°C , -0.2°C , 0.0°C , 0.2°C , 呈明显上升趋势, 2000—2004 年气温距平为 1.0°C 。

久治年平均气温距平在 20 世纪 60 年代, 70 年代, 80 年, 90 年代分别为 -0.5°C , -0.2°C , 0.2°C , 0.4°C , 呈现明显的上升趋势, 2000—2004 年气温距平为 0.9°C 。2000 年后仍在上升。若尔盖、红原气温年代际距平具有相同变化特征, 其年代际变化与全国

同步, 年平均气温高值年均出现在 1998 年以后。

根据 WMO 规定, 距平大于或等于 2 个标准差为异常暖; 小于或等于 2 个标准差为异常冷。距平大于或等于一个标准差划分为暖年; 小于或等于一个标准差划分为冷年。玛曲暖年为 1988, 1994, 1998, 1999, 2001—2004 年, 其中异常暖年为 1998, 2003 年; 冷年为 1967—1968, 1970—1971, 1976—1977, 1983 年, 无异常冷年。

久治暖年为 1974, 1984, 1987—1988, 1991, 1994, 1996, 1998—2004 年, 其中异常暖年为 1975, 1988, 1998—1999, 2003 年; 冷年为 1962—1963, 1965, 1967—1968, 1970—1971, 1977, 1983 年, 异常冷年为 1977, 1983 年。

若尔盖暖年为 1974, 1984, 1988, 1994, 1998—1999 年, 其中异常暖年为 1998—1999 年; 冷年为 1962—1963, 1965, 1968, 1970—1971, 1976—1977, 1983 年, 无异常冷年。

红原暖年为 1964, 1974, 1987—1988, 1994, 1996, 1998—1999 年, 其中异常暖年为 1998—1999 年; 冷年为 1963, 1965, 1968, 1970—1971, 1976—1977, 1983, 1997 年, 无异常冷年。

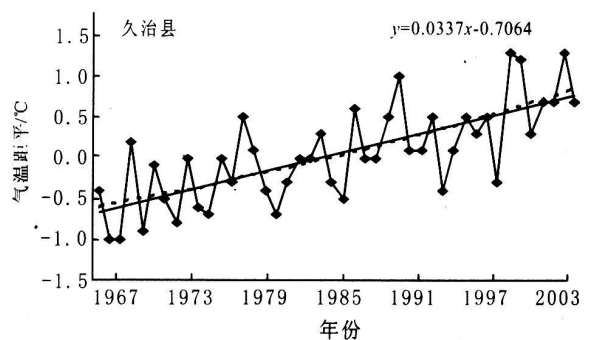
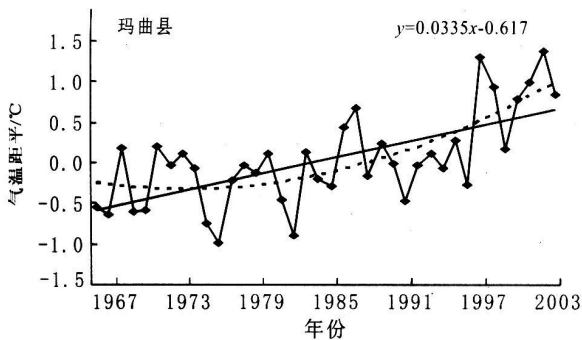


图 3 黄河首曲气温距平年际变化曲线

由此可知,黄河首曲气温变化1983年之前以偏冷为主,1984年之后持续偏暖。

2.2.3 径流量 黄河首曲唐乃亥年径流量年际变化呈波动性变化(图4),径流量3阶主值函数呈单峰型,方程为 $y = 0.0059x^3 - 0.9232x^2 + 31.164x + 561.96$,其线性化后的复相关系数 $R = 0.39$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。

唐乃亥年径流量距平百分率介于 $-34\% \sim 60\%$,波动较大,1956—1960,1969—1974,1977—1980,1990—1998年为偏枯时期,1961—1968,1981—1985年以偏丰为主,若定义年径流量距平百分率 $R \geq$

60%为特丰, $60\% > R \geq 20\%$ 为偏丰, $20\% > R > -20\%$ 为正常, $-20\% \geq R > -60\%$ 为偏枯, $R \leq -60\%$ 为特枯,则偏丰年为1967—1968,1975,1976,1981—1983,1989年,其中1989年为特丰年,偏多60%以上。偏枯年为1956—1957,1959—1960,1969—1970,1977,1991,1994—1997年,无特枯年。

用小波分析方法对黄河首曲唐乃亥年径流量的年际周期振荡特征进行分析,由图4可见,年径流量存在4~5,14~16a的年际周期变化,短周期振荡中1968年前后5a周期振荡明显,振荡较强,长周期振荡1975年之前较明显。

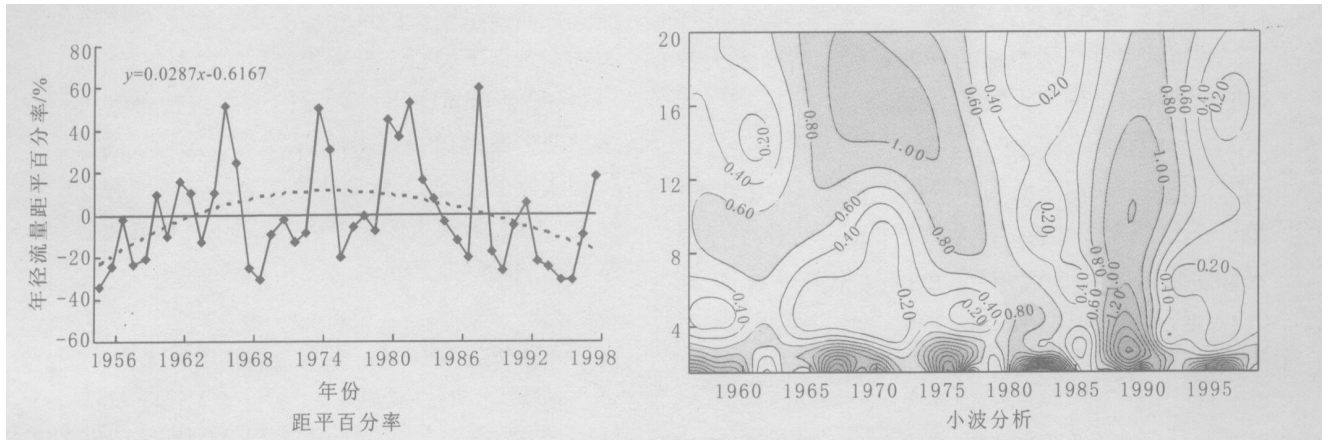


图4 黄河首曲径流量年际变化

3 气候变化与径流量的关系

黄河首曲年降水量与唐乃亥年径流量相分析表明,红原、久治、玛曲、若尔盖年降水量与径流量相关系数分别为0.675,0.608,0.601,0.513,通过 $\alpha = 0.001$ 检验,降水量直接影响径流量,降水量年际波动曲线与径流量年际波动基本一致。1990—1999年属高温少雨时段,也是径流偏枯时期。

利用黄河首曲代表站年降水量资料建立唐乃亥年径流量气候模式如下。

$$Y = -902.433 + 0.374R_1 + 1.009R_2 + 0.907R_3$$

式中: Y ——唐乃亥年径流量; R_1 ——若尔盖年降水量; R_2 ——红原年降水量; R_3 ——久治年降水量; $F = 20.06 > F_{0.01}^{(3,36)} = 4.33$,通过 $\alpha = 0.01$ 检验。由回归系数可知各地对唐乃亥年径流量的影响大小依次为红原、久治、若尔盖。

4 气候变化与断流

4.1 黄河断流与气候

影响河流入海径流量量的原因包括自然和人类活动两方面,人类活动的影响一是通过大规模水土保持改变流域的土地利用、土地覆被状况,从而改变下

垫面状况,进而影响径流的产生及汇集过程;二是通过大量引水以满足灌溉、工业和城镇的需水要求,使河流径流大幅度减少。自然的影响一是流域生态环境的演替变化,二是气候变化。

为了分析气候变化对黄河下游断流的影响,将降水量资料和黄河利津站1972—1999年断流天数资料进行标准化处理,以消除量纲的影响,处理后的标准化数据曲线见图5。由图5可见,红原、久治降水量与同期黄河下游断流天数曲线呈明显的反相位分布,即降水偏多断流天数偏少,降水偏少断流天数偏多。玛曲、若尔盖降水量与同期黄河断流天数也呈明显的反相位分布。

对降水量与同期黄河下游断流天数标准化数据进行相关分析,红原、久治降水量与同期黄河下游断流天数相关系数分别为 -0.32 , -0.31 ,通过 $\alpha = 0.10$ 检验。

由气温分析可知,1984年之后,黄河首曲气温持续偏暖呈上升趋势。黄河下游断流天数曲线在1984年之后呈同样的上升趋势。由此可知,黄河上游气温上升一方面引起流域水分蒸发能量增加,蒸发耗水增多,另一方面气温增高导致人类需水量加大,二者共同作用必然导致黄河下游断流天数增加。

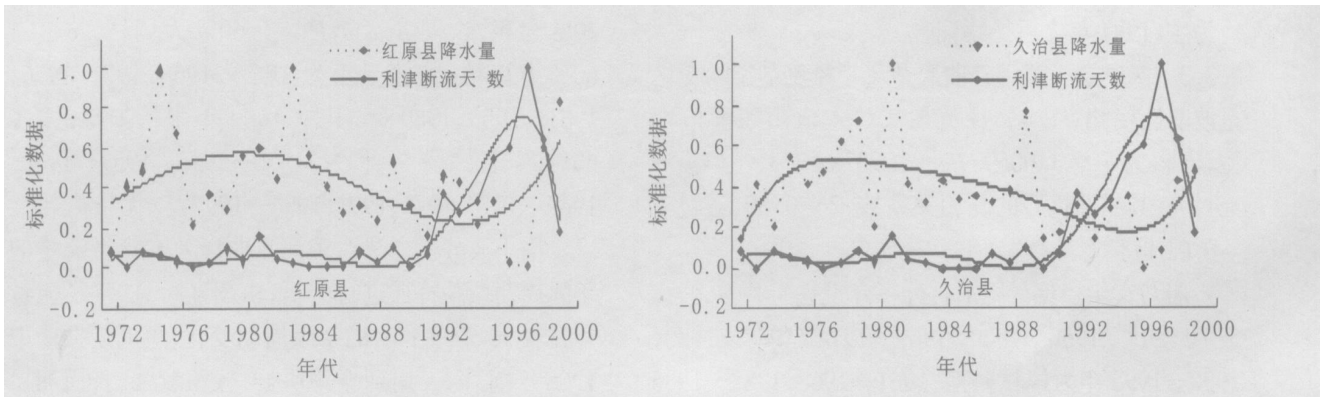


图 5 黄河首曲降水与下游断流天数标准化数据

4.2 断流天数气候模式

利用黄河首曲降水量与同期黄河下游断流天数标准化数据建立断流天数气候模式:

$$Y = 0.358 - 0.228X_1 - 0.242X_2$$

式中: Y ——黄河下游利津站断流天数标准化数据;
 X_1 ——红原年降水量标准化数据; X_2 ——久治年降水量标准化数据; 其线性化后的复相关系数 $R = 0.37$, 通过 $\alpha = 0.05$ 检验。

5 结论

(1) 黄河首曲大部分区域降水量年际变化呈下降趋势, 降水量变化曲线线性拟合倾向率玛曲、久治分别为 $-13.70 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, $-17.13 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 大于全国年降水量递减率。降水量的年际变化存在 2~4, 6~7, 10~11 a 的年周期振荡特征。黄河首曲降水量距平百分率的年际变化在 $-35\% \sim 40\%$ 之间, 相对平稳。1961—1975 年, 1990—2002 年为少雨时段, 1979—1989 年为多雨时段。

(2) 黄河首曲气温年际变化趋势呈上升趋势, 气温变化曲线线性拟合倾向率玛曲、久治较大分别为 $0.335 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$, $0.337 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ 。若尔盖、红原较小分别为 $0.224 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$, $0.201 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$, 增温速度均大于全国增温速度。1983 年之前气温距平变化以偏冷为主, 1984 年之后持续偏暖。

(3) 唐乃亥年径流量距平百分率介于 $-34\% \sim 60\%$ 之间, 有较大的波动。1956—1960, 1969—1974, 1977—1980, 1990—1998 年为偏枯时期, 1961—1968, 1981—1985 年以偏丰为主。年径流量存在 4~5, 14~16 a 的年际周期振荡变化。

(4) 降水量直接影响径流量, 降水量年际波动曲线与径流量年际波动基本一致。1990—1999 年属高温少雨时段, 也是径流偏枯时期。

(5) 黄河首曲降水量与同期黄河下游利津站断

流天数曲线呈明显的反相位分布, 红原、久治降水量与同期黄河下游断流天数相关系数显著。

(6) 影响黄河下游断流的原因包括自然和人类活动两方面, 自然的影响包括流域生态环境的演替变化和气候变化, 而气候变化和生态环境的演替存在互馈性, 为此, 黄河上游关键区、敏感区气候变化对黄河水资源的影响非常重大。

[参 考 文 献]

- [1] 李栋梁, 吕世华, 邓振镛, 等. 疏勒河绿洲系统气候变化的特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 233—237.
- [2] 叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 46—49.
- [3] 徐国昌, 姚辉, 李珊, 等. 中国干旱半干旱地区气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [4] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 52—63.
- [5] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学进展与未来趋势[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 467—469.
- [6] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京: 气象出版社, 2001. 61—74.
- [7] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314—319.
- [8] 张国胜, 李林, 时兴合, 等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 277—283.
- [9] 蓝永超, 丁永建, 康尔泗, 等. 黄河上游径流长期变化及趋势模型[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 321—326.
- [10] 王爱军, 朱诚. 黄河断流对气候变化的响应[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 103—107.
- [11] 朱燕君, 李海萍. 黄河断流的气候因子分析[J]. 资源科学, 2003, 25(2): 26—31.
- [12] 杨志刚, 杨洪昌, 谷湘潜, 等. 近年来黄河下游断流的干旱背景分析[J]. 气象学报, 2000, 58(6): 751—758.
- [13] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002. 120—122.

(部分参考文献略)