

1957—2009 年乌鲁木齐河径流与气候变化的对应关系

穆艾塔尔·赛地¹, 热孜燕², 阿不都·沙拉木¹

(1. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049; 2. 巩留县水利局, 新疆 巩留 835400)

摘要:以 1957—2009 年乌鲁木齐河径流量、气温和降水量数据为基础, 采用线性分析、Mann-Kendall 检验方法、相关性分析和灰色关联度分析法等方法, 研究乌鲁木齐河年径流量、气温和降水量的变化特征以及影响径流量的气象因子。结果表明: (1) 50 多年间乌鲁木齐河年径流量变化呈增加趋势, 气温显著升高而降水量缓慢减少。从径流量的年际变化来看, 乌鲁木齐河年径流量变化出现平水期(1957—1990 年)、丰水期(1991—2000 年)和平水期(2001—2009 年), 总体呈现波动增加趋势; 从年内分配来看, 乌鲁木齐河年径流量主要集中在夏季和秋季, 而春季和冬季较少; 从月分布来看, 6 月、7 月、8 月份径流量最大, 其他月份较少。(2) Mann-Kendall 检验表明, 1957—2009 年乌鲁木齐河年径流量、春季径流量和冬季径流量均显著上升, 而夏季和秋季径流量上升趋势不显著。(3) 相关性分析和灰色关联度分析表明, 乌鲁木齐河年径流量变化主要受降水的影响。

关键词: 乌鲁木齐河; 年径流量; Mann-Kendall 检验; 相关性分析; 灰色关联度分析

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0289-05

Corresponding Relationship Between the Runoff and Climate Change in the Upper Urumqi River Basin During the Period from 1957 to 2009

Muattar Saydi¹, Reziyan², Shalamu Abudu¹

(1. Xinjiang Research Institute of Water Resources, Urumqi 830049, China;

2. Water Conservancy Bureau of Gongliu, Gongliu, Xinjiang 835400, China)

Abstract: We analyzed the annual and interannual variability of runoff discharge and the related influential factors in Urumqi River basin during the hydrological years from 1957 to 2009 using linear analysis, Mann-Kendall test, correlation and grey correlation analysis methods based on the annual runoff, temperature, and precipitation data from the hydrological station located at the river outlet. Results showed that: (1) annual runoff had the increasing trend during the study period, and the annual average temperature increased significantly while the annual precipitation decreased slightly; the runoff had relatively greater value and was sufficient during the period from 1991 to 2000, and had average value during the hydrological years from 1957 to 1990 and from 2001 to 2009; in terms of seasonal distribution, the runoff in Urumqi River basin mainly concentrated in summer and fall seasons while runoff was relatively small in winter and spring; the runoff was the greatest in June, July and August within a year; (2) Mann-Kendall analysis showed that the annual, spring and winter runoff had significant increasing trend while the increasing trend for runoff in summer and fall seasons was insignificant; (3) the correlation and gray correlation analysis showed that the increased runoff in Urumqi River basin was mainly caused by precipitation during the study period.

Keywords: Urumqi River; annual runoff; Mann-Kendall test; correlation analysis; grey correlation analysis

气候变化直接影响水资源径流的大小及空间分布, 是径流变化的主要驱动因素^[1-2], 而气温和降水变化是气候变化的主要体现。气温变化可以引起流域潜在蒸发和实际蒸发变化, 降水量年内与年际变化在

下垫面引起流域水分垂向和横向再分布, 由此会影响流域径流情势变化^[3]。本文以乌鲁木齐河上游山口英雄桥水文站 1957—2009 年年径流量、气温和降水量等数据为基础, 研究近 50 多年乌鲁木齐河年径

流量变化趋势及其与气温、降水等气象因子的关系,以期了解全球及区域气候变化背景下的干旱区内陆河流域水资源变化提供参考。

1 研究区概况

乌鲁木齐河是新疆干旱区典型的内陆河,位于天山山脉北坡中段,补给以冰雪融水、降雨及地下水混合补给为主,是新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市工、农业生产和城市生活用水的主要水源^[5]。乌鲁木齐河多年平均径流量为 2.44 亿 m³,年最大径流量为 3.44 亿 m³。乌鲁木齐河由乌鲁木齐河水系组成,包括发源于南山的乌鲁木齐河及水西沟等 10 条支流以及发源于东山水磨沟、芦草沟、铁厂沟、白杨沟等 15 条小河和山泉。乌鲁木齐河径流量在出山口附近达到最大值,在中下游逐渐散失,并最终消失在米泉市西北部的古尔班通古特沙漠中。乌鲁木齐河流域是新疆水利水电建设中水资源开发利用程度较高、工程效益发挥较好的地区,河流上游建有青年渠、知青渠、黄草梁渠以及大西沟水库等;中游拦河筑坝建有乌拉泊水库和红雁池水库;下游平原地区修建了猛进水库、八一水库。流域水资源利用和开发程度高,水资源变率对城市生产、生活影响极大^[4-6]。

2 数据与方法

2.1 数据

利用乌鲁木齐河出山口英雄桥水文站 1957—2009 年实测年径流量、降水量和气温等数据,采用线性回归分析、相关分析、Mann-Kendall 检验法和灰色关联度分析方法定量研究乌鲁木齐河年径流量、气温与降水量变化趋势以及径流量与气温、降水量变化的相关性,分析乌鲁木齐河年径流量变化的原因及与气候因子的相关性。

2.2 灰色关联度分析

灰色理论方法视不确定的信息为灰数,应用灰色数学处理不确定量,可以最终使不确定量化^[7-8]。

假设有 n 个时间序列:

$$\begin{aligned} & tX_1^{(t)}, X_2^{(t)}, \dots, X_n^{(t)} \\ & 1X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_n^{(1)} \\ & 2X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, \dots, X_n^{(2)} \\ & \vdots \\ & nX_1^{(n)}, X_2^{(n)}, \dots, X_n^{(n)} \end{aligned} \quad (1)$$

另设定时间序列 $m: \{X_0^{(0)}(t=1, 2, 3, \dots, m)\}$, 该时间序列为母序列,而上 n 序列为子序列。通过原始数据转换、计算关联系数、求关联度和排关联序,从而比较关联度大小^[9]。

2.3 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验方法,该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算比较简单,是目前较为常用的气候、气象趋势判断方法^[9-12]。

假设 H_0 为时间序列数据 (X_1, \dots, X_n) , 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 , 是双边检验,对于所有的 $k, j < n$, 且 $k \neq j$, X_k 和 X_j 的分布不相同的,检验的统计变量 S 计算如下:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{j=k+1}^n S_{gn}(X_j - X_k) \quad (2)$$

统计变量 S 的取值由符号函数 $S_{gn}(X_j - X_k)$ 决定,其中:

$$S_{gn}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

S 服从正态分布,其均值为 0,方差 $\text{var}(S)$ 计算公式为:

$$\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (4)$$

当 $n \geq 10$ 时, Z 收敛于标准正态分布,正态分布检验统计量 Z 计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

双边趋势检验中,在指定的 α 置信水平上,若 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$, 则接受假设 H_0 , 即趋势不显著;反之则拒绝原假设 H_0 , 趋势显著。其中,若 Z 为正值,说明序列变化有上升趋势;若 Z 为负值,说明序列变化有下降趋势。

Mann-Kendall 趋势检验法可以进行序列变化的突变检验。对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 定义统计量 T_j , 表明第 j 个样本 x_j 大于 x_i 的累计数,其中 $j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, j-1$ 。

$$T_j = \sum_{i=1}^{j-1} n_{ji} \quad (6)$$

在原序列随机独立的假定下,定义统计变量 $U(t)$ 为:

$$U(t) = \frac{T_j - E(T_j)}{\sqrt{\text{var}(T_j)}} \quad (7)$$

其中, $E(T_j)$, $\text{var}(T_j)$ 分别为累计统计量 T_j 的均值和方差,其计算为:

$$E(T_j) = [j(j-1)]/4 \quad (8)$$

$$\text{var}(T_j) = [j(j-1)(2j+5)]/72 \quad (9)$$

$U(t)$ 为标准正态分布,是按时间序列计算的统计变量,在给定的置信水平 α 上,若 $|U(t)| > \alpha$, 拒绝

原假设 H_0 , 表明序列的趋势变化显著。其中: 当 $U(t) > 0$ 时, 说明序列变化有上升趋势; 当 $U(t) < 0$ 时, 说明序列变化有下降趋势; 若 $|U(t)| < \alpha$, 则接受原假设 H_0 , 表明序列的趋势变化不显著。利用同样的方法计算原时间序列反序列的 $U(t)$ 统计变量, 记为 $U(t)'$, 获得 $U(t)$ 和 $U(t)'$ 统计曲线。若分析绘制的两条统计曲线出现交点, 并交点落在置信水平 α 的临界线之间, 那么交点对应的值便是突变开始的时间。

3 结果与分析

3.1 径流量与气象因子的变化

运用距平分析法和时间序列法分析研究乌鲁木齐河上游气象要素的时程变化特征。由图 1 可以看出,

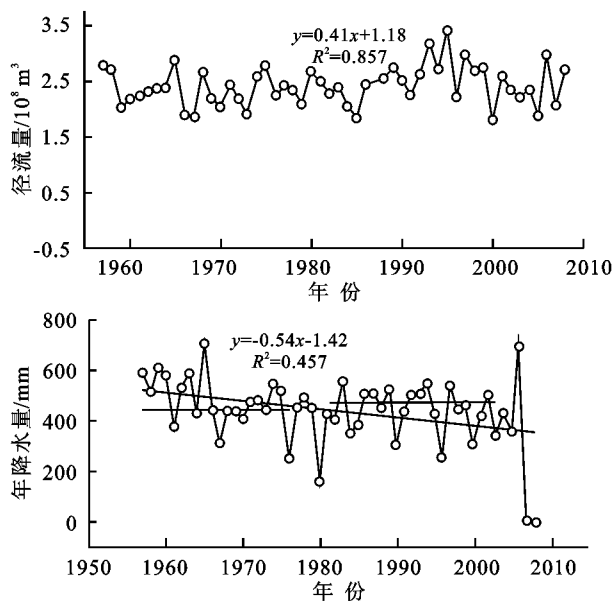


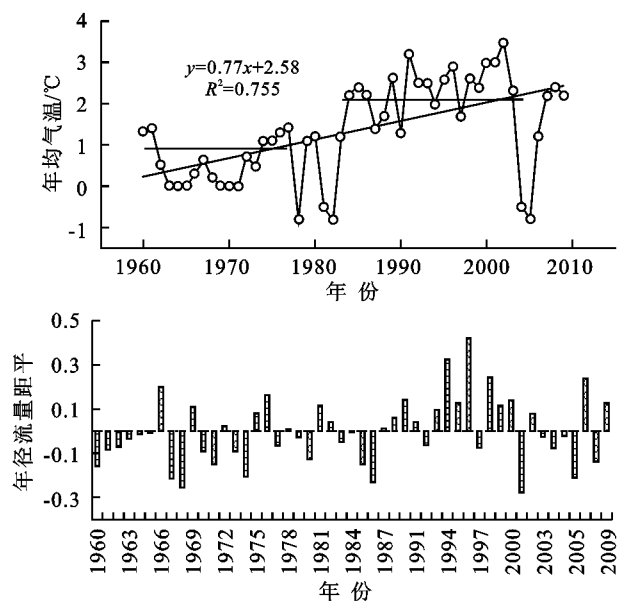
图 1 1957—2009 年乌鲁木齐河年径流量、气温和降水量变化

运用时间序列分析法分析乌鲁木齐河上游 1957—2009 年气温和降水量的变化规律(图 1)。结果表明, 乌鲁木齐河上游出山口气温变化总体呈上升趋势, 线性倾向率为 $0.018^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 相当于每 10 a 平均气温升高 0.18°C 。根据 1957—2009 年的气温变化总体情况, 将气温变化趋势可以分成 4 个时段, 分别为 1957—1979 年、1980—1983 年、1984—2004 年、2005—2009 年。其中, 1957—1979 年和 1984—2004 年两个时期气温均呈显著上升趋势, 而 1980—1983 年和 2005—2009 年气温变化总体上呈上升趋势, 但个别年份气温发生明显的下降 ($< -1^{\circ}\text{C}$), 其中在 1979 年、1982 年、1983 年, 2005 年出现气温低值 ($0 \sim -1^{\circ}\text{C}$); 从 1957—2009 年乌鲁木齐河上游降水量历年变化可以看出, 降水量在整个研究时段总体上呈缓慢降低的趋势, 线性倾向率为 $1.36 \text{ mm}/\text{a}$ 。

3.2 Mann-Kendall 检验法

利用 Mann-Kendall 检验法计算 1957—2009 年

1957 年以来乌鲁木齐河年径流量呈增加趋势。其中: 1957—1990 年平均年径流量为 2.35 亿 m^3 , 接近于多年平均水平, 总体呈波动增加趋势; 1991—2000 年为丰水期, 径流量大于多年平均径流量, 在 1996 年径流量达到最大正距平值, 为 0.42; 2001—2009 年径流量存在一定的波动, 在 2001 年径流量达到最大负距平值, 为 -0.28, 总体上接近于多年平均径流量, 相对于前一段而言是流域的平水期。如图 2 所示, 从径流量的季节性分布来看, 春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)和冬(12—次年 2 月)4 个季节分别占年总径流量的 10.28%, 69.37%, 15.74%, 4.73%。从径流量的月平均值来看, 6 月、7 月、8 月份径流量最大, 分别占 19.3%, 28.6%, 21.4%。



序列实测径流量资料, 在 0.05 的置信水平上获得乌鲁木齐河年径流量和四季径流量的变化趋势特征, 计算结果如表 1 所示。

计算结果表明, 在 0.05 的置信水平上, 乌鲁木齐河上游年径流量、春季和冬季径流量的 Z 值分别为 2.11, 2.45, 4.41, 均大于检验临界值 1.89, 表明在 1957—2009 年乌鲁木齐河上游年径流量、春季径流量和冬季径流量均呈显著的上升趋势; 与此对比, 乌鲁木齐河上游夏季和秋季径流量的 Z 值分别为 1.03, 1.61, 均小于检验临界值 1.89, 表明该时段径流量的上升趋势不显著。

突变检验分析表明(图 3), 在 1957—2009 年除 1974 年外, 其他时间 $U(t)$ 的统计变量取值均大于零, 表明在研究期间乌鲁木齐河上游年径流量的变化呈显著的上升趋势。其中除了 1963—1967 年、1994—2005 年 $U(t)$ 的曲线超过临界线外, 在其他时间段 $U(t)$ 和 $U(t)'$ 的统计曲线均落在 0.05 置信水平

上的检验临界线之间,表明乌鲁木齐河上游年径流量的变化趋势不显著。

计算可知,1986 年以前乌鲁木齐河上游年径流量上升变化有较大的波动,而 1986 年后其径流量变

化呈逐渐增长的趋势。1957—2009 年乌鲁木齐河上游年径流量的 $U(t)$ 和 $U(t)'$ 统计曲线落在两条检验临界线之间的部分在 1970 年、1972 年、1978 年出现交点,代表其年径流量变化的突变发生时间。

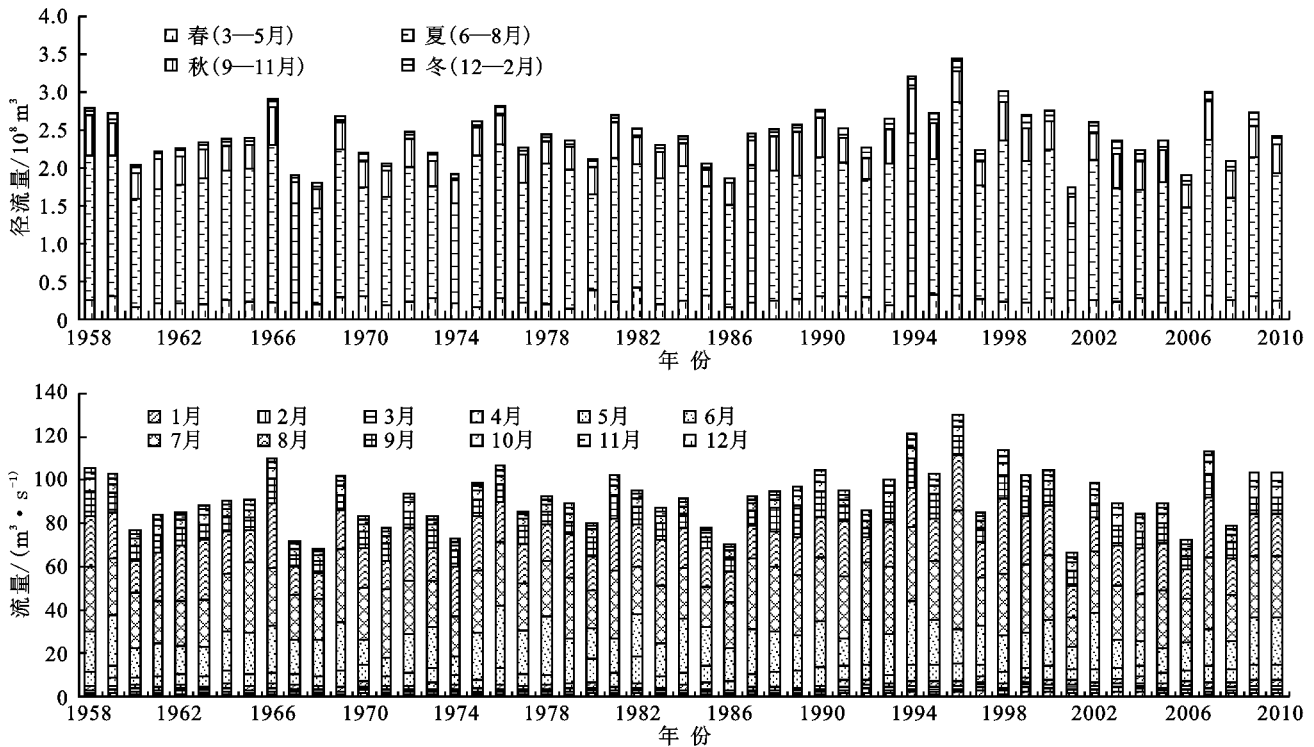


图 2 1957—2009 年乌鲁木齐河径流量年内变化特征

表 1 乌鲁木齐河上游径流量变化趋势检验结果

项目	多年平均 径流量/ 10 ⁸ m ³	Z 统计 变量	Z 统计变 量临界值	显著 水平	趋势
春季	0.26	2.45	1.89	0.05	显著上升
夏季	1.65	1.03	1.89	0.05	不显著上升
秋季	0.39	1.61	1.89	0.05	不显著上升
冬季	0.12	4.41	1.89	0.05	显著上升
全年	2.42	2.11	1.89	0.05	显著上升

过 0.01 置信水平上的显著性检验,表明乌鲁木齐河年径流量变化受降水的影响较显著,受气温的影响不显著。为了进一步验证以上相关分析结果,利用灰色关联度分析方法分析乌鲁木齐河上游地区年径流量与降水和气温的关联度。首先通过对 1957—2009 年乌鲁木齐河上游年径流量与气温、降水的原始数据进行均值化转换,采用如下公式:

$$X_{ij}^1 = (X_{ij} - \overline{X_j}) / S_j \tag{10}$$

式中: X_{ij} ——原始数据; $\overline{X_j}$ ——平均值, $\overline{X_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$;

S_j ——标准差, $S_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \overline{X_j})^2}$ 。由此得到标准化的数据,结果如表 2 所示。

原始数据标准化处理后,以年径流量为参考序列 X_0 ,以气象因子(气温和降水量)为比较序列 X_1 ,求得比较序列与参考序列的绝对差值,从而计算出乌鲁木齐河流域上游地区年径流量与气象因子的关联系数,比较其大小,确定年径流量与气象因子之间的相关性。比较时,以 L_{01} 代表径流量与降水量间的关联系数,以 L_{02} 代表径流量与气温间的关联系数。计算可得 $L_{01} = 0.8517$, $L_{02} = 0.7158$;年径流量与降水和气温的关联度的大小顺序为 $L_{01} > L_{02}$,表明乌鲁木齐河上游降水量对径流量的影响比气温更显著,该结论与相关性分析的结果一致。

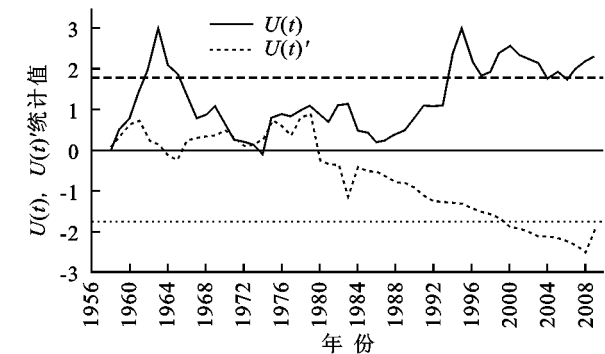


图 3 乌鲁木齐河上游出山口年径流量 Mann-Kendall 检验曲线

3.3 乌鲁木齐河上游年径流量与气温、降水的关系

通过径流量和气温、降水量等气象因子的相关分析可知,乌鲁木齐河年径流量与降水量的相关性较好 ($R^2 = 0.857$),通过 0.01 置信水平上的显著性检验;而径流量与气温的相关性不显著 ($R^2 = 0.457$),未通

表 2 径流量、气温和降水量的标准化值

年份	R_t	T_t	P_t	年份	R_t	T_t	P_t	年份	R_t	T_t	P_t
1957	0.829437	-0.14732	1.221623	1975	0.868589	-2.02232	0.565039	1993	1.661279	1.28125	0.426019
1958	0.670148	-0.05804	0.478621	1976	-0.24912	-0.32589	-1.98146	1994	0.689456	0.209821	0.795172
1959	-0.71089	-0.86161	1.400094	1977	0.115586	-0.23661	-0.08215	1995	2.130565	1.013393	-0.3151
1960	-0.34083	-1.30804	1.127691	1978	-0.06516	-1.75446	0.280425	1996	-0.3006	0.834821	-1.94858
1961	-0.27647	-1.30804	-0.79322	1979	-0.55321	-2.02232	-0.10564	1997	1.257962	1.370536	0.751963
1962	-0.10002	-1.30804	0.65991	1980	0.636896	-0.23661	-2.82685	1998	0.640113	1.370536	-0.17702
1963	-0.00026	-1.04018	1.169961	1981	0.273802	0.65625	-0.32262	1999	0.754351	1.816964	-0.00137
1964	0.024142	-0.77232	-0.26626	1982	-0.17188	0.834821	-0.52363	2000	-1.2912	0.745536	-1.4592
1965	1.046113	-1.12946	2.287751	1983	0.054445	0.65625	0.915405	2001	0.452936	0.65625	-0.42031
1966	-0.9819	-1.30804	-0.18736	1984	-0.66852	-0.05804	-1.01865	2002	-0.05121	-0.05804	0.379992
1967	-1.19032	-1.30804	-1.38405	1985	-1.06916	0.209821	-0.70962	2003	-0.30489	0.209821	-1.1248
1968	0.606057	-1.30804	-0.19581	1986	0.130603	1.013393	0.433534	2004	-0.04102	1.013393	-0.2672
1969	-0.37247	-0.68304	-0.22587	1987	-4.8449	-0.14732	0.449502	2005	-0.96189	-0.14732	-0.97732
1970	-0.67094	-0.86161	-0.49921	1988	0.36766	1.549107	-0.08215	2006	1.241872	1.549107	2.225756
1971	0.176781	-0.32589	0.111347	1989	0.765614	0.924107	0.594157	2007	-0.6047	0.924107	1.194383
1972	-0.37408	-0.32589	0.214672	1990	0.277557	0.924107	-1.45544	2008	0.693746	0.03125	0.830866
1973	-0.94221	-0.14732	-0.16293	1991	-0.24	0.477679	-0.20614	2009	1.661279	1.28125	0.426019
1974	0.456422	-0.05804	0.813958	1992	0.538211	1.013393	0.392204				

注: R_t , T_t , P_t 分别为径流标准化值、气温标准化值、降水标准化值。

4 结 论

本文通过分析 1957—2009 年乌鲁木齐河年径流量变化及其与气温、降水量的关系得出如下结论:

(1) 从径流量的年际变化来看,1957—1990 年平均年径流量接近于多年平均水平,1991—2000 年径流量大于多年平均径流量,2001—2009 年与多年平均径流量基本一致,总体呈增加的趋势,出现平水期(1957—1990 年)、丰水期(1991—2000 年)和平水期(2001—2009 年)的变化过程。径流量主要集中在夏季和秋季,春季和冬季径流量比重较小。

(2) 乌鲁木齐河上游径流量的变化与降水量的变化趋势一致;径流量增长的同时气温显著升高而降水量缓慢减少。

(3) Mann-Kendall 检验表明乌鲁木齐河年径流量、春季径流量和冬季径流量均呈显著上升趋势,而夏季和秋季径流量上升趋势不显著。

(4) 相关分析表明,乌鲁木齐河径流量与降水量的相关性较好,而与气温的相关性不显著。灰色关联度法分析表明径流量与降水量间关联系数大于其与气温间关联系数,表明降水量对径流量影响更显著。

参考文献:

[1] Dooge J C I. Sensitivity of runoff to climate change: A hortonian approach[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1992,73(12):2013-2024.

[2] Bergstrom S, Carlsson B, Gardelin M, et al. Climate change impacts on runoff in Sweden-assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modeling[J]. Climate Research,2001,16(2):101-112.

[3] 张士锋,华东,孟秀敬,等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. 地理学报,2011,66(1):13-24.

[4] 谷鑫,金兵. 乌鲁木齐河水文特性分析[J]. 黑龙江水利科技,2012,40(11):17-18.

[5] 姚海燕,张民. 乌鲁木齐河流域水管理信息系统[J]. 水文,2006,26(2):78-80,96.

[6] 穆艾塔尔·赛地,阿不都·沙拉木,崔春亮,等. 新疆天山北坡山区流域水文特征分析[J]. 水文,2013,33(2):87-92.

[7] 秦昌波,郑丙辉,秦延文,等. 渤海湾天津段海岸带水环境质量灰色关联度评价[J]. 环境科学研究,2006,19(6):94-99.

[8] 李香云,王玉杰. 不同植被类型对地表径流影响的灰色关联度分析[J]. 水土保持通报,2007,27(2):83-86.

[9] 曹辉,黄强,畅建霞,等. 黑河径流时空演变规律分析[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):69-72.

[10] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.

[11] 陈忠升,陈亚宁,徐长春. 近 50 a 来塔里木河干流年径流量变化趋势及预测[J]. 干旱区地理,2011,34(1):43-51.

[12] Gerstengarbe F W, Werner P C. Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime[J]. Climate Research,1999,11(2):97-107.