

额尔齐斯河流域气候特征及变化趋势分析

李 捷^{1 2} 夏自强^{1 2} 郭利丹^{1 2} 王 霞²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水文水资源学院 江苏 南京 210098)

摘要 选取额尔齐斯河流域斋桑泊、塞米巴拉金斯克、鄂木斯克、托博尔斯克 4 个代表站 1948 ~ 1995 年实测逐月降水与气温资料 , 利用距平分析法、5 年滑动平均法、坎德尔秩次相关检验法及相关水文统计方法对流域内气候特征及变化趋势进行了分析 . 结果表明 : 额尔齐斯河流域年均降水量在 200 ~ 500 mm 之间 , 主要集中于夏、秋两季 , 下游降水较上游丰富 , 但年际变化下游小于上游 ; 年及四季降水量在 1948 ~ 1995 年期间整体呈上升趋势 ; 流域年均气温自上游到下游逐渐降低 , 但年际变化逐渐增大 ; 流域年均气温多年来总体呈上升趋势 .

关键词 降水 ; 气温 ; 气候变化 ; 额尔齐斯河流域

中图分类号 : P461⁺.5 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2008)03-0311-05

额尔齐斯河(以下简称“ 额河 ”)是我国唯一一条自东向西流入北冰洋的跨界河流^[1] , 流域位于 46°55'N ~ 49°10'N , 85°30'E ~ 90°30'E 之间 , 地处欧亚大陆腹地 . 河流发源于中国境内新疆维吾尔自治区富蕴县北部海拔 3 500 m 的齐格尔台达坂 , 自东向西流经中国、哈萨克斯坦、俄罗斯 , 在俄罗斯境内汉特-曼西斯克附近汇入鄂毕河 , 为鄂毕河的最大支流 . 河流全长 4 248 km , 流域面积 164 万 km² [2-4] ; 中国境内河长 633 km , 流域面积 5.37 万 km² . 流域多年平均降水量 200 ~ 500 mm , 河口处年均径流量为 950 亿 m³ , 年均含沙量为 0.076 kg/m³ , 年均输沙量为 18.5 万 t .

本文采用的数据是额河流域斋桑泊、塞米巴拉金斯克、鄂木斯克、托博尔斯克 4 个代表站 1948 ~ 1995 年 48 年的逐月降水及温度资料 . 4 个代表站从上游到下游依次分布 , 其地理坐标分别为 : 斋桑泊站(47.5°N , 84.9°E)、塞米巴拉金斯克站(50.4°N , 80.2°E)、鄂木斯克站(55.0°N , 73.4°E)、托博尔斯克站(58.2°N , 68.2°E) .

本文主要采用距平分析法^[5]、5 年滑动平均法^[6]、坎德尔(Mann-Kendall)秩次相关检验法^[7-9]以及相关水文统计学方法 , 对额河流域的气候变化特征和变化趋势进行分析 , 寻找其时间分布规律 .

1 降水量的变化特征分析

1.1 降水量的年内分配

从表 1 可以看出 , 额河流域降水量年内分配不均匀 . 降水主要集中在夏、秋两季 , 两季降水量占全年降水量的 60% ~ 70% , 连续最大 4 个月(斋桑泊 4 ~ 7 月、塞米巴拉金斯克 5 ~ 8 月、鄂木斯克 6 ~ 9 月、托博尔斯克

表 1 额河流域代表站降水量年内分配

Table 1 Annual distribution of precipitation at the representative stations in the Irtysh River Basin

站 名	极值比	年均降水量/mm	月均降水量/mm											
			1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
斋 桑 泊	4.6	306.1	9.7	11.3	16.4	30.5	39.4	33.7	44.2	25.3	26.7	28.1	23.8	17.0
塞米巴拉金斯克	3.0	266.5	13.2	13.9	15.6	17.5	24.9	29.4	39.2	28.9	18.5	23.4	24.1	17.9
鄂 木 斯 克	6.6	353.3	14.3	10.2	10.9	19.7	31.5	52.2	67.3	50.1	32.7	26.6	21.5	16.3
托博尔斯克	5.2	448.3	18.4	14.2	15.7	22.1	41.2	57.2	73.5	66.4	49.5	36.8	30.4	22.9

收稿日期 2007-06-11
基金项目 国家自然科学基金(50379007 , 30490235)
作者简介 李捷(1983—) , 女 , 湖北赤壁人 , 硕士研究生 , 主要从事水文水资源及生态水文研究 .

6~9月)降水量占全年降水量的40%~60%,最大月(7月)降水量占全年降水量的14%~19%,最小月(斋桑泊、塞米巴拉金斯克为1月,鄂木斯克、托博尔斯克为2月)降水量占全年降水量的3%~5%。额河下游(鄂木斯克站、托博尔斯克站)比额河上游(斋桑泊站、塞米巴拉金斯克站)的降水量年内分配更不均匀。

1.2 降水量的年际变化

从表2可以看出,额河流域年均降水量在200~500mm之间,年降水量的 C_v 值为0.21~0.27,年最大与年最小降水量之比为2.9~3.9,整体上,降水量的年际变化上游(斋桑泊站、塞米巴拉金斯克站)大于下游(鄂木斯克站、托博尔斯克站)。

表2 额河流域代表站降水量特征值

Table 2 The characteristic value of precipitation at the representative stations in the Irtysh River Basin							
站名	年均降水量/mm	C_v	C_s/C_v	最大年降水量/mm	最小年降水量/mm	极值比	
斋桑泊	305	0.25	2	487.2	168.5	2.9	
塞米巴拉金斯克	264	0.27	2	399.7	102.9	3.9	
鄂木斯克	351	0.25	2	585.6	192.2	3.0	
托博尔斯克	455	0.21	2	672.2	217.1	3.1	

1.3 不同时段降水量变化

采用距平分析法分析不同时段降水量的变化,结果见表3。从表3可以看出,20世纪50年代4个站降水量与多年均值相比均偏少,60年代偏多偏少各占一半,均在±10%以内,70年代基本上是偏多的,偏多10%左右,80年代偏多偏少各占一半,均在±8%以内,1990~1995时间段均偏多,且偏多在20%以内。

表3 额河流域代表站降水量不同时段均值及距平

Table 3 Mean value and anomaly of precipitation during different periods at the representative stations in the Irtysh River Basin											
站名	1950~1959年		1960~1969年		1970~1979年		1980~1989年		1990~1995年		
	均值/mm	距平/%	均值/mm	距平/%	均值/mm	距平/%	均值/mm	距平/%	均值/mm	距平/%	
斋桑泊	277.1	-9.7	320.4	4.4	285.6	-6.9	331.3	8.0	346.2	12.8	
塞米巴拉金斯克	205.1	-21.5	281.8	7.9	273.8	4.8	253.4	-3.0	312.5	19.6	
鄂木斯克	300.5	-18.6	354.0	-4.1	407.3	10.3	395.8	7.2	430.4	16.5	
托博尔斯克	406.4	-9.2	429.5	-4.0	494.1	10.4	438.2	-2.1	456.6	2.0	

1.4 降水量丰、平、枯频次分析

在对额河流域年降水量的频次分析中,将年降水量按照经验频率分为5种年型:频率小于12.5%的为丰水年,12.5%~37.5%为偏丰年,37.5%~62.5%为平水年,62.5%~87.5%为偏枯年,大于87.5%的为枯水年(表4)。从表4可以看出,统计的48年中,额河流域4个代表站的丰水年占10%左右,偏丰年占27%左右,平水年占25%左右,偏枯年占23%左右,枯水年占15%左右。

表4 额河流域代表站年降水量丰、平、枯频次统计

Table 4 Frequencies of annual precipitation in a wet year, normal year and dry year in the Irtysh River Basin											
站名	丰水年		偏丰年		平水年		偏枯年		枯水年		
	次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	
斋桑泊	5	10.4	14	29.2	11	22.9	12	25.0	6	12.5	
塞米巴拉金斯克	5	10.4	11	22.9	14	29.2	11	22.9	7	14.6	
鄂木斯克	6	12.5	12	25.0	14	29.2	10	20.8	6	12.5	
托博尔斯克	4	8.3	14	29.2	10	20.8	11	22.9	9	18.8	

1.5 降水量连丰年和连枯年分析

首先采用丰水年相应频率 $P < 37.5\%$ 、枯水年相应频率 $P > 62.5\%$ 的标准判别出年降水量系列中的丰水年和枯水年,然后从中挑选出持续时间最长且均值最大的连丰年和持续时间最长且均值最小的连枯年,并分别计算连丰年和连枯年的年均降水量及其与多年平均降水量的比值(模比系数) $K_{\text{丰}}$ 和 $K_{\text{枯}}$ (表5)。从表5可以看出,额河流域4个代表站连丰年为3年或4年, $K_{\text{丰}}$ 在1.20~1.32之间,连枯年在3~5年之间, $K_{\text{枯}}$ 在0.68~0.85之间。

表 5 额河流域代表站降水量连丰年和连枯年分析

站 名	连丰年				连枯年			
	起讫年份	年数	年均降水量/mm	$K_{\text{丰}}$	起讫年份	年数	年均降水量/mm	$K_{\text{丰}}$
斋 桑 泊	1992 ~ 1994	3	406.2	1.32	1974 ~ 1978	5	224.1	0.73
塞米巴拉金斯克	1966 ~ 1968	3	337.4	1.29	1948 ~ 1951	4	177.0	0.68
鄂 木 斯 克	1977 ~ 1979	3	467.2	1.27	1951 ~ 1955	5	252.0	0.68
托博尔斯克	1969 ~ 1972	4	536.9	1.20	1958 ~ 1960	3	382.4	0.85

2 降水量的变化趋势分析

对降水量的变化趋势分析采用 2 种方法 :一是 5 年滑动平均法 ,绘制年降水量 5 年滑动平均过程线图 ;二是降水量变化倾向率法^[10].

2.1 年降水量的变化趋势

绘制 4 个代表站的年降水量 5 年滑动平均过程线(图 1),从图 1 可以看出 :4 个代表站的年降水量都呈上升趋势 ,表明额河流域在 1948 ~ 1995 年期间正处于一个丰水期.

为更具体地说明额河流域年降水量的变化趋势 ,对各代表站的年降水量变化倾向率进行了统计分析.以时间 t 为自变量 ,年降水量为应变量 ,建立一元回归方程 :

$$\hat{y}(t) = b_0 + b_1 t \tag{1}$$

其趋势变化率方程为

$$d\hat{y}(t)/dt = b_1 \tag{2}$$

方程中的系数 b_0 , b_1 可以用最小二乘法来确定. b_1 即为变化倾向率 , b_1 为正值 ,表示降水有增多趋势 ; b_1 为负值 ,表示降水为减少趋势 ;绝对值越大 ,变化趋势越明显. 计算结果表明 :额河流域年降水量变化倾向率在 0.08 ~ 0.35 mm 之间.

2.2 四季降水量的变化趋势

采用上述同样方法计算 4 个代表站春(3 ~ 5 月)夏(6 ~ 8 月)秋(9 ~ 11 月)冬(12 ~ 次年 2 月)四季降水量变化倾向率(表 6).从表 6 中可以看出 :除斋桑泊站夏季(- 0.013 mm/a)及塞米巴拉金斯克站春季(- 0.004 mm/a)降水量变化呈下降趋势外 ,其他各站四季降水量均呈上升趋势 ;其中 ,秋季降水量的上升趋势最显著(0.032 ~ 0.138 mm/a) ,其次为冬(0.002 ~ 0.127 mm/a) ,夏(0.003 ~ 0.071 mm/a)两季.

3 气温统计特征分析及检验

对额河流域气温时间序列的检验采用坎德尔秩次相关检验法.对于水文序列 x_i ,先确定所有对偶值(x_i , x_j ; $j > i$, $i = 1, 2, \dots, n - 1$; $j = i + 1, i + 2, \dots, n$)中的 $x_i < x_j$ 的出现个数 p ,对于无趋势的序列 , p 的数学期望为 $E(p) = \frac{1}{4n(n-1)}$. 构建坎德尔秩次相关检验的统计量 :

$$U = \frac{\tau}{[\text{Var}(\tau)]^{1/2}} \tag{3}$$

其中

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$$

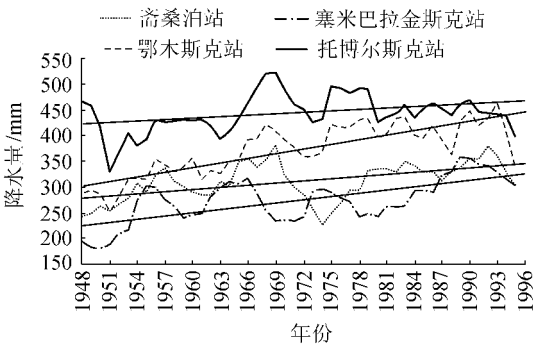


图 1 年降水量 5 年滑动平均过程线

Fig.1 Moving average curve of annual precipitation over 5 years

表 6 额河流域代表站四季降水量变化倾向率

Table 6 Trend of seasonal precipitation at the representative stations in the Irtysh River Basin					mm/a
站 名	春季	夏季	秋季	冬季	
斋 桑 泊	0.002	- 0.013	0.116	0.002	
塞米巴拉金斯克	- 0.004	0.047	0.050	0.050	
鄂 木 斯 克	0.068	0.003	0.138	0.127	
托博尔斯克	0.034	0.071	0.032	0.014	

$$Var(\tau) = \frac{\chi^2(2n+5)}{9n(n-1)}$$

式中 n 为序列样本数, 当 n 增加时, U 很快收敛于标准化正态分布. 假定序列无变化趋势, 当给定显著性水平 α 后, 可在正态分布表中查得临界值 $U_{\alpha/2}$. 当 $|U| < U_{\alpha/2}$ 时, 接受假设, 序列的趋势性不显著; 当 $|U| > U_{\alpha/2}$, 序列的趋势性显著, 而且 $U > 0$, 序列呈上升趋势, $U < 0$, 序列呈下降趋势. 查表得 $U_{0.05/2} = 1.96$.

3.1 年均气温统计特征值分析

从表 7 可以看出, 额河流域年均气温从上游(斋桑泊站、塞米巴拉金斯克站) 到下游(鄂木斯克站、托博尔斯克站) 逐渐降低, 而年均气温的年际变化(C_v) 从上游到下游却是逐渐变大的, 这与流域年均降水量的年际变化情况正好相反.

表 7 额河流域代表站气温特征值

Table 7 The characteristic value of temperature at the representative stations in the Irtysh River Basin							
站 名	统计历时	最高年均气温/℃	最低年均气温/℃	极值差/℃	多年平均气温/℃	C_v	C_s/C_v
斋 桑 泊	1948 ~ 1995 年	6.3	1.9	4.4	4.4	0.27	2.0
塞米巴拉金斯克	1926 ~ 1995 年	5.8	0.0	5.8	3.4	0.34	2.0
鄂 木 斯 克	1928 ~ 1995 年	3.5	- 1.4	4.9	1.0	1.16	2.0
托博尔斯克	1931 ~ 1995 年	2.8	- 3.0	5.8	0.4	3.74	2.0

图 2 为额河流域各代表站年均气温年际变化过程线. 从图 2 可以看出: 额河流域各站年均气温变化情况较相似, 气温总体呈上升趋势, 其中, 上游斋桑泊站、下游鄂木斯克站年均气温上升趋势比较显著, 而上游塞米巴拉金斯克站和下游托博尔斯克站年均气温上升趋势不明显; 上游斋桑泊站、塞米巴拉金斯克站在 1954 年、1969 年及 1984 年均出现了低温, 而下游鄂木斯克站、托博尔斯克站在 1941 年及 1969 年也均出现了低温.

—— 年均气温 ---- 5年滑动平均

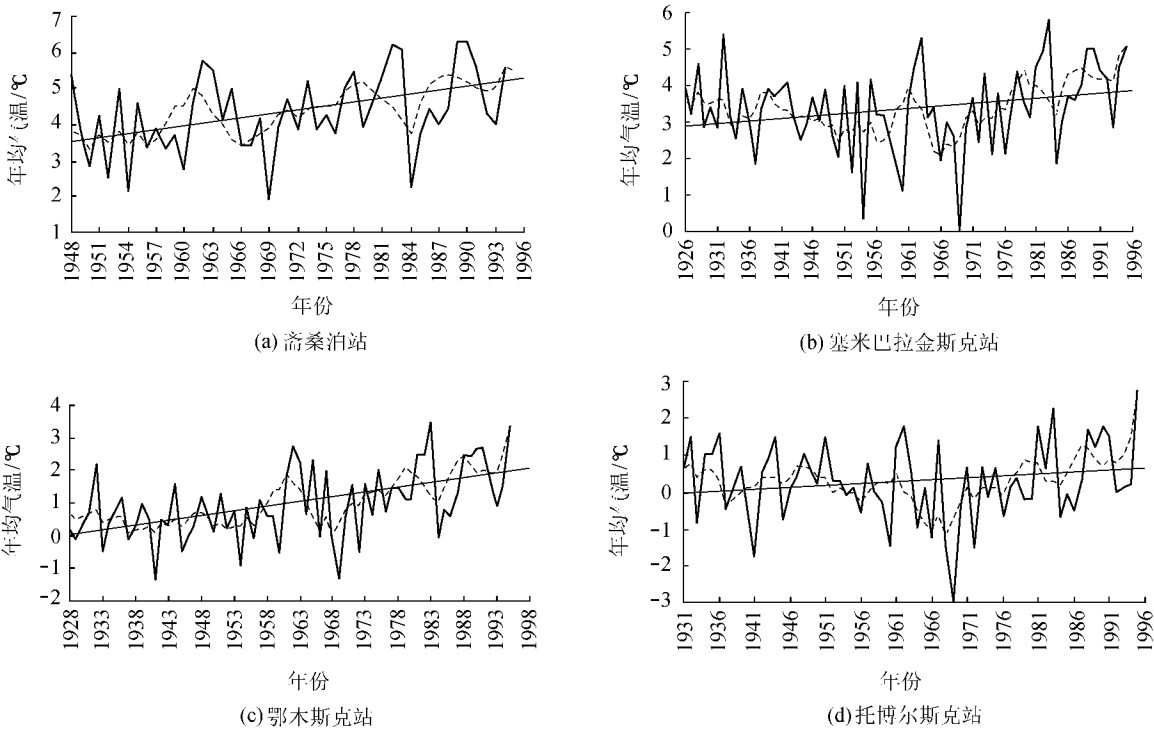


图 2 额河流域代表站年均气温年际变化过程

Fig.2 The inter-annual variation of the average yearly temperature at the representative stations in the Irtysh River Basin

3.2 年均气温变化趋势检验

运用前文所述坎德尔秩次相关检验法对额河流域各代表站统计年份期间年均气温时间序列的趋势性进行检验, 结果表明(表 8) 额河流域 4 个代表站中, 斋桑泊站和鄂木斯克站年均气温上升趋势显著, 而塞米巴拉金斯克站和托博尔斯克站年均气温上升趋势不显著, 这再次验证了图 2 的结论.

4 结 论

- a. 额河流域年均降水量在 200 ~ 500 mm 之间,降水量时空分布不均匀,主要集中于夏、秋两季,年降水量下游多于上游,年降水量 C_v 在 0.21 ~ 0.27 之间,整体上升降水量的年际变化上游大于下游.
- b. 流域年及四季降水量在 1948 ~ 1995 年期间整体处于上升趋势,其中秋季降水量的上升趋势最显著,其次为冬、夏两季.
- c. 流域年均气温从上游到下游逐渐降低,而年均气温的年际变化从上游到下游逐渐变大,流域年均气温多年来总体呈上升趋势.其中,上游斋桑泊站、下游鄂木斯克站年均气温上升趋势比较显著,而上游塞米巴拉金斯克站和下游托博尔斯克站年均气温上升趋势不显著.

参考文献 :

[1] 汤齐成,李丽娟.西北地区主要国际河流水资源特征与可持续发展[J].地理学报,1999,54(6):21-28.

[2] VOGTMANN H,DOBRETsov N. Transboundary water resources : strategies for regional security and ecological stability [M]. Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2005.

[3] 赵纯厚,朱振宏.世界江河与大坝 [M].北京 :中国水利水电出版社,2000.

[4] 朱德祥.国际河流研究的意义与发展[J].地理研究,1993,12(4):85-95.

[5] 谭徐明.近 500 年我国特大旱灾的研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(2):77-83.

[6] 丁晶,刘权授.随机水文学 [M].北京 :中国水利水电出版社,1997.

[7] KENDALL M G. Rank correlation method [M]. London : Charles Griffin,1975.

[8] LIBISELLER C,GRIMVALL A. Performance of partial Mann-Kendall test for trend detection in the presence of covariates [J]. Environmetrics, 2002,13(1):71-84.

[9] MANN H B. Non-parametric test of randomness against trend [J]. Econometrica,1945,13:245-259.

[10] 于成龙,胡海清,刘丹.近 43 年来小兴安岭及周边地区的气候变化特征[J].自然灾害学报,2005,14(5):55-60.

Characteristics and trends of change in the climate
of the Irtysh River Basin

LI Jie^{1,2}, XIA Zi-qiang^{1,2}, GUO Li-dan^{1,2}, WANG Xia²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Using an anomaly analytical method , a five-year moving average method , the Kendall test method and a hydrological statistical method , this paper analyzed monthly precipitation and temperature data from 4 stations , Zaysan , Semipalatinsk , Omsk , and Tobolsk , from 1948 to 1995 , in order to identify characteristics and trends of change in the climate of the Irtysh River Basin. The results indicate that the average yearly precipitation in this basin is between 200 mm and 500 mm ; precipitation is mainly concentrated in the summer and autumn ; the precipitation in the lower reaches was much higher than in the upper reaches during the study period , but the inter-annual variation was higher in the upper reaches ; the average annual temperature dropped from the upper reaches to the lower reaches , but the inter-annual variation of temperature in the lower reaches was higher ; and the annual and seasonal precipitation and annual temperature increased on the whole from 1948 to 1995.

Key words : precipitation ; temperature ; climatic change ; the Irtysh River Basin

表 8 额河流域代表站年均气温趋势检验
Table 8 The trend test of the annual average temperature
at the representative stations in the Irtysh River Basin

站 名	U	检验结果	趋势性
斋 桑 泊	2.595	拒绝原假设	显 著
塞米巴拉金斯克	1.343	接受原假设	不显著
鄂 木 斯 克	3.737	拒绝原假设	显 著
托博尔斯克	0.125	接受原假设	不显著

注 : | U | 坎德尔统计量 ;显著性水平为 0.05.