

# Study on Impacts of Climate Changes on Bahe River Runoff\*

Xian Jia, Bing Shen

State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an  
Email: jiaxian727@163.com

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2013; revised: Nov. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** Based on hydrological data for Bahe River from time series of 1961 to 2010, the trend of hydrological and meteorological elements was analyzed by using the Mann-Kendall method. The runoff response to climate change is researched with Double mass curves and multiple regression models. The results showed that: the runoff significantly reduced while the annual mean temperature and annual precipitation have no significant trends, with only slightly elevated temperature and precipitation decreasing slightly; by the regression analysis, runoff reduction is mainly due to rising temperatures and reduced precipitation.

**Keywords:** Mann-Kendall; Double Mass Curves; Regression Analysis; Climate Change

## 灞河流域气候变化及其对径流的影响研究\*

贾 宪, 沈 冰

西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安  
Email: jiaxian727@163.com

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

**摘 要:** 根据 1961~2010 年的灞河流域内的逐月水文气象数据, 采用 Mann-Kendall 法对水文气象要素进行变化趋势分析, 采用双累积曲线和复回归模型进行径流量的气候变化响应研究。结果表明: 流域内年径流量显著减少, 年平均气温和年降水量均无显著的变化趋势, 仅仅表现为气温略升高、降水稍减少; 气温变化和降水变化对径流的影响各自存在三个突变点, 突变点前后径流量增加或减少的变化明显, 由回归分析可知, 气温升高、降水减少是径流量减少的主要原因。

**关键词:** Mann-Kendall; 双累积曲线; 回归分析; 气候变化

### 1. 引言

全球气候变化已经是不必争议的科学事实。据全球范围的观测表明, 近 100 年(1906~2005)全球平均地表温度上升了  $0.74^{\circ}\text{C}$  ( $0.56\sim 0.92^{\circ}\text{C}$ )<sup>[1]</sup>。由于气候变化的影响, 水资源的年际变化很大, 旱涝频繁发生, 水资源供需矛盾突出, 给国民经济的可持续性发展设置

\*基金项目: 陕西高校省级重点实验室科研项目(12JS067)。  
作者简介: 贾宪(1987-), 男, 黑龙江七台河人, 在读硕士生, 研究方向: 干旱水文与雨洪侵蚀。

了巨大的障碍。因此, 认清气候变化的趋势及其对水资源的影响对于合理开发利用水资源具有重要的意义。

在这种大环境下, 我国西北地区的气候变化得到了学者的关注<sup>[2]</sup>, 对于灞河流域水文气象研究也已取得了一定的成果<sup>[3-5]</sup>, 但是都存在着雨量站数量少、代表性低, 水文气象资料序列较短等问题, 因此对于灞河流域气候变化及其对水资源的影响还需进一步研

究。

灞河隶属于黄河流域, 渭河水系, 是渭河右岸一级支流, 位于陕西省西安市东南部, 东经 109°00'~109°47'、北纬 33°50'~34°27'之间, 南起秦岭, 北至渭河, 流域全长 104.1 km, 总流域面积 2581.0 km<sup>2</sup>。灞河是一条典型的不对称水系, 左岸支流少而长, 主要有清河、辋川河和浐河; 右岸支流多而短小。

## 2. 数据和研究方法

本文气温资料采用蓝田气象站 1961~2010 年逐月平均气温, 径流资料采用马渡王水文站 1959~2010 年逐月径流量资料, 降水量资料是对灞河流域内 12 个雨量站根据泰森多边形<sup>[6,7]</sup>(图 1)求得的面平均降水量, 其中各个雨量站的权重及控制面积见表 1。

### 2.1. Mann-Kendall 法

#### 1) 趋势分析方法

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法。非参数检验方法也称之为无分布检验, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量, 计算也比较简便。对于具有  $n$  个样本的时间序列  $x$ , 构造变量  $S$ :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

其中  $n$  为序列长度,  $i > j$ ,  $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的数值,  $\text{sgn}$  为表征函数:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

由下式计算统计检验值  $Z_c$  :

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当  $|Z_c| \leq Z_{1-\alpha/2}$  时, 接受原假设, 表示无变化趋势, 当  $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$  时, 拒绝原假设, 表示序列有显著变化趋势,  $\alpha$  为检验的显著水平。而且为了检验序列的趋

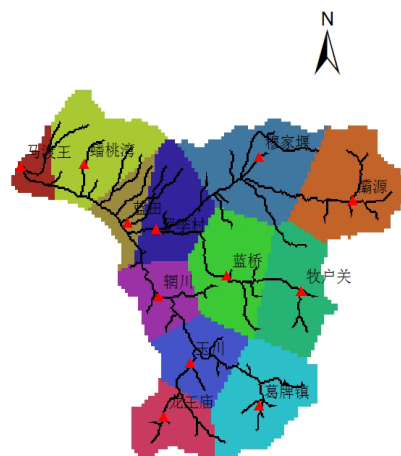


Figure1. Thiessen polygon in the Bahe River basin area  
图 1. 灞河流域面积的泰森多边形示意图

Table 1. The weight and controlled basin area of rain station in Bahe River basin

表 1. 灞河流域雨量站的权重和控制面积

站名	坐标		权重	控制面积 (km <sup>2</sup> )
	东经	北纬		
潘源	109°42'	34°09'	0.12	195.59
穆家堰	109°32'	34°11'	0.13	201.31
罗李村	109°22'	34°09'	0.08	131.47
龙王庙	109°20'	33°54'	0.06	97.42
葛牌镇	109°30'	33°55'	0.11	176.45
马渡王	109°09'	34°14'	0.02	38.77
牧户关	109°30'	34°03'	0.1	153.84
蓝桥	109°27'	34°06'	0.1	162.78
玉川	109°23'	33°58'	0.07	112.83
辋川	109°22'	34°05'	0.06	90.21
蓝田	109°19'	34°09'	0.04	69.34
蟠桃湾	109°14'	34°13'	0.11	170.99

势, 还需要计算单调趋势的量级 Kendall 倾斜度, 即单位时间内的变化量, 计算公式为:

$$\beta = \text{Media} \left( \frac{x_i - x_j}{i - j} \right) (\forall j < i, 1 \leq j < i \leq n) \quad (4)$$

当  $\beta$  值为正表示上升趋势, 即变量随时间的增加而增大, 当  $\beta$  值为负表示下降趋势, 即变量随时间的增加而下降。

#### 2) 显著性检验

本文采用的检验方法是  $t$  检验, 构造检验总计均

值的  $t$  统计量公式为:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n-1}} \quad (5)$$

其中  $\bar{X}$  和  $S$  分别代表样本均值和标准差,  $\mu$  为总体均值,  $n$  为样本量。在确定显著性  $\alpha$  水平后, 根据自由度  $\nu = n-1$  查  $t$  分布, 若  $|t| \geq t_{\alpha}$ , 则拒绝原假设。在结果分析的 M-K 统计表中, significance 下的各个符合的意义表示为: “+”为通过 90% 的置信度检验; “\*”为通过 95% 的置信度检验; “\*\*”为通过 99% 的置信度检验; “\*\*\*”为通过 99.9% 的置信度检验。

## 2.2. 双累积曲线法<sup>[8]</sup>

双累积曲线是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法。

建立双累积曲线的基本方法为: 设有一个参考变量或基准变量  $X$  和被检验变量  $Y$ ,  $n$  年的观测期间得到相应的观测值  $X_i$  和  $Y_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n$ 。然后对变量  $X$  和  $Y$  按时间顺序进行累积计算, 得到新的累积值序列  $X'_i$  和  $Y'_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n$ , 即:

$$X'_i = \sum_{i=1}^n X_i; Y'_i = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (6)$$

然后, 在直角坐标系中绘制两个变量所对应点累积值的关系曲线, 通常以被检验的变量为纵坐标, 参考变量或基准变量为横坐标。

## 2.3. 复回归模型法

通过建立水文系统与气候变量之间的数学模型近似的模拟二者之间的复杂关系是合理可行的。本文将实测径流量作为因变量, 将流域内的气温和降水作为自变量, 建立它们之间的复回归方程来探究灞河流域气候变化对径流的影响。该模型的数学表达式为:

$$Q = a + bT + cP \quad (7)$$

其中:  $Q$  为径流量,  $T$  为平均气温,  $P$  为平均降水,  $a, b, c$  为系数。

## 3. 结果分析

### 3.1. 水文气象要素趋势分析

根据 1961~2010 年灞河流域内的年平均气温、年降水量和年径流量资料, 采用 Mann-Kendall 法对灞河

流域水文气象要素进行趋势分析, 结果见表 2, 可以看到, 虽然流域内的气温和降水在 1961~2010 年的时间里的 MK 值没有通过 90% 的置信度检验, 表明趋势变化不明显, 但结合图 2 和图 3 可以发现气温有升高的趋势, 降水有减少的趋势; 流域内径流减少的趋势很显著, 已通过 99% 的置信度检验。

### 3.2. 气候变化对径流的影响

由于水源地气候、下垫面条件及人为因素的影响, 改变了径流产生模式、水文事件发生的时间、频率和流量, 气温和降水的微小变化能够引起径流的显著变化<sup>[9]</sup>。灞河流域内的气温-径流双累积曲线见图 4, 气温变化对年径流量的影响存在三个突变点, 分别是 1980、1986 和 2002 年, 其中 1980 年前后斜率增大, 表明年径流量增多; 1986 年后斜率减小, 表明年径流量减少; 2002 年后斜率增大, 表明年径流量又有增多。

同样采用双累积曲线观察降水与径流的关系, 灞河流域内的降水-径流双累积曲线见图 5, 可以看到降水变化对年径流量的影响存在三个突变点, 分别是 1976、1986 和 2008 年, 1976 和 1986 年两次的突变都是斜率变小, 表明两次变化均是径流量减少, 2008 年后斜率增大, 表明径流量增多。

将流域内年径流量作为因变量, 将流域内的年平均气温和年降水量作为自变量, 作复回归分析, 结果见表 3, 其中由  $F$  分布表可知,  $F_{0.01} = 5.087$ 。

Table 2. Mann-Kendall test for hydrological and meteorological elements in Bahe River basin

表 2. 灞河流域水文气象要素 Mann-Kendall 趋势检验

Time series	First year	Last year	$n$	$Z_c$	Significance
气温	1961	2010	50	1.62	
降水	1961	2010	50	-1.17	
径流	1961	2010	50	-2.59	**

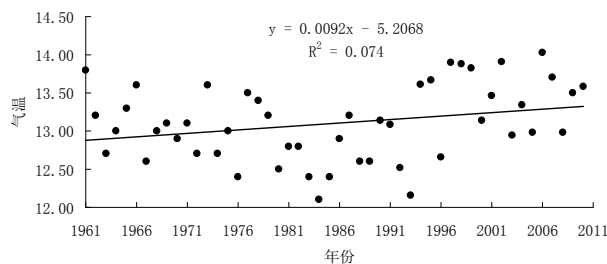


Figure 2. The annual average temperature trends of Bahe River basin

图 2. 灞河流域年平均气温趋势图

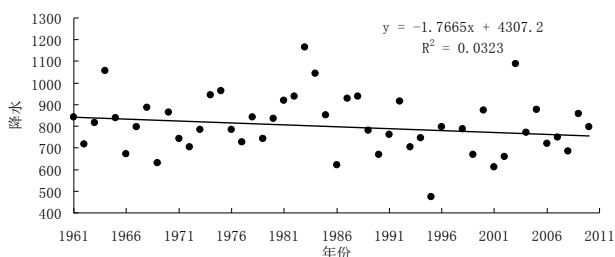


Figure 3. The annual precipitation trends of Bahe River basin  
图 3. 灞河流域年降水量趋势图

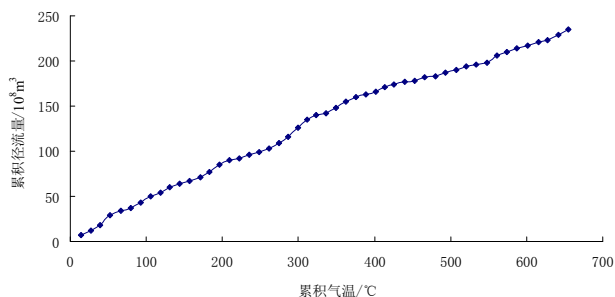


Figure 4. Accumulation curves of the mass temperature and mass runoff in Bahe River basin  
图 4. 灞河流域气温 - 径流双累积曲线图

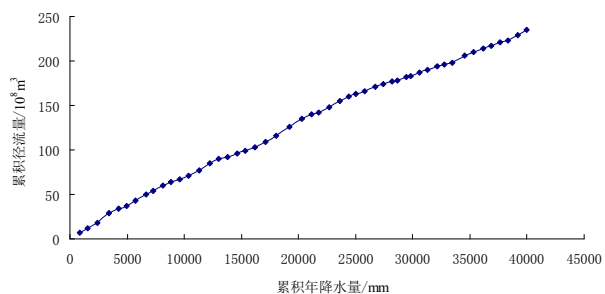


Figure 5. Accumulation curves of the mass precipitation and mass runoff in Bahe River basin  
图 5. 灞河流域降水 - 径流累积曲线

Table 3. Regressive model of annual mean runoff with annual precipitation and annual mean temperature in Bahe River basin  
表 3. 灞河流域径流量与气温、降水的回归模型

回归方程	复相关系数 R	径流量与降水量 Pearson 关系系数	径流量与气温 Pearson 关系系数	统计量 F
$Q = -4.475 - 0.106T + 0.013P$	0.888	0.89	-0.47	87.98

可见, 径流量和气温、降水的复相关性很好, 复相关系数为 88.8%, 且  $F$  达到了 99% 信度 ( $87.98 > 5.087$ )。对于流域内的年径流量而言, 当气温不变时, 降水每增加 1mm, 径流量增加 0.013 亿  $m^3$ , 当降水不变时, 气温每增加 1 $^{\circ}C$ , 径流量减少 0.106 亿  $m^3$ 。所以气温升高和降水减少是灞河流域内径流减少的主要原因。

#### 4. 结论

1) 在 1961~2010 年的期间, 灞河流域的年径流量显著减少, 年平均气温和年降水量均无显著的变化趋势, 仅仅表现为气温略升高、降水稍减少的变化。

2) 气温变化和降水变化对径流量的影响各自存在三个突变点, 突变点前后径流量增加或减少的变化明显, 根据回归分析可知, 气温升高、降水减少是径流量减少的主要原因。

#### 5. 致谢

感谢陕西高校省级重点实验室科研项目(12JS067)对本文的支持; 感谢第十一届中国水论坛推荐。

#### 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. SHI Yafeng, SHEN Yongping and HU Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226. (in Chinese)
- [3] 马新萍, 白红英, 侯钦磊等. 1959 年至 2010 年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1298-1305. Ma Xiping, Bai Hongying, Hou Qinlei, et al. Runoff change of Bahe River basin in Qinling Mountains and its influencing factors. Resources Science, 2012, 34(7): 1298-1305. (in Chinese)
- [4] 王战平, 沈冰, 吕继强. 气候变化及人类活动对灞河源流区径流的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 97-99. Wang Zhanping, Shen Bing and Lv Jiqiang. Impact of climate variation and human activities on runoff in the source area of Bahe River basin. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(6): 97-99. (in Chinese)
- [5] 王战平. 灞河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 176-179. Wang Zhanping. Hydrologic Characteristics analysis in Bahe River basin. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5): 176-179. (in Chinese)
- [6] THIESSEN, A.H. Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review, 1911, 39(7): 1082-1084. (in Chinese)
- [7] 龙胤慧, 廖梓龙. 基于泰森多边形的庆阳市面雨量计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(3): 64-67. Long Yinhui, Liao Zilong. Surface precipitation calculation of Qingyang area based on Thiessen polygons method. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2012, 29(3): 64-67.
- [8] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51. Mu Xingmin, Zhang Xiuqin, Gao Peng, et al. Theory of double mass curves and its application in hydrology and meteorology. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 47-51. (in Chinese)
- [9] 林启才, 李怀恩. 气候变化及宝鸡峡引水对渭河径流量的影响分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 71-74. Lin Qicai, Li Huaen. Analysis on impacts of climate changes and Baojixia water diversion on Wei river runoff. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 71-74. (in Chinese)