

# 黄河流域平均气温变化趋势分析<sup>①</sup>

徐宗学 隋彩虹

(北京师范大学水科学研究院,教育部水沙科学重点实验室,北京 100875)

## 提 要

采用线性倾向估计和非参数统计检验(Mann-Kendall)方法计算黄河流域78个气象站点12个月及年平均气温多年来的长期变化趋势,并在计算结果基本一致的前提下,重点对Mann-Kendall法的计算结果进行了分析。结果表明,黄河流域平均气温总体呈现上升趋势,这种趋势主要归因于1、2、12月气温的升高;气温上升趋势以12月份表现最明显,8月份表现最平缓;全流域年平均气温只有4个站点表现出下降趋势,不同月份变化趋势的地区分布亦有差异,并根据这些差异将流域进行了分区。

**关键词:** 气温 Mann-Kendall 统计检验 线性倾向估计

## 引 言

黄河是我国第二大河,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓、海拔高度4500m的约古宗列盆地,全长5464km。黄河流域位于32~42°N、96~119°E之间,包括内流区流域面积为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,加上下游受洪水影响的范围共 $91.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省区,跨越青藏高原、黄土高原和华北平原。该区地理环境、气候条件十分复杂,一直是人们所关注的焦点。同时,黄河流域资源丰富,生产潜力巨大,在我国实行西部大开发战略中具有重要的战略地位。气温是气候变化的一个重要因子,根据IPCC 2001的评估报告,全球平均气温自1861年以来上升了 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>,在全球变暖的大环境下,研究黄河流域的气温变化趋势,对于该地区的生产、生活、生态环境以及科学研究都具有重要的意义。

目前,我国对气温变化单调趋势的研究多限于市<sup>[2,3]</sup>和省(区)<sup>[4,5]</sup>的较小尺度范围,这些对气温趋势的研究,一般存在站点少、空间分布不均匀、时间序列长度不够等缺点;对

于趋势分析的方法,大多使用累积距平、滑动平均和线性分析等方法;较大尺度气温趋势的研究较少。本文采用线性倾向估计和Mann-Kendall非参数统计检验方法,分别对黄河流域78个站点逐月及年平均气温变化的单调趋势进行了计算分析。

## 1 资料来源及处理

水文、气象站点的选取,既要考虑空间上不同地貌形态区域的代表性,又要保证各站点资料系列的同步性和具有较长的观测系列。本文共搜集黄河流域85个气象台站的气温资料,该85个台站分布在不同的地理位置,包含青藏高原、黄土高原和华北平原等不同地貌形态特征。所用资料由中国气象局气象中心提供(该资料已经过了初步的质量控制),因起始观测时间不统一,资料系列大多从20世纪50年代到2001年,从统计意义上看,这样长的时间序列足够获得比较可信的趋势结果。其中,同仁(青海)等7个站点的资料系列不足30年,因此,不将其作为研究对象,而对其余78个台站进行趋势分析。

对每个台站的平均气温值进行整理,获取各月及年平均序列,个别年份资料缺测的,

① 本文得到北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费与国家重点基础研究发展规划项目(G1999043601)的资助

采用邻近站点插值法插补得到,以保证序列的连续性。

## 2 研究方法

趋势分析的方法很多,目前常用的有线性倾向估计、滑动平均、累计距平、Kendall 统计检验、Mann-Kendall 统计检验法等。本文采用线性倾向估计和 Mann-Kendall 非参数统计检验方法对黄河流域平均气温趋势进行对比分析,并绘制了年平均 Mann-Kendall 倾斜度等值线图,重点对 Mann-Kendall 法的计算结果进行趋势分析。

### 2.1 线性倾向估计

用  $x_i$  表示样本量为  $n$  的某一变量,用  $t_i$  表示  $x_i$  所对应的时间,建立  $x_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数。回归系数  $b$  的符号表示变量  $x$  的趋势倾向。  $b > 0$  说明随时间  $t$  增加,  $x$  呈上升趋势;当  $b < 0$  时,说明随时间  $t$  增加,  $x$  呈下降趋势。  $b$  值则反映了上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾斜度。

### 2.2 Mann-Kendall 秩次相关检验法

Mann-Kendall 非参数统计检验法是由国际气象组织(WMO)推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法<sup>[6]</sup>,也是检验水文时间序列单调趋势的有效工具<sup>[7]</sup>,并且得到了十分广泛的应用。具体方法表示如下<sup>[7,8]</sup>:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (3)$$

$x_k, x_i$  是连续的数值;  $n$  代表数据序列的长度;当  $\theta$  大于、等于或小于 0 时,  $\text{sgn}(\theta)$  的值分别为 1、0、-1;

当  $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z_c \leq Z_{1-\alpha/2}$ , 认为没有趋势,其中,  $\pm Z_{1-\alpha/2}$  为标准正态分布的  $1-\alpha/2$  分位数。

在 Mann-Kendall 统计检验中,还有一个非常重要的指标: Mann-Kendall 倾斜度,

它是单调趋势的度量因子,表示为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \quad \forall_j \leq i, j < i \quad (4)$$

当  $\beta > 0$  时,表示趋势上升,即变量随时间增大,当  $\beta < 0$  时,表示趋势下降,变量随时间下降。

## 3 气温长期变化趋势分析

### 3.1 计算结果

本文将两种方法的趋势检验结果列于表 1。结果表明,黄河流域的单调趋势检验接受零假设,即整个流域不存在统计意义上的单调趋势,因此,本文从实际意义方面分析整个流域的变化趋势。限于篇幅,本文只列出 Mann-Kendall 法的计算结果。表 2 对计算结果进行了站点统计,图 1 表示年平均气温的倾斜度的等值线图。

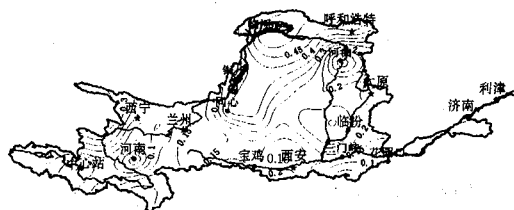


图 1 黄河流域年平均气温 Mann-Kendall 倾斜度等值线图(°C/10a)

表 1 黄河流域平均气温序列的趋势检验

	t 检验			Mann-Kendall 检验			
	$\beta_0$	$\beta_1$	$T_c$	$H_0$	$\beta$	$Z_c$	$H_0$
平均气温	7.0198	0.0087	1.270	A	0.0095	1.0526	A

表 2 Mann-Kendall 法检验结果的站点统计

	上升		下降		上升百分比
	显著	不显著	显著	不显著	
1月	52	23	2	1	96
2月	33	41	1	3	95
3月	5	43	4	26	62
4月	16	45	1	16	78
5月	36	37	1	4	94
6月	25	36	3	14	78
7月	14	48	0	16	79
8月	6	50	1	21	72
9月	37	32	1	8	88
10月	30	43	2	3	94
11月	26	47	2	3	94
12月	37	39	1	1	97
年平均	58	16	2	2	95

### 3.2 趋势分析

黄河流域平均气温总体呈上升趋势,各

月及年平均气温的上升站点数均在60%以上,且两种方法得出的结果基本一致。以下将从年平均变化、月际差异和地区差异三个方面分别进行分析和讨论。

### 3.2.1 年平均

黄河流域年平均气温上升站点数占总站点数的95%,这说明绝大多数地区呈上升趋势,与全球变暖的趋势相符,且多数地区上升趋势显著。两种方法所得该流域气温倾斜度值大都在 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上,最高倾斜度值发生在内蒙古临河站,其倾斜度两种方法计算值都超过 $0.7^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

流域年平均气温表现出下降趋势的站点数不多,两种方法均得出青海省河南站呈显著下降趋势,山西河曲站、青海中心站、河南卢氏站也表现出一定程度的下降趋势,其显著程度不同方法得出的结果略有不同。

从图1可以看出,整个流域年平均气温呈现出以山西河曲站和青海河南、中心站为趋势增强中心的等值线圈,且流域等值线最密集的区域也出现在这两个等值线圈附近。

### 3.2.2 月际差异

从全流域来看,12月至翌年2月气温增长最为明显,该期间气温呈上升趋势站点的百分比均超过95%(见表2),平均倾斜度值最大,且等值线分布密集,变幅大,这表明流域气温上升的主要原因在于该期间气温的升高。其中,12月份气温呈现明显上升趋势站点的百分比最高,为97%,2月倾斜度平均值最大,其Mann-Kendall倾斜度平均值为 $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。流域全年倾斜度最大值发生在宁夏同心站的2月份,其Mann-Kendall倾斜度值为 $1.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,主要原因在于宁夏同心站数据序列仅为1971~2001年,较其他站点的序列短,而本世纪气温变化的特征表现为二十世纪五六十年代为冷期,七十年代开始转暖,八十年代以后为暖期,九十年代末达到本世纪最高气温<sup>[9]</sup>,该站的数据序列恰为本世纪的暖期阶段。

流域5、10月份气温与年平均气温最接近,变化趋势等值线图也大致相同;3、4、6、7、8月气温上升趋势不明显,趋势下降的站点数较多,等值线分布也较疏松;增长趋势最不明显的月份为3月和8月,其中3月气温下降站点数最多,占流域站点数的38%,也是

流域平均倾斜度值最小的月份,8月份趋势不显著站点数最多,倾斜度变幅最小,是流域气温趋势表现最平缓的月份。

流域总体平均气温呈上升趋势的同时,局部地区有下降趋势,3、4月气温下降主要发生在青海、甘肃、宁夏西部和陕西南部地区,6、7、8月主要发生在山东、山西、河南三省交界处,其余月份气温下降站点数较少,主要发生在以山西河曲和青海河南两站为中心的个别地区。

### 3.2.3 地区差异

内蒙古自治区是流域内全年增温趋势最明显的地区,以内蒙古临河站为中心向外上升趋势逐渐减弱;宁夏自治区以宁夏同心站为中心也呈现出较明显的增长趋势。

陕西省气温变化趋势月际间变化比较明显,12月至翌年2月气温呈较明显的上升趋势,3、4、6、7、8月气温呈下降趋势的站点数较多,降温趋势较明显,其余月份表现不明显,尤以陕西中南部地区表现最为明显。

甘肃和青海两省春季气温下降趋势比较明显,变化最大值发生在甘肃省松山站3月份,其Mann-Kendall倾斜度值为 $-0.7143^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,因为松山站是本文数据序列最短的气象站,为1958~1988年,该序列经历的冷期时间较暖期时间长<sup>[9]</sup>。

山西南部、河南北部以及山东境内6、7、8月气温呈下降趋势。

因此,根据以上分析可以将流域划分为四个区:

#### (1)青海、甘肃区

该区特点是1、2、12月增温趋势较明显,3、4月呈显著降温趋势,其余月份趋势不明显。此外,本区包括青海河南站和中心站,这两站全年下降趋势都比较明显,在等值线图上表现出以这两站为趋势减弱中心的等值线圈。

#### (2)内蒙古、宁夏区

该区全年都表现出较显著的增温趋势,时间上以12月至翌年2月的趋势最为明显,空间上则以内蒙临河站和宁夏同心站最明显。

#### (3)陕西、山西北部区

该区气温变化趋势月际间变化明显,与流域总体变化趋势接近,12月至翌年2月气

温呈较明显的上升趋势,3、4、6、7、8月气温呈下降趋势的站点数较多,降温趋势较明显,其余月份趋势不太明显。

(4)山西南部、河南、山东区

该区最大的特点是6、7、8月气温下降趋势明显,且整个流域6、7、8月表现出降温趋势的地区主要分布在此区,其他月份表现出增温趋势,但是倾斜度值不大。

#### 4 小结

本文通过线性倾向估计和 Mann-Kendall 统计检验两种方法对黄河流域 78 个站点的逐月及年平均气温的变化趋势进行了分析,根据计算结果,可以初步得到以下几点结论:

(1)黄河流域平均气温总体呈上升趋势,上升最明显的地区为内蒙古和宁夏自治区,上升的主要原因在于12月至翌年2月气温的升高,这一结论表明黄河流域总体上表现为暖冬现象,而且尤以内蒙古和宁夏自治区为甚。

(2)流域内年平均气温表现出下降趋势的站点仅有4个:青海河南站、山西河曲站、青海中心站、河南卢氏站,其原因有待于结合更详细的资料进行深入的分析。

(3)从流域总体来看,12月至翌年2月气温增长趋势明显,5月、10月气温变化趋势与年平均趋势接近,5、9、10、11月气温增长趋势较明显,其余月份气温上升趋势表现不明显,气温下降站点数较多,以3月为全年下降站点数最多月,气温变化趋势等值线图以2月等值线最为密集,变幅最大,8月表现最

平缓。

(4)根据流域气温变化趋势的不同,将流域划分为四个区:青海、甘肃区,内蒙古、宁夏区,陕西、山西北部区和山西南部、河南、山东区,不同区气温变化特征不同。

最后需要说明的是,本文采用的数据序列经历我国气温的冷期和暖期两个阶段,分析结果一定程度上受数据序列的影响,将来有必要通过对更长时间序列的分析,进一步检验黄河流域平均气温受气候变化的影响。

#### 参考文献

- 1 IPCC. Climate change 2001: The Science Basis, Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- 2 徐虹,郭巨学. 西安市 65 年气温的变化分析. 陕西气象, 1998, (1): 19~22.
- 3 夏传栋,周立宏. 沈阳近 50 年气温变化分析. 辽宁气象, 2002, (3): 15~16.
- 4 陈莉,李帅,王阳. 黑龙江省气温变化的研究. 黑龙江气象, 2001, (3): 29~31.
- 5 胡桂芳,李芸,李德萍. 山东近百年来最高、最低温度变化. 气象, 2004, 30(11): 43~46.
- 6 Yu, P. S., Yang, T. C., Wu, C. K., Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. Journal of Hydrology, 2002, 260: 161~175.
- 7 Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira, H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 2002, 20(2): 11~26.
- 8 Z. X. Xu, K. Takeuchi, H. Ishidaira. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. Journal of Hydrology, 2003, 279: 144~150.
- 9 王绍武,蔡静宁,朱锦红. 中国气候变化的研究. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 137~145.

## Long-Term Trend of Temperature in the Yellow River Basin

Xu Zongxue Sui Caihong

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education  
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875)

#### Abstract

On the basis of average temperature from 78 meteorological stations in the Yellow River basin, the monotonic trends of temperature over the past more than 30 years are analyzed with linear trend method and Mann-Kendall method. The analysis is mainly made for 12 months and the annual average temperature with the emphasis on the result of Mann-Kendall method. The isogram for the long-term trend of annual temperature is given. The result shows that the average temperature exhibits an increasing trend, mainly because of the increase of temperature in December, January and February. The largest trend is shown in December, while the smallest in August. However, temperature from several stations and months show declining tendency. Large differences show in areas and months, and according to these differences, the Yellow River basin is further divided into four regions.

**Key Words:** temperature Mann-Kendall statistic test linear trend