

# 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和 突变特征分析<sup>\*</sup>

赵芳芳 徐宗学

(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)

## 摘 要

采用 1960—2001 年黄河流域兰州以上地区 23 个气象站的气温、降水、日照时数和蒸发量 4 个气候要素的资料, 分析了 42 年来兰州以上地区的气候变化和发展趋势。用非参数统计检验方法 (Mann-Kendall 法) 分析了气候变化的长期变化趋势。结果表明, 42 年来全区平均变暖  $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量、日照时数和蒸发量平均减少了  $17.89\text{ mm}$ ,  $125.6\text{ h}$  和  $161.3\text{ mm}$ ; 用距平曲线法分析了气候变化的阶段性特征; 用滑动 T 检验法 (MTT 法)、Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法对 5 年滑动平均的区域季节和年时间序列进行突变检测, 讨论了黄河流域兰州以上地区的气候变化问题。MTT 法的检测结果表明, 气温、降水量和日照时数分别在 20 世纪 80 年代的末期、中期和初期发生了突变, 蒸发量除了发生在 80 年代的突变外, 90 年代也有一次超过 0.01 显著性水平的突变; Yamamoto 法检测结果表明, 20 世纪 80 年代的气候突变最为明显, 1981 年春季蒸发量和 1985 年的年气温均出现了强突变, 年蒸发量突变的 S/N 值的位相明显提前于其他 3 个气候要素突变 S/N 值的位相; Mann-Kendall 法检测结果表明, 各气候要素年和季的突变年份中, 气温主要发生在 20 世纪 90 年代, 蒸发量主要发生在 20 世纪 60 年代, 日照时数主要发生在 20 世纪 80 年代。这一事实也说明检测方法不同, 评价结果会存在一定差异。

**关键词:** 气候变化, 突变, 黄河流域, 兰州。

## 1 引 言

国际地圈、生物圈计划 (IGBP) 与世界气候研究计划 (WCRP) 的科学家于 1994 年 11 月在意大利的威尼斯召开了联合工作会议, 会上确定了 6 个共同关心的问题, 其中气候突变动力学和气候变化的检测是其中很重要的两个问题<sup>[1]</sup>。近年来, 随着 WCRP 工作的推进, 与人类生活及生产活动紧密联系的区域气候变化成为当今人们最关心的问题之一<sup>[2]</sup>。

气候系统具有典型的时空多尺度、结构多层次、本质非线性特征, 不同层次之间关系及其相互作用十分复杂<sup>[3]</sup>。目前许多学者进行了气候要素变化趋势和突变特征的研究。严中伟等<sup>[4-6]</sup> 研究指出, 北半球夏季气候状况在 20 世纪 60 年代普遍出现跃变。

闫敏华等<sup>[2-7]</sup> 分析了三江平原地区气温、降水量、日照时数和气压 4 个主要气候要素的变化趋势, 并用累积距平法、 $J_y$  参数法、Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法联合检测了该区域气候变化中的突变现象。周顺武等<sup>[8]</sup> 通过线性倾向估计和多项式函数拟合等方法分析了雅鲁藏布江中游地区夏季气候的长期变化和周期变化, 并利用滑动 T 检验等方法讨论了气候突变的问题。杨莲梅<sup>[9]</sup> 分析了 40 a 来新疆极端降水的气候变化、发展趋势和空间分布差异, 并用 Mann-Kendall 法对年极端降水量进行了突变检验。杨志峰等<sup>[10]</sup> 采用 EOF 技术分析了黄河上游降水的时空结构特征与变化, 并用 Mann-Kendall 法检验了降水序列的突变现象。比较来看, 对于黄河流域上游的气候变化趋势及其突变特征的研究还相对较少, 有待于进一步研究和探讨。

<sup>\*</sup> 初稿时间: 2005 年 5 月 19 日; 修改稿时间: 2005 年 9 月 10 日。

资助课题: 北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费和国家重点基础研究黄河“973”项目 (1999043601)。

作者简介: 赵芳芳, 女, 1980 年出生, 硕士生, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail: zhfang2003@126.com

近年来黄河断流问题受到国内外的普遍关注,作为黄河“水塔”的河源地区,径流减少、湖泊水位下降,究竟是气候变化所造成的还是人类活动影响所致,也是令人瞩目的问题,急待进一步深入分析和探讨。鉴于以上原因,本文采用 1960—2001 年黄河流域上游兰州以上(包括兰州)23 个气象站的气温、降水、日照时数和蒸发量(20 cm 口径蒸发皿蒸发量)4 个要素的资料,分析了近 42 a 来这些气候要素的变化和发展趋势,用不同方法检验了 4 个气候要素的突变性,以定量描述黄河流域上游气候变化的现象。

## 2 研究区概况

黄河流域地处中国半干旱半湿润地区,多年平均降水量为 200—600 mm,天然径流量为 580 亿  $\text{m}^3$ ,水资源短缺十分严重<sup>[10]</sup>。兰州以上面积 222551  $\text{km}^2$ ,气候属青藏高原气候系统,冬季为青藏冷高压所控制,长达 7 个月,具有典型大陆性气候特征;暖季受西南季风的影响,产生热低压,水汽丰富,降水较多,形成高原亚热带湿润季风气候。总的气候特征是冬长无夏,春秋相连,热量低,年温差小、日温差大,日照时数长,辐射强烈,风沙大,植物生长期短,绝大部分地区无绝对无霜期。多年平均气温 2.68  $^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数为 2554.7 h,多年平均降水量 446 mm,由西北向东南递增,6—9 月降水量占全年的 75%,年蒸发量为 1428.9 mm。黄河兰州以上水资源占黄河流域的 57.5%(1951—1998 年平均),其水资源时空变化对黄河流域水资源具有重要的影响<sup>[11]</sup>,而气候要素的时空变化是引起水资源变化的主要原因<sup>[12]</sup>。因此,研究黄河流域兰州以上气候要素的时空结构变化对了解黄河水资源演变具有十分重要的意义。

## 3 资料处理和分析方法

本文利用 GIS 提取了黄河流域兰州以上地区 23 个气象站,这些站点分布较为均匀,能大体反映该区域的气候变化特征。自建站起到 2001 年的月平均气温、月降水量、月日照时数和月平均蒸发量资料来自国家气象局气象中心(该资料已经经过了初步的质量控制)。考虑到资料的可靠性和完整性,选取了研究范围内 1960—2001 年的观测资料。为保证序列的完整性,对于个别缺乏数据的年份,采用临近站点空间内插法补齐。从统计意义上看,这样

长的时间序列是可以获得比较可靠的分析结果。所选台站的具体位置见图 1。

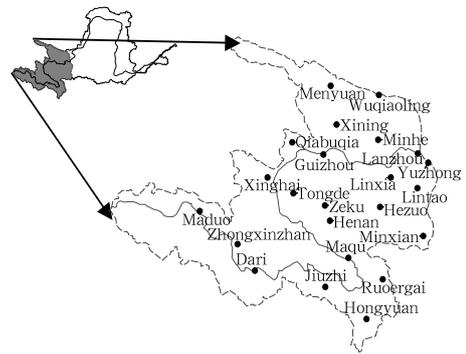


图 1 研究区在黄河流域中的位置及其水文气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and the meteorological stations selected

考虑到黄河兰州以上地区的独特气候特征,本文设定研究区域的四季分别是 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季<sup>[13]</sup>。春季气温、日照时数和蒸发量是 3 个月的平均值,降水量是 3 个月的降水总量,以此类推,得到夏季、秋季、冬季和年的气温、日照时数、蒸发量和降水量。为了减少单站记录的片面性,取整个地区的空间平均序列作为区域序列。为了进行气候突变分析再对区域化的各要素的季节和年序列作 5 a 滑动平均,以突出较长期的变化趋势,序列两端的 5 a 滑动平均值是通过添加 2 个序列的平均值得到的,经过以上数据处理,就得到了 5 a 滑动平均的、各季节和年的、区域化的各气候要素序列。

研究区气候变化总趋势分析采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法,气候变化的阶段性分析采用距平曲线法,气候突变分析用滑动 T 检验法, Yamamoto 法和 Mann-Kendall 非参数检验法。

## 4 研究区的气候变化分析

近 20 a 来,中国的气候学家以不同的时间尺度对中国区域的气候变化特征和规律进行了大量研究。他们的研究成果为正确了解大尺度气候变化特征和充分认识区域气候变化规律提供了良好的基础和指导<sup>[2]</sup>。Mann-Kendall 非参数统计检验法是由世界气象组织(WMO)推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法<sup>[14-16]</sup>,也是检验水文时间序列

单调趋势的有效工具<sup>[17-18]</sup>,并且得到了十分广泛的应用。本研究对黄河流域上游兰州以上 23 个气象台站近 42 a 的气候序列在 95% 的置信水平上进行趋势检验,同时借助 Surfer 7.0 用 Kriging 插值法将所有台站年气候要素变率(即 Kendall 倾斜度  $\beta$  值)进行内插,求出其在空间上的分布情况,并用黄河兰州以上流域边界提取出研究区气候要素变率的空间分布图。

#### 4.1 气温变化

用 1960—2001 年的年平均气温 Kendall 倾斜度等值线分布图(图 2a),来分析黄河上游兰州以上地区的气温变化趋势。兰州以上大部分地区都是气温升高区,在监测的 23 个气象站中,有 21 个站的气温倾向率大于 0,只有 2 个站(中心站和河南站)小于 0。全区形成了以两个低温站为中心的升温区,其中最大的升温中心分布在北部的恰卜恰地区,另一个较小的升温中心分布在东部兰州地区,它们的 Kendall

倾斜度分别达到了  $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$  和  $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 。全区平均气温倾斜度为  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,即兰州以上地区 42 a 来平均变暖  $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 2b 为兰州以上地区 1960—2001 年的年平均气温距平曲线,距平是对 1960—2001 年 42 a 气候值的偏差。结合气温距平从图 2b 中可以看出,兰州以上地区年平均气温可分成两个大的时期:1960—1986 年是持续时间较长的冷期,负距平年约占 80% 以上,其中 1967,1977,1983 年异常偏冷;1987—2001 年是持续时间相对较短、温度逐渐上升的暖期,该时段温度平均值为  $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较气候平均值偏高  $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,正距平年占 87%,42 a 来的温度最高值就出现在这一时期,其中 1998 年偏高  $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属于异常偏高年。温度变化具有明显的季节差异,比较季平均气温距平曲线可知,四季气温都对年平均气温变化有一定贡献,其中以冬季气温贡献最大。这与丁一汇等<sup>[19]</sup>的研究结果是基本一致的。

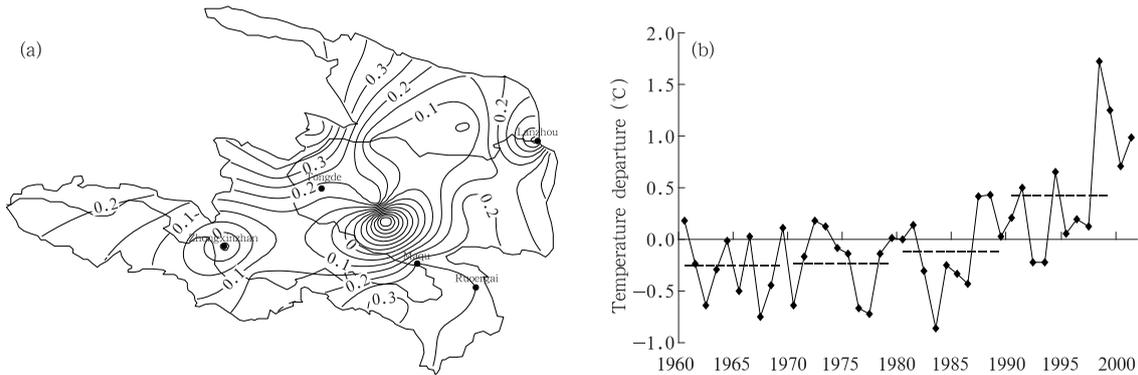


图 2 气温序列的 Kendall 倾斜度等值线(a)和年平均气温距平曲线(b)  
Fig. 2 Distribution of nonlinear tendency (a) departure curve (b) annual mean temperature

#### 4.2 降水量变化

兰州以上地区 1960—2001 年的年降水量 Ken-

dall 倾斜度等值线分布(图 3a)显示,兰州以上地区绝大部分地区的年降水在 42a 中都呈减少的趋势,检

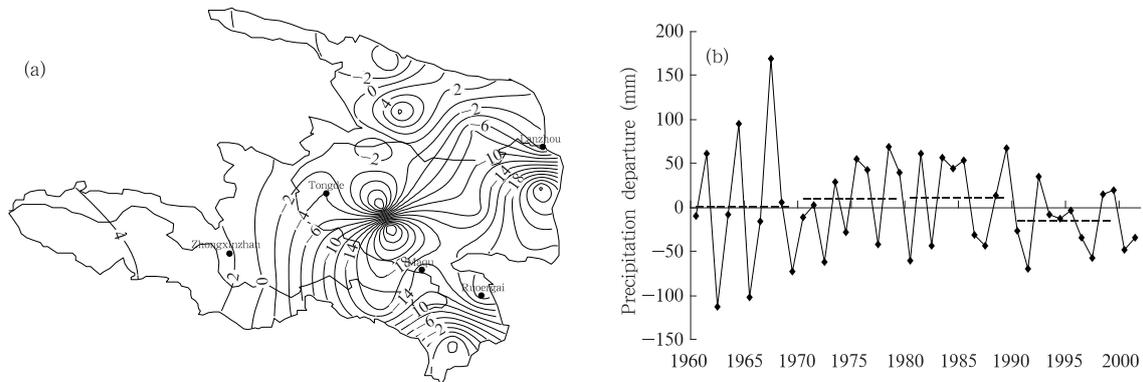


图 3 降水量序列的 Kendall 倾斜度等值线(a)和年平均降水量距平曲线(b)  
Fig. 3 Distribution of nonlinear tendency (a) departure curve (b) annual mean rainfall

测的 23 个气象站中,有 17 个站的 Kendall 倾斜度小于 0。全区沿黄河干流分别形成了以临洮站和河南站为中心的降水减少区,减少中心的 Kendall 倾斜度分别为  $-28.63 \text{ mm}/(10 \text{ a})$  和  $-28.83 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。在兰州以上地区,只有北、西和南部的边缘地区降水是增加的,而且增加中心的强度仅为  $9.00 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。全区平均降水倾斜度为  $-4.26 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ ,即兰州以上地区 42 a 来降水减少了  $17.89 \text{ mm}$ ,由此说明,自 1960 年开始,兰州以上地区有变旱的趋势,但程度不是很严重。

图 3b 为兰州以上地区 1960—2001 年的年平均降水量距平曲线。从图 3b 看出,20 世纪 60 年代降水量累积距平变化曲线波动较大,呈三升三降特点;1970—1989 年是持续时间较长的多雨期,降水量平均偏高  $11.7 \text{ mm}$ ;1990—2001 年是持续的少雨期,降水量平均偏低  $18.6 \text{ mm}$ 。观察季平均降水量距平曲线可知,秋季降水量对年均降水量变化贡献最大。

### 4.3 日照时数变化

由兰州以上地区 1960—2001 年的年日照时数 Kendall 倾斜度分布(图 4a)得出,该区大部分日照

时数呈减少的趋势,减少中心分布在民和、兰州一带,最大 Kendall 倾斜度达到了  $-104.38 \text{ h}/(10 \text{ a})$ 。同时,在兰州以上地区中部地区形成了以同德、达日和玛曲为中心的日照时数增大区,最大 Kendall 倾斜度达到了  $56.39 \text{ h}/(10 \text{ a})$ 。全区平均日照时数倾斜度为  $-2.99 \text{ h}/(10 \text{ a})$ ,即 42 a 来兰州以上地区日照时数减少了  $125.6 \text{ h}$ 。

结合日照时数距平(图 4b)看出,兰州以上地区年平均日照时数有两个明显的时期:1961—1980 年是持续时间较长的偏高期,日照时数平均偏高  $35.4 \text{ h}$ ;1981—1996 年是持续偏少期,日照时数平均偏少  $49.4 \text{ h}$ 。在四季日照时数变化趋势图中,春季和冬季对年均日照时数贡献最大。

### 4.4 蒸发量变化

兰州以上地区 1960—2001 年的年蒸发量 Kendall 倾斜度分布(图 5a)显示出,该区大部分地区蒸发量呈减少的趋势,最大减少中心的 Kendall 倾斜度为  $-115.74 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ ,东、南和西部的边缘地区呈增加的趋势。全区平均蒸发量倾斜度为  $-3.84 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ ,

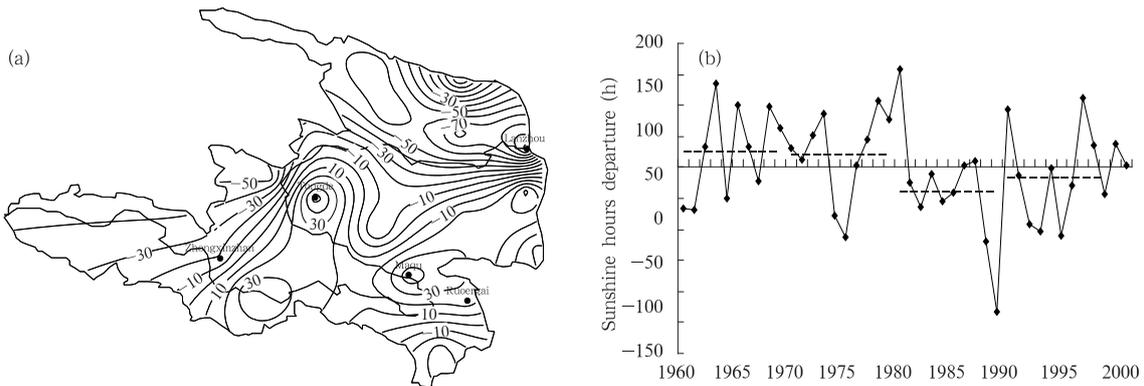


图 4 日照时数序列的 Kendall 倾斜度等值线(a)和年平均日照时数距平曲线(b)

Fig. 4 Distribution of nonlinear tendency (a) departure curve (b) annual mean sunshine duration

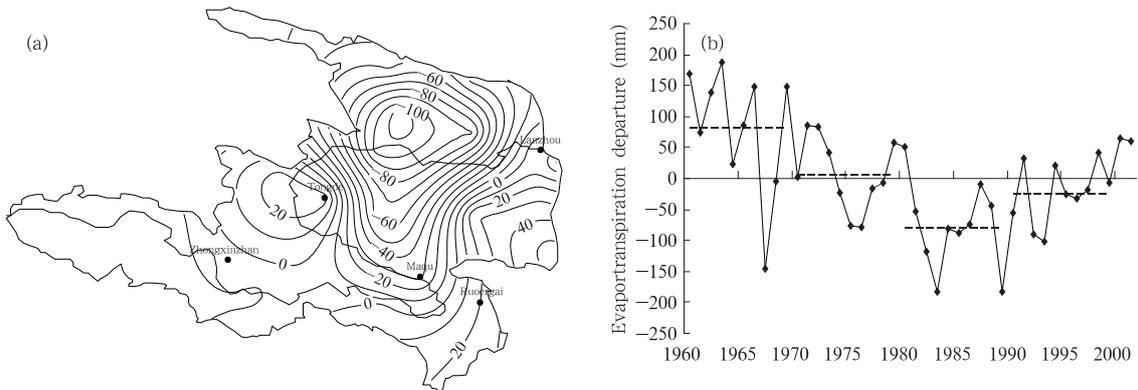


图 5 蒸发量序列的 Kendall 倾斜度等值线(a)和年平均蒸发量距平曲线(b)

Fig. 5 Distribution of nonlinear tendency (a) departure curve (b) annual mean evaporation

即 42 a 来年蒸发量减少了 161.3 mm。

结合蒸发量距平(图 5b)看出,兰州以上地区年平均蒸发量有一个偏多期和一个偏少期:1960—1973 年是持续的偏多期,蒸发量平均偏多 74 mm;1974—1997 年是持续的偏少期,蒸发量平均偏少 50 mm。由季平均蒸发量曲线可知,春季和夏季平均蒸发量对年均蒸发量贡献最为显著。

#### 4.5 各气候要素变化间的关系

图 2b, 3b, 4b 和 5b 中,用虚线表示了气温、降水、日照时数和蒸发皿蒸发量距平序列的年代际变化情况。从图 2b 和 3b 可以看出,20 世纪 60 年代至 90 年代气温一直在升高,而降水在 20 世纪 60 年代至 80 年代增多,进入 90 年代以后降水持续减少。这说明降水和气温的关系不是绝对对应的,也即气温高时降水可多可少,这与施雅风<sup>[20]</sup>研究中国历史变化时得出的结论是一致的,即温度的变化不是降水变化的直接原因,因此未来降水的变化如何需要进一步的研究。日照时数是评价一个地区辐射资源的一个很重要的气候要素。从原理上来讲,日照时数减少会导致气温的下降,但是由于大气中温室气体的增加,温室效应导致了气温的增加<sup>[21]</sup>。由于黄河上游兰州以上地区人类活动影响相对较小,因此日照时数和蒸发皿蒸发量与降水存在一定的反相关关系。从图 4b 可以看出,从 20 世纪 60 年代开始,日照时数持续偏少,80 年代偏少最多,进入 90 年代日照时数开始增多,蒸发量变化(图 5b)与此相似,这与图 3b 显示的降水的年代际关系正好相反。

综合定性分析气温、降水、日照时数和蒸发量变化趋势之间的关系,可以作为研究地区的生态环境变化的依据,有助于对未来气候变化做出合理的预测,并制定相应的对策<sup>[21]</sup>。

### 5 黄河兰州以上的气候突变

气候系统是非线性的,在其变化过程中可能存在着不连续性。因此,要用非线性理论和方法分析、认识气候系统变化过程,如应用突变理论和突变检测方法<sup>[7]</sup>。符淙斌等<sup>[22]</sup>探讨了气候突变定义及其各种检测方法,对认识和检测突变现象提供了方法上的指导。

自从 20 世纪 80 年代气候突变的定义被提出以来,气候突变的检测方法已经发展了多种,如低通滤波法、滑动 T 检验法(MTT 法)、Crammer 法、

Yamamoto 法、Mann-Kendall 法和 Spearman 法等。其中低通滤波法不合实际,MTT 法、Crammer 法和 Yamamoto 法以直观、简便而著称,但由于子序列的选择带有有人为性,可能会使计算结果产生漂移,因此要确切地判断某点为突变点的产生,还得依赖于 Mann-Kendall 法和 Spearman 法,这类方法的优点在于检测范围宽、人为影响小、定量化程度高<sup>[23]</sup>。因此,本文选取 MTT 法、Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法联合检测气候变化过程中的突变现象,其原理详见参考文献<sup>[22-23]</sup>。

魏凤英等<sup>[24]</sup>分析中国、北半球和全球的气温突变时得出平均时段取 10 a 的突变指数是可靠的,因此本文用 MTT 法和 Yamamoto 法时,取平均时段  $n_1 = n_2 = 10$ ,并用  $n_1 = n_2 = 14$  来做比较,但是取这两个时段时仅能从 1967—1991 年这 25 a 中寻找气候突变。根据这一思想,本文用 1960—2001 年黄河兰州以上地区气温、降水量、日照时数和蒸发量的季节和年的 5 a 滑动平均时间序列来检测气候突变。

由图 6a, b, c 可以看出,兰州以上地区年平均气温、降水量和日照时数  $t$  统计量分别在 1985, 1987 和 1982 年超过 0.01 显著性水平,说明在 20 世纪 80 年代兰州以上地区年平均气温经历了一次由冷到暖的转变,这与尤卫红<sup>[25]</sup>对于中国气温的突变检测相吻合,降水和日照时数经历了一次由偏多转为偏少的突变。虽然 70 年代初的春季气温和 60 年代末 70 年代初的冬季气温均出现过突变,但该突变在统计上是没有意义的。同样,虽然 70 年代夏季降水量和 60 年代末至 70 年代中期的冬季降水量均出现过突变,但这种突变没有达到相应的显著性水平。从图 6d 中看出,兰州以上地区年平均蒸发量在 20 世纪 60 年代至 80 年代有一明显的增大趋势,且在 80 年代初经历了一次由偏多转为偏少的突变,另外,在 90 年代初  $t$  统计量超过 0.01 显著性水平(负值),说明年平均蒸发量在此时期还有一次明显的突变,即由偏少转为偏多的突变。

用 Yamamoto 法检测出的各次突变列于表 1。本文在图表中用  $n=10$  和  $n=14$  代表这两个平均时段。从表 1 中可以看出,4 个气候要素中,日照时数在秋季没有出现突变,在其余 3 个季节均出现了突变,气温、降水和蒸发量 3 要素在全年 4 个季节中均出现了突变,且年平均气温、冬季降水和春季蒸发量出现了强突变。本研究中,20 世纪 60 年代,兰州

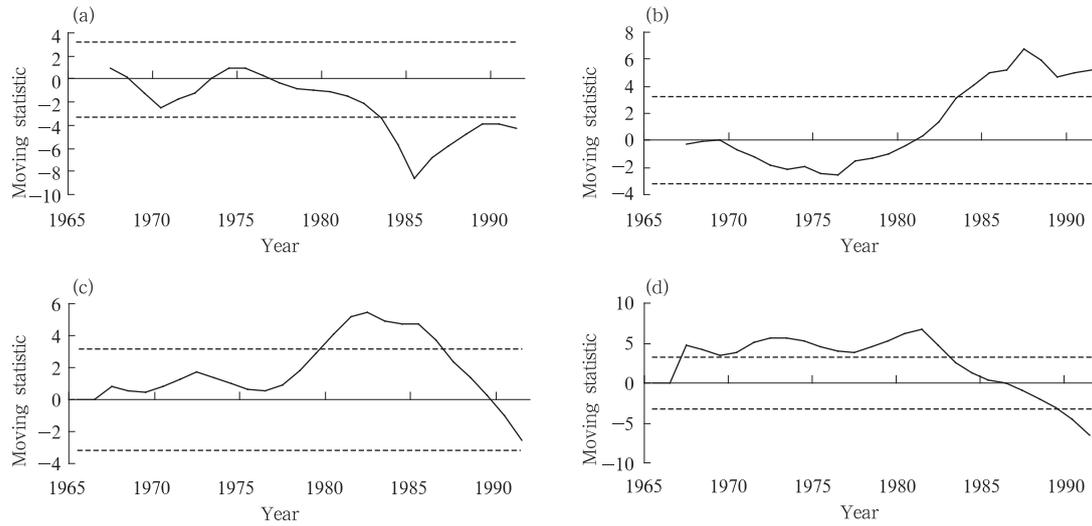


图 6 黄河上游地区气候要素等级滑动  $t$ -统计量曲线

(直线为  $\alpha=0.01$  显著性水平临界值; a. 气温, b. 降水, c. 日照时数, d. 蒸发量)

Fig. 6 The moving  $t$ -statistic curve of the climatic factors in the upper Yellow River basin

(a. Temperature, b. Precipitation, c. Sunshine hours, d. Evaporation; dashed line,  $\alpha=0.01$ )

表 1 用 Yamamoto 法测定出的黄河兰州以上地区 1967—1991 年间气候突变

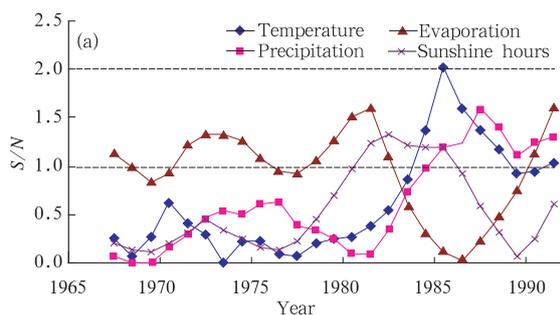
Table 1 Climate jumps detected by using Yamamoto method in the upper Yellow River basin during the period from 1960 to 2001

时间	要素 $n$ 值	气温		降水量		日照时数		蒸发量	
		$n=10$	$n=14$	$n=10$	$n=14$	$n=10$	$n=14$	$n=10$	$n=14$
春 季	时段	1973—1974	1973—1975	1981—1983		1982—1986	1981—1985	1967—1968, 1971	1971—1974
		1989—1991		1991				1979—1983, 1991	1978—1983
	最大 $S/N$ (年份)	1.14(1974) 1.89(1991)	1.39(1974)	1.4(1982) 1.14(1991)		1.71(1984)	1.62(1983)	1.54(1967) 2.19(1981)	1.04(1971) 1.53(1991)
夏 季	时段	1985—1991	1986—1987	1972—1976	1973—1974	1973—1979	1976—1980	1972—1981	1971—1980
								1989—1991	
	最大 $S/N$ (年份)	1.37(1987)	1.37(1987)	1.28(1973)	1.06(1974)	1.23(1973)	1.15(1979)	1.7(1973) 1.22(1991)	1.7(1973) 1.7(1974)
秋 季	时段	1984—1988	1979—1987	1983—1988	1983—1986			1972, 1984—1985	1971—1972
		1991						1990—1991	1985—1987
	最大 $S/N$ (年份)	1.65(1986) 1.10(1991)	1.45(1987)	1.75(1984)	1.42(1985)			1.03(1972) 1.15(1991)	1.13(1984) 1.13(1987)
冬 季	时段	1969—1970	1983—1987	1969—1974	1972—1974	1982—1986	1982	1967—1974	1971—1973
		1983—1986		1985—1988	1986				
	最大 $S/N$ (年份)	1.27(1970) 1.65(1985)	1.61(1985)	2.1(1971) 1.85(1986)	1.37(1973) 1.00(1986)	1.48(1985)	1.01(1982)	1.33(1971)	1.44(1971)
年	时段	1984—1988	1984—1987	1985—1991	1986—1987	1981—1985	1980—1983	1967, 1971—1975	1971—1981
		1991						1978—1982, 1990—1991	
	最大 $S/N$ (年份)	2.02(1985) 1.03(1991)	1.43(1987)	1.59(1987)	1.68(1987)	1.32(1982)	1.45(1981)	1.12(1967) 1.61(1981)	1.33(1973) 1.61(1991)

以上地区气温、降水和蒸发量均出现了突变,其中,蒸发量分别在春季、冬季和年序列中出现突变,气温和降水只在冬季出现了突变,这可能与本研究的时间序列较短有关系,但仍然可以说明 20 世纪 60 年

代黄河上游地区气候要素发生了突变。20 世纪 70 年代,兰州以上地区气温、降水、日照时数和蒸发量 4 个气候要素均在不同时期出现了突变。其中,蒸发量在全年 4 个季节和年序列的检测中都发生了突

变现象,降水量在夏季和冬季发生了突变,并且冬季降水在 1971 年出现了强突变,其  $S/N$  值达到了 2.1。另外,春季气温和夏季日照时数在此期间也发生了一定程度的突变。与 20 世纪 60 和 70 年代相比,发生在 20 世纪 80 年代的气候突变最为明显,这与汤懋苍等<sup>[26]</sup>对青藏高原的检测结果部分吻合。除了春季气温、夏季降水、夏秋季日照时数和夏冬季蒸发量外,其他在不同季节或全年出现突变的气候要素都在 20 世纪 80 年代的不同年份出现了突变。并且 47% 的最大  $S/N$  年份出现在在此期间,另外,1981 年春季蒸发量和 1985 年的年气温出现了强突变,其  $S/N$  值分别达到了 2.19 和 2.02。



4 个气候要素年时间序列的  $S/N$  值曲线(图 7)显示,蒸发量突变的  $S/N$  值的位相明显提前于其他 3 个气候要素突变  $S/N$  值的位相,主要发生在 20 世纪 70 年代,而其他 3 个要素突变的  $S/N$  值的位相主要出现在 20 世纪 80 年代,其时段明显落后于蒸发量出现突变的时段,并且各气候要素的  $S/N$  值也有很大不同,即其变化幅度不同。在所取 2 个平均时段都能进行检测的 1971—1987 年,2 个平均时段检测出的气候突变是相吻合的,但因时间序列长短的限制,取  $n=14$  时,无法确定出 1971 年以前和 1987 年以后的气候突变。

对黄河流域兰州以上区域而言,4 个气候要素

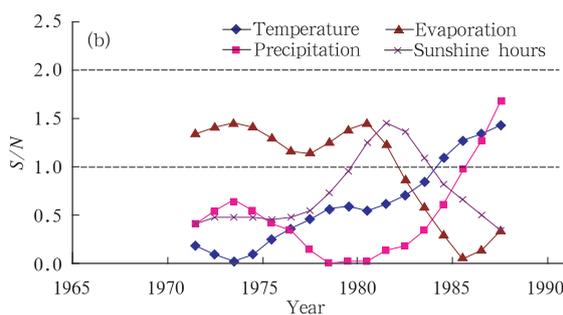


图 7 4 个气候要素年时间序列的  $S/N$  值(a.  $n=10$ , b.  $n=14$ )

Fig. 7  $S/N$  values of annual time series for four climatic factors(a.  $n=10$ , b.  $n=14$ )

突变年份没有表现出一致的变化规律,这主要是各要素季节变化不同步所致。如发生在 70 年代中期的夏季降水、夏季日照时数和夏季蒸发量的突变有很好的相关关系,即夏季降水突变增加,夏季日照时数和蒸发量突变减少。

用 Mann-Kendall 法检测 4 个气候要素区域季节时间序列的结果列于表 2。表 2 中所确定的气候突变年份,是 Mann-Kendall 法计算图(图 8)中  $C_1$  和  $C_2$  曲线相交点所对应的年份。由表中可以看出,各气候要素年和季的突变年份中,气温突变主要发生在 20 世纪 90 年代,这与魏凤英等<sup>[22]</sup>研究的 1990—1991 年为全球高温期相吻合;秋季降水量在 1986 年发生突变,这与杨志峰等<sup>[27]</sup>的研究结论一致;蒸发量突变主要发生在 20 世纪 60 年代;日照时数突变主要发生在 20 世纪 80 年代。

对比 Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法的结果发现,2 种方法确定的突变年份有一部分是相当吻合的,尤其是 20 世纪 60 年代的蒸发突变和 80 年代的日照时数突变。但用 Mann-Kendall 法检测到的出

表 2 用 Mann-Kendall 法测定出的黄河上游出现突变的年份  
Table 2 The years with climate jump detected by using Mann-Kendall method in the upper Yellow River basin

	气温	降水量	蒸发量	日照时数
春季	1998		1968	1984
夏季	1997		1965	1977
秋季	1995	1986		
冬季	1986	1975	1969	1982
年	1994	1994	1965	1981

现在 20 世纪 60 年代的蒸发量突变和 90 年代的气温、降水量突变,由于资料限制用 Yamamoto 法是无法检测到的,因此也就无法比较。Mann-Kendall 法没有检测到发生在 20 世纪 80 年代的气温突变、70 年代的日照时数突变和 70—80 年代的蒸发量突变,仅检测到 Yamamoto 法所确定出的突变的约 50%。这说明检测方法不同,结果存在一定差异,而且每种检测方法都有其不足之处<sup>[2,22]</sup>。图 8 给出了 Mann-Kendall 法确定气候要素年序列突变,当给定显著性水平为 0.05 时,置信区间为  $[-1.96, +1.96]$ ,与图 7 作对比更加确定了以上结果。

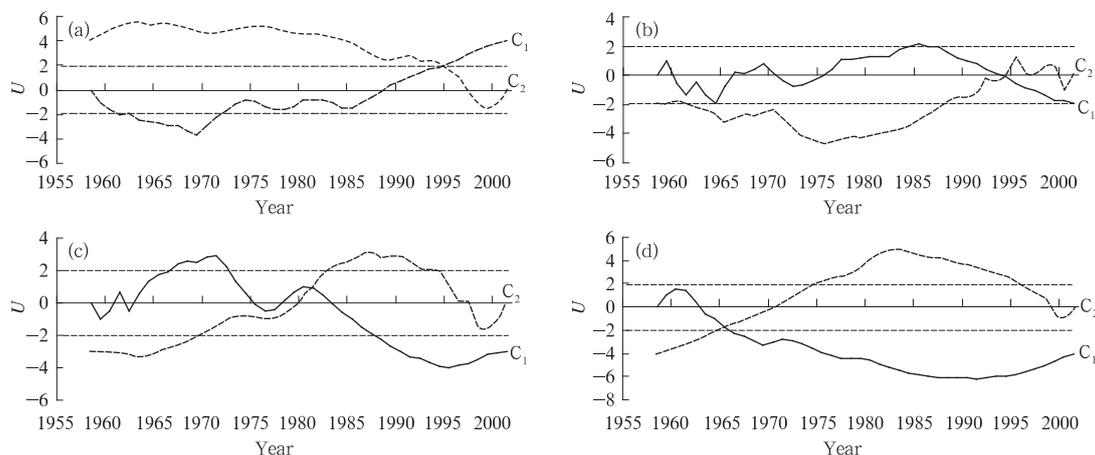


图8 Mann-Kendall法确定黄河上游气候要素的年序列突变

(a. 气温, b. 降水, c. 日照时数, d. 蒸发量; 虚线为  $\alpha=0.05$  临界线)

Fig. 8 Jump of climatic factors detected by using Mann-Kendall method in the upper Yellow River basin

(a. Temperature, b. Precipitation, c. Sunshine hours, d. Evaporation; dashed line  $\alpha=0.05$ )

## 6 结论和讨论

经过分析黄河兰州以上地区 1960—2001 年的气候资料,得到以下结论:

(1) 气温:黄河兰州以上地区形成了两个升温中心,分别位于北部的恰卜恰和东部的兰州地区。全区平均气温倾斜度为  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,42 a 来平均变暖  $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冬季气温变化贡献率最大。突变检测表明,在 20 世纪 80 年代中期发生了一次较明显的气候突变,由冷期转为暖期,并且由 Yamamoto 法确定的突变结果表明,1985 年气温出现了强突变。

(2) 降水:自 1960 年开始,黄河兰州以上地区有变旱的趋势,全区平均降水倾斜度为  $-4.26\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,秋季降水量对年降水量变化贡献最大。突变检测表明,在 80 年代末期发生了一次明显的降水突变,由多雨期转为少雨期。

(3) 日照时数:全区平均日照时数倾斜度为  $-2.99\text{ h}/(10\text{ a})$ ,42 a 有两个明显的时期,分别是 1961—1980 年的偏高期和 1981—1996 年的持续偏少期,即年均日照时数在 80 年代初期发生了一次明显的由偏多转为偏少的突变。

(4) 蒸发量:42 a 来全区年平均蒸发量减少了  $161.3\text{ mm}$ ,其中春季和夏季平均蒸发量对年均蒸发量贡献最为显著。MTT 法检测到在 80 年代初经历了一次由偏多期转向偏少期的突变,而在 90 年代初出现了由偏少转为偏多的突变;Yamamoto 法显示年蒸发量主要在 70 年代出现了突变;Mann-Kendall 法则确定蒸发量突变主要发生在 60 年代。

综上所述,黄河上游兰州以上地区在过去的 42 a 间,表现出向暖干方向发展的趋势,即有气温逐渐升高、降雨量逐渐减少的趋势。一个很有趣的现象是,尽管气温升高,但研究区在过去的 42 a 间,蒸发量却表现出减少的趋势。这可能与更大范围内人类活动的影响导致空气中气溶胶增多、日照时数变短有关。另外,对于各气候要素突变点的检测表明,检测方法不同,结果会存在一定差异,而且每种检测方法都有其不足之处。因此,要精确地确定气候要素的突变点,需要联合运用多种方法,并联系历史资料来共同确定。这些问题将在下一步研究工作中进行深入探讨。

## 参考文献

- [1] 王绍武. PAGES 计划与 CLIVAR 计划中的交叉科学问题. 气象学报, 1997, 55(6): 662-669  
Wang Shaowu. Scientific intersection of PAGES and CLIVAR. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1997, 55(6): 662-669
- [2] 闫敏华, 邓伟, 马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化. 地理学报, 2001, 56(2): 159-170  
Yan Minhua, Deng Wei, Ma Xuehui. Climate variation in the Sanjiang Plain disturbed by large scale reclamation during the last 45 years. Acta Geog Sinica (in Chinese), 2001, 56(2): 159-170
- [3] 李跃清. 相空间 EOF 方法及其在气候诊断中的应用. 高原气象, 2001, 20(1): 88-93  
Li Yueqing. A phase space EOF method and its application to climate diagnosis. Plateau Meteor (in Chinese), 2001, 20(1): 88-93
- [4] 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 60 年代北半球夏季气候跃变——I. 降水和温度变化. 中国科学(B辑), 1990 (1): 97-103  
Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. The climatic jump of the Northern Hemisphere in summer during the 1960s——

- I. Precipitation and temperature change. Chinese Sci (B) (in Chinese), 1990 (1): 97-103
- [5] 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 60年代北半球夏季气候跃变——II. 海平面气压和 500 hPa 高度变化. 中国科学(B辑), 1990,(8): 879-885  
Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. The climatic jump of the Northern Hemisphere in summer during the 1960s——II. Sealevel pressure and 500 hPa height change. Chinese Sci (B) (in Chinese), 1990,(8): 879-885
- [6] 严中伟. 60年代北半球夏季气候跃变过程的初步分析. 大气科学, 1992, 16(1): 111-119  
Yan Zhongwei. A primary analysis of the process of the 1960s Northern Hemispheric summer climatic jump. Sci Atmos Sinica (in Chinese), 1992, 16(1): 111-119
- [7] 闫敏华, 邓伟, 陈泮勤. 三江平原气候突变分析. 地理科学, 2003, 23(6): 661-667  
Yan Minhua, Deng Wei, Chen Panqin. Analysis of climate jumps in the Sanjiang Plain. Sci Geogr Sinica (in Chinese), 2003, 23(6): 661-667
- [8] 周顺武, 假拉, 杜军. 近 42 年青藏高原雅鲁藏布江中游夏季气候趋势和突变分析. 高原气象, 2001, 20(1): 71-75  
Zhou Shunwu, Jia La, Du Jun. Analyses of climatic trend and jump over middle reaches of Yarlung Zangbu River in Tibetan Plateau in recent 42 years. Plateau Meteor (in Chinese), 2001, 20(1): 71-75
- [9] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583  
Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang. Acta Geogr Sinica (in Chinese), 2003, 58(4): 577-583
- [10] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域上游降水时空结构特征. 地理科学进展, 2004, 23(2): 27-33  
Yang Zhifeng, Li Chunhui. The spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River basin. Progress Geogr (in Chinese), 2004, 23(2): 27-33
- [11] 李春晖. 黄河流域地表水资源可再生性评价:[学位论文]. 北京:北京师范大学, 2003  
Li Chunhui. The reproducible evaluation of the surface water resources in the Yellow River basin [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2003
- [12] 李道峰. 黄河河源区径流对气候和土地覆被变化的响应:[学位论文]. 北京:北京师范大学, 2003  
Li Daofeng. Impact of climate and land-cover change on runoff of the source regions of the Yellow River [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2003
- [13] 曾燕. 黄河流域实际蒸发分布式模型研究:[学位论文]. 北京:中国科学院, 2004  
Zeng Yan. Distributed modeling of actual evapotranspiration over rugged terrain of the Yellow River basin [D]. Chinese Academy of Science, 2004
- [14] 刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析. 自然资源学报, 2003, 18(2): 129-135  
Liu Changming, Zheng Hongxing. Trend analysis of hydrological components in the Yellow River basin. J Natur Resources (in Chinese), 2003, 18(2): 129-135
- [15] Liu Changming, Zheng Hongxing. Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th century. Hydrological Process, 2004, 18: 2337-2345
- [16] Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. J Hydrology, 2002, 260: 161-175
- [17] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan. J Hydrosience Hydraulic Engin, 2002, 20(2): 11-26
- [18] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. J Hydrology, 2003, 279: 144-150
- [19] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. 气象, 1994, 20(12): 19-26  
Ding Yihui, Dai Xiaosu. Temperature variation in China during the last 100 years. Meteor Mon (in Chinese), 1994, 20(12): 19-26
- [20] 施雅风. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 443-467  
Shi Yafeng. Chinese Historical Climatic Changes. Jinan: Shandong Sci Tech Press, 1996. 443-467
- [21] 杨彦武, 于强, 王靖. 近 40 年华东及华东局部主要气候资源要素的时空变异性. 资源科学, 2004, 26(4): 45-50  
Yang Yanwu, Yu Qiang, Wang Jing. Spatio-temporal variations of principal climatic factors in North China and part of East China within past 40 years. Resources Sci (in Chinese), 2004, 26(4): 45-50
- [22] 符彦斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493  
Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. Sci Atmos Sinica (in Chinese), 1992, 16(4): 482-493
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 62-76  
Wei Fengying. Modern technology of statistics, diagnosis and forecast for Climate. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 62-76
- [24] 魏凤英, 曹鸿兴. 中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究. 大气科学, 1995, 19(2): 140-148  
Wei Fengying, Cao Hongxing. Detection of abrupt changes and trend prediction of the air temperature in China, the northern hemisphere and the globe. Scientia Atmos Sinica (in Chinese), 1995, 19(2): 140-148
- [25] 尤卫红. 气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究. 北京: 气象出版社, 1998, 1-17  
You Weihong. Multi-scale Diagnosis of Climatic Change and Some Technologies and Methods for Its Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 1-17
- [26] 汤懋苍, 白重瑗, 冯松等. 本世纪青藏高原气候的三次突变及与天文因素的相关. 高原气象, 1998, 17(3): 250-257  
Tang Maocang, Bai Chongyuan, Feng Song, et al. Climate abrupt change in the Qinghai-Xizang Plateau in recent century and its relation to astronomical factors. Plateau Meteor (in Chinese), 1998, 17(3): 250-257
- [27] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特

征. 山地学报, 2004, 22(2): 140-146  
Yang Zhifeng, Li Chunhui. Abrupt and periodic changes of

the annual natural runoff in the subregions of the Yellow River. *J Mountain Sci (in Chinese)*, 2004, 22(2): 140-146

## LONG-TERM TREND AND JUMP CHANGE FOR MAJOR CLIMATE PROCESSES OVER THE UPPER YELLOW RIVER BASIN

Zhao Fangfang Xu Zongxue

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

### Abstract

On the basis of the mean air temperature, precipitation, sunshine duration and evapotranspiration from 23 meteorological stations in the upper Yellow River basin from 1960 to 2001, the feasibility of using hypothesis test techniques to identify the long-term trend for major climatic variables has been investigated. Parametric test were limited by the assumptions such as the normality and constant variance of the error terms. Nonparametric tests did not have these additional assumptions and were better adapted to the trend test for hydro-meteorological time series. The possible trends of annual and monthly climatic time series are detected by using a non-parametric method and the jumps have been examined in terms of 5-year moving averaged seasonal and annual series by using moving t-test (MTT) method, Yamamoto method and Mann-Kendall method. The results showed that the annual mean temperature has increased by 0.8 °C in the upper Yellow River basin during the last 42 years. The warmest center was located in the northern part of the basin. The nonlinear tendency for annual precipitation was negative during the same period. The declining center in annual precipitation was located in the eastern part and the center of the basin. The variation of annual precipitation in the upper Yellow River basin during the last 42 years exhibited an increasing tendency from 1972 to 1989 and a decreasing tendency from 1990 to 2001. The nonlinear tendency for annual sunshine duration and evapotranspiration were negative, too. They have decreased by 125.6 h and 161.3 mm during the last 42 years, respectively. The test for jumps by using MTT method shows that an abrupt warming occurred in the late 1980s. An abrupt change of the annual mean precipitation occurred in the mid 1980s and an abrupt change of the mean sunshine duration took place in the early 1980s. For the annual mean evapotranspiration, two abrupt changes took place in the 1980s and the early 1990s. The test results of the Yamamoto method show that the climate jumps are mostly occurred in the 1980s, and two acute jumps were tested for the spring evapotranspiration in 1981 and for the annual mean temperature in 1985. According to the Mann-Kendall method, the abrupt changes of the temperature mainly occurred in the 1990s, the evapotranspiration jumps mostly occurred in the 1960s, and the abrupt changes of the sunshine duration primary took place in the 1980s. Although the results obtained by using three methods are different, it is undoubted that jumps have indeed occurred in the past four decades. This may result from possible climate change or the effect from human activities. It should be pointed out that it is not easy to distinguish between jumps and monotonic trends and further studies are required to identify these trends more precisely. However, it is believed that the approaches presented in this study could be useful tools for further examining the impacts of climate change on hydrological processes.

**Key words:** Climate Change, Trend, Jump, Yellow River.