

# 近52年和林格尔气温和降水量时间变化特征

郭永丽<sup>1,2</sup>, 滕彦国<sup>1,2</sup>, 翟远征<sup>1,2</sup>, 王金生<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

**摘要:** 利用内蒙古和林格尔县气象站 1959 年–2010 年的气温和降水量数据, 对和林格尔地区气温和降水的时间变化进行了分析。气温和降水量的距平分析、趋势分析、相关性分析、突变性分析和 Hurst 指数分析的结果显示, 随着时间的推移, 该地区气温在未来将保持持续上升的趋势(0.36 °C/(10 a)) 而且或将更明显, 微弱的年降水量下降趋势(-8.4 mm/(10 a)) 极有可能改变; 气温和降水量之间不具有明显的相关性; 冬季气温和夏季降水分别是影响年平均气温和年降水量的最重要因素; 年平均气温在 1986 年–1988 年间发生了突变, 年降水量则未发生。分析该地区气温和降水量等气候因素演变特征, 对全面了解并合理利用当地气候资源, 以及对水资源的可持续利用和加强生态环境保护等方面具有重要意义。

**关键词:** 和林格尔; 气温; 降水量; 趋势; 相关性; 突变; Hurst

**中图分类号:** P45      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0055-05

## Temporal Changes of Air Temperature and Precipitation of Helingeer in Recent 52 Years

GUO Yong li<sup>1,2</sup>, TENG Yarr guo<sup>1,2</sup>, ZHAI Yuarr zheng<sup>1,2</sup>, WANG Jirr sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Engineering Research Center for Groundwater Pollution Control and Remediation, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The temporal variations of air temperature and precipitation in Helingeer, Inner Mongolia were analyzed based on the monitoring data of air temperature and precipitation in the Helingeer meteorological station from 1959 to 2010. The anomaly, trend, correlation, mutation, and Hurst index analyses were conducted in the paper. Results showed that there is an increasing trend of temperature (0.36 °C/(10 a)) in the area, while the weak decreasing trend of precipitation (-8.4 mm/(10 a)) is likely to change; the air temperature does not have an apparent relationship with the precipitation; the winter temperature and summer precipitation are the most important influencing factors of the annual average atmospheric temperature and annual precipitation, respectively; the air temperature had mutations between 1986 and 1988, while precipitation didn't. Analysis of variation characteristics of climate factors has great significance on the knowledge and reasonable utilization of the climate resources, sustainable utilization of water resources, and reinforcement of ecological environment protection.

**Key words:** Helingeer; temperature; precipitation; trend; correlation; mutation; Hurst

水资源工程多是基于水的利用史、水质、对水的需求以及气候行为进行计划和实施的<sup>[1]</sup>, 与气候相关的最重要的两个因素为降水量和气温<sup>[2]</sup>。气候的变化不仅影响水资源量, 也通过很多方式影响水质。与地表水相比, 地下水对气候变化的响应相对迟缓, 气候和地下水之间最重要的联系通道是地表水和陆地<sup>[3-4]</sup>。降水量的大小决定着水资源量, 降水量的变化与气温变化密切相关, 与生态环境及生态安全密切相关。研究降水量与气温气候因子的变化特征可为水资源可

持续发展决策的制定提供科学依据<sup>[5]</sup>。

随着社会发展、人口增长和生活水平的提高, 人类活动已经影响气候环境的变化, 并导致地区性气温和降水量等因子时空上的不均匀性<sup>[6]</sup>。总的来讲, 全球气候变暖导致大气水循环加快, 从而使全球总降水量增加。区域上气候因子的变化导致降水量时空分布的变化, 将对水资源、生态系统和社会经济发展等产生影响。

和林格尔县位于内蒙古呼和浩特市东南, 地处土默特平

收稿日期: 2012-11-21

网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.027.html>

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项(201009009)

作者简介: 郭永丽(1989), 女, 河南太康人, 硕士研究生, 主要从事水资源及地下水污染方面的研究。E-mail: guoyongli@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 滕彦国(1974), 男, 黑龙江巴彦人, 教授, 博士, 主要从事环境地球化学和水文地球化学的教学和研究工作。E-mail: teng1974@163.com

原向黄土高原和蛮汗山脉的过渡地带,地势自东南向西北倾斜;气候类型属于中温带半干旱大陆性季风气候,主要特点是光资源丰富,热量充足,年降水量少,雨量集中,蒸发量大,气候干燥。为了解地区性气候因子在全球气候变化背景下的演变特征<sup>[7]</sup>,本文利用和林格尔县气象站 1959 年-2010 年的监测数据,分别建立和林格尔县降水量和气温的年际和年内序列,进行气温和降水量的年际变化特征分析,并对气温和降水的季节性变化特征、相关性、突变特征和 Hurst 指数进行分析,以探讨该地近 52 年来的水文循环要素变化基本事实及初步规律。该研究可为分析气候变化对水资源的影响奠定基础,从而为区域水资源的规划管理等方面提供科学依据,且对于了解该地的水资源和气候特征及未来演变趋势有重要意义。

## 1 数据和分析方法

### 1.1 数据来源

数据来源于和林格尔县气象站 1959 年-2010 年的逐月降水和气温记录。一年和四季的划分:3 月-5 月为春季,6 月-8 月为夏季,9 月-11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。

### 1.2 研究方法

(1) 线性回归。利用气象因素的时间序列,以时间为自变量,要素为因变量,建立一元回归方程。设  $y$  为某一气象变量, $t$  为时间(年份或序号),建立  $y$  与  $t$  之间的一元线性回归方程: $y(t) = b_0 + b_1 t$ ;其趋势变化率为  $b_1$ 。把  $b_1 \times 10$  称为气候倾向率, $b_1 < 0$  表示在计算时段内呈下降趋势, $b_1 > 0$  表示呈上升趋势。 $b_1$  的绝对值大小可以度量其演变趋势上升或下降的程度。

(2) 相关性分析。目前最常用的趋势检验法为非参数方法,其中又以 Kendall 检验最为常用,与参数统计检验法相比,非参数检验法更适用于非正态分布或经过删检的时间序列分析,本文基于 SPSS 软件中的 Kendall 的  $\tau_b(K)$  方法对变量之间进行相关性分析,非参数相关系数为正负值表示变量之间相关性的性质。

(3) 突变检验。气候突变是指在较短时期内,由一种相对稳定的气候状态过渡到另一种气候状态的变化,它是气候系统非线性性质的一种表现<sup>[8]</sup>。Mann Kendall 检验法是世界气象组织<sup>[9]</sup>推荐的一种非参数检验方法,常用来分析降水、气温等气象水文要素序列的趋势显著变化,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,计算简便,适合于水文、气象等非正态分布的时间序列,并已得到广泛应用<sup>[10-11]</sup>。通过分析顺序统计值和逆序统计值序列曲线(UF 和 UB)可以进一步分析序列  $x$  的趋势变化,当它们之间有交点且超过临界直线( $\pm 1.96$ )时,表明上升或下降趋势显著,则交点就是突变的开端。

(4) Hurst 指数。Hurst 指数( $H$ )是用来定量表征时间序列的持续性或相依性。根据  $H$  值可以判断一定时间序列是完全随机的或是存在趋势性成分,在趋势性成分中表现为持续性或反持续性,一般  $0 < H < 1$ ,存在以下三种情况:(1)  $0 < H < 0.5$ ,系统是反持久性的或遍历性的时间序列,这种时间序列具有比随机序列更强的突变或易变性,即将来的总体趋势可能与过去相反;(2)  $H = 0.5$  时,气候指标在各个时次观测结

果是完全独立的,气候变化是随机的;(3)  $0.5 < H < 1$ ,系统是一个持久性或趋势增强的序列,表明未来的气候整体变化将与过去的变化趋势一致,且  $H$  值越接近 1,持续性就越强。

## 2 年际变化

### 2.1 气温

#### 2.1.1 线性回归分析

通过对和林格尔地区年平均温度距平分析和趋势分析(图 1),结果表明研究区近 52 年来年平均气温呈明显上升趋势,年平均气温倾向率为  $0.36\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ 。SPSS 软件中的 Kendall 分析表明,年平均气温与年份的非参数相关系数为 0.47,通过了  $\alpha = 0.01$  置信度的显著性水平检验,说明近 52 年来年平均气温的增温趋势明显。近 52 年来,年平均气温在 1998 年出现 1 次最高值,年平均气温是  $8.15\text{ }^\circ\text{C}$ ,比 52 年平均值( $6.12\text{ }^\circ\text{C}$ )偏高  $2.03\text{ }^\circ\text{C}$ ;最低年平均气温出现在 1968 年( $4.79\text{ }^\circ\text{C}$ ),比 52 年平均气温偏低  $1.59\text{ }^\circ\text{C}$ 。在 1987 年以前有 85.7% 的年份年平均气温值在 52 年平均气温值以下,1987 年以后有 87.5% 的年份的年平均气温值在 52 年平均气温值以上,表明 1987 年是年平均气温变化的一个转折点。1987 年-2010 年 24 年气温平均值  $6.76\text{ }^\circ\text{C}$ ,较 1959 年-1986 年 28 年的平均值  $5.57\text{ }^\circ\text{C}$  偏高  $1.19\text{ }^\circ\text{C}$ 。

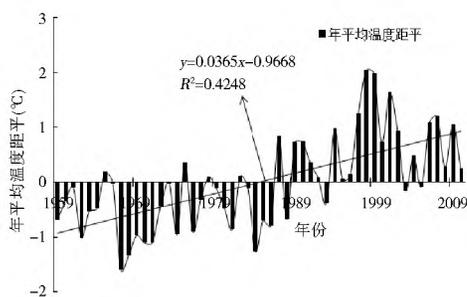


图 1 年平均气温距平变化及趋势分析

Fig. 1 Anomaly variation and trend analysis of air temperature

#### 2.1.2 Hurst 指数分析和突变分析

(1) 突变分析。1986 年-1988 年期间年平均气温的顺序统计值和逆序统计值曲线在临界线之间有两个交叉点(图 2),气温顺序统计值曲线于 1991 年开始在临界线以上,表明和林格尔地区年平均气温从 20 世纪 90 年代初逐渐上升,升温趋势很明显,故研究区在 1986 年-1988 年期间年平均气温发生了突变。

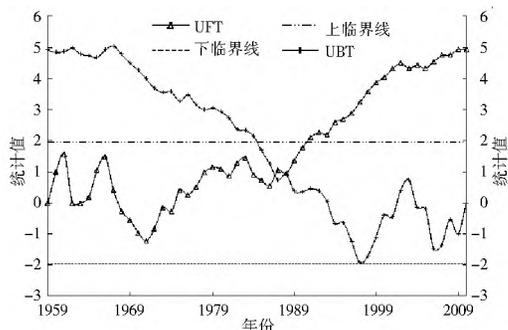


图 2 气温突变检测结果

Fig. 2 Results of mutation detection of air temperature

(2) Hurst 指数分析。年平均气温的 Hurst 指数为 0.874 1, 表明年平均气温的上升具有趋势性成分, 其时间序列具有长期相关的特征, 过程具有很强的持续性, 其未来的变化趋势将与过去一致, 气温保持上升趋势的可能性很大。

## 2.2 降水量

### 2.2.1 线性回归分析

根据和林格尔 1959 年-2010 年的降水量资料, 该地区近 52 年的多年平均降水量为 400 mm。1959 年-2010 年年降水量距平变化曲线及趋势分析见图 3。由图 3 可知, 20 世纪 60 年代到 21 世纪初前 5 年, 年降水量在多年降水量上下波动, 处于相对动态平衡状态; 2005 年至今, 年降水量低于 400 mm; 20 世纪 60 和 70 年代年降水量波动范围(201.7~701.6 mm)较 20 世纪末和 21 世纪初年降水量波动范围(250.3~564.2 mm)大。总体上看, 近 52 年来年降水量呈微弱的下降趋势(-8.4 mm/(10 a)), 与 Folland 等<sup>[12]</sup>的研究结果相一致, 即全球气候变暖加速了地球系统的水循环, 全球总降水量增加, 但干旱与半干旱地区减少。

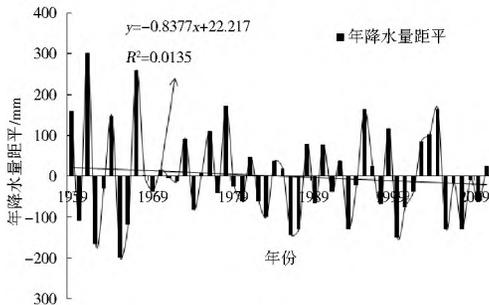


图 3 年降水量距平变化及趋势分析

Fig. 3 Anomaly variation and trend analysis of annual precipitation

### 2.2.2 Hurst 指数分析和突变分析

(1) 突变分析。年降水量顺序统计值和逆序统计值曲线有多个交叉点(图 4), 但顺序统计值和逆序统计值曲线均未超过临界线, 表明近 52 年研究区年降水量未发生突变。

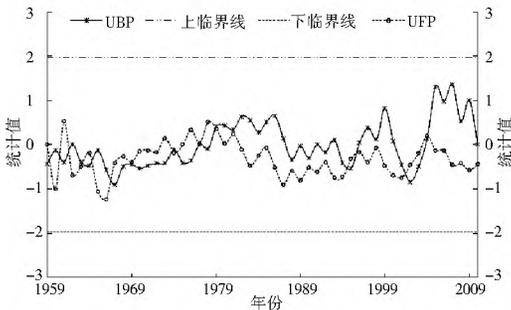


图 4 年降水量突变检测结果

Fig. 4 Results of mutation detection of annual precipitation

(2) Hurst 指数分析。年降水量的 Hurst 指数为 0.213 5, 具有较强的突变性, 目前的变化趋势易发生改变。目前和林格尔地区降水量与全球降水量变化趋势相反, 但随着时间的推移该地区的降水量变化趋势极有可能与全球降水量变化趋于一致。

## 3 季节性变化特征

### 3.1 年代际距平分析

#### 3.1.1 气温

研究区不同年代各季节温度距平和年平均温度距平统计结果(表 1)表明, 20 世纪 60-70 年代上升 0.2 °C, 70-80 年代上升 0.1 °C, 80-90 年代上升 1.0 °C, 20 世纪 90 年代与 21 世纪初无变化, 故近 52 年来年平均气温持续上升。20 世纪 60、70 和 80 年代比 50 年平均值分别低 0.6 °C、0.4 °C 和 0.3 °C, 20 世纪 90 年代和 21 世纪初比 50 年平均值均高 0.7 °C, 故 80 年代末和 90 年代初是该地区气温变化的一个转折点, 与年平均气温的突变性分析结果相一致。

表 1 温度年代际距平分析

Table 1 Anomaly variation of temperatures in decades

		°C				
年代		春	夏	秋	冬	年
1960 年-1969 年	温度	7.8	20.8	5.9	-12.5	5.5
	距平	-0.2	-0.1	-0.4	-1.8	-0.6
1970 年-1979 年	温度	7.4	20.4	5.9	-11	5.7
	距平	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4
1980 年-1989 年	温度	7.8	20.6	5.8	-11	5.8
	距平	-0.3	-0.3	-0.4	-0.2	-0.3
1990 年-1999 年	温度	8.6	21.4	6.8	-9.4	6.8
	距平	0.5	0.4	0.5	1.4	0.7
2000 年-2010 年	温度	8.8	21.4	6.9	-9.8	6.8
	距平	0.7	0.5	0.6	0.9	0.7
多年平均温度		8.1	20.9	6.3	-10.7	6.1

#### 3.1.2 降水量

研究区不同年代各季节降水量距平和年降水量距平统计结果(表 2)表明, 20 世纪 60 和 70 年代年降水量比多年平均降水量分别偏高 5.7 mm 和 23.5 mm; 80 年代和 21 世纪初分别偏低 37.7 mm 和 10.7 mm, 90 年代与多年平均降水量相当。以上分析表明, 20 世纪 80 年代至今年降水量呈减少趋势。

表 2 降水量年代际距平分析

Table 2 Anomaly variation of precipitations in decades

		mm				
年代		春	夏	秋	冬	年
1960 年-1969 年	降水量	63.3	249.7	85.6	7.2	405.7
	距平	2.6	6.8	2.7	-2.8	5.7
1970 年-1979 年	降水量	63.8	242.6	104.1	13	423.5
	距平	3.2	-0.3	21.2	3.1	23.5
1980 年-1989 年	降水量	48.3	239.8	65.2	9	362.3
	距平	-12.3	-3.1	-17.7	-0.9	-37.7
1990 年-1999 年	降水量	57.8	259.5	75.1	8.7	401.1
	距平	-2.8	16.6	-7.8	-1.3	1.1
2000 年-2010 年	降水量	70	222.9	84.6	11.9	389.3
	距平	9.3	-20	1.6	1.9	-10.7
多年平均降水量		60.6	242.9	82.9	10	400

20 世纪 80 年代年降水量及四季降水量均比多年平均值低, 与其它年份不同, 同样表明了 80 年代该地区气候变化发

生突变,也表明了研究区年降水量在 80 年代随着气温的突变而出现异常。

### 3.2 突变性分析

分析图 5 可知,四季气温均具有突变点,经统计可知四季气温突变发生在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初;春、秋和冬季

降水量均发生突变,突变点发生在 20 世纪 70 年代左右,统计曲线并非一直上升或下降,多数在 90 年代统计曲线趋势发生改变,夏季则无突变点,且与年降水量统计曲线相似(图 4 和图 5(b)),故夏季在年降水量中占主导作用;以上的分析结果表明各季节气温和降水量之间没有明显的相关性。

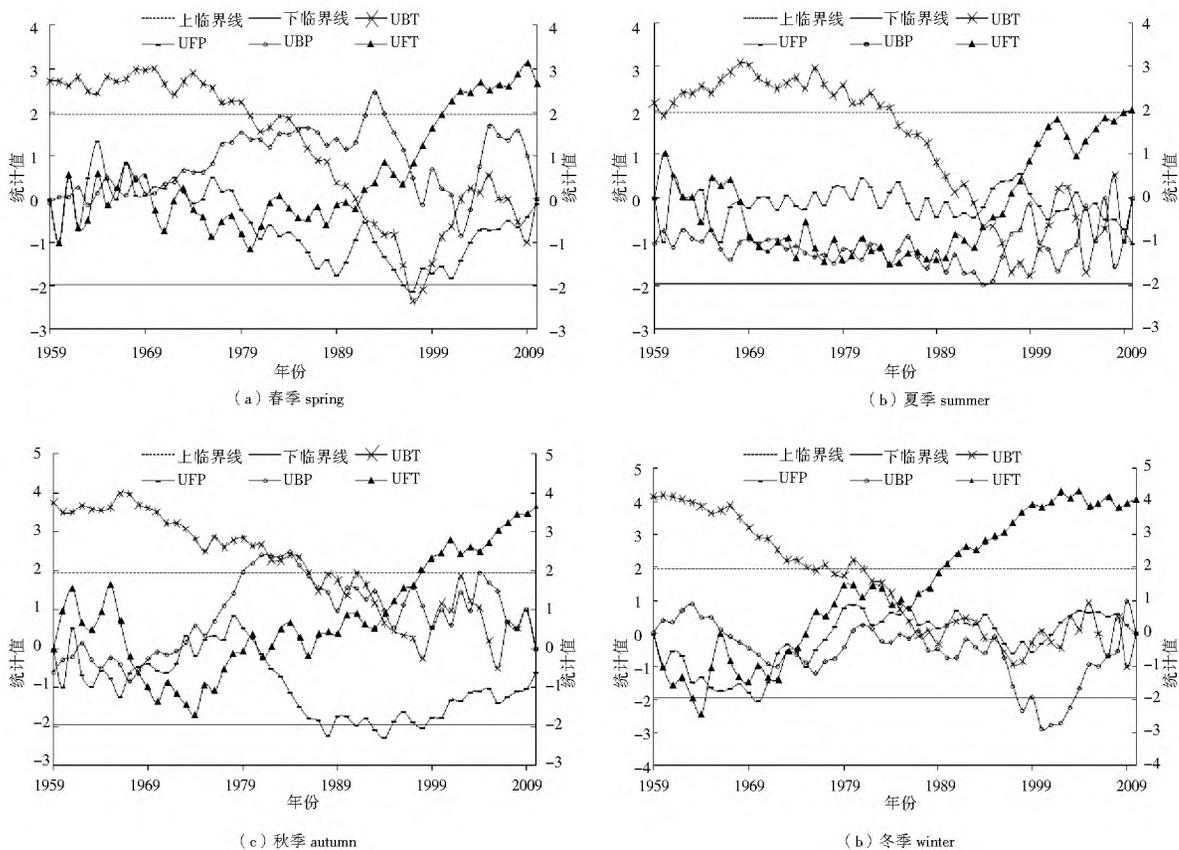


图 5 四季气温和降水量突变性检验

Fig. 5 Results of mutation detections of temperatures and precipitations of four seasons

### 3.3 相关性分析和 Hurst 指数分析

#### 3.3.1 相关性分析和 Hurst 指数分析

(1) 气温。分析表 3 中年平均气温与各季节温度的非参数相关系数,可知年平均气温与各季节温度之间具有明显的相关性;分析各季节气温与年份的非参数相关系数和 Hurst 指数,可知四季气温均具有明显的上升趋势且将保持现有的增温状态。通过分析各季节温度与年平均气温和年份之间非参数相关系数,以及各季节气温的 Hurst 指数,可知年平均气温上升是各季节温度上升的累积;其中冬季气温与年平均气温和年份的非参数相关系数最大,且 Hurst 指数最大,表明年平均气温的增温主要是受冬季增温的影响。

表 3 气温的相关性和 Hurst 指数统计

Table 3 Statistical results of correlations and Hurst indexes of temperatures

参数	春	夏	秋	冬
年平均气温	0.44**	0.43**	0.51**	0.61**
年份	0.26**	0.20*	0.36**	0.39**
Hurst 指数	0.660 9	0.737 3	0.714 1	0.794 9

注:\*\* 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的;\* 在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的。

(2) 降水量。分析表 4 中年降水量与四季的相关性,可知年降水量与冬季的相关性最弱,与夏季降水量的相关性最强且夏季降水量约占年降水量的 60%,故该地区的年降水量主要是受夏季降水量的影响。通过分析表 4 中各季降水量与年份的非参数相关系数以及各季节的 Hurst 指数,可知近 52 年来,春、夏和秋季降水量均呈现下降趋势,而冬季降水量具有微弱的上升趋势;其中春季和夏季降水量具有较强的突变性,随着时间往后推移,春季和夏季降水量极有可能呈现上升趋势,而秋季和冬季降水量相对具有一定的随机性。

表 4 降水量的相关性和 Hurst 指数统计

Table 4 Statistical results of correlations and Hurst indexes of precipitations

参数	春	夏	秋	冬
年降水量	0.36**	0.70**	0.29**	0.21*
年份	-0.01	-0.10	-0.06	0.001
Hurst 指数	0.255 4	0.217 0	0.509 1	0.462 5

注:\*\* 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的;\* 在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的。

#### 3.3.2 气温和降水量的相关性分析

通过对和林格尔地区不同年代和近 52 年的各季节气温

和降水量、年平均期气温和年降水量序列的相关性统计分析(表5)可知,各季节气温和降水量、年平均气温与年降水量之间没有明显的相关性;与其它季节相比,夏季气温与夏季降水量的相关性和年平均气温和年降水量的相关性较一致,大多数呈负相关,表明夏季降水量在年降水量中占主导地位。在全球变暖背景下,和林格尔地区气温和降水量两个气候因素相互关系与全球气温和降水量变化相关性不一致。

表5 气温与降水量相关性统计表

Table 5 Statistical results of correlation between air temperature and precipitation

年代	春	夏	秋	冬	年
1960年-1969年	0.644**	-0.200	0.045	-0.090	-0.289
1970年-1979年	-0.135	-0.022	0.289	0.156	0.156
1980年-1989年	-0.333	-0.244	0.156	-0.584*	-0.422
1990年-1999年	0.244	-0.333	0.244	0.180	-0.156
2000年-2010年	-0.200	-0.511*	0.333	0.022	-0.244
1959年-2010年	0.067	-0.242*	0.069	-0.006	-0.116

注:\*\*在置信度(双侧)为0.01时,相关性是显著的;\*在置信度(双侧)为0.05时,相关性是显著的。

## 4 气温和降水量变化特征及影响因素

### 4.1 变化特征

通过以上气温和降水量的距平分析、趋势分析、相关性分析、突变性分析和Hurst指数分析可知,该地区气温持续上升,降水量呈微弱的下降趋势;年平均温度和年降水量分别主要受到冬季温度和夏季降水量的控制。和林格尔地区近52年来,温度升高、降水量减少,气候趋于干旱化,将显著改变该地区的水资源和生态系统。

20世纪80年代末是该地区近52年来年平均气温变化的突变点,年降水量在80年代出现异常但未发生突变;降水量随着气温的突变产生异常但不明显;与气温和降水量的突变性分析和相关性分析结果一致。

气温和降水量的Hurst指数分析表明,年平均气温和各季节气温保持持续增温趋势或更强;而年降水量、春季和夏季降水量变化形式趋于全球降水量变化状况,秋季和冬季降水量相对具有一定的随机性。

综合以上分析可知,在全球气候变暖背景下,近52年来和林格尔地区的气温和降水量两个气候因子的演变特征表现出其独特性;但随着时间的推移,该地区气候因子——气温和降水量的变化趋于与全球变化相一致。

### 4.2 影响因素

和林格尔地区气温的持续增加和降水量的持续减少,对该地区的水文循环产生了较大影响,进而引起水均衡失调等问题。该地区气温和降水量气候因子演变特征的独特性受到当地地形地貌、地质构造、太阳辐射、大气气体和颗粒物等组成、大气环流及要素、城市化等因素的影响,且人为因素的影响是非周期循环和单调发展的,其累积效应不可低估<sup>[13-14]</sup>。

和林格尔属于蒙古高原地区,在地理环境上,属半干旱、干旱和荒漠草原脆弱的生态系统,极易受人类活动的影响,

该地区的持续增温趋势可能与它的生态系统的脆弱性有关;其中影响气候变暖的显著因素有人类活动产生的温室气体、城市化过程、土地利用变化等,这些因素改变了地面原有的能量平衡和水分循环模式,对温度变化产生明显影响。和林格尔地区的水汽主要来源于太平洋,但由于该地区气温较高、蒸发量大且气候属于干旱半干旱区,对降水强度和频率周期影响较大<sup>[15]</sup>。

## 5 结论

本文对和林格尔县1959年-2010年的气温和降水量数据进行了距平分析、趋势分析、相关性分析、突变性分析和Hurst指数分析,并得出以下结论。

(1)平均气温以 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 的趋势上升,随着时间的推移,仍将保持该趋势或增强,年平均气温的变化趋势是各季节气温变化趋势的累积,其中冬季增加最显著;1986年-1988年间是年平均气温变化的转折点。

(2)年降水量呈微弱下降趋势,但该趋势在未来的时间里极有可能发生逆转趋于全球降水量变化形式,其中夏季降水量变化在年降水量趋势变化中占主导作用。

(3)各季气温和降水量、年平均气温和降水量之间均不具有明显的相关性。

根据质量守恒原理,全球变暖、极地冰川融化、全球大气水循环加快导致全球总降水量增加。由于局部地区气候因子变化的独特性,极端天气事件增加、气温和降水量分布不均等现象越来越明显。本文的研究结果表明,和林格尔地区在1959年-2010年间气温逐渐升高,而降水量微弱减小,故该地区气候因子对全球气候变化的响应并非与全球气候因子变化相一致。气温持续升高和降水量减少导致水资源量减少,这对该地区的社会供水、水环境、生态和社会经济将产生深远影响,故应采取积极措施防止水资源问题的加剧。

### 参考文献(References):

- [1] Abdul Aziz, O. I., Burn, D. H.. Trends and Variability in the Hydrological Regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of hydrology, 2006, 319: 282-294.
- [2] Hossein Tabari, Parisa Hosseinzadeh Talaei. Temporal Variability of Precipitation over Iran: 1966-2005 [J]. Journal of Hydrology, 2011, 396: 313-320.
- [3] William M. Alley. Ground Water and Climate [J]. Ground Water, 2001, 39(2): 161.
- [4] 张峰, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 近55年珠江上游流域降水演变规律[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 49-54. (ZHANG Feng, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Analysis of Spatial and Temporal Precipitation Variations for the Upstream of Pearl River Basin during the Past 55 Years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 49-54. (in Chinese))
- [5] Qiang Liu, Zhifeng Yang, Baoshan Cui. Spatial and Temporal Variability of Annual Precipitation during 1961-2006 in Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361: 330-338.

(下转第70页)

(3) 数值模拟结果与试验结果吻合,验证了数值模拟的可靠性。同时通过将换算后的原型试验结果与 CFD 数值模拟结果进行对比发现,在设计工况点附近,试验结果与数值模拟结果完全一致,而在偏离设计工况点但保持额定水头不变时,改变导叶开度引起的流量变化比改变叶片安放角引起的流量变化对数值模拟结果的偏差影响略大。

#### 参考文献(References):

- [1] 段宏江,张继成.大型潮汐电站关键技术浅析[J].西北水电,2012,(s1):28-33.(DUAN Hong jiang,ZHANG Ji cheng.The Key Technology of Large Tidal Station[J].Northwest Hydropower,2012,(s1):28-33.(in Chinese))
- [2] 陈金松,王东辉,吕朝阳.潮汐发电及其应用前景[J].海洋开发与管理,2008,(11),84-86(CHEN Jin song,WANG Dong hui,LV Zhao yang.Tidal Power Generation and Application Prospect[J].Ocean Development and Management,2008,(11),84-86.(in Chinese))
- [3] 房玉敏,宋桂玲,张清顿.竖井贯流式机组的流道设计及选型优化探讨[J].大电机技术,2009,(1):49-52.(FANG Yu min,SONG Gui ling,ZHANG Qing dun.The Flow Passage Design and Type Selection of Pit Type Tubular Turbine[J].Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2009,(1):49-52.(in Chinese))
- [4] 郑源,李平,陈新方,等.水力机械多功能模型试验台循环管路系统水力设计[J].流体机械,2001,29(11):16-18.(ZHEN Yuan,LI Ping,CHEN Xin fang,et al.Hydraulic Design on Circulating Pipe System with Multiple Rig for Hydraulic Machinery Model Test [J]. Fluid Machinery,2001,29(11):16-18.(in Chinese))
- [5] DL 446 91,水轮机模型验收试验规程[S].(DL 446 91,Hydraulic Turbine Model Acceptance Rules [S].(in Chinese))
- [6] 张丽敏,郑源,张成华,等.用于冷却塔的超低比转数混流式水轮机设计[J].农业机械学报,2010,41(S1):39-42.(ZHANG Li min,ZHENG Yuan,ZHANG Cheng hua,et al.Study on Francis Turbine with Super Low Specific Speed Applied in Cooling Towers [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(S1):39-42.(in Chinese))
- [7] 冯卫民,宋立,左磊,等.轴流泵装置三维非定常湍流流场的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2010,28(6):531-536.(FENG Wei min,Song Li,Zuo Lei,et al.3D Numerical Simulation on Unsteady Turbulence Flow in Axial Flow Pump System[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2010,28(6):531-536.)
- [8] 郑源,杨春霞,周大庆,等.卧轴双转轮混流式水轮机的优化设计[J].排灌机械工程学报,2012,30(11):341-345.(ZHEN Yuan,YANG Chun xia,ZHOU Da qing,et al.Optimization Design of Horizontal Francis Turbine with Two Runners [J].Journal of Drainage and Irrigation Machine Engineering,2012,30(11):341-345.(in Chinese))
- [9] Saeed R A, Galybin A N, Popov V. Modelling of Flow-induced Stresses in a Francis Turbine Runner [J]. Advances in Engineering Software,2010,41(12):1245-1255.
- [10] Xiao Ruofu, Wang Zhengwei, Luo Yongyao. Dynamic Stresses in a Francis Turbine Runner Based on Fluid-structure Interaction Analysis [J]. Tsinghua Science and Technology,2008,13(5):587-592.
- [6] 许云锋,左其亭.气候变化对水资源影响的研究现状与展[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):80-84.(XU Yun feng,ZUO Qi ting.Current Status and Prospect of Research on Influence of Climate Change on Water Resource [J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(5):80-84.(in Chinese))
- [7] 李占杰,鱼京善,信达.1951年-2010年贵阳市气温变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):31-35.(LI Zhan jie,YU Jing shan,XIN Da.Characteristic Analysis of Temperature in Guiyang from 1951 to 2010 [J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(5):31-35.(in Chinese))
- [8] Jonathan, T. O., Julia, E. C.. Abrupt Change in Earth's Climate System [J]. Annual Review Environment and Resources,2006,31:1-31
- [9] Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of Climate Change on Water Resources in Southern Taiwan [J]. Journal of Hydrology,2002,260:161-175.
- [10] Liqiao Liang, Lijuan Li, Qiang Liu. Precipitation Variability in Northeast China from 1961-2008 [J]. Journal of Hydrology,2011,404:67-76.
- [11] Tao H, Gemmer M, Bai Y G, et al. Trends of Streamflow in the Tarim River Basin during the past 50 years: Human Impact or Climate Change [J]. Journal of hydrology,2011,400:1-9.
- [12] Foland C K, Karl T R, Christy J R, et al. Observed Climate Variability and Change, In: Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge U K,2001:99-181.
- [13] 王英,曹明奎,陶波,等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究,2006,25(6):1031-1041.(WANG Ying,CAO Ming kui,TAO Bo,et al.The Characteristics of Spatio-temporal Patterns in Precipitation in China under the Background of Global Climate Change [J]. Geographical Research,2006,25(6):1031-1041.(in Chinese))
- [14] 张强,韩永翔,宋连春.全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J].地球科学进展,2005,20(9):990-998.(ZHANG Qiang,HAN Yong xiang,SONG Lian chun.The Summarize of Development of Global Climate and Its Effect Factors [J]. Advances in Earth Science,2005,20(9):990-998.(in Chinese))
- [15] 王菱,甄霖,刘雪林,等.蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究[J].地理研究,2008,27(1):171-180.(WANG Ling,ZHEN Lin,LIU Xue lin,et al.Comparative Studies on Climate Changes and Influencing Factors in Central Mongolian Plateau Region [J]. Geographical Research,2008,27(1):171-180.(in Chinese))

(上接第 59 页)