

# 武功地区气候变化特征及趋势预测

侯凯<sup>1,2</sup>, 林涛<sup>1,2</sup>, 钱会<sup>1,2</sup>, 徐盼盼<sup>1,2</sup>, 杨咪<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:**基于1955—2012年武功地区气温与降水量逐日观测数据,运用累积距平、Mann-Kendall检验与洛伦兹曲线理论分析了该地区年均气温和降水量地变化趋势及年内均匀性评价,并借助R/S分析对该地区气候发展趋势进行预测。结果表明:武功地区58年来年均气温呈明显上升趋势,而年降水量呈下降趋势;气温在1990年发生气温升高突变,1955—1984年为丰水期,1985—2002年转入枯水期,2002年之后逐渐转为丰水期;年内降水分布不均匀性逐渐增强,降水量较小的月份所占比例较大,且基尼系数与洛伦兹不对称系数的年代际变幅不大,基本趋于不变;目前气温升高趋势将不再持续,未来可能降低,并且年降水量减少趋势也不再持续,未来可能开始增加。

**关键词:**气温;降水量;M-K检验;R/S分析;洛伦兹曲线;基尼系数

**中图分类号:**P467

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)04-0252-07

## Change Characteristics and Trend Prediction of Climate in Wugong Area

HOU Kai<sup>1,2</sup>, LIN Tao<sup>1,2</sup>, QIAN Hui<sup>1,2</sup>, XU Panpan<sup>1,2</sup>, YANG Mi<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental science and Engineering, Chang'an University College, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:**Based on the daily observation data of temperature and precipitation from 1955 to 2012 in Wugong area, the cumulative departure and Mann-Kendall test and Lorenz curve method were applied to analyze the temperature and annual precipitation variation characteristics and years uniformity evaluation, the R/S method was applied to forecast the development trend of climate in this region. The results showed that the temperature had an increasing trend over the past 58 years in Wugong area, and the annual precipitation decreased; the temperature had a rising mutation in 1990, the region was wet in 1955—1984, and it turned to dry season in 1985—2002, and it gradually turned into the wet season after 2002; the uneven of annual precipitation distribution was gradually strengthen, the months of less precipitation had a larger percentage, and the decadal amplitude of the Gini coefficient and Lorenz asymmetry coefficient was little, which was essentially unchanged; the rising tendency of temperature will no longer last, it may reduce in the future, the decreasing tendency of precipitation will also no longer last, it may increase in the future.

**Keywords:**temperature; precipitation; M-K test; R/S method; Lorenz curve; Gini coefficient

全球变暖将会引发全球性或区域性水汽循环的变化,导致气温和降雨特征发生改变。根据GCMs气候模型,预测至21世纪末,全球平均降雨量可能将增加7%,但降雨天数会变少,强降雨概率或极端干旱概率的频率将增多<sup>[1-2]</sup>。因此,全球性气候变暖已经引起了世界各国的共同关注。Kosaka Y等<sup>[3]</sup>在研究近期全球变暖的间断与赤道太平洋的表面冷却关系中,指出相似的年代际中断事件可能在未来十年发生,但全球变暖趋势在继续增加。段安民等<sup>[4]</sup>研究全球变暖下青藏高原

35 a气候变化特征,指出青藏高原气温与降雨加速增长,但积雪和大气热源减小趋势显著。张存杰等<sup>[5]</sup>在研究全球变暖下对西北地区秋季降雨的影响,发现秋季降雨量的突变是最明显的,西北地区东、西部降雨在年代际尺度上存在相反的变化趋势。

中国北方地区从20世纪80年代以来,干旱化趋势日益严重,当前北方多数地区显著干旱化的主要原因是降雨量持续性减少<sup>[6-7]</sup>。陕西省横跨三个气候带,南北气候差异较大,降雨南多北少,陕南属北亚热带

带气候,关中及陕北大部属暖温带气候,关中地区大部分为半湿润区。何艳芬等<sup>[8]</sup>对陕西省 27 a 气候变化进行研究,指出陕西省平均气温呈上升趋势,但降雨下降趋势不明显,总体上呈暖干化趋势。李平华等<sup>[9]</sup>研究关中地区水文气候对全球变暖的响应问题上,发现关中地区未来气候将更加趋向于干暖化,生态环境就更加脆弱。但目前对于关中地区气候变化,特别是气温与降水量分布均匀性研究以及对未来气候发展趋势的预测相对较少。基于此,本文选择关中武功地区,以陕西武功站气象站 1955—2012 年 58 a 的逐日气温与降水数据为基础,分析其 58 a 气温与降水量特征的多尺度变化,为该地区水资源优化配置和预防旱涝灾害提供科学依据,以期完善本地区气象灾害预警网络,同时对该地区生态环境建设和保护具有重要的现实意义,以应对全球变暖趋势所带来的潜在威胁与灾害。

1 研究资料与方法

1.1 资料

资料来源于陕西武功站(57034)气象站 1955—2012 年 58 a 的逐日气温与降水数据。武功县位于关中盆地西部,东迄兴平市,西邻杨凌区、扶风,北接乾县,南隔渭河。属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季严寒少雪。全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为  $4\,184^{\circ}\text{C}$ ,在全省处于中等水平。年降雨量为 633.7 mm,降雨季节性强,多集中在 6 月,7 月,8 月,占全年的 50% 以上。

1.2 原理与方法

1.2.1 滑动平均与累积距平 滑动平均这种方法类似于低通滤波器,用确定时间序列的平滑值来显示变化趋势。对于气象要素的年际变化,可利用模比差积曲线来直观、准确地反映,即累积距平曲线,且年降雨量的累积距平曲线可以反映降雨年际间的丰、枯变化,若一段时间内累积距平曲线呈下降的趋势,说明此时期为枯水期,反之为丰水期<sup>[10-11]</sup>。

1.2.2 Mann-Kendall 趋势分析与突变检验 Mann-Kendall 趋势检验为一种非参数统计检验方

法,优点为样本不需要遵循某种特定分布,也不受异常值的干扰,可以有效分析水文气象时间序列的趋势变化。也可利用  $Z_{MK}$  进行趋势显著性分析,当给定置信水平  $\alpha$ ,若  $|Z_{MK}| < Z_{1-\alpha/2}$ ,系列无显著变化; $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,则序列变化趋势显著。通常认为当其绝对值大于等于 1.28,1.64,1.96 时分别表示通过了置信度为 90%,95% 和 99% 的显著性检验<sup>[12]</sup>。

1.2.3 R/S 分析法 R/S 分析法,又称重标极差分析法,用来判断时间序列是完全随机或是存在趋势性成分,常用 Hurst 指数值大小来判断趋势性成分的持续性或反持续性的强度大小。一般认为: $0 \leq H < 0.5$  表明时间序列具有长期负相关性,即未来总体趋势与过去相反; $H = 0.5$  表明未来气象要素演进不受过去影响; $0.5 < H \leq 1$  表明时间序列具有长期正相关性,即未来总体趋势与过去一致<sup>[13]</sup>。

Hurst 指数试验可以分为 20 a 试验和累加试验:20 a 试验指的是从起始年起,连续计算构成一组序列。累加试验指的是起始年为 20 a,计算第 1 个 Hurst 指数(1955—1974 年),记为 1955(20);然后增加 1 a,计算第 2 个 Hurst 指数(1955—1975 年),记为 1955(21);以此类推,连续计算构成一组序列。最终未来变化趋势结果可通过 20 a 试验和累加试验的 Hurst 指数分布图进行预测<sup>[13]</sup>。

1.2.4 洛伦兹曲线 洛伦兹曲线是由美国统计学家 M. Lorenz 在 20 世纪初提出,最初用于研究社会财富、土地和工资收入等的分配公平性,它利用累积数绘制成的曲线来描述不平等(集中或分散)程度。洛伦兹曲线横轴与纵轴上的点都是由累积百分比构成(图 1): $x$  轴表示收入不高于某一水平的人数占总人数的百分比, $y$  轴表示相应收入占总收入的百分比。当曲线与  $x$  轴呈  $45^{\circ}$  夹角时,该直线为绝对均匀线(OA),即财富分配绝对平等。当曲线距离绝对均匀线越近时表示收入差距小,财富分配较平等;反之,则表示收入差距大,财富分配不平等<sup>[14]</sup>。本文利用这一原理对降水量时间分布均匀度进行量化评价,以期对降水变化做出更加客观、全面的评估。

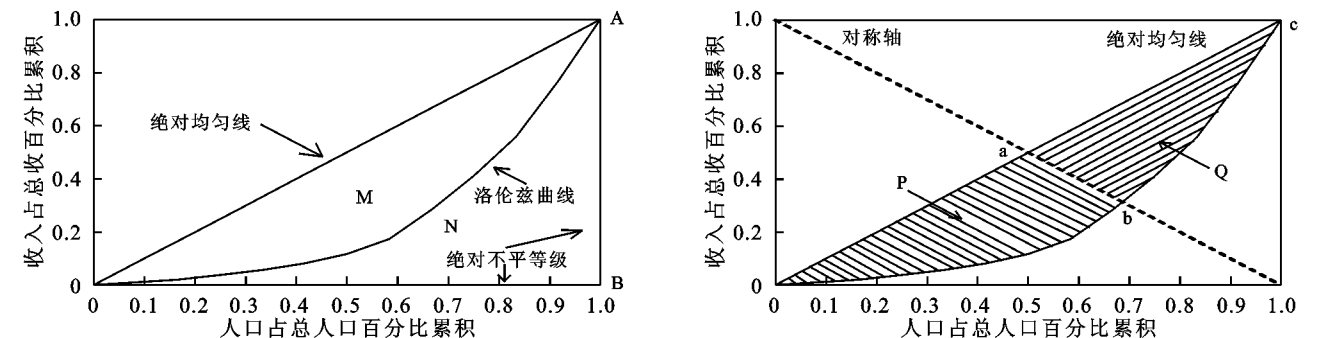


图 1 洛伦兹曲线及基尼系数曲线

基尼系数是在洛伦兹曲线基础上利用累积数学绘制的曲线来刻画不平等(集中或分散)程度,表示为 $G$ 。基尼系数为图1中绝对均匀线与曲线之间面积( $M$ )和绝对均匀线与绝对不平等线之间面积( $M+N$ )的比值<sup>[14]</sup>。基尼系数的变化范围为 $0 \leq G \leq 1$ ,基尼系数越大,均匀度越低,反之亦然。洛伦兹不对称系数是用来定量界定不同等级群体对总不均匀程度的贡献大小,即不均匀性的缘由,表示为 $S$ 。洛伦兹不对称系数的变化范围为 $S < 1, S > 1, S = 1$ 三种情况,用 $P$ 表示曲线oab围成的面积, $Q$ 表示曲线abc围成的面积,即 $S = 1$ 时,洛伦兹曲线对称( $P = Q$ ); $S > 1$ 时,表示洛伦兹曲线与均匀线围成的右边(对称线右边)的面积大于左边的( $P < Q$ );反之, $S < 1$  ( $P > Q$ )<sup>[15-20]</sup>。基尼系数与洛伦兹不对称系数的计算公式为:

$$G = 1 - 2 \int_0^1 f(x) dx \quad (1)$$

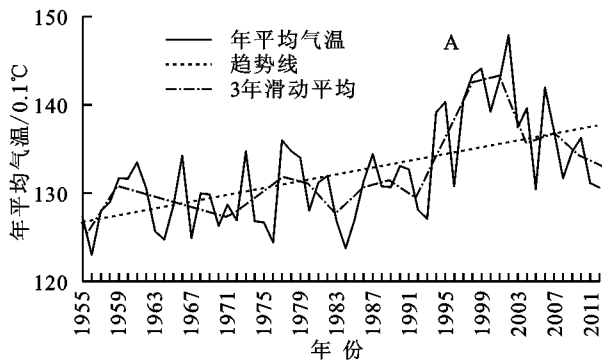
$$S = F(\mu) + L(\mu) \quad (2)$$

对于有序数列 $x_1 \leq x_2 \leq \dots, \leq x_i \leq x_n$ , $S$ 可用下列公式计算:

$$\delta = \frac{\mu - x_m}{x_{m+1} - x_m} \quad (3)$$

$$F(\mu) = \frac{m + \delta}{n} \quad (4)$$

$$L(\mu) = \frac{L_m + \delta x_m}{L_n} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i + \delta x_m}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (5)$$



式中: $f(x)$ 为多项式拟合得到的函数; $x$ 为时间累积百分比; $\mu$ 为均值; $n$ 为数据总数目; $m$ 为小于均值的数据个数。

本文所研究降水的年内分配均匀度基尼系数模型的构建过程为:(1)将年内月降雨量按升序排列,计算累计百分比;(2)以月为单位,对时间进行累积百分比累积;(3) $x$ 轴为时间累积百分比, $y$ 轴为月降水量累积百分比,拟合得到洛伦兹曲线;(4)根据拟合曲线公式,计算年基尼系数与年洛伦兹不对称系数,且拟合曲线的 $R^2$ 值均大于0.995。其中 $S > 1$ 表明造成年内分布不均匀的原因为较大降雨量月份占全年比例较大,反之, $S < 1$ 为较小降雨量月份占全年比例较大<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温变化趋势分析

图2为武功1955—2012年年均气温变化趋势和3a滑动平均及累计距平图。由图2A可知:武功近58a气温变化幅度较大,总体呈上升趋势,倾斜率为 $1.93^\circ\text{C}/10\text{a}$ ;从3a滑动平均曲线也可看出气温在1991年之后出现了大幅度升高。由图2B可知:1993年前,气温累计距平值呈下降趋势,气温呈下降趋势且趋势缓慢,1993年后,气温累计距平值呈上升趋势,气温呈逐步上升趋势且上升速率较快。

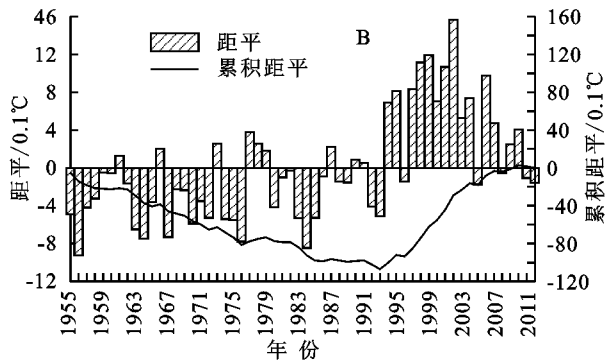


图2 武功年均气温变化趋势及累计距平

图3为武功年均气温Mann-Kendall检验曲线。由图可知:1987年之后气温呈上升趋势( $UF > 0$ ),且 $UF$ 曲线在1998年与0.05显著置信曲线相交,说明其以后气温上升趋势达到0.05显著性水平;1987年之前气温呈波动趋势,即在1955—1958年,1963—1978年,1984—1986年气温为下降趋势,其余时期为上升趋势; $UF$ 与 $UB$ 曲线在1990年出现交点,且位于 $\pm 1.96$ 之间,说明气温在1990年发生气温上升的突变。

### 2.2 年降水量变化趋势分析

图4为武功1955—2012年年降水量变化趋势和

3a滑动平均及累计距平图。由图4A可知:武功近58a年际降水量变化幅度不明显,总体呈下降趋势,倾斜率为 $-18\text{mm}/10\text{a}$ ;从3a滑动平均曲线也可以看出自2000年之前,武功地区年降水量在波动中呈降低的趋势,在2000年之后开始降水量在波动中呈上升趋势。图4B可知:1955—1975年,1983—1984年及2002年之后,年降水量累计距平值呈上升趋势,为丰水期,1976—1982年,1985—2002年,累计距平值呈下降趋势,为枯水期。所以,总体上武功地区在1955—1984年年降水量总体呈上升趋势,为丰水期,1985—2002年逐渐转入枯水期,到2002年之后才逐渐扭转趋势进入丰水

期,总体上呈现出丰—枯—丰的变化趋势。

图 5 为武功年降水量 Mann-Kendall 检验曲线。由图可知:1955—1956 年,年降水量呈增加趋势( $UF>0$ );1957 年之后,呈下降趋势( $UF<0$ ),且  $UF$  曲线在 1962—1963 年,1979—1980 年以及 1994—2010 年与 0.05 显著置信曲线相交,说明其下降趋势达到 0.05 显著性水平; $UF$  与  $UB$  曲线的交点位于信度线之内,在 1958 年出现交点,确定该年份为年降水量降低的突变点。

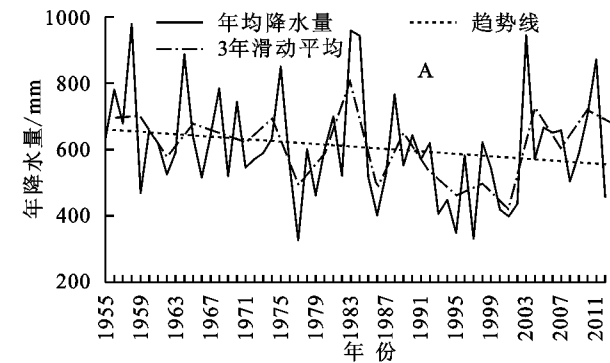


图 4 武功年降水量变化趋势及累计距平

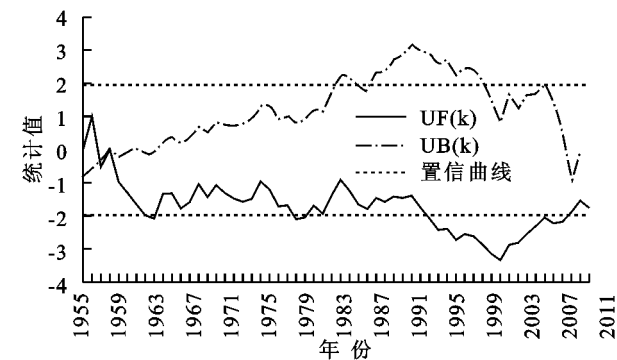


图 5 1955—2012 年武功降雨量 Mann-Kendall 检验曲线

为了解武功地区 58 a 年内降水量的分布变化对年降水量逐渐减少的影响,分析武功地区四季降水量变化趋势。图 6 为武功地区季节降水量变化趋势,由图可知:春季、夏季与秋季降水量呈下降趋势,分别为  $-9.9\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $-3.1\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $-5.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,其中春季降水量下降趋势最明显;冬季降水量呈上升趋势,倾斜率为  $0.31\text{ mm}/10\text{ a}$ 。表 1 为武功地区季节降水量统计表,由表 1 可知:春季、夏季与秋季降水量占全年约 96.59%,而冬季只占 3.41%,因此春夏秋三季降水量决定年降水量变化趋势,验证了武功地区 58 a 总降水量总体呈下降趋势。

表 1 武功地区季节降水量统计表

季节	春季	夏季	秋季	冬季
降水量/mm	7649.6	15346.9	11069.2	1206.3
降水量/%	21.69	43.51	31.39	3.41

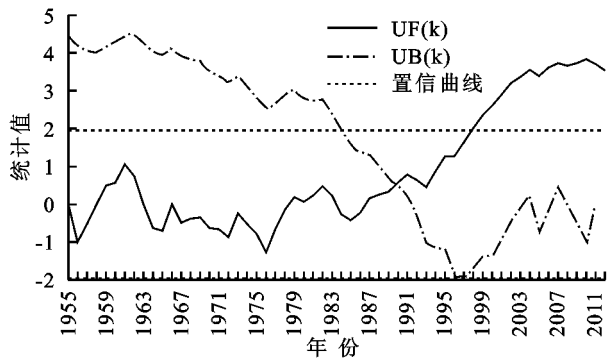
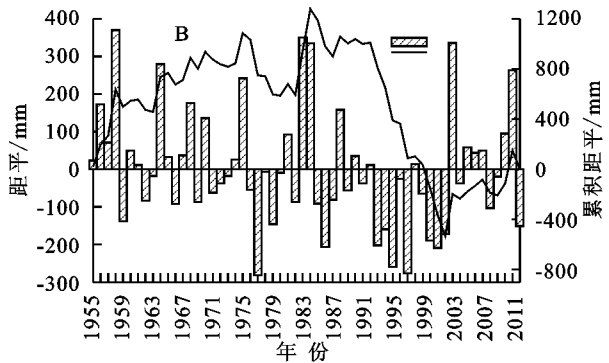


图 3 武功年均气温 Mann-Kendall 检验曲线



2.3 气温与降水量未来发展趋势预测

2.3.1 R/S 分析结果 R/S 分析结果表明,年均气温与降水量的 Hurst 指数均小于 0.5(分别为 0.300, 0.302),表明目前气温升高趋势将不再持续,未来可能开始降低,同理,年降水量微弱减少趋势也将不再持续,未来可能开始增加。

2.3.2 Hurst 指数试验结果 在年均气温与降水量 Hurst 指数试验中,其中包括 20 a 试验和累加试验,从 Hurst 指数序列图可以看出,低谷处基本多与气温、年降水量发生突变或显著性变化的时刻对应。

(1) 年均气温 Hurst 指数试验 1955—2012 年气温整体表现为上升趋势。图 7A 和 7B 分别为气温的 20 a 试验和累加试验的 Hurst 指数试验结果图。由图 7A 可知:20 a 试验中除了 1976—1980 年的 Hurst 指数大于 0.5,其他年份均小于 0.5,表明气温目前的上升趋势将不再持续,未来可能降低;由图 7B 可知:累加试验中气温的 Hurst 指数均小于 0.5,表明气温目前上升趋势未来不再继续,会出现降低趋势。1976 年开始的 20 a 试验中,Hurst 指数开始出现大于 0.5 的值,此后连续 4 个 20 a 试验的 Hurst 指数都大于 0.5,1996 年气温开始升高,气温升高且趋势明显,持续了 3 a;1981 开始的 20 a 试验中,Hurst 指数又开始出现小于 0.5 的值,此后一直小于 0.5。因此武功地区先后出现两个气候突变点:第一个出现在 1976 年开始的 20 a 试验中,将它定义为  $H(1996)$ ,  $H(1996)$  是 Hurst 指数由反持续性转折为持续性的突

变点,气温自1996年起开始转变为升高的趋势;第二个出现在1981年开始的20 a试验中, $H(2001)$ 是

Hurst指数由持续性转折为反持续性的突变点,气温自2001年起开始转变为降低的趋势。

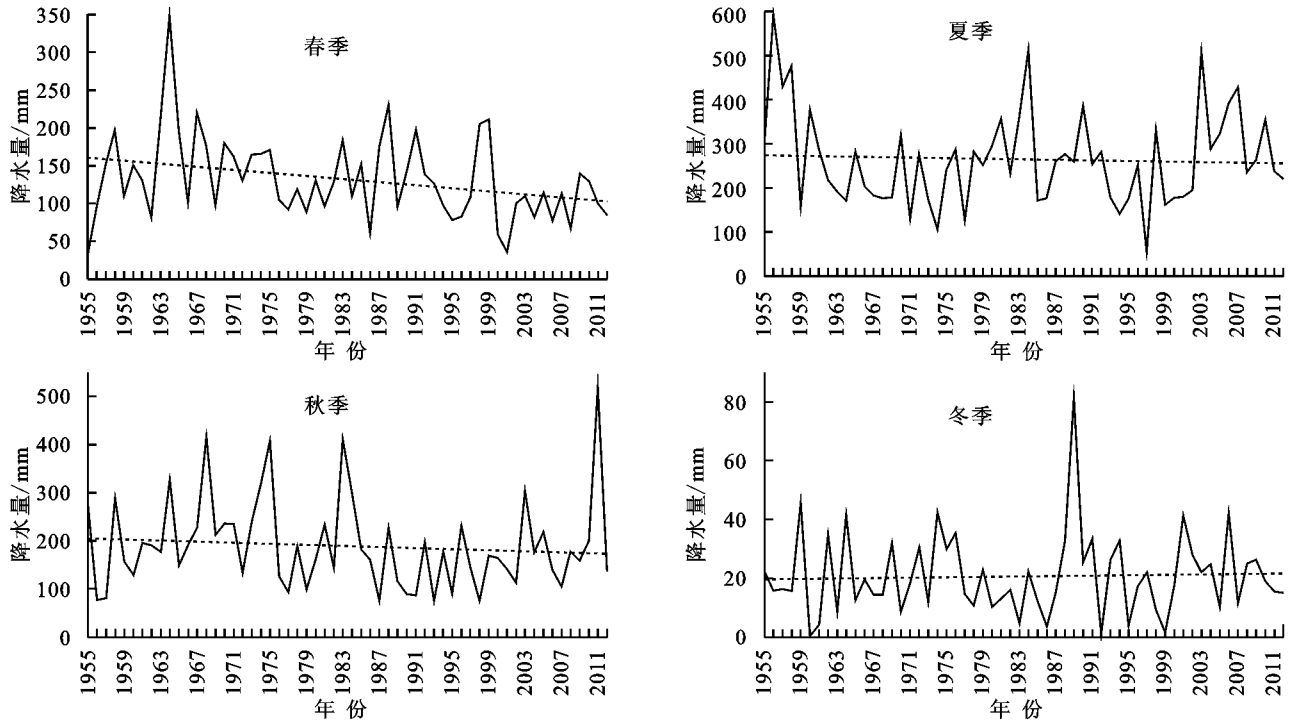


图6 武功地区季节降水量变化趋势

(2) 年均降水量 Hurst 指数试验 1955—2012 年降水量整体表现出减少趋势。图 7C 与 7D 为年降水量的 20 a 试验和累加试验的 Hurst 指数试验结果图。由图 7C 可知:20 a 试验中除了 1968—1971, 1977—1979 年的 20 a 试验 Hurst 指数大于 0.5, 其他年份 Hurst 指数均小于 0.5, 表明目前年降水量的减少趋势将不再持续, 未来可能增多。由图 7D 可知:累加试验中, 年降水量的 Hurst 指数均小于 0.5, 表明年降水量目前减少趋势未来不再继续, 会出现增加趋势。1968 年开始的 20 a 试验中, Hurst 指数开始出现大于 0.5 的值, 此后连续 3 个 20 a 试验的 Hurst 指数都大于 0.5, 1988 年降水量开始减少, 且减少趋势明显; 1972 年开始的 20 a 试验 Hurst 指数又开始出现小于 0.5 的值; 1977 年开始的 20 a 试验 Hurst 指数又开始出现大于 0.5 的值, 此后连续 2 个 20 a 试验的 Hurst 指数都大于 0.5, 1998 年降水量开始减少, 且减少趋势明显; 1980 年开始的 20 a 试验 Hurst 指数又开始出现小于 0.5 的值, 此后一直小于 0.5。因此, 武功地区先后出现四个气候突变点: 第一个出现在 1968 年开始的 20 a 试验中, 定义为  $H(1988)$ , 是 Hurst 指数由反持续性转变为持续性的突变点, 年降水量自 1988 年起由增加开始转变为减少; 第二个出现在 1972 年开始的 20 a 试验中, 定义为  $H(1992)$ , 是 Hurst 指数由持续性转变为反持续

性的突变点, 年降水量自 1992 年起由减少开始转变为增加; 第三个出现在 1977 年开始的 20 a 试验中, 定义为  $H(1997)$ , 是 Hurst 指数由反持续性转变为持续性的突变点, 年降水量自 1997 年起由增加开始转变为减少; 第四个出现在 1980 年开始的 20 a 试验中, 定义为  $H(2000)$ , 是 Hurst 指数由持续性转折为反持续性的突变点, 年降水量自 2000 年起由减少开始转变为增加。

## 2.4 年降水量不均匀性评价

表 2 为武功地区 1955—2012 年年降水量基尼系数和洛伦兹不对称系数趋势检验结果, 图 8 为降水量基尼系数和洛伦兹不对称系数趋势图及年代际间变化特征。

由图 8 可知: 58 a 平均基尼系数为 0.507, 年基尼系数有微弱上升趋势, 年降水量不均匀性增强, 波动趋势越来越强。对于洛伦兹不对称系数, 大于 1 的年份占总年份的 24.1%, 说明在这些年份中, 降水年内分布不均匀性主要由于降水量较多月份引起的。这里以 2011 年为例说明: 年降水量为 871.7 mm, 基尼系数为 0.639, 洛伦兹不对称系数为 1.105, 6—9 月降水量占全年 75% 以上, 表明引起本年降水不均匀是由于 6—9 月降水量过多造成的。由图 8 还可知: 从 20 世纪 50 年代至今, 基尼系数变化浮动不大, 基本在 0.5 左右, 洛伦兹不对称系数变幅也不大, 在

20 世纪 70 年代洛伦兹不对称系数最大,为 0.96 接近于 1,在这 10 a 当中,降水量大的月份所占比例较

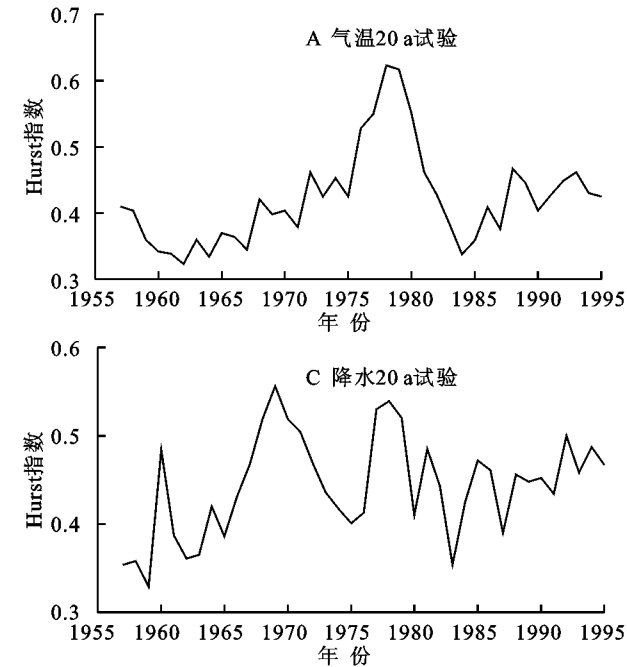


图 7 年均气温与降水量 20 a 及其累加试验的 Hurst 指数

年降水量与基尼系数和洛伦兹不对称系数的相关系数分别为 0.29 和 -0.16,说明年降水量与基尼系数和洛伦兹不对称系数不相关。由表 2 可知:年降水量和洛伦兹不对称系数呈降低趋势,而基尼系数呈上升趋势,其中年降水量趋势明显,通过 90% 的置信水平。这说明武功地区降水量减少,年内降水分布不均匀性增强,且降水量较小的月份所占比例较大。

总之,武功地区年降水量分配的均匀程度越来越低,发生旱涝灾害趋向频繁。雨季月份降雨量基本集

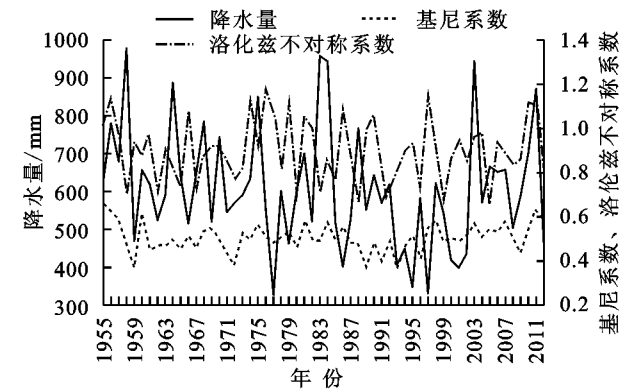
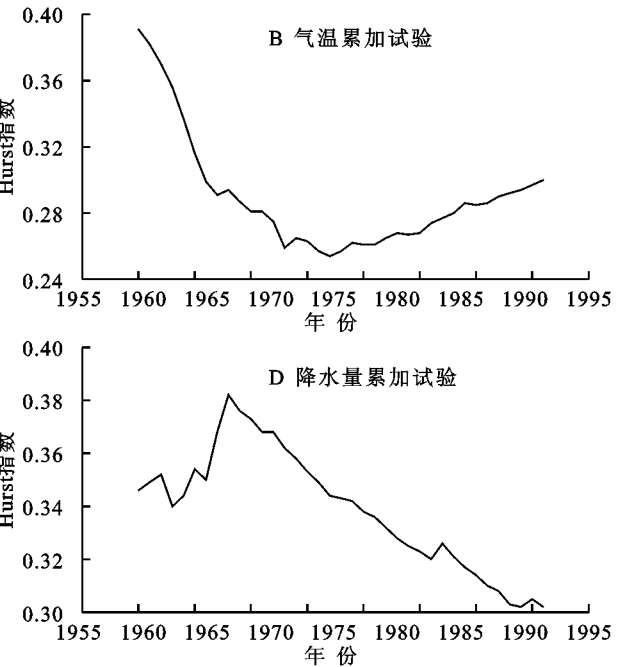


图 8 降水量基尼系数和洛伦兹不对称系数趋势图及年代际间变化特征

3 结论

(1) 武功地区气温总体呈上升趋势,且在 1990 年发生气温上升的突变。年降水量总体呈下降趋势,1955—1984 年为丰水期,1985—2002 年转入枯水期,在 2002 年之后才逐渐变为丰水期,且 1958 年为年降水量降低的突变点。

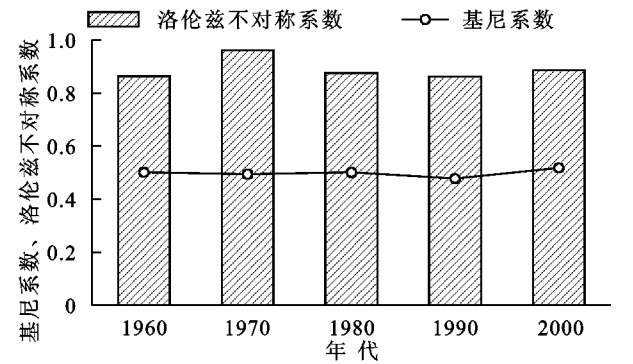
大,大部分集中于 6—9 月份,且 6—9 月份降水量占年内比例高达 50%。



中在 6—9 月,暴雨发生频率增加,造成水土流失以及营养矿物成分流失,洪涝灾害现象频繁发生;非雨季月份降雨量少,占全年比例也少,干旱化趋势增强,不利于作物生长,阻碍农业经济发展。

表 2 年降雨量基尼系数和洛伦兹不对称系数趋势检验结果

项目	$Z_{MK}$	显著性	变化趋势
降雨量	-1.476	显著(90%)	降低
基尼系数	+0.899	不显著	上升
洛伦兹不对称系数	-0.228	不显著	降低



(2) Hurst 指数试验的未来趋势变化的预测与 R/S 分析结果一致:目前气温升高趋势将不再持续,未来可能降低,且年降水量减少趋势也不再持续,未来可能开始增加。由气温 20 a 试验可知,气温出现两个气候突变点,分别为 H(1996)与 H(2001);由年降水量 20 a 试验可知,降水出现四个气候突变点,分别为 H(1988),H(1992),H(1997)与 H(2000)。

(3) 由基尼系数和洛伦兹不对称系数可知:年降水量减少,年内降雨分布不均匀性逐渐增强,且降水量较小的月份所占比例较大;基尼系数与洛伦兹不对称系数的年代际变幅不大,基本趋于不变,在20世纪70年代洛伦兹不对称系数最大,为0.96接近于1。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers[R]. New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptations[R]. New York, USA: Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [3] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature, 2013, 501(7467): 403-407.
- [4] 段安民,肖志祥,吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [5] 张存杰,高学杰,赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 57-164.
- [6] 张可慧. 全球气候变暖对京津冀地区极端天气气候事件的影响及防灾减灾对策[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 122-125.
- [7] 翟盘茂,邹旭凯. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [8] 何艳芬,张晓. 陕西省 1980—2006 年气候变化时空特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 59-63.
- [9] 李平华,胡小晖,程燕. 陕西关中地区水文气候状况对全球变暖的响应问题探讨[J]. 灾害学, 2002, 17(2): 37-41.
- [10] 白爱娟,方建刚. 近 50a 陕西省冬季气候变化特征及其与北半球大气环流的关系[J]. 气象科学, 2003, 23(2): 176-184.
- [11] 王文艳,张丽萍,吴东平,等. 近 19 年干旱半干旱过渡区气温降雨变化特征分析[J]. 环境科学与技术, 2012 (S1): 57-61.
- [12] 李小丽,敖天其,黎小东. 古蔺县近 50 年来降水序列趋势分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 140-144.
- [13] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 175-181.
- [14] 史婉丽,杨勤科,李小芳,等. 基于洛伦兹曲线的陕北黄土高原降雨分布不均匀性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 172-177.
- [15] 徐万玲,朱卫红,张健,等. 基于洛伦兹曲线的图们江干流区间径流分布不均匀性分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 128-132.
- [16] 张晶,封志明,杨艳昭. 洛伦兹曲线及其在中国耕地,粮食,人口时空演变格局研究中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 63-67.
- [17] 边静,何多兴,田永中,等. 基于信息熵与空间洛伦兹曲线的土地利用空间结构分析:以重庆市合川区为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 201-204.
- [18] Marull J, Pino J, Tello E, et al. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region[J]. Land Use Policy, 2010, 27 (2): 497-510.
- [19] Tang J, Wang X. Analysis of the land use structure changes based on Lorenz curves[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 151(1/4): 175-180.
- [20] Xu L, Zhou H, Du L, et al. Precipitation trends and variability from 1950 to 2000 in arid lands of Central Asia[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 514-526.

(上接第 251 页)

- [7] Wu G L, Du G Z, Liu Z H, et al. Effect of fencing and grazing on a Kobresia-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plant and Soil, 2009, 319(1/2): 115-126.
- [8] Middleton N, Thomas D. World Atlas of Desertification [M]. London: Hodder Arnold Publication, 1997.
- [9] Meissner R A, Facelli J M. Effects of sheep exclusion on the soil seed bank and annual vegetation in chenopod shrublands of South Australia[J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42(2): 117-128.
- [10] 李永宏. 内蒙古典型草原地带退化草原的恢复动态[J]. 生物多样性, 1995, 3(3): 125-130.
- [11] 杨晓晖,张克斌,侯瑞萍. 封育措施对半干旱草场植被群落特征及地上生物量的影响[J]. 生态环境, 2005, 14 (5): 730-734.
- [12] 闫玉春,闫瑞瑞,杨桂霞,等. 围封对草地影响研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [13] Fırlınoğlu H K, Seefeldt S S, Sahin B. The effects of long-term grazing exclusions on range plants in the Central Anatolian Region of Turkey[J]. Environmental Management, 2007, 39(3): 326-337.
- [14] 周国英,陈桂琛,徐文华,等. 围栏封育对青海湖地区芨芨草草原生物量的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 33(3): 434-441.
- [15] 朱丽,李广宇,王芳,等. 围栏封育对草地生物多样性的影响[J]. 草业与畜牧, 2012(5): 1-3.