

# 基于分形方法的石羊河流域气候变化研究

别强<sup>1</sup>, 何磊<sup>1</sup>, 赵传燕<sup>2</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学草地农业系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 利用代表祁连山东段石羊河流域山区和平原区的乌鞘岭和武威气象站半个世纪以来(1954-2006)实测气象资料, 应用 Kandel 秩次相关检验法对石羊河流域气候变化趋势进行分析, 采用时间序列分析方法 R/S 对气候变化的持续性进行分析。结果表明: 过去 50 a 石羊河流域温度、水汽压、降水量在 95% 的置信水平下整体呈现显著上升趋势, 尤其是冬季上升趋势最为显著, Kandel 秩次相关检验系数达到 3.0 左右; R/S 分析得出石羊河流域气候变化具有持续性。石羊河流域气候变化的复杂度平原地区大于山区, 在山区气候变化复杂度秋季最大, 在平原区气候变化复杂度冬季最大。

**关键词:** 石羊河流域; 气候变化; 趋势性; R/S 分析; 分形维数

**中图分类号:** P467

**文献标识码:** A

## 引言

石羊河流域位于祁连山东段, 地势西南高东北低, 河流发源于祁连山, 进入河西走廊武威盆地, 汇成石羊大河注入红崖山水库, 再向北流, 消失于民勤湖区。石羊河流域为典型的山地、平原绿洲和荒漠耦合景观。山区和平原区气候和水文条件差异很大。人类活动对流域上游生态涵养区的破坏和对中上游水资源的过度利用以及气候的驱动下, 石羊河流域下游水量逐年减少, 民勤地区面临着地下水位下降、沙漠化加剧的巨大生态危机<sup>[1-4]</sup>。石羊河流域生态环境的恶化与气候变化有密切的关系, 过去对石羊河流域的研究一般集中于沙漠化扩张和人类活动的影响<sup>[5-6]</sup>, 很少涉及气候变化的科学推断以及预测。在研究方法上, 目前尚无用分形理论来研究石羊河流域的气候变化。研究石羊河流域气候变化对石羊河流域生态保护、绿洲生产、生活以及灾害预防有极其重要的作用。

分形理论主要研究和揭示复杂自然现象和过程中所隐藏的“自相似性”, 而在揭示自然界中普遍存在着的“自相似性”时, 分形理论又提供了一种“通过部分认识总体”、“从有限中认识无限”的新工具。分形理论为认识和研究石羊河流域过去气候变化规

律与未来气候变化趋势究竟存在着多大程度的“自相似性”, 以及“自相似性”的科学性、可靠性提供了可能性, 使我们有可能从气候观测台站这个局部来认识石羊河流域的总体气候变化。分形理论和方法最大的应用价值就在于利用连续气候资料对未来气候变化趋势做出科学预测<sup>[8-12]</sup>。

本文用 Kandel 秩次相关法对全年及季节降水量、温度、蒸发量、干旱指数以及径流量等气象水文数据进行变化趋势分析<sup>[12-14]</sup>, 计算各气象水文指标的 Hurst 指数和豪斯道夫(Hausdorff)维数以反映气候水文变化持续性和复杂性。

## 1 基本原理和数据来源

### 1.1 分形理论

分形(Fractal)理论, 由美国科学家 Mandelbrot 于 20 世纪 70 年代中期创立, 是一种横跨自然科学、社会科学和思维科学的新理论。分形是指组成部分以某方式与整体相似的几何形态, 或者是指在很宽的尺度范围内, 无特征尺度却有自相似性和自仿射性的一种现象。无特征尺度是分形的一个突出特点。分形理论是描述具有自相似结构几何形状的工具, 分形特点由分形维数来描述, 分维数是描述自然界

收稿日期: 2012-01-16; 改回日期: 2012-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025015, 30770387) 和环境保护公益性行业科研专项(NEPCP 200809098) 共同资助

作者简介: 别强, 男, 甘肃武威人, 在读硕士, 主要从事自然地理和环境遥感方向研究。E-mail: bieq@qq.com

复杂事物特征的参数。对于分维确定,根据分形的基本概念,如果具有大于  $r$  的特征度的客体数目  $N(r)$  满足关系式:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(r)}{\ln(1/r)} \quad (1)$$

则定义了一个分形集合,式中  $D$  为客体的分维<sup>[7,11]</sup>。

## 1.2 R/S 分析

R/S 分析法,是由 Hurst 在总结尼罗河多年实测水文资料时提出的一种分析方法:变标度极差分析法,后来经 Mandelbrot Wallis 进一步补充和完善将其发展成为研究时间序列分形理论<sup>[7]</sup>。R/S 分析方法的基本原理为:对于时间序列  $\{x(t), t=1, 2, \dots, n\}$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$  定义均值序列:

$$\langle x_\tau \rangle = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{k=1}^{\tau} [x(k) - \langle x_\tau \rangle] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差序列:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau) \quad (4)$$

极准差序列:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - \langle x(\tau) \rangle]^2} \quad (5)$$

比值  $R(\tau)/S(\tau) \equiv R/S$ , 如果存在如下关系:

$$R/S \propto \tau^H \quad (6)$$

则说明时间序列  $\{x(t)\}, t=1, 2, \dots, n$  存在 Hurst 现象,  $H$  称为 Hurst 指数,  $H$  值可根据计算出的  $(\tau, R/S)$  的值在双对数坐标系  $[\ln(\tau), \ln(R/S)]$  中用最小二乘法拟合。

根据  $H$  值的大小,可以判断该时间序列具有随机性或趋势性。趋势性是表现为持续性 (Persist-

ence) 还是反持续性 (Anti persistence)。Hurst 等人曾证明,如果  $\{x(t)\}$  是相互独立、方差有限的随机序列,则有  $H=0.5$ 。对应于不同的 Hurst 指数  $H$  ( $0 < H < 1$ ) 存在以下几种情况: (1)  $H=0.5$  表明时间序列完全独立,相互没有依赖,气候变化是随机的; (2)  $0.5 < H < 1$  表明时间序列具有长期相关的特征 (Long range correlation), 过程具有持续性。反映在气候要素上,则表明未来气候总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; (3)  $0 < H < 0.5$  表明时间序列具有长期相关性。但将来的总体趋势与过去相反,即过去整体增加的趋势预示将来整体减少,这种现象就是反持续性。 $H$  值越接近 0, 反持续性越强。

Hurst 指数能很好地揭示出时间序列中的趋势性成分,并且能由 Hurst 指数值的大小来判断趋势性强度<sup>[15]</sup>,由此总结出了 Hurst 指数的分级表 (表 1)。持续性 (反持续性) 强度由弱到强都分为 5 级,其中持续性强度用 1~5 级表示,反持续性强度则用 -1~-5 级表示。

表 1 Hurst 指数分级表  
Tab. 1 Hurst index classification

等级	Hurst 指数值域	持续性 强度	等级	Hurst 指数值域	持续性 强度
1	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱	-1	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
2	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	-2	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
3	$0.65 < H \leq 0.75$	较强	-3	$0.25 \leq H < 0.35$	较强
4	$0.75 < H \leq 0.80$	强	-4	$0.20 \leq H < 0.25$	强
5	$0.80 < H \leq 1.00$	很强	-5	$0.00 \leq H < 0.20$	很强

## 1.3 R/S 分析的时间序列分维数

根据分形有关概念,对于在不同方向上具有不同标度因子的变换称为仿射变换,经过仿射变换的图形与原图形相似则称之为自仿射分形,即满足:

$$F(br) = b^F F(r) \quad (7)$$

式中  $F$  为标度变换因子,  $F \in (0, 1)$ ;  $b$  为比例因子  $b \in R$ , 且  $b > 0$ ;  $r$  为时间尺度。对于时间序列的  $R/S$  分析结果,令  $X(t) = R/S \sim t^H$ , 用因子  $b$  改变时间尺度则有:

$$X(bt) \sim (bt)^H \sim b^H t^H \sim b^H X(t) \quad (8)$$

由(8)式,参照(7)式可知时间序列  $X(t)$  具有自仿射性,式中  $H$  为 Hurst 指数。经过严格数学推导<sup>[16]</sup>,证明时间序列 Hurst 指数( $H$ )与豪斯道夫(Hausdorff)维数( $D$ )之间存在如下关系:

$$D = 2 - H \quad (9)$$

#### 1.4 水文气象要素变化的趋势性

时间序列中稳定和规则的变动,称之为趋势。对水文气象要素的变化趋势,可以应用坎德尔(Kandel)秩次相关法进行分析。

Kandel 检验即  $\tau$  检验<sup>[17]</sup>,是建立在连续实测值的比例数基础上。对时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,所有对偶值( $x_i, x_j; j > i$ )中的  $x_i < x_j$  出现的次数为  $d_i$ ,则 Kandel 秩次相关系数( $U$ )为:

$$U = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^2} \quad (10)$$

式中,  $\tau = \frac{4\sum d_i}{n(n-1)} - 1$ ,  $Var(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$ ,  $n$  为序列长度。

当  $n$  增加时,  $U$  很快收敛于标准化正态分布,给定显著性水平  $\alpha$ ,在正态分布表中查出临界值  $U_{\alpha/2}$ ,当  $|U| > U_{\alpha/2}$ ,则趋势显著;反之,不显著。如  $U > 0$ ,说明序列存在上升趋势;  $U < 0$ ,为下降趋势,查表得  $U_{0.05/2} = 1.96$ 。

#### 1.5 气象水文资料来源

根据中国气象数据共享网提供的 1961~2006 年气象数据,分别统计整理出代表石羊河流域山区的乌鞘岭站点和代表平原区的武威站点的逐月温度、水汽压、蒸发量、降水量、干旱指数,利用 Kandel 秩次相关检验法和 R/S 分析方法,对石羊河流域山区和平原区的气象变化特征和趋势进行分析。

## 2 计算结果和分析

### 2.1 石羊河流域山区气象要素变化

#### 2.1.1 气象要素的分形特征

各气候要素序列的 Hausdorff 维数( $D$ )见表 2。分形维数的不同,表明气象要素在不同时间尺度上的变化情况不同。对于同一气象要素,不同的分形维数表明在不同时间尺度上要素的分形特征与复杂度,分维数越大,气象要素在该尺度上越复杂。从表 2 可以看出石羊河山区气候要素的分形维数大多介

于 1.1~1.5 之间,从全年来看,秋季各气候要素的变化复杂度最大,其次为冬季>夏季>春季。从各气候要素来看,降雨量变化复杂度最大,其次为水汽压>温度>干旱指数>蒸发量。

#### 2.1.2 气象要素变化的趋势性和持续性

应用坎德尔(Kandel)秩次相关法得到秩次相关系数( $U$ )和利用 R/S 方法得到 Hurst 指数见表 2,表中  $\downarrow$  表示下降,  $\downarrow\downarrow$  表示显著下降,  $\uparrow$  表示上升,  $\uparrow\uparrow$  表示显著上升。

##### (1) 温度变化

石羊河流域山区的夏季、秋季、冬季以及全年的温度变化都呈增长趋势,其中秋季、冬季以及全年为显著增长,温度变化的持续性都大于 4 级,表现出该地区全年气温尤其是秋季和冬季将持续的增长,这和全球变暖在西部地区主要表现在冬季的变化是一致的<sup>[18-19]</sup>。与此同时春季温度几乎维持不变,其持续性也十分强烈。

##### (2) 水汽压变化

水汽压在石羊河流域山区变化整体呈现为上升趋势,夏季、冬季以及全年 Kandel 秩次相关系数都  $> 2.8$ ,呈现该区域在夏季、冬季及全年空气水分显著的增加,同时 R/S 分析结果表明这 3 个季节的水汽压增加的趋势持续性都达到 4 级,即未来变化与过去变化趋势一致,过去水汽压总体增加趋势预示未来水汽压总体趋势仍将上升。春季水汽压的变化趋势和温度变化趋势一致,都表现为较强持续性的不变。

##### (3) 蒸发量变化

蒸发量序列相关特性表现为强持续性,即未来变化与过去变化趋势一致。蒸发量在石羊河流域山区春季、夏季及全年呈显著下降趋势, Hurst 指数为 0.92,表明这种趋势具有很强的持续性,这一趋势与当地的下垫面、大气环流有密切的关系<sup>[20-21]</sup>。蒸发量在秋季和冬季变化不显著,表现为未来秋季和冬季变化不大,而且其持续性较弱。

##### (4) 降水量变化

降水量在全年各个季节都表现为上升趋势,最为显著的为冬季, Kandel 秩次相关系数( $U$ )达到了 3.9,降雨量长期相关性特征表现为持续性,即未来变化与过去变化趋势一致,过去降雨量增加的趋势预示着未来降水量持续增加<sup>[22-23]</sup>。季节降水量持续性冬季最为强烈,其次为夏季>全年>春季>秋季。

##### (5) 干旱指数变化

Kandel 秩次相关法分析得出全年各个季节干旱指数都呈下降趋势,尤其冬季 Kandel 秩次相关系数( $D$ )绝对值达到 3.9,表现为显著的下降趋势。R/S 分析表明除秋季以外干旱指数序列长期相关特征表现为持续性,未来变化与过去变化一致,未来干旱指数仍延续过去下降趋势<sup>[24]</sup>。

总之,由 R/S 分析可以得出石羊河流域上游温度、水汽压、蒸发量、降水量、干旱指数序列在春季、夏季、冬季及全年都表现为持续性,持续性强度一般都大于 3 级,而各气候要素秋季变化都比较随机。通过 Kandel 分析得出石羊河流域山区气候变化最显著的季节为冬季。

表 2 乌鞘岭站 Hausdorff 维数( $D$ )、Kandel 秩次相关系数( $U$ )和 Hurst 指数

Tab. 2 Hausdorff Dimension, Kandel Rank correlation coefficient and Hurst Index of Wushaoling weather station

气象要素	指标	春	夏	秋	冬	全年
温度	$D$	1.177	1.325	1.314	1.239	1.173
	$U$	-0.0674 ↓	1.7522 ↑	2.8754 ↑ ↑	2.8304 ↑ ↑	2.8754 ↑ ↑
	Hurst	0.823	0.675	0.686	0.761	0.827
	$R^2$	0.971	0.839	0.926	0.908	0.929
水汽压	$D$	1.349	1.211	1.504	1.249	1.233
	$U$	0.9659 ↑	2.5384 ↑ ↑	-0.0449 ↓	2.6507 ↑ ↑	2.0215 ↑ ↑
	Hurst	0.651	0.789	0.496	0.751	0.767
	$R^2$	0.916	0.921	0.848	0.903	0.761
蒸发量	$D$	1.075	1.17	1.283	1.366	1.008
	$U$	-1.8645 ↓ ↓	-2.0442 ↓ ↓	0.3370 ↑	-0.292 ↓	-1.9544 ↓ ↓
	Hurst	0.925	0.83	0.717	0.634	0.992
	$R^2$	0.795	0.948	0.726	0.930	0.936
降水量	$D$	1.311	1.182	1.542	1.081	1.238
	$U$	1.1007 ↑	0.9435 ↑	0.5167 ↑	3.9087 ↑	1.0783 ↑
	Hurst	0.689	0.818	0.458	0.919	0.762
	$R^2$	0.964	0.974	0.910	0.965	0.978
干旱指数	$D$	1.145	1.109	1.531	1.124	1.15
	$U$	-1.8645 ↓	-1.2130 ↓	-0.382 ↓	-3.9312 ↓ ↓	-1.2804 ↓
	Hurst	0.855	0.891	0.469	0.876	0.850
	$R^2$	0.918	0.979	0.947	0.899	0.978

注: ↓ 下降, ↓ ↓ 显著下降; ↑ 上升, ↑ ↑ 显著上升

## 2.2 石羊河流域平原区气象要素变化分析

### 2.2.1 气象要素分形特征

石羊河流域平原区有位于流域中央的武威站和位于流域边缘的民勤站及永昌站,丁玉贞等研究表明武威站与民勤和永昌站气象要素具有很好的一致性<sup>[25]</sup>。本文用武威站气候变化趋势代表石羊河流域平原区气候变化趋势。石羊河流域平原区气象要素序列的分形维数见表 3,可以看出石羊河平原区气候要素的分形维数介于 1.1~1.4 之间,从全年来看,秋季各气候要素的变化复杂度最大,其次为冬季>夏季

>春季。从各气候要素来看干旱指数变化复杂度最大,温度变化复杂度最小,依次为干旱指数>降雨量>水汽压>蒸发量>温度。

### 2.2.2 气象要素变化的趋势性和持续性

#### (1) 温度变化

石羊河流域平原区温度变化和山区变化基本一致,全年大体上呈现升温趋势,而且最为突出的是冬季和全年升温十分显著,Kandel 秩次相关系数达到 3.57,全年温度 Kandel 秩次相关系数也达到 1.9544,这从整体上反映了近半个世纪以来的升温

趋势,而且冬季升温最为显著。石羊河流域平原区温度序列的 Hurst 指数高,显示这种变化趋势的持续性强烈。

### (2) 水汽压变化

石羊河流域平原区水汽压在夏季显著上升,其 Kandel 秩次相关系数达到 3.59,冬季和全年平均都有上升趋势,春季和秋季基本保持不变,R/S 分析表明:水汽压序列长期相关特性表现为持续性,未来变化与过去变化趋势一致,其持续性强度依次为:夏季 > 全年 > 冬季。

### (3) 蒸发量变化

Kandel 秩次相关分析显示,蒸发量在全年的变化趋势都表现为一致的下降趋势,但各个季节的下降显著度不同,夏季和春季下降趋势显著,全年平均次之,秋冬 2 季变化显著度较差,R/S 分析得出夏季和全年平均蒸发量持续性都达到 5 级,说明在未来蒸发量将持续的下降。

### (4) 降水量变化

石羊河流域平原区降水量在春季、夏季及全年呈现增多趋势,但其持续性都较弱,说明未来降水量在春季、夏季及全年变化比较复杂,对过去变化的持续性差。相反平原区降水量在秋季和冬季呈下降趋势,而且这种下降趋势的持续性很强,即未来秋冬季降水量将延续过去变化趋势继续减少。

### (5) 干旱指数变化

干旱指数是反映区域干旱程度的重要指标,Kandel 秩次相关分析得出,在过去 50 a 石羊河流域平原区春季、夏季及全年干旱指数呈下降趋势,但是秋冬季节干旱程度一直在加剧,秋冬季节干旱的加剧对当地农业生产和生态带来较大压力。R/S 分析结果表明干旱指数持续性较弱,即干旱指数变化比较复杂,尤其是春季、夏季、冬季及全年平均干旱指数呈现随机变化。

表 3 武威站 Hausdorff 维数( $D$ )、Kandel 秩次相关系数( $U$ )和 Hurst 指数

Tab. 3 Hausdorff Dimension, Kandel Rank correlation coefficients and Hurst Index of Wuwei weather station

气象要素	指标	春	夏	秋	冬	全年
温度	$D$	1.198	1.186	1.288	1.22	1.141
	$U$	0.743 ↑	-0.2022 ↓	1.6399 ↑	3.5718 ↑ ↑	1.9544 ↑ ↑
	Hurst	0.802	0.814	0.712	0.78	0.859
	$R^2$	0.951	0.969	0.923	0.933	0.964
水汽压	$D$	1.194	1.238	1.337	1.348	1.234
	$U$	-0.2022 ↓	3.5942 ↑ ↑	-0.2246 ↓	0.6065 ↑	1.1007 ↑
	Hurst	0.806	0.762	0.663	0.652	0.766
	$R^2$	0.944	0.993	0.932	0.944	0.891
蒸发量	$D$	1.367	1.144	1.383	1.424	1.185
	$U$	-1.3703 ↓	-1.4826 ↓	-0.3594 ↓	-0.3594 ↓	-0.6964 ↓
	Hurst	0.633	0.856	0.617	0.576	0.815
	$R^2$	0.925	0.987	0.873	0.959	0.963
降水量	$D$	1.398	1.4	1.084	1.301	1.366
	$U$	0.8312 ↑	0.9435 ↑	-0.6964 ↓	-0.8087 ↓	0.6515 ↑
	Hurst	0.602	0.600	0.916	0.699	0.634
	$R^2$	0.952	0.915	0.955	0.928	0.918
干旱指数	$D$	1.464	1.393	1.289	1.498	1.485
	$U$	-0.9659 ↓	-1.1457 ↓	0.4493 ↑	0.6290 ↑	-0.9210 ↓
	Hurst	0.536	0.607	0.711	0.502	0.515
	$R^2$	0.912	0.985	0.932	0.857	0.846

注: ↑ 上升, ↑ ↑ 显著上升; ↓ 下降, ↓ ↓ 显著下降

### 3 结果与讨论

(1) Kandel 检验表明,石羊河流域山区温度、水汽压、降水量呈显著上升趋势,尤其冬季上升趋势更为显著,山区蒸发量、干旱指数整体呈显著下降趋势,其中蒸发量春夏季节下降显著,干旱指数春夏季节下降趋势显著。石羊河流域平原区相对山区变化较为复杂,温度、水汽压、降水量整体呈上升趋势,但个别季节呈不显著下降,温度在冬季上升最为显著,水汽压在夏季上升最为显著。

(2) R/S 分析结果表明,石羊河流域山区各气象要素在各个季节及年平均均  $>0.5$ ,说明它们存在明显的 Hurst 现象,即石羊河流域山区未来气候变化趋势与过去 50 a 变化有很好的相似性。从季际来看,其持续性依次为冬季  $>$  春季  $>$  夏季  $>$  秋季。石羊河流域平原区,春、夏、冬季及全年平均 Hurst 指数均  $>0.5$ ,说明它们存在 Hurst 现象,未来气候变化和过去气候具有自相似性。从各个气候要素来看依次为温度  $>$  降水量  $>$  蒸发量  $>$  干旱指数。

(3) R/S 分析结果显示,石羊河流域各个气象要素在不同地貌单元、不同季节和年序列的分形维数不同,说明气候要素在时间尺度上的趋势性和复杂程度不同,总体上讲平原区的复杂度大于山区的复杂度,在山区气候复杂度大小为:秋季  $>$  春季  $>$  夏季  $>$  冬季,在平原区复杂度大小依次为:冬季  $>$  春季  $>$  秋季  $>$  夏季。

#### 参考文献:

- [1] 刘虎俊,王继和,常兆丰.石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征[J].生态学杂志,2006,25:113-118.
- [2] 胡影,胥宝一,李亚.石羊河下游物候季节的水热分配及变化特征[J].干旱区资源与环境,2006,11,vol19,no6:48-52.
- [3] 张奎俊.石羊河流域下游民勤绿洲生态需水与措施研究[D].兰州理工大学,2008.
- [4] 王启武,尹桂荣.民勤县生态危机分析及其对策[J].甘肃教育学院学报(社会科学版),2002(4):1-5.
- [5] 张同泽,刘翰朝.石羊河流域武威区域水资源供需平衡分析[J].干旱地区农业研究,2004(3):139-143.
- [6] 纪永福,贺访印,李亚.民勤绿洲水资源状况与生态建设研究[J].干旱区研究,2005(3):361-366.
- [7] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].合肥:中国科学技术出版社,1995.93-99.
- [8] 黄登仕,李后强.R/S 分析与分布式布朗运动[J].自然杂志,1992,13(8):477-483.
- [9] MANDELBROT B B. How long is the coast of Britain Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 150 (3775): 636-638.
- [10] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: Freeman, 1982. 1-376.
- [11] 秦耀辰,刘凯.分形理论在地理学中的应用研究进展[J].地理科学进展,2003,22(4):426-436.
- [12] 张晓伟,沈冰,孟彩侠.和田绿洲水文气象要素分形特征与 R/S 分析[J].中国农业气象,2008,29(1):12-15.
- [13] 李海毅,汤洁,斯蔼.分形理论在吉林西部干旱指数预测中的应用[J].东北大学学报,2007,39(1):126-130.
- [14] 王乃昂,赵晶,高顺尉.东亚季风边缘区气候代用指标的分形比较及其意义[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(4):59-65.
- [15] 丑纪范.大气科学中的非线性与复杂性[M].北京:气象出版社,2002.
- [16] 屈世显,张建华.复杂系统的分形理论与应用[M].西安:陕西人民出版社,1995.
- [17] Goel NK. 随机水文学[M].王志毅,周刚炎,译.郑州:黄河水利出版社,2001.
- [18] 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.
- [19] 魏锋,王劲松,李宝梓,等.祁连山近 45a 5~9 月降水气候特征[J].干旱气象,2010,28(3):285-290.
- [20] 董安祥,白虎志,雷小斌.中国西北地区干旱气候学的新进展及其主要科学问题[J].干旱气象,2006,24(4):57-62.
- [21] 罗哲贤.西北干旱研究的若干问题[J].干旱气象,2003,21(4):55-58.
- [22] 杨绚,李栋梁.中国干旱气候分区及其降水量变化特征[J].干旱气象,2008,26(2):17-24.
- [23] 陈乾,陈添宇,肖宏斌.祁连山区夏季各类降水过程的典型个例分析[J].干旱气象,2008,26(3):1-7.
- [24] 张强,张存杰,白虎志,等.西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响—总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J].干旱气象,2010,28(1):1-7.
- [25] 丁贞玉,马金珠,张宝军,等.近 50 年来石羊河流域气候变化趋势分析[J].干旱区研究,2007,24(6):779-783.

(下转第 38 页)

- [15] 孙永亮, 李小雁, 许何也. 近 40a 青海湖流域逐日降水和气温变化特征[J]. 干旱气象, 2007, 25(1): 7-13.
- [16] 韩晖, 孟丽霞. 甘肃省近 46a 年降水结构空间变化分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 30-34.
- [17] 巴金, 王秀琴. 敦煌近 56a 气候特征分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(3): 304-308.
- [18] 魏锋, 王劲松, 李宝梓, 等. 祁连山近 45a 5~9 月日降水气候特征[J]. 干旱气象, 2010, 28(3): 285-290.
- [19] 陈海波, 严华生, 陈文, 等. 宁夏六盘山区多年降水的时空变化分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 103-110.
- [20] 曹玲, 龚永祥. 黑河流域降水的时空特征及预报方法[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 35-38, 59.
- [21] 杨美敏, 潘娅英. 丽水市 40 年洪涝的气候特征及演变趋势预测[J]. 浙江气象, 2003, 25(3): 5-8.
- [22] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [23] 江志红, 屠其璞, 施能. 多窗谱分析方法及其在全球变暖研究中的应用[J]. 气象学报, 2001, 59(4): 480-490.
- [24] 中国气象局政策法规司编. 气象标准汇编 2005-2006[M]. 北京: 气象出版社, 2008. 33-52.
- [25] 周国华, 孙莉莉, 胡淳焱, 等. 影响丽水的热带气旋降水气候特征[J]. 广东气象, 2008, 30(4): 27-29.

## Multi-time-scale Characteristic of Precipitation Cycle Evolution in the Past 58 Years in Lishui of Zhejiang Province

WU Haomin<sup>1,2</sup>, JIANG Yanmin<sup>2</sup>, QIANG Yuhua<sup>2</sup>

(1. College of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;  
2. Lishui Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Based on the monthly precipitation data from 1953 to 2010 in Lishui of Zhejiang Province, the change tendency method was used to analyze monthly, seasonal, annual and decadal variation characteristics of precipitation in Lishui, then the precipitation cycle characteristic was analyzed by multi-taper method in order to investigate the cycle evolution of precipitation. The results showed that the precipitation in Lishui presented a decreasing trend with the rate of 10.19 mm/10 a in the past 58 years, in May and September precipitation reduced obviously, but increased in August. It was found that the precipitation was characterized by obvious cycle change with 12 years on decadal scale, and 2-4 years cycle was also obvious with slowly varying envelope characteristics.

**Key words:** precipitation; change tendency; multi-taper method; Lishui

=====

(上接第 26 页)

## Application of Fractal Theory in Climate Change in Shiyanghe Watershed

BIE Qiang<sup>1</sup>, HE Lei<sup>1</sup>, ZHAO Chuanyan<sup>2</sup>

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Pastoral Agricultural Ecosystem, Institute of Arid Agroecology, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The climate change trend in past 50 years of Shiyanghe watershed was analyzed by using Kandel Rank test and R/S time series analysis method based on the climate records from Wushaoling and Wuwei weather station which stands for climate of the mountains and the plain of Shiyanghe watershed in the east of Qilian mountain respectively. The results indicated that the temperature, vapor pressure and precipitation of Shiyanghe watershed presented significantly increasing trend at 95% confidence level in the past 50 years, especially in winter, the Kandel Rank correlation coefficient reached about 3.0, and the climate change in Shiyanghe area had an obvious continued phenomenon through the R/S analysis.

**Key words:** Shiyanghe watershed; climate change; trend; R/S analysis; fractal theory