

青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究

冯新灵^{1,2,4}, 罗隆诚^{2,4,5}, 邱丽丽^{1,2,4}, 冯自立^{3,2}

(1 绵阳师范学院资源环境科学系, 四川 绵阳 621000; 2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;
3 中国民航飞行学院, 四川 广汉 618307; 4 绵阳师范学院气候·环境变化与数字模拟研究所, 四川 绵阳 621000;
5 国家城市污水处理及资源化工程技术研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据 1951~2002 年中国 194 台站的雨日资料, 运用分形理论中 R/S 分析法的基本原理, 设计了两项 Hurst 指数试验。研究并预测了中国 5 大区域年雨日的气候变化趋势。研究表明: 中国 5 大区域未来年雨日变化趋势与过去 50 年来的变化有着很好的自相似性。两项 Hurst 指数试验结果表明中国今后年雨日将继续减少。依照 5 大区域的气候倾向率, 未来 10 年青藏高原和川西高原平均每十年减少雨日 3.7~3.8 天; 中国东部南方区和中国东部北方区平均每十年减少 5.9~6.8 天; 四川盆地年雨日减少最多, 平均每十年减少雨日 12.3 天。且期间雨日没有突变。

关键词: 雨日; 气候变化; 分形; R/S 分析; Hurst 指数试验

文章编号: 1000-0585(2007)04-0835-09

1 引言

全球性的气温升高和气候变暖引起当今世界各国的共同关注和高度重视^[1]。在此背景下, 降水的变化规律和地域特点就强烈吸引着气候学家进行研究和探索。近年来, 我国学者在降水气候变化的研究中取得了一系列的研究成果^[2~15]。由于受诸多因子的影响, 降水在时间和空间地域上有很大的变异, 其气候变化也就更为复杂, 故而在研究中出现了不同时段、不同区域的降水会有着各自不同的特点和规律, 以及程度不同的正负趋势变化^[12, 13], 降水在我国表现出了多样化和不确定性的变化趋势^[14, 15]。

降水气候变化主要包括降水量和雨日两个要素的变化, 以往的研究大多集中于降水量的变化, 而极少涉及雨日的气候变化。降水量和雨日是两个既有联系又有区别的气候要素, 雨日是指对日降水量经过界定后的降水日数, 它是降水气候变化的重要组成部分。气温升高, 气候变暖将会给雨日带来什么样的变化? 由此, 本项研究对雨日的地域变化、趋势变化、以及未来变化进行了探索性研究。为了对雨日未来变化趋势作出科学的推断和预测, 采用了“分形理论”的原理和方法。

分形理论 (Fractal Theory) 是 20 世纪 70 年代中期以来发展起来的一种横跨自然科学、社会科学和思维科学的新理论, 主要研究和揭示复杂的自然现象及社会现象中所隐藏的规律性、层次性和标度不变性, 为人们通过局部认识总体、从有限中认识无限提供了一种新的工具。分形理论是在“分形”概念的基础上升华和发展起来的, 它是一种全新的思

收稿日期: 2006-10-25; 修订日期: 2007-03-26

基金项目: 中国气象局气候研究开放实验室开放课题 (LCS-2006-06) 和绵阳师范学院重点科研基金项目联合资助项目

作者简介: 冯新灵 (1944-), 男, 教授。主要从事气候变化、气候与环境的研究。E-mail: growupxl@163.com

维方式。在复杂多变的气候变化研究中,分形理论和方法最大的价值就在于利用连续的气候资料对未来气候变化趋势作出科学预测^[16, 17],这就是新近发展起来的研究时间序列的分形理论——R/S 分析法 (Rescaled Range Analysis)^[17~ 21]。R/S 分析法能对未来气候变化的总体趋势作出预测和推断。这种未来总体变化趋势一般表现为两种形态:一是长期相关性特征表现为持续性,即未来变化与过去相似,是正趋势;二是长期相关性特征表现为反持续性,即未来变化与过去变化相反,是反趋势。但对未来的气候变化不但要预测推断其变化趋势,以及趋势中的每一种状态所持续的时间,还要找出有无气候变化的转折点,并进一步判断这种转折是否就是气候突变。所有这些 R/S 分析法是无法解决和完成的,为了突破 R/S 分析法的这种局限,能对雨日未来变化趋势作出更进一步的推断和预测,我们设计了两项 Hurst 指数试验,通过试验和试验结果来探讨雨日的未来气候变化。

关于青藏高原是我国气候变化启动区的认识,随着研究的不断深入已被不断证实^[22~ 24]。由此,本研究选择了以青藏高原为首的包括川西高原、四川盆地、我国东部的南方区及北方区共 5 大区域。对 5 大区域的年雨日都进行两项 Hurst 指数试验,由试验结果推断并预测中国 5 大区年雨日的未来气候变化趋势。

2 资料和方法

2.1 气候资料

根据国家气象信息中心气象资料室(中国气象科学数据共享服务网, <http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的 194 个台站的降水资料,分别整理出青藏高原、川西高原、四川盆地和我国东部的南方区及北方区 5 大区域的平均年雨日。其中东部的南方区包括华南区、江南区、长江中下游区及淮河区 4 个小区域;北方区包括华北区、内蒙古区、松辽平原区及兴安岭区 4 个小区域^[11](图 1)。雨日定义为日降水量大于等于 0.0mm(包括有雨无量)

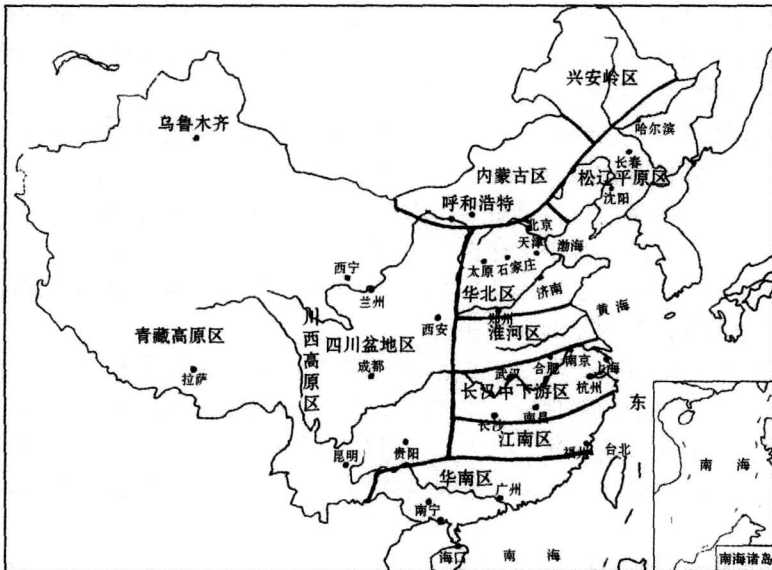


图 1 中国 5 大降水区示意图

Fig 1 Rainy days in 5 regions of China

的日数。先由逐日降水量资料统计整理出月雨日数，再由月雨日数累加而成年雨日数。

2.2 分析方法

R/S 分析法最早由英国科学家赫斯特 (H. E. Hurst) 提出，后来经 Mandelbrot 和 Wallis 在理论上补充完善，发展成为研究时间序列的分形理论^[18, 19]。

R/S 分析法的主要原理为：考虑一个时间序列 $\{\xi(t)\}$ ， $t=1, 2, \dots$ ，对于任意正整数 $\tau \geq 1$ ，定义均值系列 $\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t)$ ， $\tau=1, 2, \dots$ (1)；累积离差为： $X(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)$ ， $1 \leq t \leq \tau$ (2)；极差为： $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$ ， $\tau=1, 2, \dots$ (3)；标准差为： $S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2}$ ， $\tau=1, 2, \dots$ (4)；现考虑比值 $R(\tau)/S(\tau) \triangleq R/S$ ，若存在如下关系 $R/S \propto \tau^H$ (5)，则说明所分析的时间序列存在 Hurst 现象。 H 称为 Hurst 指数， H 值可根据计算出的 τ 值和 R/S 值，在双对数坐标系 ($\ln \tau$, $\ln(R/S)$) 中用最小二乘法拟合式(5)得到。根据 H 值的大小，可以判断该时间序列是完全随机的抑或是存在趋势性成分。趋势性成分是表现为持续性 (Persistence)，还是反持续性 (Antipersistence)^[20, 21]。

Hurst 等人曾证明，如果 $\{\xi(\tau)\}$ 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) $H = 0.5$ ，如上所述，即各项气候要素完全独立，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，过程具有持续性。反映在气候要素上，则表明未来的气候总体变化将与过去的变化趋势一致。如过去整体增加的趋势预示将来的整体趋势还是增加，反之则减少。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的整体上减少，反之亦然，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成分的持续性或者反持续性强的程度，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 The classification of Hurst Index | | | | | |
|---|----------------------|-------|----|----------------------|--------|
| 等级 | Hurst 指数值域 | 持续性强度 | 等级 | Hurst 指数值域 | 反持续性强度 |
| 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 | $0.80 < H < 1.00$ | 很强 | -5 | $0.00 < H < 0.20$ | 很强 |

表 2 中国 5 大区域年雨日的 Hurst 指数

| Tab 2 Hurst Index of annual rainy days in 5 regions of China | | | | |
|--|-----------|---------|----|--|
| 区域 | 计算年限 | Hurst 值 | 等级 | |
| 青藏高原区 | 1953~2002 | 0.6998 | 3 | |
| 川西高原区 | 1951~2002 | 0.7420 | 3 | |
| 四川盆地 | 1951~2002 | 0.9988 | 5 | |
| 东部南方区 | 1951~2002 | 0.8350 | 5 | |
| 东部北方区 | 1951~2002 | 0.9242 | 5 | |

按照上述计算方法，利用 DPS 数据处理系统^[25]对青藏高原等 5 大区域的年雨日选取各自不同的 τ 值进行 R/S 分析。由 5 大区域年雨日的 R/S 分析结果图 (图略) 及所得

的 Hurst 指数可知 5 大区域的年雨日存在着明显的 Hurst 现象 (表 2)。绘制 5 大区域雨日年际变化曲线图,同时做直线拟合^[26]分析变化趋势 (图 2)。由图中可以看出,5 大区域的年雨日有着完全一致的减少趋势。根据线性倾向估计方法^[26]计算出我国青藏高原、川西高原、四川盆地、东部南方区、东部北方区年雨日的区域平均气候倾向率依次分别是 $-3.7\text{d}/10\text{a}$ 、 $-3.8\text{d}/10\text{a}$ 、 $-12.3\text{d}/10\text{a}$ 、 $-5.9\text{d}/10\text{a}$ 、 $-6.8\text{d}/10\text{a}$ 。青藏高原区线性估计的相关系数 0.33 通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验。其余各区线性估计的相关系数不断增大,其中东部北方区和四川盆地地区已达 0.90 和 0.95,且均通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。

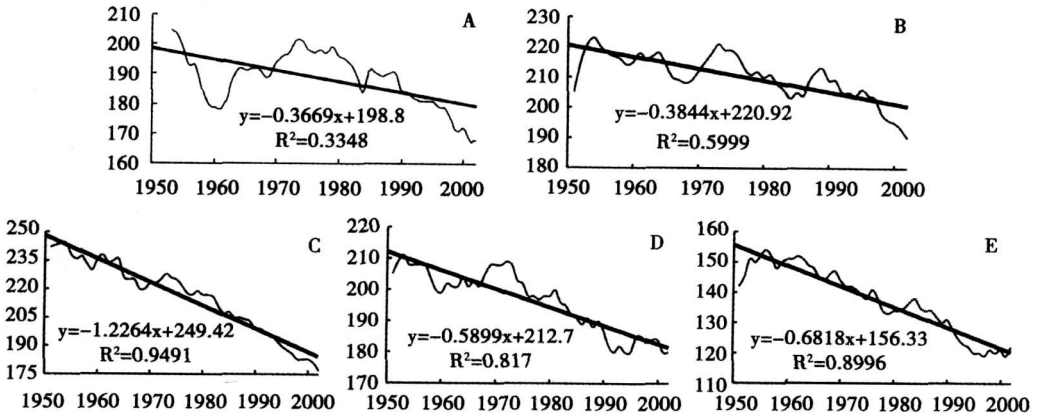


图 2 中国 5 大区域年雨日年际变化曲线图

Fig. 2 Interannual variation curves of annual rainy days in five regions of China

中国 5 大区域年雨日有着一致的减少趋势,这一结论与最新的相关研究结果十分一致。王大钧等^[6]与王颖等^[7]的研究都得出了这样的结论:中国年雨日已经明显减少,年雨日呈负趋势,其负趋势变化不但范围广,而且强度大,中国没有一个季节、一个区域的年雨日有明显正趋势变化。他们研究所得出的“雨日减少最多的地区是东北、华北和西南,这些地区的雨日平均每 10 年减少 7~10 天”的结论^[6,7]也与本项研究的结论基本一致。

3 Hurst 指数试验设计与结果分析

3.1 Hurst 指数试验设计

3.1.1 Hurst 指数试验设计概述 青藏高原、川西高原、四川盆地、我国东部的南方区及北方区 5 大区域的年雨日有着完全一致的减少趋势,并且这种减少趋势的持续性强度在 3~5 级范围 (表 2),表现出十分强劲的势头。这就是说,按照长期相关性特征表现为持续性,表明 5 大区域年雨日减少的趋势未来仍将继续。那么,年雨日继续减少的长期相关性特征从时间上能维持多久? 10 年、20 年还是更长? R/S 分析法没有直接明确给出。《分形原理及其应用》^[21]却提到了“当 Hurst 指数处于 0.65~0.80 之间具有正效应,即干旱愈久就可能出现持续的干旱。而在大水年份后,还会有大水年……”。我们认为,这样的推断显然绝对化了,因为一个 Hurst 指数所包含的信息量毕竟是十分有限的,用一个 Hurst 指数对一个时间序列的未来趋势作出长期推断和预测则显得不太充分。更何况气候

变化的复杂性往往需要找出未来变化的转折和突变点。所有这些, R/S 分析法是不能解决的。那么, 我国 5 大区域年雨日减少的趋势到底能持续多久, 年雨日减少趋势的持续性强度会怎样变化, 是增强还是减弱。如果由增强变为减弱, 这种转折是不是雨日气候变化的突变点? 为了解决这些问题, 我们利用 5 大区域各自的平均年雨日设计了两项 Hurst 指数试验, 用两个序列 Hurst 指数的变化综合对比来看 5 大区域年雨日未来的变化趋势。

3.1.2 Hurst 指数试验设计方案 年雨日 Hurst 指数的试验由两部分构成, 第一部分为中国 5 大区域年雨日年际变化趋势, 用直线拟合分析变化趋势, 通过图 2 展示。第二部分为 Hurst 指数的两个试验。

试验 1 是序列长度为 20 年的 Hurst 指数试验 (以下简称 20 年试验)。其方法是从年雨日资料开始年起, 计算第一个 20 年序列的 Hurst 指数, 第二年计算第二个 Hurst 指数, 以此类推, 连续计算构成一个 Hurst 指数序列。以青藏高原为例, 1953 年开始的第一个 20 年序列的 Hurst 指数值为 0.8346; 1954 年则为第二个, 其值为 0.8195; 直到 1983 年为最后一个序列, 其值为 0.6579。由此绘制年雨日 20 年 Hurst 指数试验图 (图 3)。试验 1 是以 20 年为序列长度, 资料年代为序, 依次计算所形成的一个大样本 ($n > 30$) 的 Hurst 指数序列。

试验 2 是时间依序、逐年累加的 Hurst 指数试验 (以下简称累加试验)。方法是年雨日资料起始年为 20 年, 计算第一个 Hurst 指数; 然后增加一年, 即 21 年计算第二个 Hurst 指数; 以此类推, 连续计算一个 Hurst 指数序列。仍以青藏高原为例, 1953 年起始的第一个序列为 20 年, Hurst 指数值为 0.8436; 第二个序列为 21 年, Hurst 指数值为 0.8357;直到最后一个序列长度为 50 年, Hurst 指数值为 0.6998。由此绘制年雨日累加试验结果图 (图 4)。试验 2 是 20 年开始, 按资料年代为序、依次累加一年所形成的一个大样本 ($n > 30$) 的 Hurst 指数序列。

使用试验方案进行结果分析时, 由两个试验的结果图与其年雨日年际变化趋势的对应关系, 来推断未来变化趋势及其转折和突变。

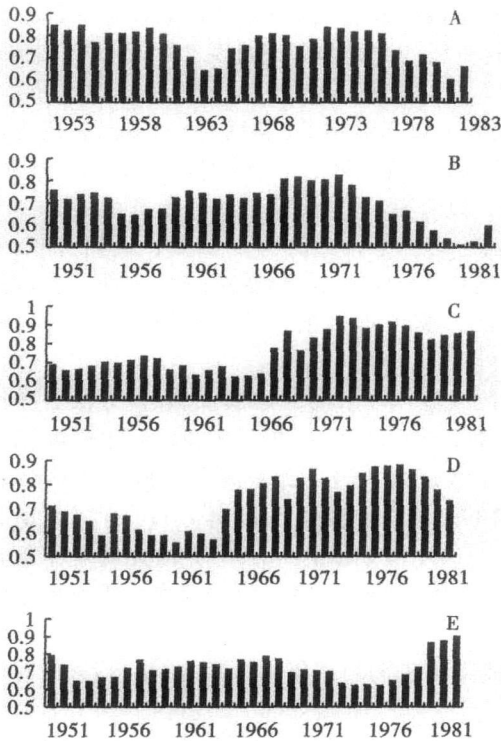
3.2 结果分析

中国 5 大区年雨日的变化趋势虽有各自不同的气候倾向率, 但却都有着完全一致的减少趋势。通过年雨日 20 年试验、累加试验与之对应, 可看出以下特点:

(1) 在 20 年 Hurst 指数试验中 (图 3): ① 5 大区域年雨日 Hurst 指数的持续性强度虽有高低起伏变化, 但是 Hurst 指数始终大于 0.5, 这一方面表示年雨日减少趋势的趋势性始终保持着长期相关性特征, 另一方面则表示 20 年 Hurst 指数试验的大样本序列中没有出现 Hurst 指数小于等于 0.5 的变化转折点。② 5 大区域中 Hurst 指数的持续性强度若以大于等于 3 级进行统计, 其样本数为 130, 占总样本数 163 的 80%, 也就是说, Hurst 指数的主体在 3~5 级范围内变化。这表明, 5 大区域未来 20 年年雨日减少的趋势性相当强。其持续性强度保持在 3~5 级的强度。

(2) 在累加的 Hurst 指数试验中 (图 4): ① 5 大区域的 Hurst 指数的变化趋势有 3 种类型。a 起伏归于平稳上升型。青藏高原和川西高原都属于这种类型。这种类型的一个显著特点是 Hurst 指数先有波状起伏, 但当下跌到某一值域后 (Hurst 指数最低跌至 0.668) 开始趋于平稳上升。b 一路攀升上扬型。四川盆地和我国东部北方区则属于这种类型。这种类型最突出的特点是随时间的依次累加 Hurst 指数一直连续升高, 越升越强, 并不断趋近于 1.0。c 大落大起型。我国东部南方区属于这种类型。自 1951 年起, 累加

到32年时, Hurst 指数下落到谷底, 出现了最小值0.593, 此后, 就一直不断上升, 最高达0.835, 期间的 Hurst 指数差达到0.242。②5大区域中, Hurst 指数的持续性强度若以大于等于3级进行统计, 其样本数为149, 占总样本数163的91%以上。实际上, 只有我国东部南方区有14个样本的 Hurst 指数小于3级, 其余4大区域的 Hurst 指数全部在3~5级范围内变化。



A: 青藏高原区; B: 川西高原区; C: 四川盆地; D: 东部南方区; E: 东部北方区。

图中横坐标表示 Hurst 指数试验序列的起始年份, 纵坐标表示 Hurst 指数值。

图 3 中国 5 大区域雨日变化的 20 年 Hurst 指数试验结果图

Fig. 3 The results of 20 years Hurst Index experiment of rainy day change of 5 regions in China

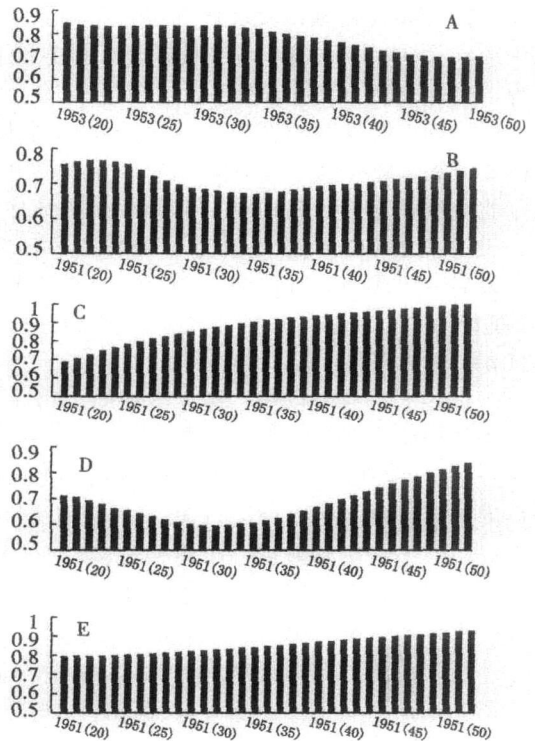


图 4 中国 5 大区域雨日变化的累加的 Hurst 指数试验结果图

Fig. 4 The results of accumulated Hurst Index experiment of rainy day change of 5 regions in China

累加的 Hurst 指数试验中, 尽管 Hurst 指数的变化趋势有 3 种类型, 但其总趋势则是平稳上升和大幅上升。特别是从 1963 年以后的 20 多个样本里, 5 大区域的年雨日 Hurst 指数都处于一致上升的趋势。这一试验结果进一步证明了未来 20 年 5 大区域年雨日减少的趋势将继续, 并且其持续性强度有逐年增强的趋势。

(3) 我国 5 大区域年雨日有着完全一致的减少趋势, 主要原因是青藏高原地表反射率有普遍增大的变化。长期的观测及研究表明, 最近几十年来, 青藏高原气候总体是向着暖干方向发展^[27,28]。这种暖干变化会引起青藏高原地表反射率的增大, 而地表反射率增大会产生两个直接后果: 一是高原季风减弱, 二是东亚季风也会显著减弱。高原季风和东亚季风的减弱则可能是造成我国 5 大区域雨日不断减少的重要原因。雨日的减少趋势, 将

会对降水量产生一种什么样的影响呢？我们认为会有两种可能性。首先从全国来看，雨日减少要比降水量减少明显得多^[7]。那么就会有这样的一种可能性，即雨日减少的“位相”比降水量减少的“位相”要早，降水量减少的“位相”变化要滞后。而另一种可能性则是，雨日的不断减少会造成降水量变化在区域和时间上更加趋于集中，而降水量的变化则不一定会明显减少。

3.3 年雨日试预报检验

根据气候倾向率计算出我国 5 大区域 2003~ 2005 年各年年雨日数以及这 3 年的雨日平均数，用其作为预测值，与 2003~ 2005 年 5 大区域 3 年的实测平均数（表 3）进行对照。通过对比分析，可以看出：

（1）青藏高原区、东部北方区和东部南方区的年雨日实测值小于或等于预测值。其中，东部北方区的实测值与预测值十分吻合。这充分表明了 3 大区域年雨日一致减少的预测趋势是正确的，也说明了该方法的科学性。

（2）四川盆地与川西高原两个区域 3 年的实测值比预测值大，说明这两个区域的年雨日减幅比预测值要小，但是依然呈减少趋势。Hurst 指数的两个试验表明：近 20 年来，这两个区域年雨日的 Hurst 指数不断增大（图 3B 和 C），预示着这两个区域的年雨日的减幅强度会越来越强，年雨日的减幅有可能越来越大，使得未来 7 年这两个区域的年雨日负趋势达到或超过 $-3.7\text{d}/10\text{a}$ 及 $-12.3\text{d}/10\text{a}$ 。这同样从另一个方面说明了预测的可靠性。

表 3 2003~ 2005 我国 5 大区域雨日对照表 （单位：天）

Tab 3 Antitheses between forecastable rainy days and observational rainy days during 2003~ 2005

| | 青藏高原区 | 川西高原区 | 四川盆地 | 东部北方区 | 东部南方区 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2003 年预测值 | 178.99 | 200.16 | 183.19 | 119.50 | 180.85 |
| 2004 年预测值 | 178.62 | 199.77 | 181.96 | 118.82 | 180.26 |
| 2005 年预测值 | 178.25 | 199.39 | 180.74 | 118.14 | 179.67 |
| 2003~ 2005 年 预测平均数 | 178.62 | 199.77 | 181.96 | 118.82 | 180.26 |
| 2003~ 2005 年 实测平均数 | 157.07 | 204.73 | 200.50 | 118.90 | 160.96 |

4 结论与讨论

我国青藏高原、川西高原、四川盆地、东部南方区、东部北方区年雨日有着完全一致的减少趋势，其区域平均气候倾向率依次分别是 $-3.7\text{d}/10\text{a}$ 、 $-3.8\text{d}/10\text{a}$ 、 $-12.3\text{d}/10\text{a}$ 、 $-5.9\text{d}/10\text{a}$ 、 $-6.8\text{d}/10\text{a}$ 。其中四川盆地年雨日减少最多，平均每十年减少雨日 12.3 天。通过 R/S 分析可知，5 大区域未来年雨日变化趋势与过去 50 年来的变化有着很好的自相似性。未来年雨日将继续减少。

通过我国 5 大区域年雨日的 20 年及累加两项 Hurst 指数试验结果分析可看到，年雨日 Hurst 指数的持续性强度不论是高低起伏变化也好，还是 3 种变化类型也好，有两点十分确定：第一，两个序列中的 Hurst 指数值始终在大于临界值 0.5 的范围内变化；第二，两个序列中，Hurst 指数值总体是在 3~ 5 级范围内变化。由此可以推知，5 大区域未来 10 年年雨日将依照各自的气候倾向率继续减少，期间没有雨日气候变化的突变点。

根据 2003~ 2005 年我国 5 大区域最近统计的年雨日数所进行的试预报检验表明：我

国 5 大区域的年雨日的确仍在减少,并且与预测值较为吻合。近 3 年来,青藏高原区、东部北方区和东部南方区的预测值与实测值基本吻合。川西高原区和四川盆地区的年雨日预测值相对偏高,减幅偏小。但 Hurst 指数的两个试验表明其年雨日的减幅将会继续增大,由此可推断这一变化趋势将会持续下去。

青藏高原是我国气候变化的启动区,温度变化的传播十分明显,1955~1992 年期间,每个温度波的波峰波谷都是高原出现最早,然后再向我国东北部、东部传播。位相传播规律明显。其位相差为 $4\sim 8a^{[22]}$ 。关于降水的传播规律,尚未发现相关研究。本文所研究的雨日,自青藏高原到我国东部,都有着十分一致的减少趋势。目前,虽然还看不出明显的位相传播规律,但雨日减少趋势却是十分相似。应该也可以看作雨日的传播形态有相似之处。关于这点,需要进一步的深入研究。

致谢: 绵阳师范学院资源环境科学系朱承湘、胡瑞林、马文超等同学做了大量的计算工作,特此表示感谢!

参考文献:

- [1] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G, *et al*. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 99~ 181.
- [2] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球变化背景下中国降水量空间格局的变化特征子. 地理研究, 2006, 25(6): 1031~ 1040.
- [3] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析. 高原气象, 2004, 23(2): 238~ 244.
- [4] 王绍武,蔡静宁,慕巧珍,等. 中国西部年降水量的气候变化. 自然资源学报, 2002, 17(4): 415~ 422.
- [5] 顾薇,李崇银,杨辉. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析. 气象学报, 2005, 63(5): 728~ 739.
- [6] 王大钧,陈列,丁裕国. 近 40 年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系. 热带气象学报, 2006, 2(3): 283~ 289.
- [7] 王颖,施能,顾骏强,等. 中国雨日的气候变化. 大气科学, 2006, 30(1): 162~ 170.
- [8] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956~ 2000 年中国潜在蒸散量变化趋势. 地理研究, 2006, 25(3): 378~ 387.
- [9] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析. 地理研究, 2006, 25(1): 27~ 34.
- [10] Chen Shenbin, Liu Yunfeng, Axel Thomas. Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961~ 2000. Climatic Change, 2006, 76(4): 291~ 319.
- [11] 陈兴芳,赵振国. 中国汛期降水研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000. 65~ 96.
- [12] 任国玉,吴虹. 我国降水变化趋势的空间特征. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322~ 330.
- [13] 韦志刚,黄荣辉,董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2003, 23(2): 157~ 170.
- [14] 丁一汇. 中国西部环境变化的预测. 见: 秦大河. 中国西部环境演变评估. 北京: 科学出版社, 2002. 16~ 46.
- [15] 冯新灵,罗隆诚. 全球变化背景下中国未来汛期旱涝灰预测. 资源科学, 2006, 28(5): 81~ 87.
- [16] 时少英,刘式达,付遵涛,等. 天气和气候的时间序列特征分析. 地球物理学报, 2005, 48(2): 259~ 264.
- [17] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002. 152~ 162.
- [18] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records. Water Resources Research, 1969, 5(2): 321~ 340.
- [19] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robutness of the rescaled ranged R/S in the measurement of monocylic long-run statistical dependence. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967~ 988.
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 392~ 418.
- [21] 孙霞,吴自勤,黄韵. 分形原理及其应用. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003. 99~ 102.
- [22] 冯松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633~ 636.
- [23] 姚檀栋,谢自楚,武筱龄,等. 敦煌冰帽中的小冰期气候记录. 中国科学 B 辑, 1990, 21(11): 1197~ 1201.
- [24] 李潮流,康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述. 地理学报, 2006, 61(3): 327~ 335.

- [25] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 2002: 22~ 26
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 43~ 47
- [27] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. 地理学报, 1990, 45(1): 5~ 17
- [28] 刘晓东, 马柱国. 中国短期气候变化的一个重要原因——青藏高原地表反射率的变化. 热带气象学报, 1996, 12(3): 240~ 245

Fractal research of rainy day changing trend from Tibetan Plateau to Eastern China

FENG Xin-ling^{1,2,4}, LUO Long-cheng^{1,4}, QIU Li-li^{1,4}, FENG Zi-li³

(1 Department of the Resources & Environment Science, Mianyang Normal University, Mianyang Sichuan, 621000, China; 2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3 Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan, 618307, China; 4 School of Numerical Modeling for Environment and Climate Change, Mianyang Normal University, Mianyang Sichuan, 621000, China; 5 National Research Center for Urban Wastewater Treatment and Resourceization, Mianyang Sichuan, 621900, China)

Abstract: The precipitation climatic change includes the changes of the rainfall and the rainy days. Rainy day change is an important constituent of the precipitation climatic change. Under the background of the temperature rising and the climatic warming, how will the rainy days be able to change? This problem belongs to one of the important contents on global climatic change research. The author studied the regional change, the tendency change and the future change of the annual rainy days of China. Using the rainy day data from 1951 to 2002 at 194 meteorological stations of China, the author studied and forecasted climatic change tendency of annual rainy days in five regions of China with the basic principle of the fractal theory, R/S analytic method. The study indicates that, there is a similarity between future change tendencies of annual rainy days in five regions with that of the past 50 years. In order to make an in-depth study of the future change of rainy days, this study designed two items of Hurst Index experiment and inferred the changing tendency, the transition and the sudden change of rainy days with the corresponding relation between two experimental results and the annual changing tendency of the rainy days. The result indicates that the annual rainy days have the completely consistent tendency to reduce in five regions of China, but the change of rainy days shows a remarkable regional differential characteristic. The rainy days will reduce 6~8 days every ten years in the next ten years in the north of Eastern China and 5~9 days in the south of Eastern China. The reduction of that of Sichuan Basin is the most, which will be 12~3 days every ten years, the Tibetan Plateau and Western Sichuan Plateau are the least, which will be 3~7 to 3~8 days but be not stable. There is the transition of climatic change in five regions of China, but there is no sudden climatic change of rainy days in this period.

Key words: rainy day; climatic change; fractal; R/S analysis; Hurst Index experiment