

文章编号:1000-694X(2003)04-0415-05

河西走廊沙尘暴频数的时序分形特征

赵晶, 徐建华*

(华东师范大学地理系、教育部城市与环境动态过程开放实验室, 上海 200062)

摘要: 对1961—1990年河西走廊沙尘暴频次资料进行的分形研究发现, 沙尘暴发生的时序分布具有分形特征, 计算所得其相空间的关联维数为5.52, 表明要恰当地描述河西地区沙尘暴变化特征, 需构造至少6个状态变量的动力学系统; 在分析了沙尘暴频数时间序列的Kolmogorov熵为0.18、平均可预测时间尺度为5~6 a的基础上, 运用R/S分析方法对1961—1990年中各时段沙尘暴的变化趋势进行了预测, 预测结果与实际沙尘暴的变化趋势十分吻合, 表明上述方法是进行河西地区沙尘暴时间序列分形研究的有效途径。

关键词: 河西走廊; 沙尘暴; 分形; 相空间重构; R/S分析

中图分类号: P425.55 **文献标识码:** A

河西走廊地处青藏高原与内蒙古阿拉善高地之间, 地势相对低洼, 为一狭长条状低地, 是西伯利亚及新疆冷气旋入侵我国中、东部地区的必经之地。长期以来因气候干燥、少雨, 再加上人类的滥砍滥伐, 该地区下垫面多呈现为戈壁和荒漠景观, 成为我国西北地区沙尘暴的发生及发展之地。近20余年来, 随着河西地区工农业的迅速发展、资源开发利用速度的加快, 该地区生态环境日益恶化, 土地荒漠化程度加剧, 沙尘暴发生的频率也愈来愈高。尤其是近10年来, 河西地区平均每年发生10余次沙尘暴, 已给当地的工农业生产及人民的生命财产造成巨大损失。如何根据现有的沙尘暴发生次数, 采用快速、可行且可靠的方法预报未来沙尘暴的发生, 对认识沙尘暴发生的规律及防治沙尘暴、减轻其危害都具有重要的指导意义。自20世纪70年代以来, 我国学者对河西地区风沙活动做了大量研究工作, 特别是对河西地区沙尘暴的发生、发展及演变等方面的研究, 得出了一些有意义的结论^[1~5]。但以往的研究多从动力学、统计力学的角度强调沙尘暴发生发展的规律性(周期性), 对沙尘暴系统的非线性变化关注较少。沙尘暴灾害系统是由承灾体、致灾因子、孕灾环境以及灾情等子系统组成的, 受自然和人类社会因素共同影响的复杂系统, 沙尘暴的发生在时间序列分布上呈现出随机性和不确定性。因此, 科学地揭示沙尘暴发生的不确定性行为机制, 确定其相空间, 对未来沙尘暴的发生发展进行科学预测, 不

仅可以深化对沙尘暴灾害现象的认知, 也可以为政府等部门的正确决策提供必要的数据参考。

分形理论的出现, 为解释复杂系统动力学行为机制及进行预测预报等研究提供了有力的工具, 目前已在物理、化学、地质、气象等诸多领域得到了广泛应用。有关研究表明, 风沙流结构、粒度分布、风沙地貌以及沙漠化过程均具有分形特征^[6], 而沙尘暴作为沙漠化过程的产物, 至今还无人从时间序列的角度研究它的分形特征。本文将应用分形理论中的重建相空间技术, 以1961—1990年河西走廊地区沙尘暴年频数时间序列为对象, 计算其关联维数和Kolmogorov熵, 探讨沙尘暴灾害系统的分形特征, 并在此基础上, 利用分形研究中的R/S分析方法, 对未来河西走廊地区沙尘暴的发生进行科学预测。

1 分形与分维

分形理论由美国科学家Mandelbrot B. B.于20世纪70年代中期创立, 它是描述具有相似结构的几何形状的工具^[7]。一个系统的自相似性是指某种结构或过程的特征从不同的空间尺度或时域尺度来看都是相似的。因此, 这种自相似现象不仅限于形体方面, 而且还表现在功能、形态、信息等诸多方面, 反映了广义全息现象的普遍存在^[7]。分形的特点由分形维数(又称分数维或分维)来描述, 它不同于一般的整数维, 而是一种分数维, 是描述自然界复杂事物特征的良好参数。

收稿日期: 2002-01-01; 改回日期: 2002-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171069)

作者简介: 赵晶(1975—), 女(汉族), 辽宁丹东人, 博士研究生, 现主要从事区域环境变化与分形理论的研究。

* 通讯联系人

关于分维的测算,根据分形的基本概念,如果具有大于 r 的特征尺度的客体数目 $N(r)$ 满足关系式:

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

则定义了一个分形集合。式中 D 为客体的分维,从中可以看出,标尺 r 愈小,其反映的客体的细节也就愈多;反之,标尺愈大,其反映的客体的细节就愈少。根据测算,自然界中大量的现象都是分维的,但许多事物的自相似的层次不是无穷的,只是在一定的尺度范围内存在,即存在上、下截止标尺尺度,超出了此范围,分形现象也就不再存在。

2 沙尘暴频数的时序分形特征

2.1 沙尘暴频数的时序分布

沙尘暴的资料选取了河西走廊有代表性的 11 个站:安西、鼎新、敦煌、高台、酒泉、民勤、武威、永昌、玉门、张掖、乌鞘岭。各站每年沙尘暴频数的累加和作为河西走廊 1961—1990 年沙尘暴发生的基本数据,其时序分布如图 1 所示。统计资料中所列出的沙尘暴频数时间序列是沙尘暴灾害系统的单一变量指标,但它是由于致灾因子、孕灾环境共同作用于承灾体而形成的,因此,该序列中包含了沙尘暴灾害系统的动力学信息,下面将应用分形理论对此时间序列曲线的自相似性问题进行分析。

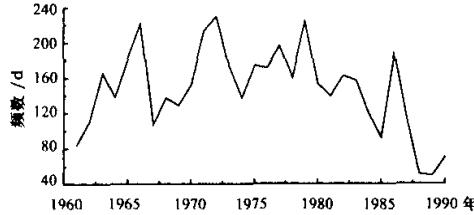


图 1 河西走廊沙尘暴频数的年际变化

Fig. 1 Annual variation of sandstorm frequency for 1961—1990 in Hexi Corridor

2.2 沙尘暴时间序列的关联维数

关联维数可用 Grassberger 和 Procaccia 提出的相空间重构方法(G-P 法)来计算^[8]。其基本思路是:系统中某一状态变量随时间的演化(序列)都是由与之相互作用、相互联系的其他状态变量的共同作用而产生的,这些相关变量的信息就隐含在某一分量的时间演化进程中。为重构一个“等价”的状态空间,只需考虑任意一个状态变量的时间演化序列,

并将它在某些固定的时间延滞点上作新维处理。这样,可以从一个状态变量的时间序列的分形结构推导出该系统的动力学特征。

对于某系统,设系统的某状态变量随时间演化的有序输出序列为 $\{X_i\}$: $x(t_i), i=1, 2, \dots, N$ (N 为样本容量或序列长度)。引入一时间延滞参数 τ ,重构 m 维相空间 R^m (R^m 为 m 维嵌入空间,其对应点集为 $\{Y_i\}$),以恢复原系统的动力学特征。当 τ 取某一值时,点集 $\{Y_i\}$ 与 $\{X_i\}$ 的关系为:

$Y_m(t) = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x[t+(m-1)\tau]\}$
式中: m 为嵌入相空间维数; τ 为时间延滞。已有研究证明,当嵌入维 m 足够大时,由单个时间序列重构的系统具有与原系统等价的几何性质。

为了计算关联维,首先计算关联函数 $C(r)$:

$$C(r) = \frac{1}{N_R^2} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_R} \theta(r - \|Y_i - Y_j\|)$$

其中 N_R 为嵌入空间 $\{Y_i\}$ 的总数目,表示重构系统的轨道长度, $N_R = N - (m-1)\tau$; r 为相空间 R^m 中选定的距离标尺, $\|Y_i - Y_j\|$ 表示 $Y_m(t_i)$ 与 $Y_m(t_j)$ 两点的欧氏距离, $\theta(x)$ 是 Heaviside 函数,它定义为:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

这里需指出的是,标尺 r 的选取既不能太大,也不能太小,太大的 r 反映不了系统内部的性质,若 r 取值太小,则系统中一切偶然的噪声都会表现出来^[9]。

适当地变换 r ,可能在 r 的一段区间内 $C(r)$ 与 r 存在下列标度关系:

$$C(r) \propto r^d$$

则 d 为时间序列的关联维数。对应于不同的嵌入维 m ,都有其相应的 d 值。如果系统具有分形结构,则当嵌入维数 m 增大到某一 m_s 维后, $d(m)$ 不再随 m 的增大而发生有意义的变化,此时的嵌入维 m_s 称为饱和嵌入维,与 m_s 相对应的维数为关联维数 d_s 。 m_s 是一个重要的量,它表征了系统有效自由度数目,它和 d_s 分别确定了模拟该动力系统所需的基本变量数目的上限和下限^[9]。

对于有限长序列,关联维数 d 值将随着嵌入维数 m 的增大而逐渐增加(图 2)。在不同嵌入维数 m 下, $\ln C(r)$ 与 $\ln r$ 均存在无标度区,即直线段;逐点求取 5 点最小二乘直线斜率 d_p ,对最大 d_p 附近 30% 涨落范围内的各 d_p 计算平均值,即为给定嵌入维 m 的关联维数 $d(m)$ 。随着嵌入维数 m 的增大,当 $(d(m) - d(m-1))/d(m) \leq 10\%$ 时,则认为 m 是饱和嵌入维 m_s , $d(m)$ 即为相应的关联维数 d_s 。图 3 给出了不同嵌入维 m 下其关联维数 $d(m)$ 的变化特征。

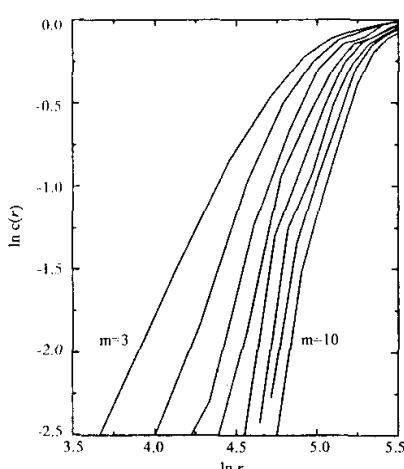


图2 河西地区沙尘暴序列在不同嵌入维 m 时的 $\ln(r)$ 与 $\ln C(r)$ 关系

Fig. 2 Diagram of $\ln(r)$ versus $\ln C(r)$ for sandstorm series in Hexi Corridor with different embedding dimensions

由图3可见,当嵌入维数 $m \geq 8$ 时,关联维数趋于稳定,即 $m_s = 8$ 为图2中 $\ln r$ 与 $\ln C(r)$ 之直线部分斜率随 m 增大而趋于不变时的嵌入维数,称之为饱和嵌入维数,它表征了动力系统的有效自由度数目。与其相对应的关联维数 d_s 为5.52。由于 $d_s > 2$,且是非整数,从而表明河西走廊地区年沙尘暴频数时间序列存在分形特征,其在相空间中的运动是混沌运动^[10];而要恰当地描述河西地区年沙尘暴变化特征,进行动力系统建模,至少需要6个独立变量。

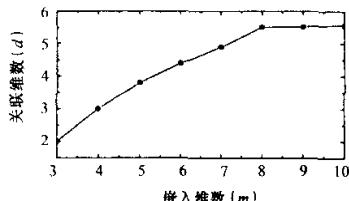


图3 嵌入维数 m 与关联维数 d 的关系
Fig. 3 Diagram of embedding dimension(m) versus correlative dimension(d)

2.3 年沙尘暴频数时间序列的 Kolmogorov 熵

由于沙尘暴频数时间序列具有正的关联维数($d_s = 5.52$),因此该系统是一混沌序列。Kolmogorov 熵(一般记为 k)给出了系统轨道在单位时间内产生的平均信息量的一个上、下限,是另一个可以描述时间序列混沌特征的重要参数^[11]。

用 G-P 方法计算 Kolmogorov 熵为:

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)}$$

τ 是延滞参数; C_m 是嵌入维数为 m 时的 $C(r)$ 值, $C_{m+1}(r)$ 是嵌入维数为 $m+1$ 时的 $C(r)$ 值。在计算中通常将 k 随 $m+1$ 变化的稳定值作为 k 的估计值。

对于有序系统, $k=0$,表示该系统能完全准确预测;对于随机系统, $k=\infty$,表示能做统计平均值预测;当 k 等于某一有限值时,则表明该系统是混沌系统,其混沌程度随 k 值的加大而加大,这时只能作短期预测,并且该系统的平均可预报时间尺度为 $1/k$ 。

从河西地区沙尘暴年频数时间序列的 k 与 $m+1$ 的变化关系中(图4)可以看出, k 值随 $m+1$ 的增大而逐渐增大,当 $m+1 \geq 8$ 时, k 值的变化趋于稳定,近似为0.18。由于 $k=0.18$,进一步说明河西走廊年沙尘暴变化所在的系统存在混沌特性, $1/k$ 表征了该混沌动力系统的平均可预测时间尺度为5~6 a。

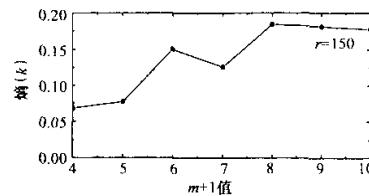


图4 Kolmogorov 熵(k)与 $(m+1)$ 的关系
Fig. 4 Diagram of Kolmogorov entropy (k) versus value $(m+1)$

2.4 年沙尘暴频数时间序列的 R/S 分析

R/S 分析(rescaled range analysis)方法的基础是由英国物理学家 H. E. Hurst 在总结尼罗河的多年水文观测资料时提出来的,后来分形理论创始人 Mandelbrot 又在理论上对该方法进行补充和完善^[12]。近些年该方法在分形研究中得到许多应用,是一种非线性的科学预测方法^[13]。它的主要原理为:

考虑一个时间序列 $\{\xi(t)\}, t = 1, 2, \dots$,对于任意正整数 $\tau \geq 1$,定义均值序列

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots$$

累积离差为

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau$$

极差为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq i \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots$$

标准差为

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots$$

赫斯特分析 $R(\tau)/S(\tau) \triangleq R/S$ 的统计规律时

发现,若存在如下关系式

$$R/S \propto (\frac{\tau}{2})^H$$

则说明所分析的时间序列存在赫斯特现象, H 称为 Hurst 指数。 H 值可根据计算出的 $(\tau, R/S)$ 值, 在双对数坐标系 ($\ln \tau, \ln R/S$) 中用最小二乘法拟合得到。赫斯特等人曾证明, 如果 $|\xi(t)|$ 是相互独立、方差有限的随机序列, 则有 $H = 0.5$ 。 $H(0 < H < 1)$ 与一个关联函数 $C(t)$ 有关:

$$C(t) = 2^{2H-1} - 1$$

当 $H > 0.5$ 时, $C(t) > 0$, 意味着时间序列未来的趋势与过去一致, 如果过去某时有一个正增量, 则在将来平均地说也有一个正增量, 这个过程具有持续性, 亦即过去的增长趋势意味着将来也是增长趋势, 反之亦成立; 当 $H < 0.5$ 时, $C(t) < 0$, 意味着未来的总体趋势将与过去相反, 即过程具有反持续性; 当 $H = 0.5$ 时, $C(t) = 0$, 意味着时间序列各要素完全独立, 没有相关性或只是短程相关^[11]。

从以上分析可以看出, Hurst 指数能很好地揭示出时间序列中的趋势性成分, 并代表了趋势性成分的强度^[14]。在分析了河西走廊沙尘暴灾害混沌系统的平均可预测时间尺度为 5~6 a 的基础上, 将 1961—1990 年沙尘暴频数时间序列划分为 5 个时段 (6 a 为一时段), 分别进行 R/S 分析, 得到了它们

的 Hurst 指数 (表 1)。

表 1 河西走廊地区 1961—1990 年沙尘暴频数时序分布的 Hurst 指数

Tab. 1 Hurst exponent of sandstorm series for 1961—1990 in Hexi Corridor

时段	1961—	1967—	1973—	1979—	1985—
	1966	1972	1978	1984	1990
H 值	0.81	0.71	0.47	0.65	0.77

由图 5 可见, 1961—1966、1967—1972 和 1973—1978 年 3 个时段的沙尘暴频数均呈上升的变化趋势, 从 1979 年开始的后两个时段内变化方向恰好相反, 为下降趋势。根据 R/S 分析结果 (表 1), 1961—1972 年沙尘暴频数的变化 ($H > 0.5$) 具有长期持续性的特征; 1961—1966 年沙尘暴的增长趋势表明未来沙尘暴的变化仍可能会出现增长趋势, 实际上 1967—1972 年沙尘暴频数的逐渐增多现象一方面验证了前一时间段 H 值预测的有效性; 另一方面, 由于该时段的 H 值为 0.71, 表明 1973—1978 年的沙尘暴变化仍可能呈现增加的趋势; 1973—1978 年的 H 值为 0.47 表明该时段的沙尘暴变化具有反持续性的特征, 由该时段沙尘暴的增加趋势可以预测 1979—1984 年的沙尘暴可能会出现减少的变化趋势, 这些预测结果均与图 5 中沙尘暴的实际变化趋势相吻合。自 1979 年开始的沙尘暴频数的变化

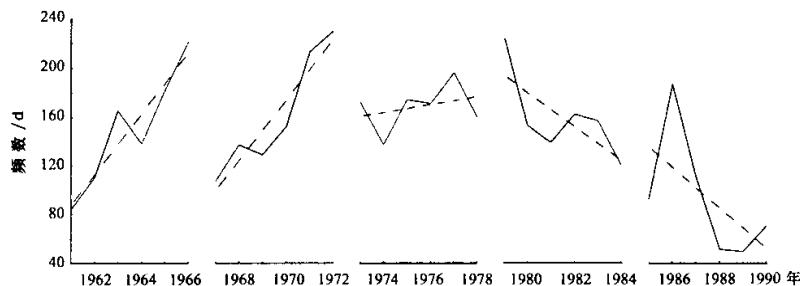


图 5 1961—1990 年河西走廊沙尘暴各时段频数变化 (实线) 与长期趋势 (虚线)

Fig. 5 Annual variation of frequency during periods and long-run trends for sandstorm in Hexi Corridor

($H > 0.5$) 又具有长期持续性的特征: 由 1979—1984 年沙尘暴频数的减少趋势得到 1985—1990 年沙尘暴仍为减少变化趋势; 根据 1985—1990 年沙尘暴频数序列的 R/S 分析结果 ($H = 0.77$) 可以预测, 未来 6 a 即 1991—1996 年河西走廊地区年沙尘暴频数可能会出现减少的变化趋势。

这里, 需要说明的是, 由于该方法是根据过去的沙尘暴频数变化趋势及其 Hurst 指数, 来推断未来相应时段内其发展变化趋势, 而不是预测沙尘暴发

生的具体数据 (频数), 因而无法给出由具体数据描述的曲线图。

由以上分析可知, 运用 R/S 方法可以充分揭示河西地区沙尘暴年频数时间序列的分形特征, 其结果均在各时段的实际变化序列中得到充分印证。

3 结论

通过对河西走廊地区 1961—1990 年沙尘暴灾害频数的时序分形特征的研究, 得到一些初步认识:

(1) 1961—1990 年的 30 a 间,河西地区沙尘暴频数的时序分布具有分形特征,该时间序列在相空间的关联维数 (> 2 , 非整数) 定量地论证了沙尘暴变化的混沌性。

(2) 关联维数是动力系统建模所需独立变量的控制参数。河西地区年沙尘暴变化的关联维数 (5.52) 表明,要恰当地描述河西地区沙尘暴变化特征,需要构造至少 6 个独立变量的动力学系统。

(3) 河西地区沙尘暴时间序列的 Kolmogorov 熵为有限值 ($k = 0.18$) 表明,该混沌动力系统的平均可预测时间尺度为 5~6 a。

(4) R/S 分析表明,除了 1973—1978 年的沙尘暴变化存在反持续性的特征外,其余各时段沙尘暴均具有持续性的变化特征。分时段预测结果在沙尘暴的实际年际变化趋势中得到了很好地印证,并由此判断 1991—1996 年河西地区沙尘暴的年变化将可能出现减少的趋势。

(5) 由于条件所限,本文所获取的时间序列稍短,但这并不妨碍我们从现有的资料中发现河西地区沙尘暴的分形特征;至于沙尘暴变化的混沌特征,如混沌演化历程、动力系统重建及多重分形等问题,尚待今后进行深入研究。

参考文献(References):

- [1] 尚可政,孙黎辉,王式功,等.甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析[J].中国沙漠,1998,18(3):239~243.
- [2] 屈建军,孙宏义,李金贵.腾格里沙漠东南缘沙尘暴变化趋势的 Markov 模型分析[J].中国沙漠,2001,21(增刊):72~75.
- [3] 方宗义,张运刚,郑新江,等.用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[J].第四纪研究,2001,21(1):48~55.
- [4] 董玉祥.我国半干旱地区现代沙漠化驱动因素的定量辨识[J].中国沙漠,2001,21(4):412~417.
- [5] 王根绪,程国栋.黑河流域土地荒漠化及其变化趋势[J].中国沙漠,1999,19(4):368~374.
- [6] 徐建华,艾南山,金炯,等.沙漠化的分形特征研究[J].中国沙漠,2002,22(1):6~10.
- [7] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [8] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractor [J]. *Physical Review Letters*, 1983, 50(5):346~349.
- [9] 朱晓华,徐容乐.地学时间序列混沌特征的定量研究方法[J].青年地理学家,1999,10(3):1~4.
- [10] Eckmann J P. Ergodic theory of chaos and strange attractors[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, 57(3):617~656.
- [11] 艾南山,李后强.第四纪研究的非线性科学方法[J].第四纪研究,1993,(2):109~120.
- [12] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records[J]. *Water Resource Research*, 1969a, 5(2):321~340.
- [13] 周厚云,余素华,朱照宇,等.西昆仑山甜水海钻孔氧化铁指标的 R/S 分析及其意义[J].冰川冻土,1999,21(2):136~140.
- [14] 赵晶,王乃昂,杨淑华.兰州城市化气候效应的 R/S 分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2000,36(6):122~128.

Time-Series Fractal Characteristics of Sandstorm Frequency in Hexi Corridor

ZHAO Jing, XU Jian-hua

(Urban & Environmental Dynamic and Geocomputation Laboratory of Ministry of Education, Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Many researches have been made about sandstorm based on correlative data, and the work mainly focused on the history data's arrangement and statistical analysis, but the inherent nonlinear trait of sandstorm is studied less.

Based on the annual frequency data of sandstorm occurring from 1961—1990 in Hexi corridor, the time-series phase space is reconstructed and Kolmogorov entropy is calculated. The results show that sandstorm time-series has fractal characteristics and its correlative dimension is 5.52, which indicates that there should have at least 6 independent variables for describing sandstorm change characteristics and reconstructing a dynamic system. Kolmogorov entropy of sandstorm time-series is 0.18, which indicates that sandstorm dynamic system is chaotic and the forecasting time-scale is about 5~6 years.

Based on R/S analysis of every sandstorm period from 1961—1990, all the periods have persistence change except the period of 1973—1978, and the results are quite consistent with actual changing trend of sandstorm time-series. The method is effective for studying fractal characteristics of sandstorm time-series in Hexi corridor.

Key words: Hexi corridor; sandstorm; fractal; phase space reconstruction; R/S analysis