

# 地球变化磁场 $Z$ 分量的混沌动力学特性分析\*

牛 超<sup>†</sup> 李夕海 刘代志

(第二炮兵工程学院科研部研究所, 西安 710025)

(2009 年 7 月 15 日收到; 2009 年 9 月 16 日收到修改稿)

对地球变化磁场进行了混沌动力学特性分析, 主要进行了以下两个方面的工作: 1) 运用多种方法对多个地磁台站同一时段变化磁场分量数据(分为磁扰较小和磁扰较大时段)进行了混沌特性分析, 主要是为了以更充分的判据来验证地球变化磁场是否具有混沌特性; 2) 同一地磁台站不同时段变化磁场分量数据的混沌特性分析, 主要是验证地球变化磁场是否具有变参数混沌特性. 分析结果表明: 1) 变化磁场时间序列确实具有混沌特性; 2) 从混沌时间序列相空间重构的角度可初步认为模拟地球变化磁场动力学系统所必须的独立变量应该为 6 左右; 3) 变化磁场时间序列不仅具有混沌特性而且其参数也是在缓慢变化着的, 具有变参数混沌系统的特性.

**关键词:** 地球变化磁场, 混沌, 变参数系统, Lyapunov 指数

**PACC:** 0545, 9125C

## 1. 引 言

地磁场中的变化磁场部分主要起源于磁层——电离层电流体系, 而这些电流体系则是由磁层——电离层中发生的动力学过程和电动力学过程所产生的, 此外, 它们在地球内部的感应电流也有重要贡献<sup>[1]</sup>. 在应用地磁学研究的许多领域都需要考虑变化磁场, 比如空间天气活动状态的诊断和预报<sup>[1]</sup>, 地磁测量数据的日变校正<sup>[2]</sup>, 地震孕育过程中的地磁日变规律研究<sup>[3]</sup>, 地磁活动指数的计算<sup>[4]</sup>, 以及地磁导航与地磁寻的技术等<sup>[5]</sup>. 但是变化磁场通常呈现出十分复杂的时空分布特征, 近几年的观测和研究结果表明, 变化磁场是一个很复杂的不断有能量输入和输出的开放系统中的非线性动力学过程, 与太阳、行星际空间、磁层、电离层乃至中低层大气中发生的一系列现象有密切关系<sup>[1]</sup>, 由于地磁动力系统中各参量间的错综复杂的非线性交互作用, 使得试图用一个完备的理论模型去描述地磁场的变化以及进一步的建模预测是不切实际的<sup>[6]</sup>.

混沌理论的诞生为地球变化磁场的研究提供了新的思路. 由上述可知地球变化磁场实质上是一个受多种因素影响而发展演化的非线性耗散动力

系统, 所以本文从变化磁场时间序列的内在特性着手, 研究变化磁场存在混沌特性的可能性, 而这也是应用混沌理论的研究成果对变化磁场进行进一步分析的前提. 事实上已有一些文献讨论了地球变化磁场相关混沌特性的文献, 王赤等<sup>[7]</sup>对 1970 年北京地磁台观测的地磁场水平分量进行混沌特性分析, 求得吸引子维数为  $D = 4.2 \pm 0.4$ , 最大 Lyapunov 指数总是正值, 表明地球变化磁场可能是混沌的, 但其也指出这只是一个初步结果, 尚待进一步研究来加以检验和修正, 不同人采用不同时期的观测资料 and 不同的处理方法也可能得到不同的结果; 张继红<sup>[8]</sup>尝试利用混沌理论中的 GP 方法计算地磁场  $Z$  分量时间序列的关联维, 其研究对象是反映地球内部信息的变化磁场时间序列, 研究结果发现其存在分维结构; 赵明等<sup>[6]</sup>计算了 1989 年 3 月 13 日大磁暴发生期间地磁场各分量数据的分数维和 Kolmogorov 熵, 通过计算出的有限分数维以及正的 Kolmogorov 熵, 指出地磁场是一个具有低维混沌的非线性系统; 高玉芬、周荣茂等<sup>[9,10]</sup>发表一系列文章讨论了地磁 AE 指数的混沌特性, 并对利用 AE 指数重构磁层相空间以及 AE 指数非线性预报存在的问题进行了探讨, 指出 AE 指数所表征的磁层具有混沌特性并可在一定时间尺度内对系统进行可靠预报, 但同样指出可能是由于使用资料的时间段以及

\* 国家自然科学基金(批准号:60705001 和 40974037) 和中国博士后科学基金(批准号:20080430234) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: niuchao0511@163.com

计算过程中一些具体细节处理方法上不同, 不同人计算出的混沌特征量结果并不完全相同; Hongre 等<sup>[11]</sup>应用混沌时间序列分析的方法对苏格兰 Eskdalemuir 地磁台长期观测的地球变化磁场各分量时均值数据的混沌特性进行了分析, 通过计算所观测 79 年的变化磁场时均值数据发现其具有正的 Lyapunov 指数, 证实了地球变化磁场具有混沌特性, 且指出计算不同地磁台站观测的数据得出的结果可能并不相同; 一些国外学者还对地磁 AE, AL 指数的分形特征进行了讨论<sup>[12,13]</sup>; Michael 等也指出与地球变化磁场密切相关的太阳黑子数随时间的变化就是一混沌运动<sup>[14]</sup>. 综观前人对变化磁场相关混沌特性研究的文献可知其研究对象较单一, 要么是针对单台站数据, 要么是针对单时段数据, 且判定变化磁场具有混沌特性的方法也较单一, 故得出的地球变化磁场具有混沌特性的论据不是很充分. 本文在前人工作的基础上首先运用多种判定方式对多个台站同一时段数据(分为磁扰较小和磁扰较大时段)进行了混沌特性分析, 进一步确认了变化磁场具有混沌特性, 论据较以往更为充分; 其次, 对变化磁场进行了变参数混沌特性的相关分析, 证实了其具有变参数混沌特性.

## 2. 多台站地球变化磁场的混沌特性验证

### 2.1. 数据来源及预处理

#### 2.1.1 数据来源

本节所使用的数据有两部分, 取自中国大陆地区 12 个地磁台站观测的地磁场  $Z$  分量时均值数据, 各地磁台站名称及位置参数见表 1. 其中第一部

分为地磁扰动相对较小的时间段数据(1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日), 各台站数据个数为 3000, 由磁暴报告可知在该段时间内没有发生磁暴; 第二部分为地磁扰动较大的时间段数据(1995 年 10 月 3 日至 12 月 31 日), 由磁暴报告可知在该段时间内发生了两次磁暴(时间分别为 1995 年 10 月 18 日和 1995 年 12 月 24 日), 各台站数据个数为 2160, 由于数据限制, 该部分数据只用了 5 个台站(CDP, QIX, SSH, WHN, BJI)的数据. 由表 1 可知, 这些地磁台站覆盖了很广的地域范围(南至琼中, 北至满洲里, 跨越了 30.6 个纬度; 西到乌鲁木齐, 东达长春, 横跨 37.5 个经度, 覆盖了两个时区多), 因此具有广泛的代表性, 如若能够从这些数据集中发现一些普遍的混沌特征存在, 则可以说明变化磁场具有混沌特性. 数据来源于磁暴基础数据库([www.geomag.ac.cn](http://www.geomag.ac.cn)).

#### 2.1.2. 预处理

对这些台站的变化磁场数据进行的预处理主要是消除其长期变化, 以武汉地磁台站(WHN)为例, 观察其 1995 年和 1996 年全年的日均值数据, 如图 1 所示.

由图 1 可以看出一个明显的日均值随日期逐渐增长的趋势, 这就是所谓的地磁场长期变化在每天中的体现(其他 11 个台站均是如此, 就不一一列举), 由于这里研究的是瞬变磁场, 所以应该消除这种趋势. 这里采取一种简便但又不失正确意义的方法, 即假设地磁场长期变化每天的增量是固定的, 其值由某年最后一天的日均值减去某年第一天的日均值并除以某年的天数得到, 然后采取第  $n$  天减去  $n$  个增量的方法进行处理( $n$  为该天在该年中的序号). 这种方法消除的只是趋势变化, 并没有消除具有逐日变化特性的太阳静日变化(Sq)等一些主要

表 1 各地磁台站数据参数

台站名称及代码	地理经度	地理纬度	地磁经度	地磁纬度	高程
成都(CDP)	103.7	31.0	175.67	20.57	653
乾陵(QIX)	108.2	34.6	179.79	24.14	893
佘山(SSH)	121.2	31.1	196.69	20.88	100
武汉(WHN)	114.6	30.5	20.10	190.66	75
格尔木(GLM)	94.9	36.4	167.89	26.20	2802
拉萨(LSA)	91.0	29.6	163.95	19.58	3655
兰州(LZH)	103.8	36.1	175.85	25.67	1560
北京(BJI)	116.2	40.0	29.63	191.84	69
长春(CNH)	125.2	44.0	199.49	33.92	203
满洲里(MZL)	117.4	49.6	192.5	39.25	682
琼中(QGZ)	109.8	19.0	186.31	8.54	227
乌鲁木齐(WMQ)	87.7	43.8	33.93	162.07	970

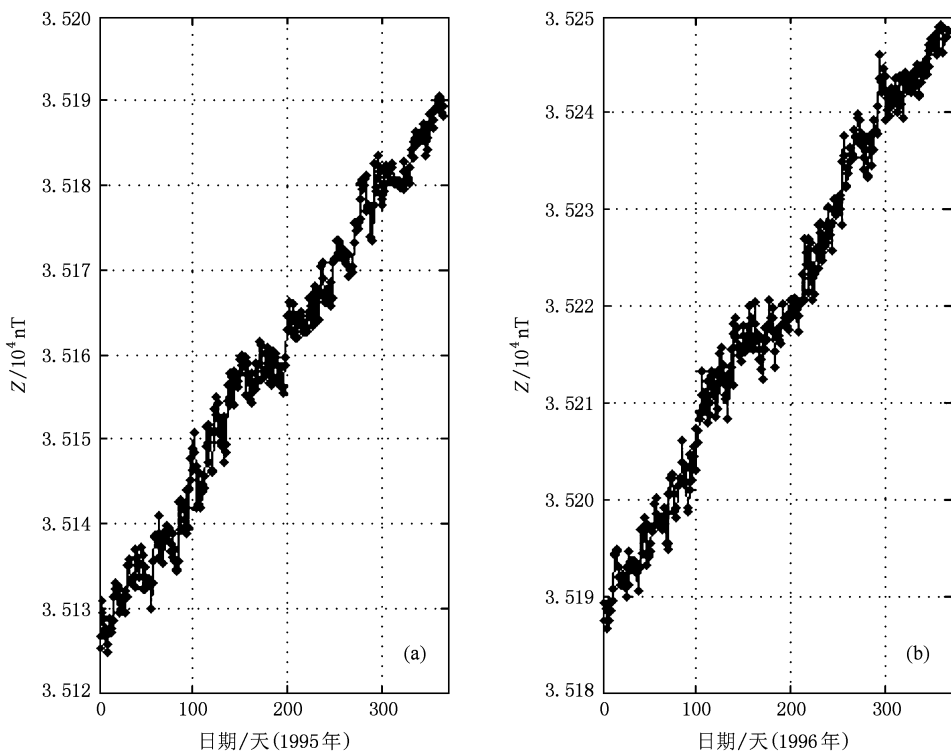


图1 武汉地磁台  $Z$  分量日均值的年变化 (a) 1995 年日均值的年变化; (b) 1996 年日均值的年变化

的变化磁场. 消除长期变化前后的武汉地磁台 1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日以及 1996 年 3 月

20 日至 1996 年 7 月 22 日的  $Z$  分量变化磁场时均值数据如图 2 所示.

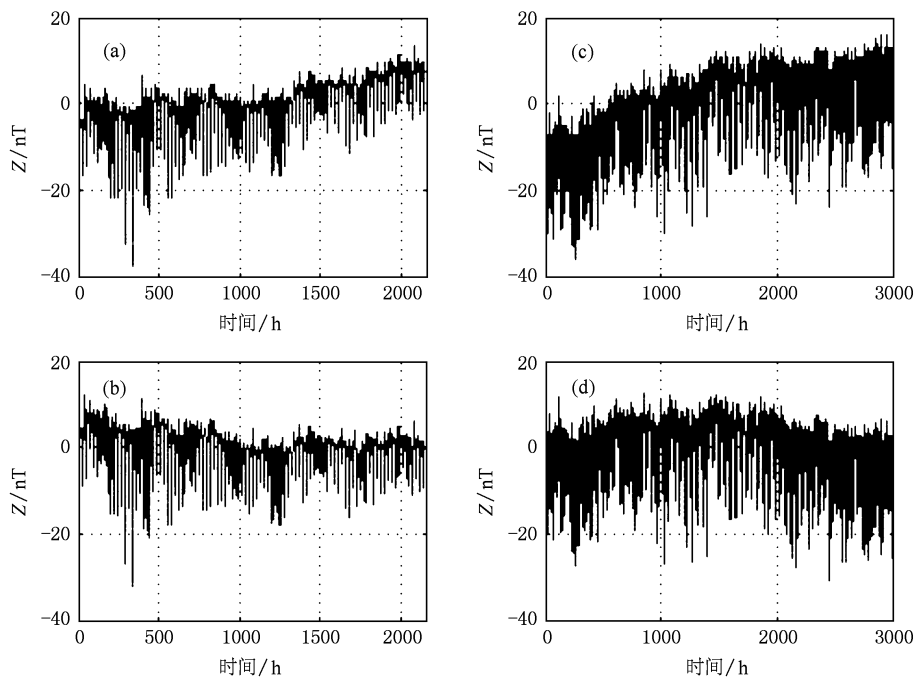


图2 武汉地磁台站时均值数据 (a) 1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日消除长期变化前的数据(磁扰较大); (b) 1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日消除长期变化后的数据(磁扰较大); (c) 1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日消除长期变化前的数据(磁扰较小); (d) 1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日消除长期变化后的数据(磁扰较小)

### 2. 2. 变化磁场时间序列的混沌特性验证

判别一个时间序列为混沌时间序列比较常用的方法主要有功率谱法、主分量分析方法、庞加莱截面法、最大 Lyapunov 指数法、饱和关联维数法等<sup>[15]</sup>, 这些方法都是从某一个方面判别序列是否为混沌序列的必要条件, 因而需要采用尽可能多的方法来鉴别. 本文采用主分量分析法、最大 Lyapunov 指数法、以及饱和关联维数法对变化磁场时间序列进行混沌特性分析. 相空间重构是对变化磁场进行混沌特性识别以及进一步的分析的前提, 重构的相空间与延迟时间  $\tau$  和嵌入维数  $m$  密切相关, 下面首

先计算嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$ .

#### 2. 2. 1. 计算延迟时间和嵌入维数

对于延迟时间  $\tau$ , 常用的计算方法有自相关法、复自相关法、互信息法、相空间扩展法等, 由于互信息方法计算嵌入时间延迟效果较好, 所以本文采用互信息法<sup>[16]</sup>. 使用 2. 1 节中的两部分数据, 按照互信息法计算各地磁台站变化磁场时间序列的延迟时间, 结果如图 3 所示, 选择使  $I(\tau)$  首次取极小值时的  $\tau$  作为延迟时间. 磁扰较小时间段的各台站数据延迟时间列于表 2, 磁扰较大时间段的各台站数据延迟时间列于表 3.

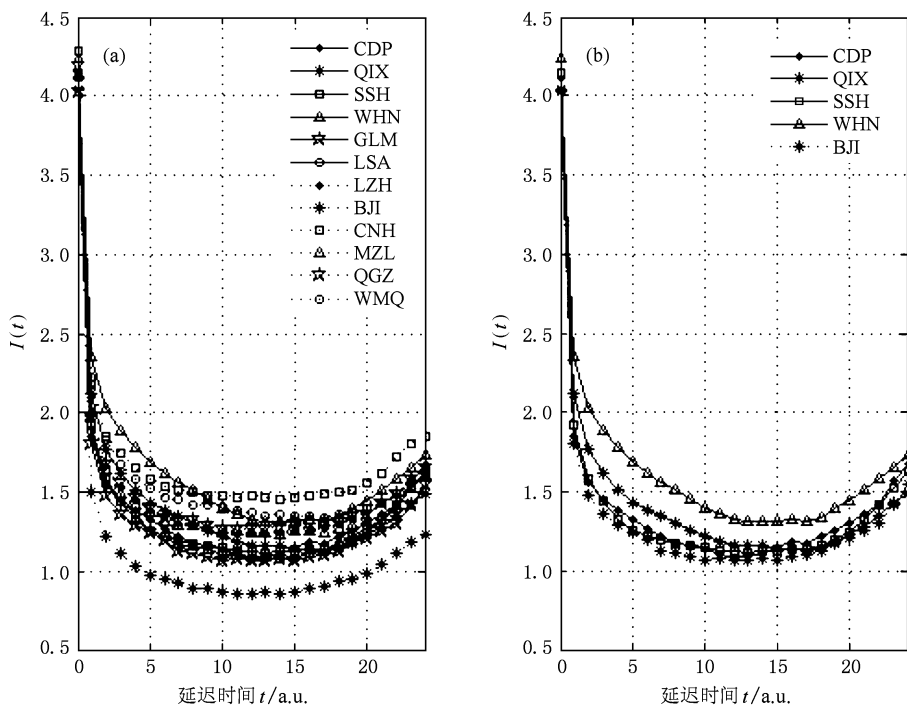


图 3 互信息法计算各地磁台站数据的延迟时间 (a)1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日数据的延迟时间(磁扰较小); (b) 1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日数据的延迟时间(磁扰较大)

对于计算嵌入维数  $m$ , 目前常用的方法有伪邻点法、奇异值分解法、Cao 氏法等, 本文采用 Cao 氏法<sup>[17]</sup>. 使用 2. 1 节中的两部分数据, 按照 Cao 氏法计算各地磁台站变化磁场时间序列的嵌入维数, 结果如图 4 所示, 从图中可以看出这些曲线都随着  $m$  的增加而趋于饱和至 1 附近, 说明地球变化磁场时间序列具有混沌特性. 磁扰较小时间段的各台站数据嵌入维数列于表 2, 磁扰较大时间段的各台站数据嵌入维数列于表 3.

#### 2. 2. 2. 变化磁场的混沌特性分析——饱和关联维数法

混沌现象最主要的特征是相空间中存在奇异

吸引子, 而描述吸引子的基本数学量是它的维数, 主要有 Hausdorff 维数、信息维数、Lyapunov 维数、关联维数等. 由于 Grassberger 和 Procaccis 提出的关联维数算法<sup>[18]</sup> (GP 算法) 特别适用于实验观测数据, 且算法简洁易于实现, 所以本文采用此方法计算变化磁场时间序列的关联维.

使用 2. 1 节中的两部分数据, 结合前面求得的延迟时间, 按照 GP 算法计算各地磁台站变化磁场时间序列的关联维数, 结果如图 5 所示. 由 GP 算法可知, 所求得的关联维数  $D$  是否会随着嵌入维的增大而增大且最后达到一个饱和值是判断动力系统

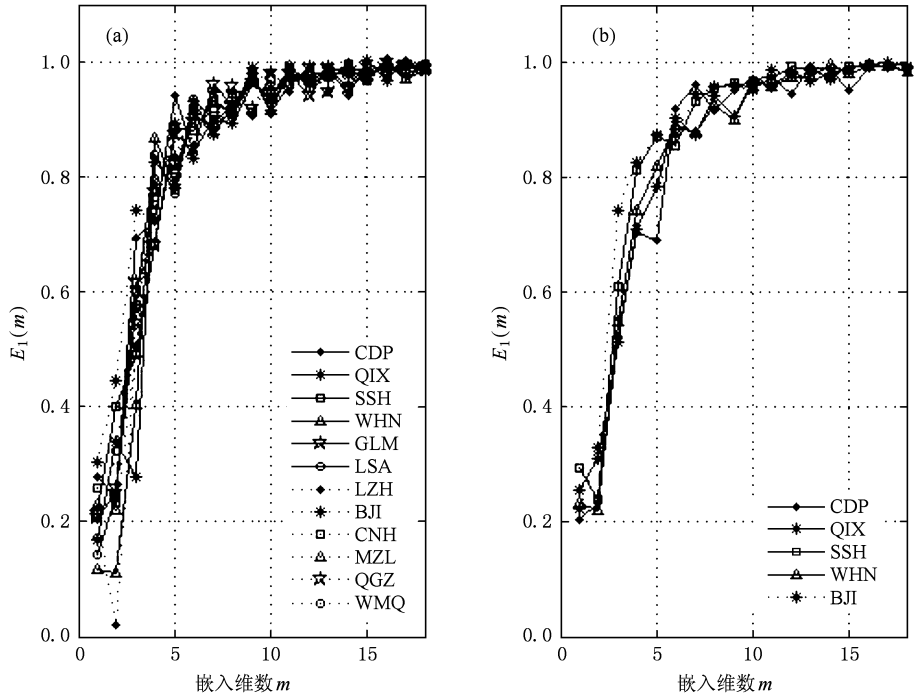


图4 Cao 氏法求各地磁台站数据的嵌入维数 (a)1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日数据的嵌入维数(磁扰较小);(b)1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日数据的嵌入维数(磁扰较大)

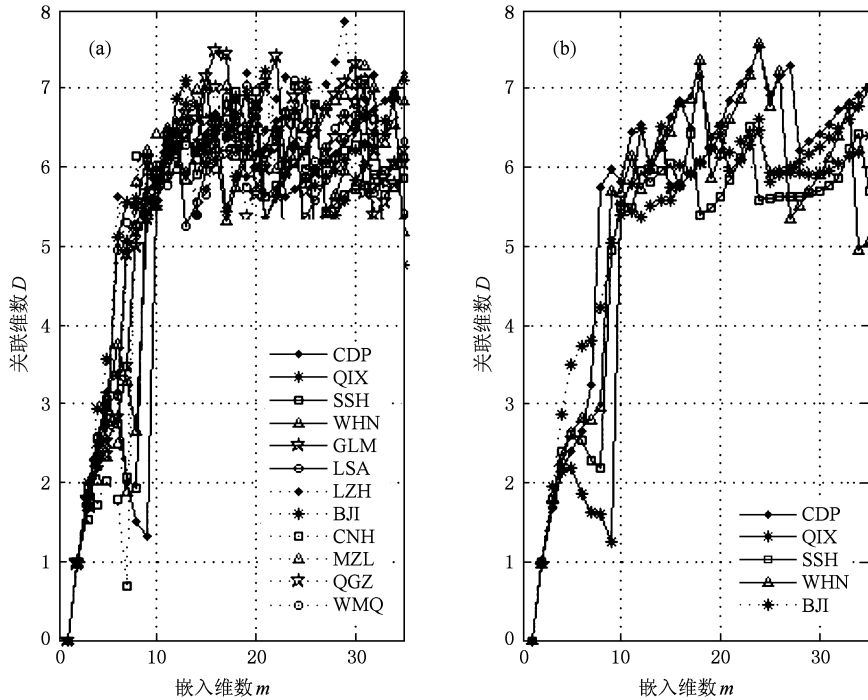


图5 GP 法求各地磁台站的饱和关联维数 D (a)1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日数据的饱和关联维数(磁扰较小);(b)1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日数据的饱和关联维数(磁扰较大)

是否具有混沌特性的一个判据. 从图 5 中可以看出 无论是磁扰较小的数据还是磁扰较大的数据,其关

联维数曲线均随着嵌入维数的增加(1—35)基本稳定在 6 左右的一个区间范围内,说明各地磁台站数

据重构出的相空间所代表的动力系统是具有混沌特性的,也就是说变化磁场是具有混沌特性的,且与前面 Cao 氏法计算出的嵌入维数  $m$  相比对,发现两者关系大概符合 Takens 定理所证实的内容(即若  $m \geq 2D + 1$ ,则可在这个嵌入维空间里把有规律的吸引子恢复出来).因此,从混沌时间序列相空间重构的角度可初步认为模拟地球变化磁场动力学系统所必需的独立变量应该为 6 左右.

2.2.3. 变化磁场的混沌特性分析——最大 Lyapunov 指数法

在混沌研究和实际应用中,如要判别一个时间序列是否为混沌时间序列,有时并不需要计算出时间序列所有的 Lyapunov 指数谱,而只要看其最大 Lyapunov 指数是否大于 0 就可以.小数据量法<sup>[19]</sup>是一种效果较好的计算混沌时间序列最大 Lyapunov 指数的方法,本文采用该方法来计算各地磁台站变化磁场时间序列的最大 Lyapunov 指数.

使用 2.1 节中的两部分数据,首先应用 FFT 方法计算出各地磁台站变化磁场时间序列的平均周期  $P$ ,发现各地磁台站数据平均周期均为 24,具有变化磁场的周日变化特性(1 天 24 小时),这说明该

计算平均周期的方法是比较正确的,然后结合前面求得的延迟时间  $\tau$  以及嵌入维数  $m$ ,按照小数据量法计算出各地磁台站变化磁场时间序列的最大 Lyapunov 指数,磁扰较小时间段的各台站数据最大 Lyapunov 指数如表 2 所示,磁扰较大时间段的各台站数据最大 Lyapunov 指数如表 3 所示.由表 2、表 3 可以看出,无论是磁扰较小的时段数据还是磁扰较大的时段数据,其最大 Lyapunov 指数均是大于 0 的,这说明变化磁场是具有混沌特性的.

2.2.4. 变化磁场的混沌特性分析——主分量分析法

主分量分析(PCA)方法是一种能有效识别混沌和噪声的方法<sup>[15]</sup>,原因在于混沌信号和噪声的主分量分布之间存在着显著差异,即噪声的主分量谱图应是一条与  $X$  轴接近平行的直线,而混沌信号的主分量谱图应是一条过定点且斜率为负的直线(或含有类似直线部分).

使用 2.1 节中的两部分数据,绘制各地磁台站变化磁场时间序列的主分量谱图,结果如图 6 所示,从图中可以看出,无论是磁扰较小的时段数据曲线还是磁扰较大的时段数据曲线均存在斜率为负的直线部分,从而进一步确认变化磁场具有混沌特性.

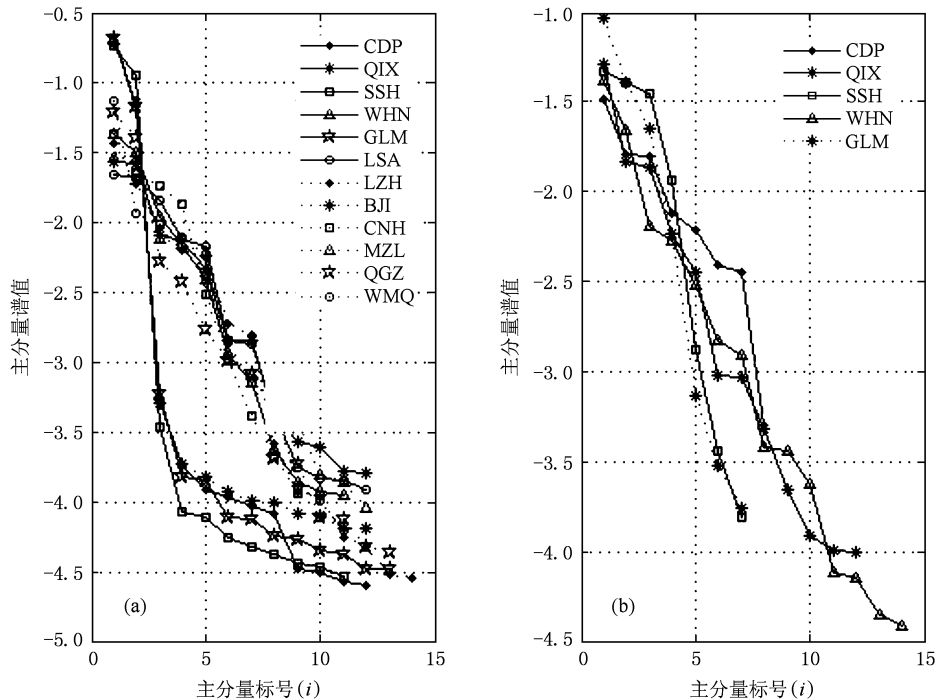


图 6 各地磁台站数据的主分量谱图 (a)1996 年 3 月 20 日至 1996 年 7 月 22 日数据的主分量谱图(磁扰较小);(b)1995 年 10 月 3 日至 1995 年 12 月 31 日数据的主分量谱图(磁扰较大)

表 2 各地磁台站数据的延迟时间、嵌入维数、平均周期及最大 Lyapunov 指数(磁扰较小)

台站名称及代码	延迟时间( $\tau$ )	嵌入维数( $m$ )	平均周期( $P$ )	最大 Lyapunov 指数
成都(CDP)	12	12	24	0.1397
乾陵(QIX)	10	12	24	0.1276
佘山(SSH)	12	11	24	0.1624
武汉(WHN)	10	11	24	0.1423
格尔木(GLM)	12	13	24	0.1459
拉萨(LSA)	10	12	24	0.1164
兰州(LZH)	11	14	24	0.1285
北京(BJI)	12	12	24	0.1552
长春(CNH)	11	10	24	0.1507
满洲里(MZL)	10	12	24	0.1033
琼中(QGZ)	13	13	24	0.1427
乌鲁木齐(WMQ)	10	11	24	0.1104

表 3 各地磁台站数据的延迟时间、嵌入维数、平均周期及最大 Lyapunov 指数(磁扰较大)

台站名称及代码	延迟时间( $\tau$ )	嵌入维数( $m$ )	平均周期( $P$ )	最大 Lyapunov 指数
成都(CDP)	10	10	24	0.030
乾陵(QIX)	11	12	24	0.037
佘山(SSH)	10	10	24	0.034
武汉(WHN)	13	14	24	0.035
北京(BJI)	10	10	24	0.022

以上三种方法的验证结果均表明地球变化磁场具有混沌特性,由于验证方法是多样的,数据来源是广泛的(中国大陆地区多个地磁台站同一时段的  $Z$  分量观测数据),且对磁扰较小时段数据和磁扰较大时段数据均进行了分析,故验证结果是比较有说服力的。

### 3. 地球变化磁场的变参数混沌特性分析

目前变参数混沌系统逐渐引起了人们的注意,且已经成为混沌理论的研究热点之一<sup>[20-30]</sup>。大家知道对于绝大多数由实际观测资料所构成的动力系统(特别是天气或气候系统)来说,控制它的外部条件都不会是一成不变的,这样的系统往往表现出很复杂的非线性、非平稳特征<sup>[23]</sup>。非平稳意味着控制系统的某些参数或条件是随时间变化的,这类系统随时间的延长会展现出丰富多变的复杂动力学特性,且在系统的整个相空间中不存在一个有规律的奇异吸引子形状,人们不可能用同样的规律去刻画

系统的动力学行为。根据混沌相空间时空轨迹所示的奇异吸引子形状,将混沌系统分为两类:具有恒定形状吸引子的混沌系统和不具有恒定形状吸引子的混沌系统,而复杂变参数混沌系统属于后者<sup>[24]</sup>。由前述的变化磁场的物理形成机理可知,地球变化磁场很有可能存在变参数混沌系统的特性,所以本节在这方面对变化磁场进行了相关研究。

#### 3.1. 数据来源及预处理

本节所使用的数据为 1995 年底至 1997 年初北京地磁台观测的地磁场  $Z$  分量时均值数据(主要是 1996 年的数据)。变化磁场的幅度和形态具有明显的季节变化,这里的季节指的是地磁学中习惯使用的劳埃德(Lloyd)季节:3,4,9,10 月为分点(春分和秋分)月份,用 E 表示,5,6,7,8 月为夏至点月份,用 J 表示,11,12,1,2 月为冬至点月份,用 D 表示。对 1996 年的北京地磁台  $Z$  分量时均值数据按照劳埃德季节原则进行时段划分(见表 4),对数据同样进行消除长期变化趋势的预处理。

表 4 1995 年底至 1997 年初北京地磁台地磁场 Z 分量时均值数据集

数据集	时间范围	时段的季节说明	数据个数
dataset1	1995. 12. 1 至 1996. 2. 16	D(冬至点月份)	1440
dataset2	1996. 2. 17 至 1996. 4. 16	E(春分点月份)	1440
dataset3	1996. 4. 17 至 1996. 6. 15	J(夏至点月份)	1440
dataset4	1996. 6. 16 至 1996. 8. 14	J(夏至点月份)	1440
dataset5	1996. 8. 15 至 1996. 10. 13	E(秋分点月份)	1440
dataset6	1996. 11. 21 至 1997. 1. 19	D(冬至点月份)	1440

由于数据集是按照地磁学中常用的劳埃德季节原则进行选取的,因此其数据代表了变化磁场的季节变化特性.不同的劳埃德季节大致对应着变化磁场不同的幅度和形态,反映在变化磁场的起源上,则可能对应着磁层——电离层中不同的动力学过程和电动力学过程,而且这些数据同为北京地磁台所记录,观测的基础条件是一样的,这是对地球变化磁场进行变参数混沌特性分析的前提.对这些不同时段的 Z 分量数据进行有关混沌特征量的计算与分析,如若表现出变参数混沌系统的相关特性,则可说明地球变化磁场具有变参数混沌特性.

### 3. 2. 重构相空间

使用前面所述的方法对北京地磁台观测的地磁场 Z 分量时均值数据 6 个数据集,进行相空间重构,计算出的延迟时间和嵌入维数如表 5 所示,由于后面计算最大 Lyapunov 指数需要参数平均周期 P, 所以也算出并列于表 5.

表 5 各数据集的延迟时间、嵌入维数、平均周期

数据集	延迟时间( $\tau$ )	嵌入维数(D)	平均周期(P)
dataset1	6	13	24
dataset2	7	14	24
dataset3	6	14	24
dataset4	9	15	24
dataset5	11	14	24
dataset6	6	13	24

### 3. 3. 饱和关联维分析

应用计算关联维的 GP 算法对表 4 各数据集进行了计算,结果如图 7 所示,从图中可以看出,随着嵌入维数的增加(1—35)这些曲线基本都稳定在 6 左右的一个区间范围内,说明这些时段的数据重构出的相空间所代表的动力系统是具有混沌特性的,也就是说这些时段的变化磁场均具有混沌特性.与

3. 2 节计算出的嵌入维数 m 相对比,发现两者关系大概符合 Takens 定理所证实的内容(即若  $m \geq 2D + 1$ ,则可在这个嵌入维空间里把有规律的吸引子恢复出来),且与 2. 2 节计算出的各地磁台站数据的关联维数相比,发现关联维达到饱和时的数值基本是一样的,都是 6 左右,这说明可进一步认为模拟地球变化磁场动力学系统所必须的独立变量应该为 6 左右.

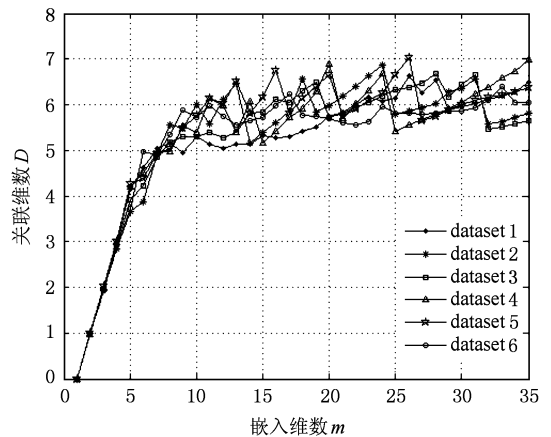


图 7 GP 法求各数据集的饱和关联维数 D

### 3. 4. 最大 Lyapunov 指数分析

由计算最大 Lyapunov 指数的小数据量算法对表 4 各数据集进行计算,得出各数据集的最大 Lyapunov 指数如表 6 所示.

表 6 各数据集的最大 Lyapunov 指数

数据集	时段的季节说明	最大 Lyapunov 指数
dataset1	D(冬至点月份)	0. 0131
dataset2	E(春分点月份)	0. 0933
dataset3	J(夏至点月份)	0. 0725
dataset4	J(夏至点月份)	0. 1065
dataset5	E(秋分点月份)	0. 1098
dataset6	D(冬至点月份)	0. 0139

由表 6 中数据可知,北京地磁台 1995 年底至 1997 年初观测的地磁场 Z 分量时均值数据在各个时段的最大 Lyapunov 指数均不相同. 因为 Lyapunov 指数是表征确定性混沌系统混沌吸引子最重要的不变特征量,但这里最大 Lyapunov 指数随选取时间段的不同,其值有所改变,说明了变化磁场的动力学特性是不断变化着的,或者说变化磁场具有变参数混沌系统的特性. 同时还可以发现对于同处于冬至点月份的 dataset1 和 dataset6 其最大 Lyapunov 指数很接近,同处于分点月份的 dataset2 和 dataset5 其最大 Lyapunov 指数也很接近,至于同处于夏至点月份的 dataset3 和 dataset4,其最大 Lyapunov 指数仅稍微有点差异,这也大概说明了一个问题:相同的劳

埃德季节,变化磁场反映的磁层—电离层中动力学过程和电动力学过程大致是相同的,而不同的劳埃德季节变化磁场则对应着磁层—电离层中不同的动力学过程和电动力学过程.

### 3.5. Lyapunov 指数谱分析

计算 1996 年全年 Z 分量变化磁场的 Lyapunov 指数谱,如图 8 所示,图中每点的 Lyapunov 指数值是该时刻之前数据累计计算的结果(1000 点之前的数据不稳定,故舍去),从图 8 中可以看出根据数据量的不同, Lyapunov 指数是缓慢变化着的,这也说明变化磁场的动力学特性是不断变化着的,或者说变化磁场具有变参数混沌系统的特性.

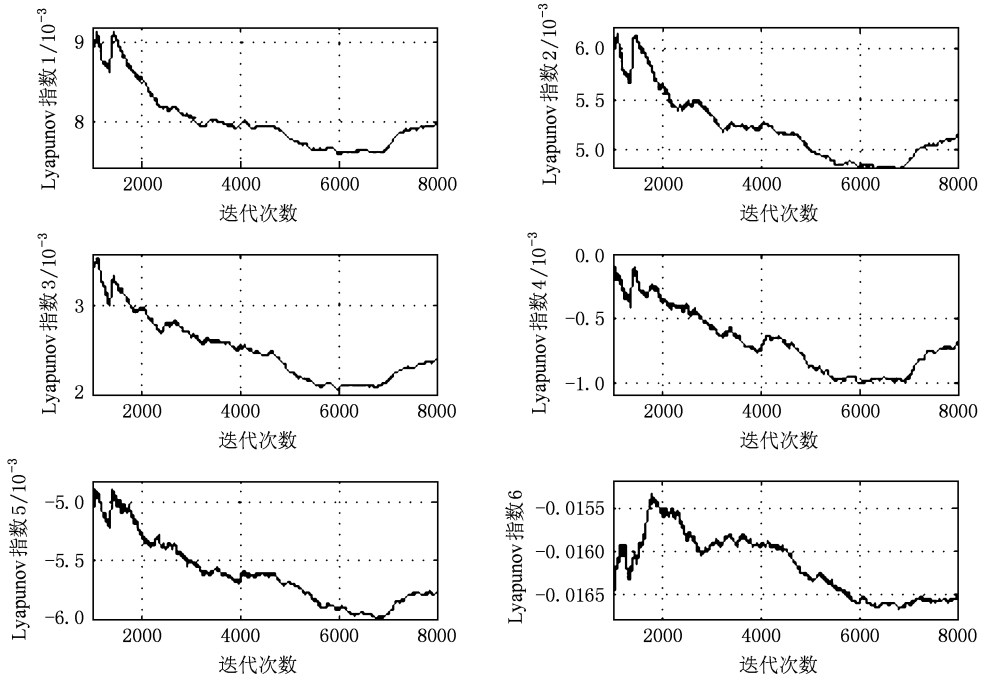


图 8 1996 年全年 Z 分量变化磁场的 Lyapunov 指数谱

## 4. 结 论

本文在前人工作的基础上主要进行了两个方面的工作,一是运用多种方法分别对磁扰较小和磁扰较大时段不同地磁台站变化磁场分量数据进行混沌特性分析,二是对同一地磁台站不同时段变化磁场分量数据进行了变参数混沌特性分析,得出的结论主要如下:

1. 地球变化磁场时间序列确实具有混沌特性,由于是运用多种判别方式分别对磁扰较小和磁扰

较大时段的多个台站数据进行的混沌特性分析,故论据比较充分,结果比较可靠.

2. 模拟地球变化磁场动力学系统所必须的独立变量应该为 6 左右,无论是对多个地磁台站同一时段(分为磁扰较小和磁扰较大时段)的地球变化磁场分量数据,还是对同一台站多个时段的地球变化磁场分量数据进行分析,得到的结果均是如此,这给了我们一个启示,或许能够从混沌理论方面进一步解释变化磁场的起源及其具有的一些特性.

3. 变化磁场时间序列不仅具有混沌特性而且其参数也是在缓慢变化着的,具有变参数混沌系统的

特性. 虽然从直观上并不难理解地球变化磁场可能具有变参数混沌特性, 因为变化磁场本身就起源于一个不断有能量输入和输出的开放的非线性动力学系统, 但本文基于混沌理论从混沌吸引子不变量进行定量分析, 证明了其确实具有变参数混沌特性. 应该说在这方面的分析结果还是比较初步的, 仅仅是证实了其具有变参数混沌特性, 但具体“变”在哪些方面, 即产生变化地磁场的非线性动力学系统的什么参量在“变”, 如何“变”, 怎样利用这个“变”对变化磁场做进一步的分析, 这是我们今后要研究的主要内容.

利用混沌理论对变化磁场进行精确描述与建模预测首先要做的就是验证变化磁场具有混沌特性, 所以本文的研究结果是一个基础, 对变化磁场的物理起源现在研究的已经比较充分, 但在变化磁场的精确描述与建模预测方面目前研究的还不是很深入, 而这恰恰正是目前研究的热点. 对变化磁场进行变参数混沌特性分析, 从变化磁场的动力学特性本质上进行研究, 再结合一些其他信号处理理论与算法, 相信应该可以在变化磁场的精细建模与预测方面取得一定突破.

- [1] Xu W Y 2009 *Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth* (Beijing: University of Science and Technology of China Press) p37 (in Chinese) [徐文耀 2009 地球电磁现象物理学(北京: 中国科学技术大学出版社)第 37 页]
- [2] Bian G, Liu Y C, Yu B, Bao J Y, Bian G L 2007 *Science of Surveying and Mapping* **32** 23 (in Chinese) [边 刚、刘雁春、于 波、暴景阳、卞光浪 2007 测绘科学 **32** 23]
- [3] Wang S C, Zhi H K, Song J S 2004 *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* **25** 18 (in Chinese) [王世昌、郅红魁、宋建锁 2004 地震地磁观测与研究 **25** 18]
- [4] Xu W Y 2005 *Northwestern Seismological Journal* **27** 36 (in Chinese) [徐文耀 2005 西北地震学报 **27** 36]
- [5] Peng F Q 2006 *Hydrographic Surveying and Charting* **26** 73 (in Chinese) [彭富清 2006 海洋测绘 **26** 73]
- [6] Zhao M, Zeng X P, Lin Y F 1997 *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* **18** 56 (in Chinese) [赵明、曾小苹、林云芳 1997 地震地磁观测与研究 **18** 56]
- [7] Wang C, Chen J B, Wang S 1995 *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* **38** 16 (in Chinese) [王 赤、陈金波、王水 1995 地球物理学报 **38** 16]
- [8] Zhang J H 1997 *Journal of Seismological Research* **20** 398 (in Chinese) [张继红 1997 地震研究 **20** 398]
- [9] Gao Y F, Zhou R M 1994 *Chin. J. Space Sci.* **14** 101 (in Chinese) [高玉芬、周荣茂 1994 空间科学学报 **14** 101]
- [10] Gao Y F, Zhou R M, Yang D M 1997 *Chin. J. Space Sci.* **17** 189 (in Chinese) [高玉芬、周荣茂、杨冬梅 1997 空间科学学报 **17** 189]
- [11] Hongre L, Saihae P, Alexandrescu M 1999 *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **110** 157
- [12] Shan L H, Hansen P, Goertz C K 1991 *Geophys. Res. Lett.* **18** 147
- [13] Prichard D, Price C P 1992 *Geophys. Res. Lett.* **19** 1623
- [14] Michael D M, Magulre W B, Chase R P 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1705
- [15] Lv J H, Lu J A, Chen S H 2002 *Analysis and Application of Chaotic Time Series* (Wuhan: Wuhan University Press) p46—50 (in Chinese) [吕金虎、陆君安、陈士华 2002 混沌时间序列分析及其应用(武汉: 武汉大学出版社)第 46—50 页]
- [16] Fraser A M, Swinney H L 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1134
- [17] Cao L V 1997 *Physica D: Nonlinear Phenomenon* **110** 43250
- [18] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physical Review Letters* **50** 346
- [19] Rosenstein M T, Collins J J, de Luca C J 1993 *Physica D* **65** 117
- [20] Ye M Y, Wang X D, Zhang H R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2568 (in Chinese) [叶美盈、汪晓东、张浩然 2005 物理学报 **54** 2568]
- [21] Cui W Z, Zhu C C, Bao W X, Liu J H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3009 (in Chinese) [崔万照、朱长纯、保文星、刘君华 2005 物理学报 **54** 3009]
- [22] Wang G L, Yang P C, Mao Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 714 (in Chinese) [王革丽、杨培才、毛宇清 2008 物理学报 **57** 714]
- [23] Mao Y Q, Wang Y Q, Wang G L 2007 *Climatic and Environmental Research* **12** 676 (in Chinese) [毛宇清、王咏青、王革丽 2007 气候与环境研究 **12** 676]
- [24] Wang Y S, Sun J, Wang C J, Fan H D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6120 (in Chinese) [王永生、孙 瑾、王昌金、范洪达 2008 物理学报 **57** 6120]
- [25] Tan W, Wang Y N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4087 (in Chinese) [谭 文、王耀南 2004 物理学报 **53** 4087]
- [26] Yu D C, Meng Q H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1093 (in Chinese) [禹东川、孟庆浩 2005 物理学报 **54** 1093]
- [27] Wang H, Han Z Z, Zhang W, Xie Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2779 (in Chinese) [王 划、韩正之、章 伟、谢七月 2008 物理学报 **57** 2779]
- [28] Zhang R X, Tian G, Li P, Yang S P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2073 (in Chinese) [张若洵、田 钢、栗 苹、杨世平 2008 物理学报 **57** 2073]
- [29] Wang Y N, Tan W, Duan F 2006 *Chin. Phys.* **15** 89
- [30] Tan W, Wang Y N, Duan F, Li X H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2529

# Chaotic dynamic characteristics of $Z$ component in geomagnetic variation field\*

Niu Chao<sup>†</sup> Li Xi-Hai Liu Dai-Zhi

(*Institute of Scientific Department, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China*)

(Received 15 July 2009; revised manuscript received 16 September 2009)

## Abstract

The article analyzes the chaotic dynamic characteristic of geomagnetic variation field mainly in two aspects: (1) analyzing the chaotic dynamic characteristic of the geomagnetic variation field data observed at the same period (both low geomagnetic disturbance period and high geomagnetic disturbance period) from a series of geomagnetic stations using multiple approaches, in order to get a sufficient proof to validate whether there is chaotic dynamic characteristic in geomagnetic variation field; (2) analyzing the chaotic dynamic characteristic of the geomagnetic variation field data observed at different periods from the same geomagnetic station, aiming at finding out whether there is a parameter-varying chaotic characteristic in the geomagnetic variation field. The results indicate: (1) There is definitely chaotic dynamic characteristic in the geomagnetic variation field time series. (2) In view of chaotic time series phase space reconstruction, the number of independent variables to simulate the geomagnetic variation field dynamical system is about 6. (3) Geomagnetic variation field time series shows not only chaotic dynamic characteristic but also parameter-varying dynamical chaotic characteristic.

**Keywords:** geomagnetic variation field, chaos, parameter-varying dynamical system, Lyapunov exponents

**PACC:** 0545, 9125C

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60705001 and 40974037) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20080430234).

<sup>†</sup> E-mail: niuchao0511@163.com