

# Comparative Analyses of Turnovers of Agricultural Products Futures Based on Nonlinear Chaotic Theories

Qingbin Han<sup>1,2\*</sup>, Zhe Zhu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Marxism, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Email: \*453495875@qq.com

Received: Nov. 4<sup>th</sup>, 2015; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2015; published: Nov. 25<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In the paper, two nonlinear estimation methods based on chaotic theory, surrogate data method and Lyapunov exponents, are used to distinguish the difference of non-stationary signals of the turnovers of agricultural products futures between Zhengzhou Commodity Exchange and Dalian Commodity Exchange from 2009 to 2014. After brief introduction of the corresponding algorithms, two typical different signals are compared by using the above two methods respectively. The obtained results demonstrate that the apparently similar signals are distinguished effectively in a quantitative way with applying above nonlinear chaotic analyses.

## Keywords

Turnovers of Agricultural Products Futures, Chaotic, Surrogate Data Method, Lyapunov Exponents, Nonlinear

---

# 基于非线性混沌理论的期货市场农产品交易分析

韩清滨<sup>1,2\*</sup>, 朱喆<sup>1</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>武汉理工大学马克思主义学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>辽宁科技大学机械学院, 辽宁 鞍山

Email: 453495875@qq.com

收稿日期: 2015年11月4日; 录用日期: 2015年11月22日; 发布日期: 2015年11月25日

## 摘要

本文应用复杂系统理论研究我国期货价格收益率数据的非线性特性。研究采用基于混沌理论的两种非线性参数估计方法(代替数据法和Lyapunov指数估计法)对大连和郑州期货交易所的2009年到2014年的农产品期货交易额进行分析。文中首先对上述两种非线性方法的具体算法进行介绍, 然后对两组期货交易数据进行对比分析。利用代替数据方法对农产品期货价格时序数据进行非线性特性检验。研究结果表明农产品期货价格时序数据中确实存在着非线性成分, 在时域波形上直观相似的农产品期货交易额, 用上述非线性混沌分析的方法可以有效地加以定量区分。

## 关键词

农产品期货交易, 混沌, 代替数据法, Lyapunov指数, 非线性

## 1. 引言

期货市场在农产品流通中发挥着至关重要的作用。一方面, 它为农业生产经营者提供了重要的价格信息, 使得农民可以根据市场需求科学调整种植结构, 合理安排生产。另一方面, 农业生产经营者也可以利用期货市场套期保值功能, 规避价格下跌风险, 保护自身利益。同时, 政府也可以根据农产品期货价格引导与调控农业生产。因此, 农产品期货的波动一直是农业生产经营者、政府宏观调控部门以及金融学者们关注的热点[1]。本文以2009年到2014年大连和郑州期货商品交易所的农产品交易额为例, 应用非线性理论对我国期货市场农产品进行非线性分析, 从而对农产品期货市场内在复杂特性进行研究。

人们通常考虑被分析信号是否具有平稳或非平稳的性质, 而线性或非线性特性则是对其源系统而言[2]。在实际中, 大多数系统所测得的信号是非平稳的, 而系统是非线性的。近年来, 人们采用多种时频分析方法对非线性和非平稳信号进行分析, 包括小波分析、Wagner-Ville分布等[3]-[5]。此外, 还有许多非线性分析的方法也加以应用[6]。但是, 从非线性角度, 基于混沌理论的一些方法, 如Lyapunov指数和分数维, 对于具有非线性特性的非平稳信号分析更为有效。另外, 对信号进行混沌辨识, 并将非线性信号从随机噪声中区分出来往往是比较困难的。这是因为混沌信号和随机噪声信号通常都具有相似的宽频特征。目前区分混沌和噪声的常用方法主要有两类: 维数估计方法和非线性预测法[7][8]。第一类方法是基于随机只能存在无限维吸引子的原理, 而有限维吸引子意味着混沌, 如在Grassberger-Procaccia算法中所指出的那样[9]。第二类方法则是根据时间序列的非线性预测原理、混沌具有不同于随机数据的短期预测性的性质来区分混沌和噪声信号。也就是对于一个混沌时间序列, 它的预测值和实际值之间的相关系数会随预测时间的增加而减弱; 而对于随机时间序列, 这种相关性不会因预测时间的增加而变化。

本文针对由大连和郑州期货交易所的2009年到2014年的农产品期货交易额, 采用两种不同的非线性预测方法进行对比分析, 即代替数据法和Lyapunov指数方法。其中代替数据法主要参考了文献[10]。这种方法可以通过对比混沌信号和噪声信号(包括白噪声和有色噪声)的预测误差分布及其所对应的代替数据集的预测误差分布的差异来实现。Lyapunov指数是某过程在其相平面内相邻轨线的平均发散速率的

量化定义, 正的 Lyapunov 指数(一个或多个)是进行混沌辨识的重要指标[11]。

## 2. 两种非线性预测方法的算法原理

### 2.1. 基于代替数据法的混沌辨识

#### 1) 信号的代替数据集的生成

信号所对应的代替数据集可以由基于时间序列的Gauss随机过程假设得到。本文通过对非Gauss过程有效的非线性直方图变换方法来实现。对于一个原始信号, 一般生成包含128个不同时间序列的代替数据集。

进行直方图变换时, 首先生成一个与原给定时间序列长度相同的Gauss随机数集合, 然后对这个Gauss数据集的顺序进行重排。新的时间序列应是具有Gauss概率密度函数分布的、与原序列相对应的非线性尺度变换的结果。对于原始信号是Gauss随机的情况, 变换后的序列也具有Gauss分布。第一步是, 将时间序列  $x(n)$  进行傅立叶变换, 得到

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2\pi i n k / N} \quad (1)$$

接下来, 通过将上述复数乘以  $e^{i\varphi}$  使其相位角在每个频率上随机化, 其中  $\varphi$  是归一化的、在  $[0, 2\pi]$  区间内变化的随机量, 得到新的  $X'(k)$ 。对其进行逆傅立叶变换, 可以得到Gauss型代替数据序列, 也就是得到具有原始信号相同的幅值分布形式的代替数据序列  $x'(n)$ , 如下式

$$x'(n) = \frac{1}{N} X'(k) e^{2\pi i n k / N} \quad (2)$$

由于上式的逆傅立叶变换是实数, 其相位角具有对称性, 即  $\varphi(k) = -\varphi(N-k)$ 。

#### 2) 统计量的计算

由于低维混沌意味着其系统在短期内可以视为是确定性的, 而随机过程与此不同。可以将预测误差  $\varepsilon$  取为统计量。首先利用状态变量  $\mathbf{x}$  将时间序列  $x(n)$  进行相空间重构, 采用时间滞后的嵌入法, 即

$$\mathbf{x} = \{x_1 = x(n), x_2 = x(n-\tau), \dots, x_d = x(n-(d-1)\tau)\}^T \quad (3)$$

其中嵌入维数  $d$  应该满足  $d \geq 2D+1$ ,  $D$  是系统的真实吸引子维数, 在实际计算过程中往往需要依靠经验选取。注意到这里的  $n$  小于数据长度  $N$ , 即  $1 \leq n \leq N$ 。时间滞后点  $\tau$  的选择有时具有一定随意性, 在这里简单地取作1。

下面将时间序列的数据点集分成长度相等 ( $N_f = N_t$ ) 的拟合集和检验集两部分。在拟合集中, 寻找与当前点欧几里德距离最为相邻的  $k$  个状态点。这  $k$  个当前时刻为  $m$  的状态点与对应的下一时刻  $m+1$  的状态点组成如下  $k$  个点对:

$$[x_1(m), x_1(m+1)], [x_2(m), x_2(m+1)], \dots, [x_k(m), x_k(m+1)] \quad (4)$$

采用如(5)式所示的预测公式对这  $k$  个点对进行拟合

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{b}$  是拟合系数,  $\bar{\mathbf{x}}$  是  $\mathbf{x}$  的预测点。

接下来, 计算检验集  $N_t$  中的所有点对应的预测误差, 将得到  $N/2$  个预测误差。预测误差的定义为由(6)式得到的下一时刻 ( $m+1$ ) 的预测值和实际值的差值。

$$\varepsilon = \bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}(m+1) \quad (6)$$

进行混沌识别的统计量取为上述全部预测误差的平均绝对误差(MAE)。

### 3) 假设检验

对于生成的所有代替数据集, 根据如下公式(7)来计算显著度:

$$\chi = \frac{|Q_D - u_s|}{\sigma_s} \quad (7)$$

其中,  $Q_D$  是由原始信号时间序列计算得到的统计量值(MAE值),  $u_s$  和  $\sigma_s$  分别是由生成的128个代替数据序列计算得到的统计量值的均值和方差。

计算得到的  $\chi$  值可以用于分析原始信号数据和代替数据的差异。如果  $\chi$  是一个较小的数, 这意味着原始信号和它的所有代替数据集具有相同的性质, 因此随机假设可以接受, 也就是原始信号是随机的。相反, 如果  $\chi$  值较大, 可以认为代替数据序列与原始信号有较大的差别, 拒绝随机假设。

更进一步, 为了辨识原始数据序列是随机的还是混沌的, 定义如式(8)所示的置信判据。拒绝随机假设的最大概率也就是相应的显著度  $P$  定义为

$$P = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\chi}{\sqrt{2}}\right) \quad (8)$$

其中  $\operatorname{erf}()$  为数据序列所有元素的误差函数, 其定义如式(9)所示。

$$y = \operatorname{erf}(x) = \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (9)$$

根据经验, 如果计算得到的概率  $P$  值小于0.05, 原始信号数据将显著地不同于它的代替数据集, 这时可以拒绝随机假设, 认为原始信号在95%置信度下是混沌的。如果  $P$  值大于0.05, 则认为原始信号是随机的(95%置信度)。当然, 这里的临界值0.05可以根据实际情况的不同而不同。

## 2.2. Lyapunov 指数的估计算法

Lyapunov指数的估计算法也是基于非线性预测理论的。进行相空间重构后, 考虑两条具有不同初始点的相邻轨线  $L_1$  和  $L_2$ , 它们的初始点分别是  $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{z}_0$ 。这两个初始点之间的距离  $d_0 = |\mathbf{z}_0 - \mathbf{x}_0|$ 。经过时间  $\Delta t$  后,  $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{z}_0$  将沿着各自的轨线到达  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{y}_1$ , 这时新的距离  $d_1 = |\mathbf{y}_1 - \mathbf{x}_1|$ 。在  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{y}_1$  之间选择一个新点  $\mathbf{z}_1$ , 并设  $d_0 = |\mathbf{z}_1 - \mathbf{x}_1|$ 。点  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{z}_1$  分别位于  $L_1$  和  $L_3$  之上。再过时间  $\Delta t$ , 以  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{z}_1$  为起始点的轨线  $L_1$  和  $L_3$  将到达它们对应的新点  $\mathbf{x}_2$  和  $\mathbf{y}_2$ 。这样经过  $p$  次重复, 将得到  $d_i = |\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_i| (i = 1, 2, \dots, p)$ 。Lyapunov指数的计算公式如式(10)所示。

$$\lambda_i = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{1}{p \Delta t} \sum_{i=1}^m \ln \frac{d_i}{d_0} \quad (10)$$

按数值大小进行重排, 得到该时间序列的Lyapunov指数如下

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \quad (11)$$

因为  $p$  是一个较大的整数, 由此得到的Lyapunov指数是每个相点在其轨线上以指数形式发散的统计平均值。在上述Lyapunov指数中, 一个或多个Lyapunov指数可能都是正的。根据非线性理论, 正的Lyapunov指数意味着该时间序列(信号)是混沌的。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 农产品期货交易时域频域分析

选择2009年到2014年大连和郑州期货交易所农产品期货交易额作为研究分析对象。以交易日交易额构建数据序列, 如图1所示。由于是两种性质不同的非线性边界条件, 得到的时间序列呈现出明显的非

平稳信号特征, 其中应该蕴含着不同的特征。两组数据对应的频域分析如图2所示。从图2能看出这两个信号都具有0~50 Hz有限频带分布的特征, 形状上有区别。因此, 仅从图1和图2人们很难区分这两个信号。

### 3.2. 农产品期货交易非线性分析

首先从非线性定性分析的角度对大连和郑州期货交易所农产品期货交易额进行比较。可以利用连续峰值来绘制这两个信号的伪Poincare映射图。设  $A(n)$  是一个时间序列的峰值集合, 则它的伪Poincare映射图是指  $A(n+1)$  对应  $A(n)$  绘出的点图。如果考虑采样误差, 信号的周期点会在伪Poincare映射图表现为一个较小的区域。而伪Poincare映射图中出现分散的点区域时, 根据非线性混沌理论, 表明存在不规则或奇怪吸引子。对于这两组数据, 它们的伪Poincare映射图如图3所示。从图3可以看出, 成交额的伪Poincare映射图在形貌上还是有区别的。

根据前文所介绍的非线性混沌分析理论, 用代替数据法计算得到的关于大连和郑州期货交易所农产品期货交易额的概率  $P$  值见表1。如前面分析, 如果  $P$  值小于0.05, 则拒绝随机假设, 信号的混沌特性得到辨识(95%的置信度)。因此大连和郑州期货交易所农产品期货交易额时间序列都可以认为是混沌时间序列。另外, 从表1中的其它特征值来看, 如  $Q_D$ ,  $u_s$  和  $\chi$ , 也可以对这两组信号加以定量地对比区分。

计算得到的郑州和大连期货交易所农产品期货交易额的Lyapunov指数如表2所示。在估算这两组信号的Lyapunov指数的过程中, 相空间重构的嵌入维数设为5, 滞后点数设为7。从表2可以看出, 大连农产品期货交易额时间序列有2个正的Lyapunov指数, 即1.1860、0.1736, 郑州期货交易所农产品期货交易额时间序列有3个正的Lyapunov指数, 即0.9325、0.1765和0.0105。所以, 这两组信号可以视为是混沌的, 但具有不同的混沌阶数。

## 4. 结论

本文利用基于混沌理论的非线性预测方法对郑州和大连期货交易所农产品期货交易额进行了比较分析。从定量分析研究的角度, 所采用的代替数据法和Lyapunov指数估计方法对区分具有不同非线性性质的时间序列是有效的。

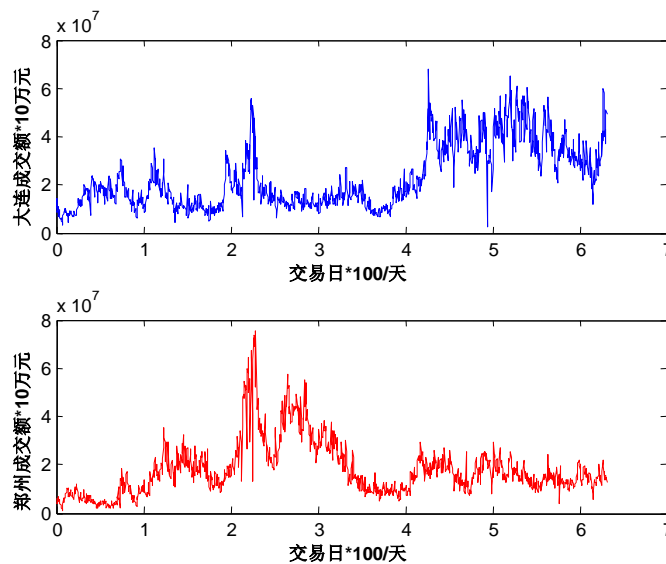


Figure 1. Original signals of turnover of agricultural products futures of D-CE and Z-CE

图1. 大连和郑州交易所农产品期货交易额

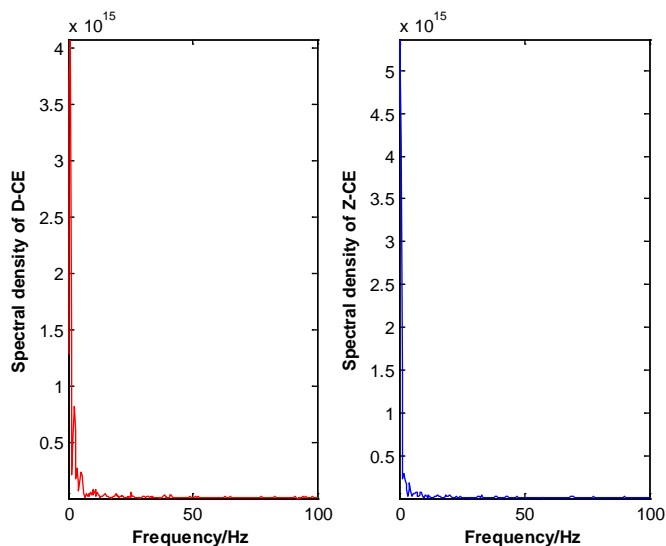


Figure 2. Power spectral densities of the turnover of agricultural products futures of D-CE and Z-CE

图 2. 大连和郑州交易所农产品期货交易总额功率谱密度

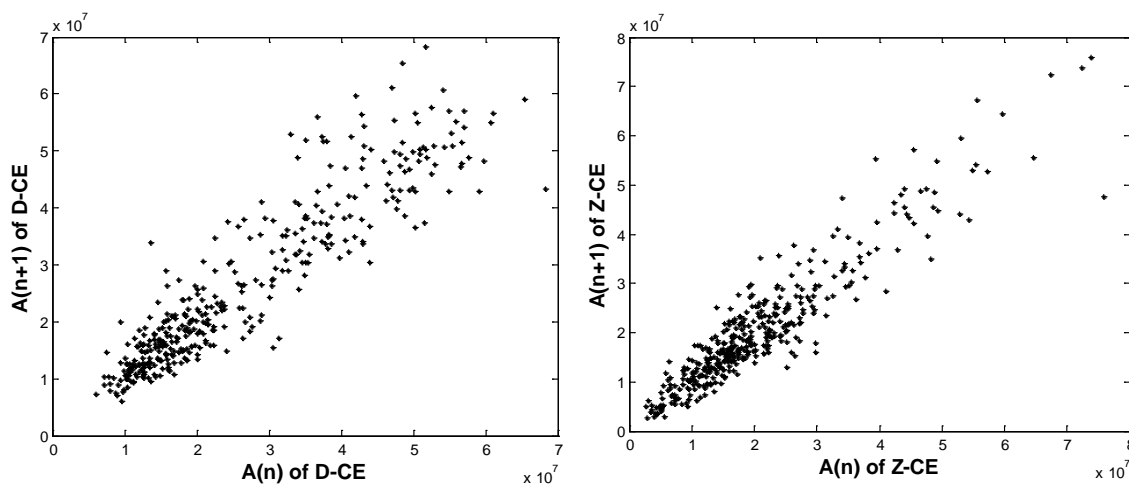


Figure 3. Pseudo Poincare mapping portraits of D-CE and Z-CE

图 3. 大连和郑州交易所农产品期货交易总额伪 Poincare 映射图

Table 1. Characteristic parameter values of D-CE and Z-CE by surrogate data method

表 1. 代替数据法得到的大连和郑州期货交易所农产品期货交易总额的特征参数数值

	$Q_d$	$u_s$	$\chi$	$P$
D-CE	0.1605	1.7324	2.8415	$P = 0.0029$
Z-CE	3.2534	2.0945	2.5238	$P = 0.0076$

Table 2. Lyapunov index of estimated of D-CE and Z-CE

表 2. 估算得到的大连和郑州期货交易所农产品期货交易总额的 Lyapunov 指数

	Lyapunov 指数				
D-CE	1.1860	0.1736	-0.0012	-0.1850	-2.6178
Z-CE	0.9325	0.1765	0.0105	-0.1433	-2.2365

对于郑州和大连期货交易所农产品期货交易额, 代替数据法所得到的特征参数的数值是互不相同的, 估算得到的最大 Lyapunov 指数也是正的。根据代替数据法中的概率值  $P$  的大小可以看出, 郑州交易所农产品期货交易额比大连交易所农产品期货交易额具有更明显的混沌特征, 但是郑州交易所农产品期货交易额有 2 个正的 Lyapunov 指数, 而大连交易所农产品期货交易额有 3 个正的 Lyapunov 指数。

## 参考文献 (References)

- [1] 唐衍伟, 陈刚, 张晨宏. 农产品期货价格联动性实证研究——基于中美玉米期货日收盘价数据[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(2): 181-192.
- [2] Kantz, H. and Schreiber, T. (1999) *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] 宋佳伟, 徐煜明, 肖贤建. 一种基于小波变换和迭代反向投影的超分辨率算法[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(2): 74-77.
- [4] Meltzer, G.S. and Ivanov, Y.Y. (2003) Fault Detection in Gear Drives with Non-Stationary Rotational Speed—Part I: The Time-Frequency Approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **17**, 1033-1047. <http://dx.doi.org/10.1006/mssp.2002.1530>
- [5] Katvonik, V. and Stankovic, L. (1998) Instantaneous Frequency Estimation Using the Wigner Distribution with Varying and Data-Driven Window Length. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **46**, 2351-2325.
- [6] 张玉波. 基于分形市场理论的大宗商品期货市场风险测度与防范[J]. 统计与决策, 2015(10): 140-143.
- [7] 陶慧, 李莹, 马小平. 含噪声多变量混沌时间序列的最大 Lyapunov 指数计算[J]. 河南理工大学学报, 2014, 33(6): 770-775.
- [8] Theiler, J., Eubank, S., Longtin, A., et al. (1992) Testing for Nonlinearity in Time Series: The Method of Surrogate Data. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **58**, 77-94. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90102-S](http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789(92)90102-S)
- [9] Yonemoto, K. and Yanagawa, T. (2007) Estimating the Lyapunov Exponent from Chaotic Time Series with Dynamic Noise. *Statistical Methodology*, **4**, 461-480. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stamet.2007.02.001>
- [10] 何鹏, 周德云, 黄吉传. 利用互信息确定延迟时间的新算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 8-11.
- [11] Kantz, H. (1994) A Robust Method to Estimate the Maximal Lyapunov Exponent of a Time Series. *Physics Letters A*, **185**, 77-87. [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601\(94\)90991-1](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601(94)90991-1)