

国际石油价格复杂网络的动力学拓扑性质^{*}

陈卫东[†] 徐 华 郭 琦

(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

(2010 年 2 月 3 日收到; 2010 年 3 月 3 日收到修改稿)

为了分析国际石油价格波动的变化特征, 依据粗粒化方法, 将 1986 年 1 月 2 日至 2009 年 11 月 17 日美国西得克萨斯原油现货逐日离岸价格转化为由 3 个表示涨落字符 {R, e, D} 构成的 102 种 5 字串组成的价格波动状态为网络节点 (即连续 5 天的价格波动组合), 按照时间顺序连边, 构建原油价格有向加权波动网络, 用复杂网络拓扑结构记录原油价格波动周涨落的信息, 计算网络的度与度分布、聚类系数、最短路径长度等动力学统计量. 结果表明, 石油价格序列的波动网络节点度与累积度分布、节点度值与秩呈幂律分布, 前 32 个节点 (模态) 的节点度值比较大, 且这些石油价格波动模态中都包含表示价格变化上升趋势的字符. 原油价格波动网络部分节点的中介中心性能力较强, 24.5% 的节点承担了网络 80.97% 的中介中心性功能, 平均路径长度 2.285, 距离是 2 和 3 的情况占总数的 86.8%, 从网络结构拓扑性质这一新的角度验证了原油价格变化的复杂特征. 这些对于我们识别具有拓扑统计重要性的节点模态, 理解原油价格波动的内在规律和价格变化信息的传导有一定指导意义.

关键词: 石油价格, 字符序列, 复杂网络, 拓扑结构

PACC: 0590

1. 引 言

石油市场资源在现代工业中具有不可替代的地位. 一方面, 石油居于现代产业链顶端, 其价格的波动通过传导制约着全社会物价演化发展的方向. 另一方面, 石油价格的演化又折射出一定时期地缘政治斗争关系. 一些掌握石油定价权的国家, 通过石油价格的调控, 干预其他国家经济和金融政策以及产业发展方向. 传统方法对石油价格波动的研究主要是建立各种计量经济模型, 解释油价波动的原因和机理, 对其未来的走势和波动做出预测^[1].

石油价格本质上是一个非线性、非平稳的复杂系统, 如何构造分析石油价格复杂网络分析模型, 传统方法很少涉及这方面的内容. 近 10 年来, 随着复杂网络中 BA (Barabási-Albert) 无标度网络^[2]、WS (Watts, Staogtz) 小世界网络^[3]、NW (Newman, Watts) 网络^[4]、ER (Erdős-Renyi) 随机网络^[5]的相继发现, 人们针对实际的交通网^[6]、虚拟社区网络^[7]、通信网^[8]、科研合作网^[9]、知识网络^[10]、排队系统和齐次马尔可夫链网络^[11]、疫情动态行为网络^[12]、生

物系统中的复杂网络^[13]展开的有关复杂网络的拓扑性质、网络的传播与控制^[14]、网络动力系统与稳定性^[15]等方面的研究, 为我们提供了一种新的研究视角. 上述研究大多是以现实中存在的实际关系为基础构建复杂网络, 很少涉及对价格波动这类以概念关系为特征的复杂网络, 其难点是如何描述价格波动的节点和节点之间的联系.

对于复杂性的刻画方法, 一些科学家借助粗粒化描述, 使用符号和符号序列, 指定一个或几个初始字母和一组“生成规则”, 通过符号动力学建立运动轨道和形式语言的联系^[16]. 对轨迹内的任一点, 只考虑某种程度的粗粒化, 用符号表示某一个点的邻域, 给定任意有限长度的符号序列, 其中特定长度的子序列与一个自映射迭代系统轨道对应^[17]. 如, 物理学里对抛物线映射的粗粒化描述, 忽略轨道点的具体数值, 相应地把数值换成字母 L (落在抛物线最高点的左面) 或 R (落在最高点右面). 于是, 数字轨道变成符号序列, 迭代动力学成为符号动力学^[18]. 文献 [19], [20] 依据粗粒化方法, 将中国 1961—2002 年逐日平均温度序列转化为由 5 个特征字符 {R, r, e, d, D} 构成的温度符号序列, 以符号

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 70971093) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-09-0594) 资助的课题.

[†] E-mail: cwd8291@163.com

序列中的 125 种 3 字串组成的温度波动模态为网络的节点,构建有向加权的温度波动网络,得到温度波动网络的度与度分布、聚类系数、最短路径长度等动力学统计量.

考察石油价格走势,不难发现石油价格波动是由价格的上升或下跌的反复变化构成的非线性运动.为了舍去石油价格更小层次上的细节,便于分析油价波动的复杂关系,本文利用国际原油的现货离岸日价格数据,依据粗粒化同质划分方法,把石油价格涨落时间序列转换成符号序列,用模态作为节点,模态之间的关系作为边,构建一个有向加权的原油价格复杂网络,将相关的价格数值编码在网络的拓扑结构中,对网络的动力学统计特征量和拓

扑参数等进行分析,以获取价格波动网络的内在规律性,旨在从复杂网络的角度揭示价格变化的动力学特征.

2. 价格网络的构建

2.1. 数据粗粒化处理

我们选用美国能源署公布的 1986 年 1 月 2 日至 2009 年 11 月 17 日美国西得克萨斯原油现货逐日离岸价格 (Cushing, OK WTI Spot Price FOB)^[21] 序列 $T(t)$, ($t = 1, 2, 3, \cdots, N, N = 6025$) 作为研究数据来源 (见图 1).



图 1 原油现货离岸价

对原油价格我们关心的是其涨跌价位信息,也就是每天价格所处的位置.对于连续的石油价格时间序列,假定 T_t 为当期的油价, T_{t-1} 为前一期的油价,则 $\Delta T = T_t - T_{t-1}$.当 $\Delta T > 0$ 时,表示油价上升,当 $\Delta T < 0$ 时,表示油价下降; $\Delta T = 0$ 时,油价稳定.这里,根据 ΔT 的值的变化,把它与某个字母对应,给出用字母表示的油价波动序列.令每一个 ΔT 对应一个符号 s_i ,

$$s_i = \begin{cases} \text{R} & (\Delta T > 0), \\ \text{e} & (\Delta T = 0), \\ \text{D} & (\Delta T < 0), \end{cases} \quad (1)$$

其中 R,e,D 分别代表石油价格与前一天相比,价格上升、相对平稳、价格下跌.依据这一思想,我们将 1986—2009 年石油价格序列 $T(t)$ 转化为相应的符号序列

$$S_T = (s_1 s_2 s_3 \cdots) \quad (s_i \in (\text{R}, \text{e}, \text{D})). \quad (2)$$

在定义石油价格符号序列的基础上,对石油价格时间序列进行粗粒化处理,也就是区间同质划分,将整个系统区间平均分成有限个子区间,赋予每个子区间一个字符串,这样就把整个系统区间转换为一个符号序列,对粗粒化符号序列的研究等价于对相应时间序列的研究.由于粗粒化过程舍去了

小层次上的细节,粗粒化形式符号序列又具有有限性,这就使得出的结论更有利于揭示油价涨跌波动的本质.值得注意的是,结论的有效性在很大程度上依赖于粗粒化的精度.这就要求所选定的符号种类不能过多,每一个符号串尽可能代表石油价格变化中的某一种基本的、相对独立的模态.

在石油价格数值序列转换为符号序列过程中,时间间隔选取的大小不同,时间序列的分辨率也不同;对同一个时间序列,其对应的符号序列长度,各字符的占有量 $N(R)$, $N(e)$, $N(D)$ 以及字符之间的关联性也会不同.为了保持理论分析与实际时间间隔的一致性,这里我们以每周的油价变化(五天为一组)作为模态研究对象,由上述 R, e, D 三种符号

组合成 5 字符串代表一个节点,表示周的变化模态,研究连续两周之间的石油价格波动规律.

2.2. 石油价格网络的构建

对石油价格粗粒化处理的过程是将油价时间序列转换成符号序列的过程.我们以周为节点,把每周定义为由连续 5 个涨落构成的 5 字串,每一字符串代表这一周的波动模态.从理论上讲,对整个石油价格时间序列,共有 243(3⁵) 种不同的波动模态.它们是 {RRRRR, RRRRD, RRRDD, RRDDD, RDDDD, DDDDD, DDDDe, RRRRe, ...}. 实际结果是 102 波动模态,其余 141 种没有出现,这就大大减少了信息处理量,石油价格波动模态如图 2 所示.

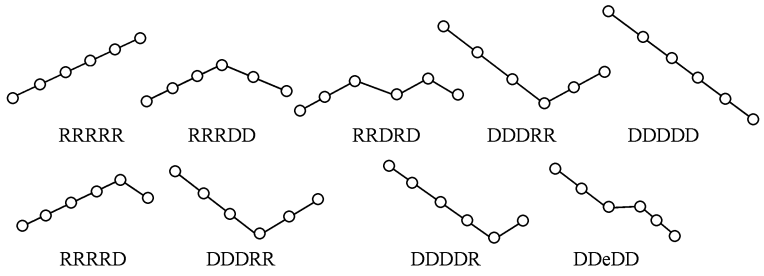


图 2 石油价格波动模态示意图

石油价格符号序列 S_T 是由 102 种不同的模态相互转换构成的.转换过程中,模态之间存在着信息传递或支配作用,后一个模态的出现是以前一个或多个模态为基础,体现了一定的记忆性和多元化的特征.因此,模态之间的联系形式是“有向”的,联系强弱程度也各不相同,各种不同的联系便构成了石油价格复杂网络系统.为此,我们引入一个加权网络来描述石油价格序列中各波动模态之间的联系和作用,以反映价格波动特征.

以周波动模态作为石油价格网络节点,按照时间顺序将本周到下周的转换作为边,构建相对独立的价格波动网络.1986 年 1 月 2 日至 2009 年 11 月 17 日,美国西得克萨斯原油现货离岸价一共 6029 个,构成 1205 个 5 字串波动模态.每一字符串代表一周的价格波动状态.边为前一个节点指向它的下一个节点,表征了一种石油价格由一种模态向另一种模态的转变过程;如果网络中的两个节点之间有多条互不相交的连接通路,则并联连接的通路数就是这两个节点连边的权重.在我们所构建的网络中,石油价格符号序列为 DDDDDDDDDDRDDDeD-DDDDRDDDDRRDDeDDDeDeDDDeDRDDeDRDDe-

RRDDRDDDDRDeDDRDRDDReD...,以 5 字串的元结构 {DDDDD, DDDDR, DDDDe, DDDRD, DDDRR, DDeDD, DDeDe, DDeDR, DDeRR, DDRDD, DDRDe, DDDR, DDeRR, DDRDD, DDRDe, DDRDR, DDeD, ...} 作为网络的节点,则网络节点的有向连接形式为 DDDDD→DDDDR→DDDeD→DDDRD→DDDRR→DDeDD→DDeDe....

由此,我们可以构建体现石油价格五种序列内部各波动模态间相互作用关系的有向含权网络,其权重就是两个节点之间的直接连边次数,反映了两个节点之间的关联程度,如图 3 所示.

图 3 是石油价格序列节点构建的复杂网络,边线标注的数字反映了节点之间关联程度的强弱.例如,节点与节点之间的连线数字越大,说明石油价格两种波动模态之间的关联程度越密集,这两种变化模态在长期的石油价格变化中转换的次数多.石油价格波动网络的有向性直观地反映了各种石油价格波动模态节点的变化方向.节点之间连边关系的权重反映着长期以来石油价格资料中一种变化模态向另一种变化模态的转换频数,研究不同变化模态之间转换的方向和频数,可以为石油价格预测

表 1 石油价格网络各种波动模态的节点度大小排序

节点	RRDDR	RDDDR	DRDRD	RRDRR	DDRRR	DRDDD	RDDRD	RRRDR
度	52	45	40	39	38	38	38	38
序号	1	2	3	4	5	6	7	8

节点	RDDRR	RRRRR	DDRDD	DRRDD	...	DDeDD
度	37	37	36	36	...	1
序号	9	10	11	12	...	102

符 D 出现的次数为 31 次,连续 2 天出现下跌的字符 DD 出现 19 次,代表连续 3 天下跌的字符 DDD 出现 8 次,连续 4 天下跌的字符 DDDD 出现 3 次.而代表石油价格值平稳不变的字符 e 出现的次数为 0. 上升字符和下降字符对称出现,上升或下跌模态的直接转换概率高达 86.71%,说明石油价格模态变化中,上升和下跌是波动主要的转换模态,平稳的模态几乎不存在.这在一定程度上反映出全球化背景下石油价格变化的激烈程度.从统计前 10 个节点,我们还发现代表价格上升的字符 R 出现的次数为 10 次,连续 2 天上升的字符 RR 出现 6 次,代表连续 3 天上升的字符 RRR 出现 3 次,连续 4 天上升的字符 RRRR 出现 1 次.代表价格下跌的字符 D 出现 9 次,连续 2 天出现下跌的字符 DD 出现 6 次,代表连续 3 天下跌字符 DDD 仅出现 2 次.显然,代表上升和下跌的字符不对称,说明石油价格上升模态出现的次数越来越多,而且在与其他变换模态之间的关联程度越来越强.石油价格波动模态的强关联性质与 2001 年以来尤其是 2008 年以来,全球石油飙升有着直接的关系.从长期来看,石油价格上升的趋势强于下跌的趋势,油价整体呈上升趋势.石油价格网络的度与累积度分布的关系如图 4 所示.

从图 4 可以看出,石油价格网络度与累积度分布以及双对数关系较为复杂.整体上表现为较少的节点具有较高的度值,大部分节点度值较低.度与累积度分布双对数,用最小二乘法回归,得到回归方程 $y = -0.537x - 0.1044$,趋势线回归系数 $R^2 = 0.7713$,说明石油价格波动网络整体上服从幂律分布.从图 4 可以看出,102 个节点分为两部分,度值较高的前 32 个节点度值在 51—23 之间,最大度值为 51,最小值为 23.后 70 个节点度值大部分在 1—5 之间.取前 32 个节点做双对数曲线,用最小二乘法回归,得到回归方程 $y = -4.3205x + 5.6907$,趋势线回归系数 $R^2 = 0.7887$,结果可信程度较高.双对数坐标系下,这部分石油价格波动网络也服从幂律分布,如图 5(a)所示.同样后 70 个节点也是服从幂

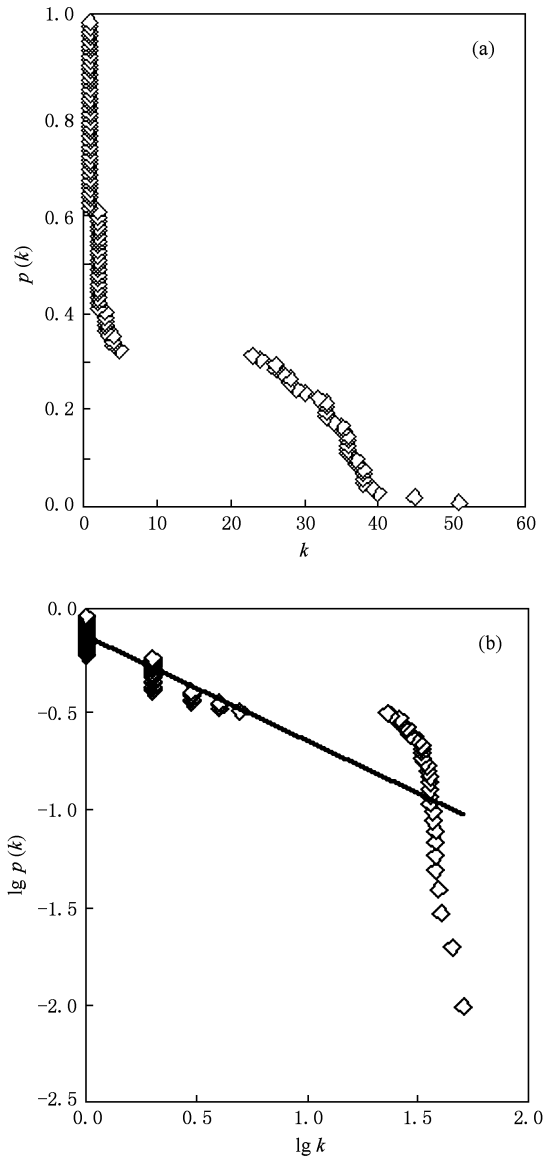


图 4 石油价格网络节点度与累积度分布关系 (a)度与累积度分布, (b)度与累积度分布双对数曲线

律分布, $y = -0.6374x - 0.0985$, $R^2 = 0.8427$, 如图 5(b)所示.

对石油价格网络中的度值由高到低排序后得到价格模态的秩 r (即等级). 节点的度值与秩的关

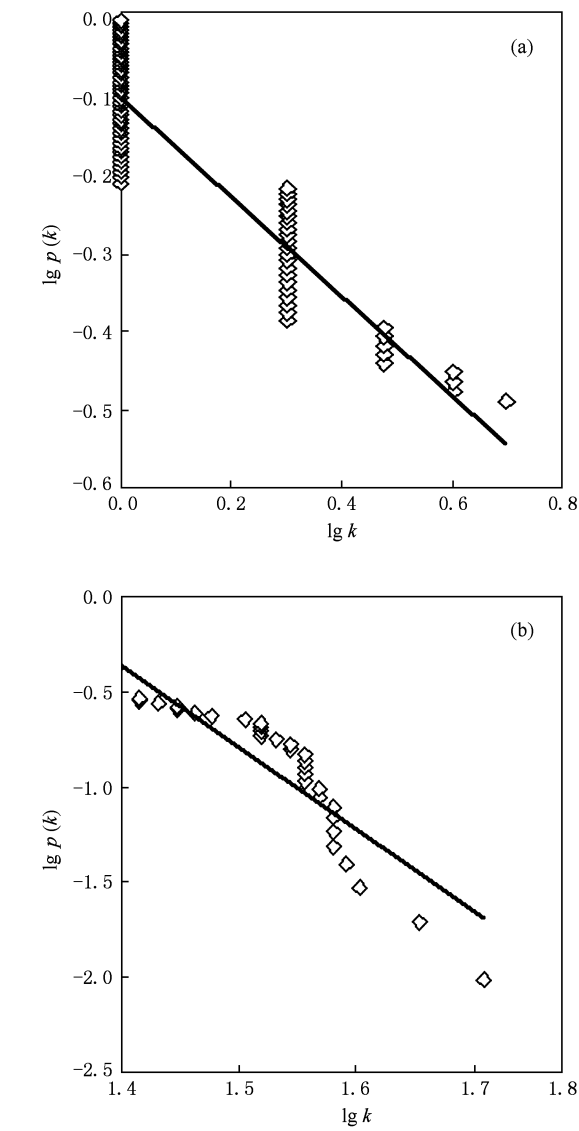


图5 石油价格网络分段幂律分布 (a)前32个节点双对数曲线, (b)32—102个节点双对数曲线

系如图6所示。从图6可以看出,石油价格网络节点度值与秩也满足幂律关系,得回归方程 $y = -4.3205x + 5.6907$, 趋势线回归系数 $R^2 = 0.7887$,结果可信程度较高,幂指数为 -1.43 。

石油价格序列的波动网络节点度与累积度分布、节点度值与秩的幂律分布,意味着各种石油价格波动模态出现的次数在一个较长的时间段内遵循较多的模态出现的概率较少,较少的模态出现的概率大。石油价格涨落变化的这种规律可能是由于人们对于石油价格预期判断中的从众心理影响所致。说明在石油价格的模态转变中,外界突发事件或者利益驱动下的人为因素都会给油价波动带来影响。这从一个侧面在一定程度上反映了石油价格

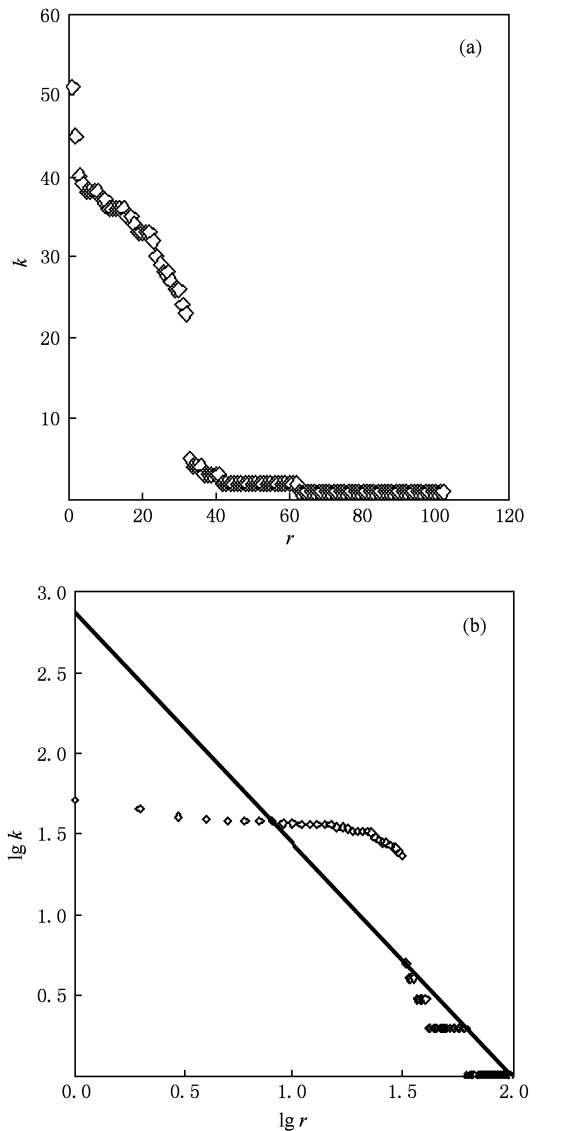


图6 石油价格网络节点的度值与秩的关系 (a)度值-秩关系曲线, (b)度值-秩双对数曲线

复杂的内在动力学本质特征。反映了在现实世界中,网络规模随时间的变化是非线性的特征^[21,22]。

3.2. 加权聚类系数

聚类系数反映网络的紧密程度,整个网络的聚类系数是所有节点的聚类系数的平均值。石油价格波动网络是含权网络,在考虑边权情况下,对于网络中某一节点的聚类系数可以定义为

$$C_i^\omega = \frac{1}{\nu_i^\omega (k_i - 1)} \sum_{j,k} \frac{\omega_{ij} + \omega_{ik}}{2} a_{ij} a_{jk} a_{ik}, \quad (4)$$

其中, ω_{ij} 表示两个节点 (i, j) 连边的边权, ν_i 表示节点 i 的点强度,定义为

$$\nu_i = \sum_j \omega_{ij},$$

即节点 i 的邻边边权之和, k_i 为节点 i 的度, $\sum_{(k>j)} a_{ij} a_{jk} a_{ik}$ 表示网络中包含节点 i 的三角形的总数. 很明显, 当且仅当 $0 < C < 1$, $C = 0$ 时所有的节点均为孤立节点, 没有任何连接边; 当且仅当 $C = 1$ 时, 网络是全局耦合的, 即网络中任意两个节点都直接相连. 图 7 给出了石油价格网络的聚类系数随节点度的分布情况. 由于石油价格序列是非线性、非平稳的复杂系统, 石油价格网络中的差异波动比较明显, 所反映出来的特性更加强烈, 表现出更高的复杂性. 石油价格聚类系数随节点度的分布如图 7 所示.

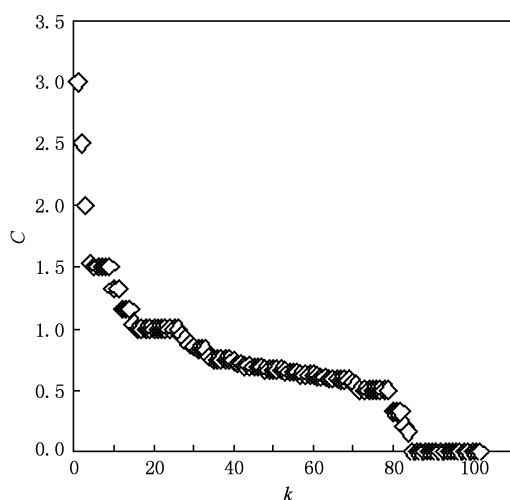


图 7 石油价格聚类系数与节点度的分布关系

从图 7 可以看出, 在石油价格网络中, 聚类系数的大小随节点度的变化幅度较大, 度值小的节点聚类系数高, 度值大的节点聚类系数低, 说明它既不是完全随机的, 又不同于小世界网络. 石油价格的网络群聚特性明显表现在随时间的变化, 群发性有时反映在小时间尺度上, 有时会反映在大时间尺度上. 正如实际的油价波动一样, 既有 10 年一次的大的周期波动, 又有年度内的涨跌回落, 还有月、周的短期变化特征. 石油价格波动网络聚类系数的这种特点, 为我们预测石油价格变化的群发性具有一定的参考价值.

3.3. 平均最短路径长度

两个节点 i 和 j 之间的距离为 d_{ij} (即任意两个节点相互连接所要经过的连边数), 网络的平均路径长度定义为任意两个节点之间距离的平均值. 在有向网络中, 网络的平均路径长度定义为

$\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$, 其中 N 为网络的节点数. 计算石油价格波动网络的平均路径长度发现, 石油价格波动网络聚类系数为 1.005, 各种波动模式之间的平均路径长度为 2.285, 平均节点度为 11.689.

研究中发现价格波动模式距离是 1 的情况出现了 1238 次, 占总数的 12%, 距离是 2 的情况出现了 5088 次, 占总数的 48.6%, 距离是 3 的情况出现了 3934 次, 占总数的 38.2%, 距离是 2 或 3 的合计占总数的 86.8%. 说明石油价格波动的周模式转换平均最短路径长度小, 且某种波动模式向另一种模式转换不需要经过较长的时间, 模式转换表现出短程关联性. 石油价格表现出较高的聚类系数、较小的平均路径长度和大的平均节点度. 石油价格网络中各种价格波动模式之间大多表现出短程相关性, 各种石油价格波动模式存在小规模群簇, 群簇内部节点之间的关联较好, 而群簇之间的关联则较差, 因此有长程关联和短程关联并重的情况. 如地缘政治、经济危机、欧佩克 (OPCE) 等对油价的控制等, 可能是不同部分波动模式起主要作用, 这些波动模式构成了一个群簇, 不同的影响则对应了不同的群簇.

平均路径长度 2.285, 距离是 1 的情况出现了 1238 次, 占总数的 12%, 距离是 2 的情况出现了 5088 次, 占总数的 48.6%, 距离是 3 的出现 3934 次, 占总数的 38.2%, 距离是 2 和 3 合计占总数的 86.8%. 说明石油价格波动的周模式转换频繁, 通过 2—3 周就转换一次. 这为预测石油未来 2—3 周的变化提供了依据.

3.4. 石油价格网络的中介中心性

复杂网络中, 不同的节点处于不同位置, 节点的中介中心性 (BC) 反映的是该节点在网络中任意两个节点的连接路径上所起的作用. 节点的拓扑重要性等价于该节点与其他节点的连接性, 失去此节点, 与之相关的节点之间将失去连接. 节点的中介中心性提供了网络拓扑结构中模式上更多的全局信息. 对于石油价格波动网络而言, 用中介中心性可以衡量各种模式在石油价格网络拓扑结构中所处位置的枢纽程度, 更好地认识石油价格变化的中间过程, 为价格预测提供理论依据.

石油价格网络节点中介中心性 f_k 测度定义如下: 设 $C(i, j)$ 是节点对 (i, j) 之间所有最短路径的总数, 路径的长度就是路径通过的各条边的权重的

总和. 这些路径中通过中间节点 k 的路径数为 C_k , 记

$$f_k(i,j) = \frac{C_k(i,j)}{C(i,j)}, \tag{5}$$

则节点 k 的中介中心性测度 f_k 为所有节点对 $f_k(i,j)$ 的和^[19]

$$f_k = \sum_{(i,j)} f_k(i,j) = \sum_{(i,j)} \frac{C_k(i,j)}{C(i,j)}. \tag{6}$$

计算石油价格波动网络中各个节点的中心参数 f_k 的值, 并把它们按数值百分比进行排序, 如表 2 所示.

表 2 石油价格网络节点中介中心性

节点	DDRRR	RRRRD	RDDRD	RRRRR	RRDDR	DDRRR	RDRDR	DRDRR	RDRRR
$f_k/\%$	4.5116	4.4154	4.288	4.2263	4.1606	4.0722	3.6665	3.5978	3.5637
等级(r)	1	2	3	4	5	6	7	8	9

节点	RRRDD	RDDRR	DDRDD	DRRDD	DDRRD	DDDRD	DRDDR	...	DeReR
$f_k/\%$	3.4511	3.4251	3.1293	3.1099	3.0844	2.8715	2.8191	...	0
等级(r)	9	10	11	12	13	14	15	...	102

就节点的 f_k 值而言, 在价格波动网络中, 各节点的 f_k 值之间的差异是比较明显的, 其中前 25 个节点 (占节点总数的 24.5%) 对整个网络的中介中心性的贡献率达到 80.97%, 平均贡献率为 3.25%, 如图 8 所示. 尤其是前 6 个节点 (占节点总数的 5.8%) DDRRR, RRRRD, RDDRD, RRRRR, RRDDR, DRRRR 中介中心性能力均在 4% 以上, 对网络的中介中心性的贡献达到了 25.67%, 前 43 个 (42.16%) 节点贡献率达到 99.54%. 说明对于整个石油价格复杂网络拓扑性质是由前 43 个节点决定的.

转换以及信息传输过程具有重要的意义, 它们在一定程度上可以作为石油价格波动模态之间转换的前兆, 对其研究将有助于更好地把握价格变化的规律性. 价格波动网络中节点中介中心性值的差异涨落较明显, 说明石油价格系统在石油价格波动网络的节点中介中心性上表现出高的复杂性, 反映出在全球经济影响下石油价格涨跌起伏变化的激烈程度. 同时, 我们还发现在石油价格波动网络中, 高频出现的节点和低频出现的节点之间的中介差异性显著, 这可能有助于石油价格的预测.

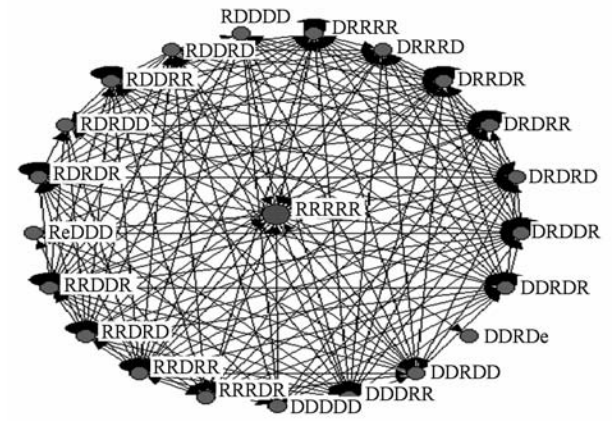


图 8 石油价格网络节点中介性贡献率达到 80.97% 的节点

我们将其中的前 43 个节点, 按照节点的中介中心性等级与 BC% 取对数, 如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 双对数坐标系下, 等级数与中心性呈幂律关系, 从网络的中介中心性来看, 意味着任意两个价格波动模态之间的转换经过这些波动模态中转的概率较大. 这几种价格波动模态对控制其他模态的

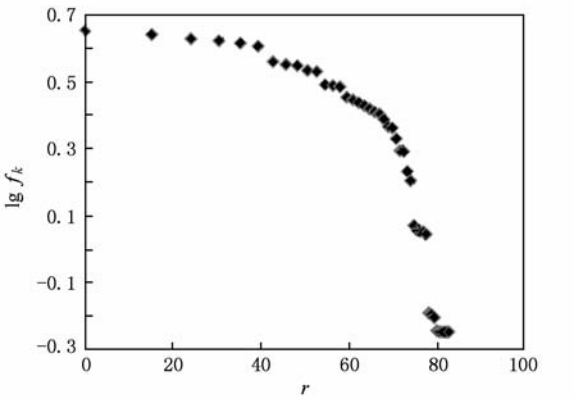


图 9 等级数与中介中心性双对数关系

4. 结 论

由于石油价格波动影响因素的复杂性, 传统的方法在解释波动规律方面尚未取得突破性进展. 本文对石油价格资料做粗粒化处理, 舍弃小尺度上的细节作用, 用复杂网络研究石油价格波动, 研究各

字符串构成模态之间的关系. 研究发现, 这种简单关系蕴涵着石油价格波动模态的相互关系和相互作用信息, 反映了石油价格序列动力学特征规律及其普遍性. 通过构建有向加权石油价格波动网络和网络的动力学统计量——节点度分布、聚类系数和平均最短路径长度等, 进行比较分析发现: 1) 石油价格序列的波动网络节点度与累积度分布、节点度值与秩呈幂律分布, 在一定程度上反映了石油价格复杂的内在动力学本质特征. 对于了解石油价格模态转变中, 外界突发事件或者利益驱动下的人为因素给油价波动带来的影响具有重要价值. 前 32 个节点(模态)的节点度值比较大, 这些节点所代表的石油价格波动模态, 在石油价格变化过程中起到重要的直接关联作用, 且这些石油价格波动模态中大都带有上升字符的价格变化趋势, 在一定意义上揭示了 2001 年以来尤其是 2008 年以来全球石油上升的趋势. 2) 石油价格波动网络中, 表现出较高的聚类系数、较小的平均路径长度和大的平均节点度. 各种石油价格波动模态之间大多表现出短程相关性, 存在小规模群簇, 群簇内部节点之间的关联较好, 而群簇之间的关联则较差, 因此有长程关联和短程关联并重的情况. 如地缘政治、经济危机、欧佩克(OPCE)等对油价的控制等不同的影响因素对应

了不同的群簇, 对不同波动模态起主要作用. 3) 石油价格波动网络节点的中介中心性具有明显的差异性, 其中前 25 个节点(占节点总数的 24.5%)对整个网络的中介中心性的贡献率达到 80.97%. 前 43 个(42.16%)节点承担了网络 99.54% 的中介中心性功能. 从网络的中介中心性角度来看, 这意味着这些节点所代表的价格波动模态在控制信息的变化与传输过程中具有重要的意义. 表明石油价格网络在统计意义下不是随机的, 某些连续的波动特征频繁出现在石油价格符号序列中, 说明这些频繁的变化模态是石油价格转变的前兆. 从这一观点来看, 石油价格的波动并不是无关联的随机过程, 识别这些具有拓扑统计重要性的节点模态对于我们理解石油价格变化的规律性以及信息的传输是有积极意义的.

本文的研究立足于对数据的统计分析, 由于受所收集数据的限制, 研究结果在解释实际石油价格波动规律的深度上难免受到一定的影响. 今后, 如何建立石油价格波动模态与外部因素的影响关系, 探讨网络模态与突发事件前兆特征, 分析石油价格波动的动力学行为与价格传导的关系以及石油价格复杂网络幂律的波动范围与动力学稳定性的关系等, 都是今后需要深入研究的内容.

-
- [1] Robert K K, Ben U 2009 *Energy Economics* **31** 550
 - [2] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
 - [3] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 6684
 - [4] Newman M E J 1999 *Phys. Lett. A* **263** 341
 - [5] Erdős P, Rényi A 1960 *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* **5** 17
 - [6] Meng Q K, Zhu J Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3632
 - [7] Zhang L, Liu Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5419 (in Chinese) [张立、刘云 2008 物理学报 **57** 5419]
 - [8] Chen H L, Liu Z X, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6068 (in Chinese) [陈华良、刘忠信、陈增强、袁著祉 2009 物理学报 **58** 6068]
 - [9] He Y, Zhang P P, Xu T, Jiang Y M, He D R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1710 (in Chinese) [何阅、张培培、许田、姜玉梅、何大韧 2004 物理学报 **53** 1710]
 - [10] Cao Z W, Li Y X, Luo J H, Tao L, Yu H, Zhao J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3571
 - [11] Guo J L 2007 *Chin. Phys.* **16** 1239
 - [12] Zhang H F, Fu X C, Wang B H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3639
 - [13] Fang J Q, Wang X F, Liu Z R 2004 *Sci. Techn. Rev.* **2** 9 (in Chinese) [方锦清、汪小帆、刘曾荣 2004 科技导报 **2** 9]
 - [14] Xu D, Li X, Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 (in Chinese) [许丹、李翔、汪小帆 2007 物理学报 **56** 1313]
 - [15] Qin S, Dai G Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 383
 - [16] Hao B L 1999 *Science* **51** 3 [郝柏林 1999 科学 **51** 3]
 - [17] Ke D G, Zhang H, Tong Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 534 (in Chinese) [柯大观、张宏、童勤业 2005 物理学报 **54** 534]
 - [18] Huang W Q, Zhuang X T, Yao S 2009 *Physica A* **388** 2956
 - [19] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7380 (in Chinese) [周磊、龚志强、支蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 7380]
 - [20] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7351 (in Chinese) [周磊、龚志强、支蓉、封国林 2009 物理学报 **58** 7351]
 - [21] <http://tonto.eia.doe.gov>
 - [22] Li J, Wang B H, Jiang P Q, Zhou T, Wang W X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4051 (in Chinese) [李季、汪秉宏、蒋品群、周涛、王文旭 2006 物理学报 **55** 4051]

Dynamic analysis on the topological properties of the complex network of international oil prices^{*}

Chen Wei-Dong[†] Xu Hua Guo Qi

(*Department of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 3 February 2010; revised manuscript received 3 March 2010)

Abstract

To analyze the dynamic of crude oil price data using homogenous partition of coarse graining process, OK WTI Spot Price FOB from January 1986 to November 2009 was transformed into symbolic sequences consisting of three characters (R, e, D). The vertices of the oil price fluctuation network were 5-symbol strings in the number of 102 (i. e. 102 fluctuation patterns in durations of 5 days) linked in the network's topology by time sequence. It contained integrated information about interconnections and interactions between fluctuation patterns of oil price in network topology. The dynamical statistics of the degree, degree distribution, clustering coefficient and the shortest path length were calculated. The results indicated that the degree of the oil price sequence fluctuation network and the accumulated degree distribution show a power-law distribution, so did the node degree and the rank. The degree of the former 32 nodes was larger, and most oil price fluctuation models had the character with the escalating trend. Some nodes of the oil price fluctuation network had stronger ability in between centrality, and 24.5 percent of the nodes took part in the 80.97 percent of Between Centrality function. The average path length was 2.285, and the paths with length 2—3 were 86.8 percent, which verified the complex characteristics of the oil price fluctuation in network topology. This paper had guiding significance in identifying the topological importance of the node model and understanding the inherent law and information of the oil price fluctuation.

Keywords: oil price, symbolic strings, complex network, topological structure

PACC: 0590

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70971093) and the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-09-0594).

[†] E-mail: cwd8291@163.com