

原油期货与现货价格联动性的复杂网络拓扑性质*

高湘昫^{1) 2)} 安海忠^{1) 2)†} 刘红红²⁾ 丁颖辉²⁾

1) (中国地质大学(北京)资源环境管理实验室, 北京 100083)

2) (中国地质大学(北京)人文经管学院, 北京 100083)

(2010年12月5日收到; 2011年1月26日收到修改稿)

选取2002年11月25日至2010年9月24日的国际原油期货价格和中国大庆原油现货价格作为样本数据,用于研究原油市场中期货价格和现货价格之间的联动变化规律. 将期货与现货价格的联动性关系转换为由 $\{Y, O, N\}$ 组成的联动性符号序列,用符号序列映射为联动性的波动状态;该波动状态由5个符号组成的滑动窗来表示,由此构成177种联动性波动模态. 将该模态作为网络节点,模态之间的转换作为边,构建期货与现货价格加权联动性复杂网络. 对联动性复杂网络的点强度、强度分布、加权集聚系数、平均最短路径、介数集中性和小团体性等拓朴性质的分析结果显示,前32个节点的点强度较大,其累计强度分布达73.27%,且这些节点中同向联动性占主要地位;加权集聚系数与点强度并没有表现出良好的相关性,网络中形成了一些小群簇,并且由这些小群簇构成了以YYYYY和NNNNN为核心的两大群簇,平均最短路径长度为6.969;网络中部分节点的介数集中性较强,11.3%的节点承担了1/4的中介功能;该网络中只出现一个次级网络,有紧密关联的节点形成的小团体性不高. 从复杂网络拓朴性质的角度研究其复杂性特征,发现在长期原油市场中这两种价格联动性的变动具有幂律性、群发性和周期性等规律. 这些规律为把握原油期货市场、利用期货价格预测现货价格波动,及现货价格的制定和规避市场风险提供科学依据.

关键词: 原油, 期货价格, 现货价格, 联动性

PACS: 89.30.aj, 89.75.Fb

1. 引言

原油被称为“黑色黄金”,属于国家的重要战略资源,作为一种重要的能源和化工原料,在经济发展和国家安全方面都具有举足轻重的地位. 原油价格的起伏波动直接关系着世界经济的发展,而在当今社会中,很多因素都时刻影响着原油价格的波动. 原油价格包括期货价格和现货价格,在长期的原油市场中,两者有着紧密的关系,具有一定的联动性. 联动性是指具有相关联系的几项指标,判断某一项指标随另一项指标变化方向一致性的程度,描述指标间共同的长期均衡关系或长期同步运动的趋势. 一种价格的涨跌往往会影响到另外一种价格甚至是整个市场系统的波动,尤其对于原油这样重要的能源和化工原料,其价格的波动影响着整个社会经济系统. 通过研究两种价格间的联动性,探

索波动规律,为价格制定、风险投资和规避经济社

会风险提供参考依据. 原油期货价格和现货价格的联动性具有方向性,如果某一项指标增加,而另一项指标同样表现为增加,或者某一项指标减少,而另一项指标同样表现为减少,则称为两个指标具有同向联动性;如果某一项指标增加,而另一项指标表现为减少,或者某一项指标减少,而另一项指标表现为增加,则称为两个指标具有反向联动性. 传统方法对原油期货价格和现货价格之间关系的研究主要通过协同理论^[1]、因果关系检验^[2]、条件方差^[3]等各种计量方法建立模型,来研究两者之间的协整和均衡关系. 但是对于两种价格之间的联动关系研究,传统方法很少涉及. 由于期货价格与现货价格时刻都在发生着变化,两种价格的联动性也时刻发生着改变,因此两者之间的联动关系构成一个非线性、非平稳的复杂系统.

* 教育部人文社会科学规划基金(批准号:10YJA630001)和国土资源部科研计划(批准号:GT-YQ-QQ-ZH-02-03)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ahz369@163.com

复杂网络是近年来兴起的研究热点,主要思想是将真实系统中各部分之间的联系看做一个复杂网络,以网络的形式来描述真实系统中各部分之间的关系,强调系统结构的拓扑性质,从而更好地认识现实系统的本质特征. 20世纪90年代,人们发现现实世界中绝大多数的网络既不是完全规则,也不是完全随机的,于是提出了一些符合实际的网络模型,如小世界模型^[4]、NW网络模型^[5]、BA无标度网络模型^[6]、阿波罗无标度网络模型^[7]、广义无标度动态网络模型^[8]和幂律模型^[9]等. 近年来一些经济物理学家研究了加权科学家合作网络的统计特性^[10],将复杂网络应用于交通运输网络^[11]、中药方剂的竞争合作网络^[12]、虚拟社区网络^[13]、生物系统^[14]、基于神经网络的电力市场价格分析^[15]等领域. 由此展开了复杂网络的拓扑性质^[16]与动力学相互作用的演化模型^[17]、加权网络上的传播动力学问题^[18]及复杂网络分析方法的研究^[19]. 这些研究主要是将现实的各个要素及要素间的关系作为网络节点和边,从而构建复杂网络模型,发现这些网络是具有幂律分布的小世界网络,为本文的研究提供了基础. 但是上述研究主要是针对现实中的单个要素展开,对要素间联动关系及其波动状态的研究很少,研究难点是如何将要素间的关系抽象成为节点,以及对节点之间关系的描述.

国内外学者利用符号和符号序列的粗粒化描述复杂性,通过符号动力学建立运动轨迹和形式语言的联系,用符号表示某一点的邻域,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^[20]. 对于温度波动的分析,依据粗粒化,将中国近40年每日的平均温度序

列转化为由5个特征符号{R, r, e, d, D}构成的温度符号序列,以符号序列中的125种3符号组成的温度波动模态为网络的节点,按照时间顺序连边构建有向加权的温度波动网络,进而将温度波动模态间的相互作用等综合信息蕴涵于网络的拓扑结构之中^[21];对于国际石油价格波动的分析,将1986年1月2日至2009年11月17日美国西德克萨斯原油现货逐日离岸价格转化为由3个表示涨落符号{R, e, D}构成102中5符号组成的价格波动状态为网络节点,按照时间顺序连边构建原油价格有向加权波动网络^[22]. 但无论是对温度还是国际石油价格的波动研究,都是用单要素(温度或价格)作为网络节点,建立复杂网络模型. 而本文针对原油的期货价格和现货价格两个要素,将两个要素间的联动关系抽象为相应符号,利用复杂网络理论界定出两种价格之间联动关系网络的节点及其节点之间的关联,建立相应的联动性复杂网络模型,通过分析其拓扑性质发现联动变化规律.

2. 联动性复杂网络的构建

2.1. 原油期货价格与现货价格联动性的建立

选取2002年11月25日至2010年9月24日近8年的西德克萨斯原油期货价格(WTI)及相对应的中国大庆原油现货价格共1920组数据作为样本数据^[23]. 从图1可以看出国际原油期货价格和大庆原油现货价格有着很强的相关性,但是它们的波动方向在同一个时刻并不是完全一致的,各个时刻的联动性综合在一起形成一个非线性、非稳定的复杂系统.

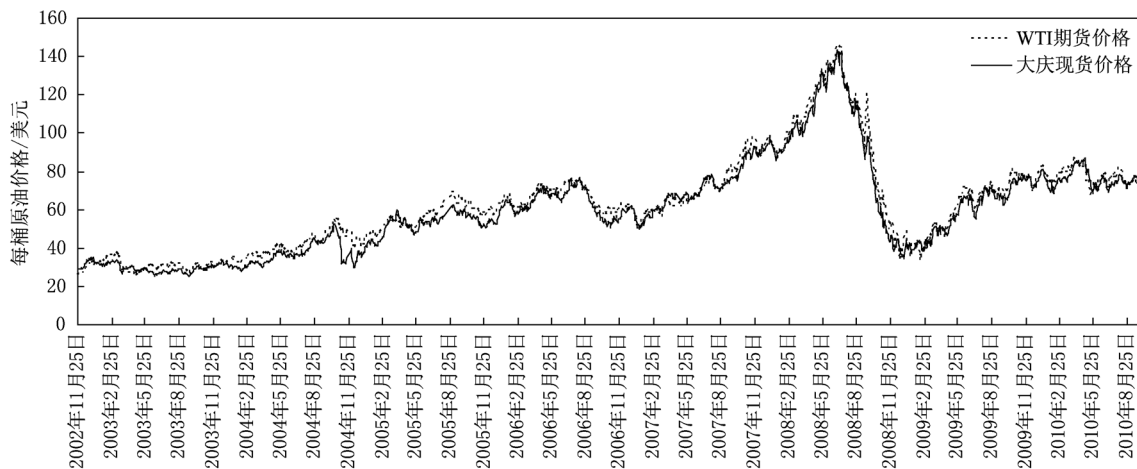


图1 原油期货价格和现货价格图

设 $P_F(t)$ 和 $P_S(t)$ 为第 t 天的原油期货价格和现货价格, $P_F(t-1)$ 和 $P_S(t-1)$ 为第 $t-1$ 天的原油期货价格和现货价格, 则 $\Delta P_F = P_F(t) - P_F(t-1)$, $\Delta P_S = P_S(t) - P_S(t-1)$. 当 $\Delta P_F * \Delta P_S > 0$, 即第 t 天的期货价格和现货价格相对于第 $t-1$ 天的价格都同涨或同跌时, 表示两者之间有同向联动性; 当 $\Delta P_F * \Delta P_S < 0$, 即第 t 天的期货价格和现货价格相对于第 $t-1$ 天的价格涨跌反向时, 表示两者之间有反向联动性; 当 ΔP_F 和 ΔP_S 中有一个为零或都为零, $\Delta P_F * \Delta P_S = 0$, 即第 t 天的期货价格和现货价格有一个相对于第 $t-1$ 天的价格没有发生变动时, 认为两者之间没有联动性.

2.2. 数据的粗粒化处理

对样本数据粗粒化的过程省去了小层次上的细节, 结论的有效性很大程度依赖于粗粒化的精度. 为了更清晰的揭示期货和现货价格之间的联动性规律, 所选择的表示符号不宜过多, 尽可能的使每一个符号串代表联动性波动中基本的、相对独立的模态. 将每天两种价格之间的联动性 (linkage) 设为相应的一个符号, 构成表示原油期货价格和现货价格联动性波动的符号序列, 即 $\Delta P_F * \Delta P_S$ 值的正负号对应一个符号 ls_i

$$ls_i = \begin{cases} Y & (\Delta P_F * \Delta P_S > 0), \\ O & (\Delta P_F * \Delta P_S = 0), \\ N & (\Delta P_F * \Delta P_S < 0), \end{cases} \quad (1)$$

其中符号 Y, O, N 分别表示同向联动性、无联动性和反向联动性.

将整个联动性波动状态用一个连续的符号序列表示, 并把该序列分成有限个子区间, 每个区间包含一个符号串, 使得对粗粒化后符号序列的研究等同于相应时间序列的研究, 转化后相应的符号序列 LS_i 为

$$LS_i = (ls_1, ls_2, ls_3, \dots, ls_n) \quad (ls_i \in (Y, O, N)). \quad (2)$$

2.3. 联动性网络的构建

一般情况下, 每周原油期货和现货市场的交易日为 5 天, 因此以连续 5 天的联动性作为一个波动模态, 映射为相应的 5 个符号. 这 5 个符号所组成的符号串代表这 5 天的联动性波动模态. 将符号序列 LS_i 作数据滑动窗, 滑动单位为 5 天, 步长为 1, 由此将粗粒化后的符号序列分为了 1916 个有一定重叠的符号区间. 每一个符号区间代表一个模态, 后一个模态是以前一个模态或多个模态为基础的. 这种数据的滑动体现了一定的记忆性和多元化的特征. 理论上整个联动性构成的符号序列应该有 243 种不同的波动模态, 即 $\{YYYYY, YYYYYN, YYYNN, YYYNY, YNNNN, YNNNY, YNNYN, YNNYY, YYYYYO, YYYOY, YYYON, \dots\}$, 如图 2 所示. 然而, 实验结果只出现了其中的 177 种波动模态, 其余的 66 种没有出现. 此外, 模态之间的转换和联系是有向的, 转换次数的不同也造成了模态之间联系强度的不同, 因此可以利用加权网络来表示符号序列中各个模态之间的联系及强度, 探索其原油期货价格和现货价格联动性的波动规律.

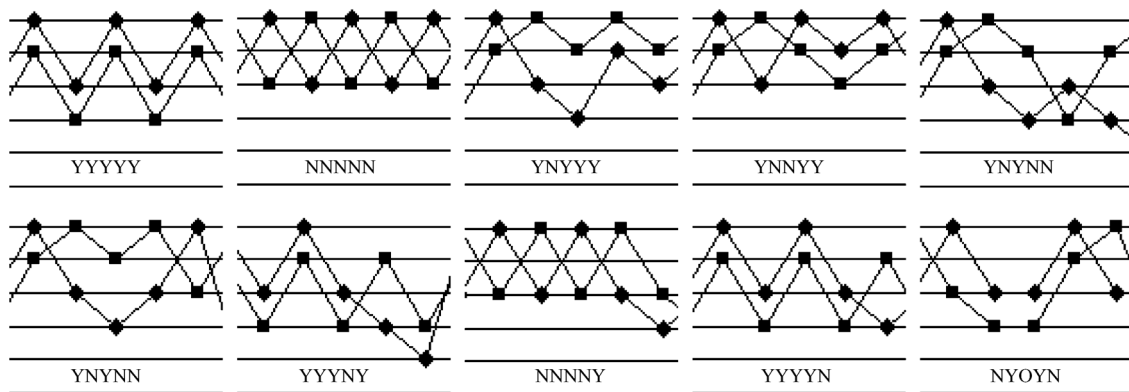


图 2 联动性波动模态示意图

将实验结果中出现的 177 种波动模态作为网络的节点, 当前模态到下一个模态的转换作为边, 其中每个节点代表连续 5 天原油价格联动性的波动模

态. 例如对联动性符号序列为 YNNYNOYNNYNNYYYYY, ... 的波动序列作数据滑动窗, 形成的模态集合为 $\{YNNY, NYNYO,$

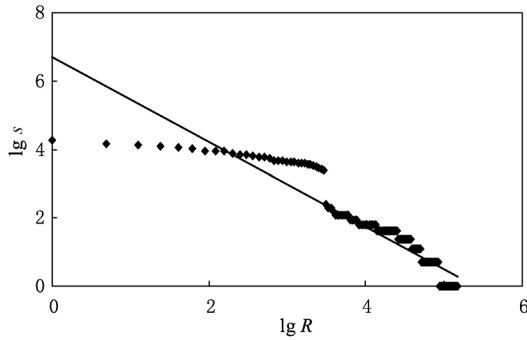


图4 点强度与排序名次双对数关系

对点强度与累积强度分布作双对数,得到线性回归方程 $y = -0.2933x + 0.1791$, 回归系数为 0.5805, 因此点强度与强度分布也是服从幂律分布的, 如图5所示. 对点强度较高的前32个节点和点强度较低的后145个节点分别与强度分布作双对数计算, 发现点强度较高的节点与点强度较低节点分别组成的联动性波动网络都服从幂律分布, 如图6和图7所示.

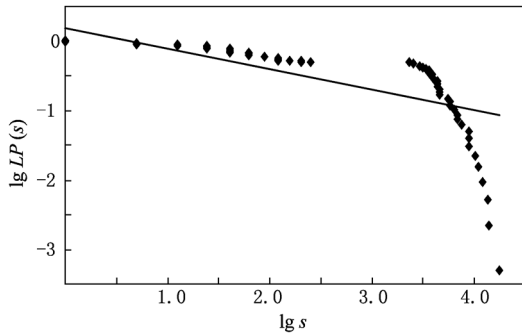


图5 点强度与累积强度分布双对数散点图

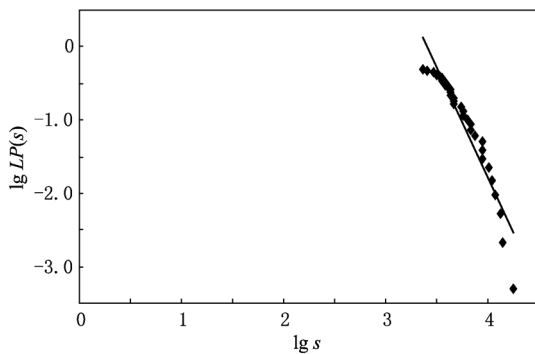


图6 前32个节点强度与累积强度分布双对数散点图

在点强度较大的前32个节点中, 没有出现符号“O”, 说明在长期的原油市场中, 期货价格和现货价格的变动比较激烈, 两者之间没有联动的情况很少. 通过计算这些符号组合在节点中出现的加权次

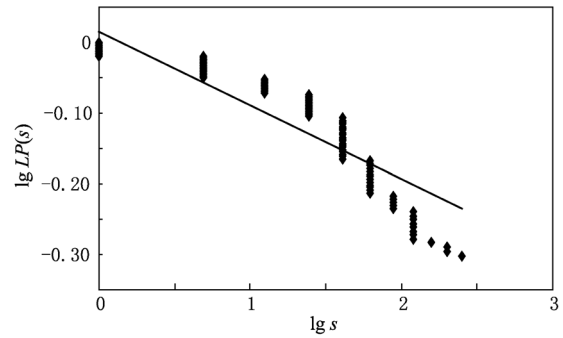


图7 后145个节点强度与累积强度分布双对数散点图

数 M , 可以用来判定价格之间联动性的方向趋势. 用节点强度分布作加权次数的权重, 将符号组合的加权次数定义为

$$M = \sum m_i * P(s), \quad (5)$$

其中, m_i 为节点 i 中相应符号组合出现的次数, $P(s)$ 为该节点的强度分布.

前32个节点中, 关于同向联动性和反向联动性的符号组合出现的加权次数如表2所示.

表2 联动性符号组合出现加权次数

符号组合	加权次数	符号组合	加权次数
Y	1.97	N	1.70
YY	0.84	NN	0.62
YYY	0.36	NNN	0.22
YYYY	0.14	NNNN	0.05

将符号组合的加权次数进行对比分析, 同向联动性组合与反向联动性组合的比例越来越大, 说明同向联动性的出现的频率越来越多.

通过以上的分析, 原油的期货价格和现货价格联动性网络的点强度与排列名次、累积强度分布都服从幂律分布. 长期以来原油期货和现货价格的联动性波动模态主要由32种构成, 其余145种模态出现的概率较小, 并且趋向于同向联动性. 可以看出, 大庆原油现货价格的制定受到国际原油期货价格的影响, 并逐步走向国际化. 但两者的联动性不是始终保持同向, 说明大庆原油现货价格制定过程中根据自身的情况作调整, 体现了国内与国际原油价格联动性变动的复杂性和内在动力学特征.

3.2. 加权集聚系数

节点的集聚系数反映了该节点的近邻之间的集团性质, 近邻之间关联越紧密, 该节点的集聚系数就越高. 原油期货价格和现货价格联动性属于加权复

杂网络,边权为相似权,权值越大表示两点间的关系越紧密,距离越小. 将加权集聚系数定义为^[25]

$$C^w(i) = \frac{1}{s_i(k_i - 1)} \sum_{j,k} \frac{(w_{ij} + w_{ik})}{2} a_{ij} a_{jk} a_{ki}, \quad (6)$$

其中 $C^w(i)$ 为节点 i 的加权集聚系数, s_i 为节点 i 的点强度, k_i 为节点 i 的度, w_{ij}, w_{ik} 分别表示两个节点 $(i, j), (i, k)$ 连边的权重, $a_{ij} a_{jk} a_{ki}$ 表示节点 i, j, k 是否构成三角形, 值为 1 表示三个节点之间都有边相连, 构成三角形, 0 表示三个节点之间没有构成三角形.

实验发现整个网络中仅有 15 个节点的加权集聚系数不为零, 即只有这 15 个节点的近邻节点之间有关联, 形成了以这些节点为核心的 15 个小群簇. 若节点的聚类系数较高, 度值也较高, 则说明该节点在网络中具有一定的主导地位. 建立节点加权集聚系数与点强度的分布发现, 两者之间并没有表现出良好的相关性, 价格联动性网络表现出了更高的复杂性, 如图 8 所示. 但加权集聚系数最高的两个节点为 YYYYY 和 NNNNN, 形成了以这两个节点为核心的小群簇, 并且这两个节点的邻接节点的加权集聚系数也不为零, 由此这些小群簇又组成了两个大的群簇, 网络中形成了同向联动性阵营和反向联动性阵营. 其中 YYYYY 节点在网络中具有高点强度和高集聚性, 表明这种模态在联动性中占有重要的地位.

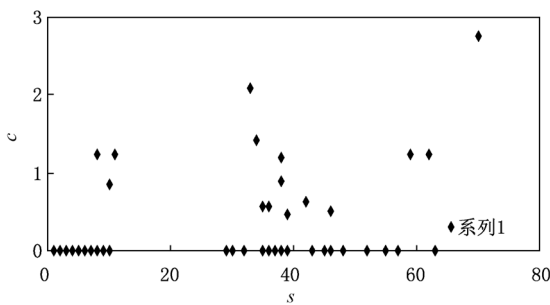


图 8 节点加权集聚系数与点强度的分布关系

在长期的原油市场中, 发生联动性群发性变动比较突出, 以 YYYYY 和 NNNNN 模态为主. 说明大庆原油现货价格与国际原油期货价格在一段时间内围绕同向联动性或者反向联动性发生改变, 并且变化幅度很小, 联动性群发性变动是交替出现的. 通过这些模态发生的频率来判断联动性处于哪个波动时期, 对价格的制定做出合理的决策, 避免出现过大的定价误差, 或者对风险投资和规避市场风险具有一定的借鉴意义.

3.3. 平均最短路径长度

考虑每条边关联的物理距离是加权网络分析的重要问题, 表示连通任意两个节点之间经历的边数, 网络的平均最短路径为任意两个节点之间距离的平均值. 对于加权网络, 每条边上的距离可以看做权重的某种函数.

价格联动性构成的是有向网络, 分析结果显示, 网络的平均最短路径长度为 6.969, 网络基于距离的聚类系数为 0.170 (范围从 0 到 1, 值越大表示集聚性越强), 加权距离为 0.830. 结合加权集聚系数的分析结果, 说明联动性网络中小群簇之间的关联比较紧密, 模态间的转换不需要经过多次路径, 但在群簇外的其他模态之间的转换则要经过大约 7 种模态. 由于模态的生成是通过数据滑动窗实现的, 滑动单位为 1 天, 因此模态间的转换需要大约 7 天的时间, 体现了模态变化的周期性. 基于距离的网络聚类系数更靠近 0, 说明整个网络的集聚性比较弱, 尽管网络中形成了一些小群簇, 但群簇的节点数不多, 并且群簇间的关联性比较差.

以上分析表明原油价格联动性的波动具有周期性, 在一周的时间里主要围绕某个模态群簇发生变动, 影响联动性变动的因素有很多, 并且联动性对这些因素的影响表现的比较敏感. 如原油期货市场的每周的 5 个交易日, 可能会受到某个交易日的影 响, 这个交易日的交易情况会带动人们心理上对价格的接受或拒绝, 影响到交易的实现, 导致某段时期内价格的联动性围绕某个模态发生变化; 或者是突发性事件的发生, 自然环境的变化和国家政策的变动等. 根据联动性波动的周期性和群簇性可以为短期内原油价格的波动预警提供依据, 也反映了原油价格联动性复杂的内在动力学特征.

3.4. 介数集中性

介数集中性是衡量节点作为媒介的能力, 用来研究各个节点在网络中所处位置的枢纽程度, 更好的理解网络变化的中间过程. 网络中节点占据这样的位置越多, 该节点具有越高的介数集中性^[26]. 联动性网络中节点的标准介数集中系数 $C'_B(i)$ 可定义为

$$C'_B(i) = \sum_{j < k} g_{jk}(i) / g_{jk}(g-1)(g-2), \quad (7)$$

其中 g_{jk} 是节点 i 到达节点 k 的捷径数, $g_{jk}(i)$ 是节点 j 到达节点 k 的最短路径上有节点 i 的捷径数, g 为

该网络中的节点数.

联动性网络节点的标准介数集中系数累积分布构成的曲线如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 节点的介数集中性分布比较均匀, 且累积分布值越高趋势斜率越小, 节点数越密集. 这说明网络中的一部分节点的介数集中性比较高. 其中前 20 个节点的累积分布达到 25.08%, 意味着 11.3% 的节点占到 1/4 网络的中介功能.

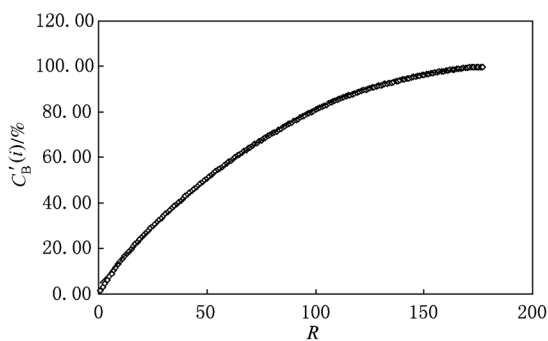


图 9 联动性网络介数集中性累积分布

研究节点介数集中性和节点强度的分布关系发现, 一部分点强度较低的节点充当着网络中主要的中介功能, 如图 10 所示. 点强度较高的节点主要通过点强度较低的节点进行过渡. 当一段时间内出现了这些点强度较低的节点(模态), 说明该时期属

于一个过渡时期, 可以对下一时期的联动性波动状态做出预兆.

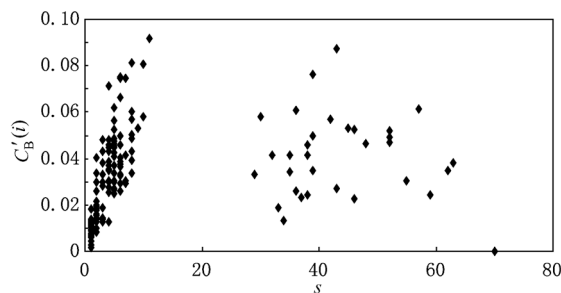


图 10 联动性网络节点介数集中性与点强度关系

结合节点集聚系数和最短路径长度的分析, 进一步验证了联动性网络中有小群簇的形成. 如节点 YYYYYY 的点强度最高, 但其介数集中系数为 0, 说明与之邻近的其他节点之间形成了关联, 形成了以节点 YYYYYY 为核心的一个小群簇. 群簇之间通过这些点强度较小的节点进行关联. 以 YYYYYY 和 NNNNN 节点为核心展开的小群簇通过外围的节点逐步进行转换, 两大阵营的过渡过程形成了一个环, 如图 11 所示. 在小群簇内有些节点起到了很强的中介性, 例如在 YYYYYY 群簇中的 YYYYYO 节点体现了很高的中介性, 该节点也是整个网络中介数集中系数最高的节点.

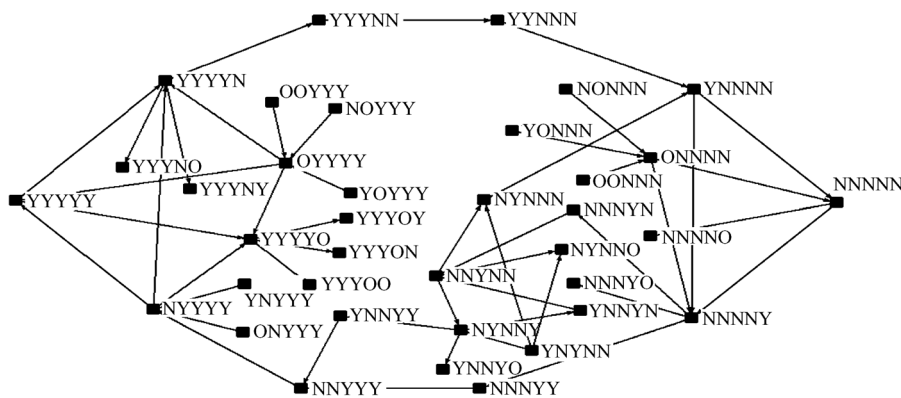


图 11 两大波动阵营间的转换过程

通过介数集中性分析, 发现网络中部分节点的介数集中性较高. 进一步验证了网络中围绕某种模态波动小群簇的存在. 群簇之间通过低频率的模态进行过渡, 反映出联动性发生群发变动的交替性及变化的前兆. 利用这种规律可以判断原油市场是否处于一个过渡时期, 可以对现货价格的波动状态做出预测, 并为过渡时期的原油现货价格的制定提供参考依据.

3.5. 小团体性

小团体就是在网络中的一部分节点的关联特别紧密, 以至于结合形成一个次级网络. 与节点的集聚系数不同的是, 集聚系数反映的是节点近邻之间的关联, 而小团体性更加注重节点之间的相互关联. 本文采用节点程度 k -plex 来计算小团体性. k -plex 是包含了 G_s 个节点的子网络, 在该网络中, 每

一个节点都至少与同一子网络中的其他节点保持 G_s-k 条关联, k 为调节系数. 因此当 k 值越小, G_s 越大时, 条件越苛刻, 所能发现的这样的次级网络越少^[27].

研究发现, 取 k 为 2, G_s 为 5 时, 只找到了一个次级团体网络, 节点为 NYYYY, YYYYY, YYYYN, OYYYY 和 YYYYO, 由这 5 个节点及与这些点相关联的邻近节点构成的网络如图 12 所示.

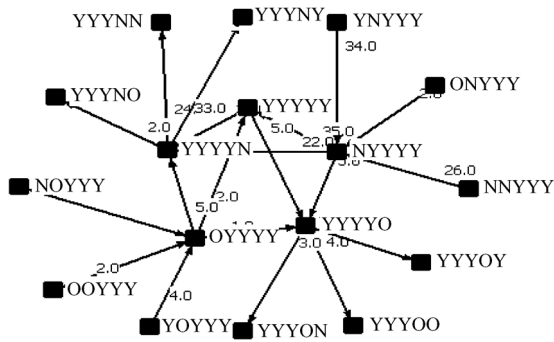


图 12 小团体及相关节点

当条件更为苛刻时, 再找不到任何一个次级团体网络, 从侧面反映出在原油期货价格和现货价格所形成的联动性复杂网络中, 出现 5 个节点以上关联紧密的情况是很少的. 说明多个模态之间的相互转换形式并不是频繁、丰富的. 该小团体是以 YYYYY 为核心的小群簇, 说明在长期的原油市场中, 原油的期货和现货价格的联动性波动模态之间的转换以同向联动性为主. 也表明近些年大庆原油现货价格逐渐走向国际化的趋势的过程中也在不断结合自身情况发生一些小范围的微调, 当进入这种小团体模态时期, 大庆原油现货价格基本与国际同步, 可以在这个相对稳定的时期中对原油交易作出相应决策, 为规避市场价格风险预警具有一定指导意义.

4. 结 论

将原油期货价格和现货价格之间的联动性关系抽象出来作为研究对象, 通过建立原油期货价格

和现货价格的有向加权联动性复杂网络, 研究复杂网络的点强度、强度分布、集聚系数、中心性和小团体性等拓扑性质, 发现了与前人关于原油价格波动网络不同的研究结果:

1) 原油的期货和现货价格联动性复杂网络节点强度与排列名次、累积强度分布的关系服从幂律分布, 说明联动性的变动模态主要为少数的几种. 期货价格和现货价格的联动关系趋势为同向联动性, 但两者的联动性不是始终保持同向, 也反映了联动性变动的复杂性和内在动力学本质特征.

2) 联动性复杂网络中, 加权集聚系数和点强度之间没有表现出良好的相关性, 存在以 15 个节点为核心的小群簇, 并且形成了以 YYYYY 和 NNNNN 模态为核心的两大波动阵营, 其中 YYYYY 阵营在联动性中占有重要的地位. 结合网络的平均最短路径长度为 6.969, 表明联动性模态间的转换平均需要一周的时间, 体现了联动性变动具有周期性.

3) 对联动性复杂网络介数集中性的研究发现, 部分节点体现了较高的介数集中性, 11.3% 的节点占到 1/4 的网络中介功能. 群簇间通过点强度较低的模态过渡, 并且在两大波动阵营中形成了一个过渡环. 期货与现货价格联动性的群发性波动具有交替性, 并且通过出现概率较小的模态进行转换. 利用这种规律可对价格联动性的波动状态做出预测, 为风险投资和原油价格的制定提供参考.

4) 对联动性复杂网络小团体性的研究, 表明在该网络中出现 5 个节点以上关联紧密的情况很少, 各种模态之间相互转换形式并不是频繁、丰富的. 当模态属于该小团体时, 说明此时的联动性波动处于相对稳定的时期, 对原油交易、风险投资和规避市场价格风险预警具有一定指导意义.

原油市场是一个较为复杂的系统, 市场中各个要素主体所形成的将是一个更为复杂的网络. 本文仅对原油期货价格和现货价格之间的联动性复杂网络拓扑性质进行了分析, 还有一些问题没有得到研究, 例如构建多要素的复杂网络、建立网络中各个要素之间的关系, 寻找众多复杂关系中最核心关系等, 都是今后要深入研究的内容.

[1] Svetlana M, Russell S 2009 *Energy Policy* **37** 1687
 [2] Kaufmann R K, Ullman B 2009 *Energy Econ.* **31** 550
 [3] Yen H L, Hsu Ning H, Jer S C 2010 *Energy Econ.* **32** 343

[4] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 6684
 [5] Newman M E J 1999 *Phys. Lett. A* **263** 341
 [6] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

- [7] Andrade J S, Herrmann H J, Andrade R F S, Roberto F S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 18702
- [8] Wang X F, Chen G R 2002 *IEEE Trans. Circuits. Syst. I* **49** 54
- [9] Richard G C, Carla D C G, Shi Z 2010 *Comput. Commun.* **33** 259
- [10] Li M, Fan Y, Chen J, Gao L, Di Z R, Wu J S 2005 *Physica A* **350** 643
- [11] Zhang P P, Chen K, He Y, Zhou T, Su B B, Jin Y D, Chang H, Zhou Y P, Sun L C, Wang B H, He D R 2006 *Physica A* **360** 599
- [12] Chang H, Su B B, Liu C P, Gao M, Di Z R, He D R 2008 *Int. J. Mod. Phys. C* **19** 1537
- [13] Zhang L, Liu Y 2008 *Acta Phy. Sin.* **57** 5419 (in Chinese)[张立、刘云 2008 物理学报 **57** 5419]
- [14] Marco A J, Brian H W, Jenny L, Nick A 2000 *Ecolog. Model.* **131** 249
- [15] Keles A, Kolcak M, Keles A 2008 *Know. Based Syst.* **21** 951
- [16] Wang W X, Wang B H, Hu B, Yan G, Ou Q 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 188702
- [17] Zhu C P, Zhou T, Yang H J, Xiong S J, Gu Z M, Shi D N, He D R, Wang B H 2008 *New J. Phys.* **10** 23006
- [18] Yan G, Zhou T, Wang J, Fu Z Q, Wang B H 2005 *Phys. Lett.* **22** 510
- [19] Chen Q H, Shi D H 2006 *Physica A* **360** 121
- [20] Hao B L 1999 *Science* **51** 3 (in Chinese)[郝柏林 1999 科学 **51** 3]
- [21] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phy. Sin.* **57** 7380 (in Chinese)[周磊、龚志强、支蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 7380]
- [22] Chen W D, Xu H, Guo Q 2010 *Acta Phy. Sin.* **59** 4514 (in Chinese)[陈卫东、徐华、郭琦 2010 物理学报 **59** 4514]
- [23] <http://www.in-en.com/oil/quote>
- [24] Yook S H, Jeong H, Barabási A L, Tu Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5835
- [25] Barrat A, Barthelemy M, Pastor S R, Vespignani A 2004 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101** 3747
- [26] Freeman, L C 1979 *Soc. Network.* **1** 215
- [27] Ronald S B 1992 *Structural Holes; the Social Structure of Competition*(Cambridge: Harvard University Press) p66

Analysis on the topological properties of the linkage complex network between crude oil future price and spot price^{*}

Gao Xiang-Yun¹⁾²⁾ An Hai-Zhong^{1)2)†} Liu Hong-Hong²⁾ Ding Ying-Hui²⁾

1) (*Lab of Resources and Environmental Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

2) (*School of Humanities and Economic Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

(Received 5 December 2010; revised manuscript received 26 January 2011)

Abstract

This paper analyzes the linkage between crude oil future price and spot price based on complex network theory. The linkage between oil future price and Daqing (China) crude oil spot price from November 25, 2002 to September 24, 2010 is transformed into symbolic sequences consisted of three characters {Y, O, N} through the process of coarse graining. The nodes of the complex network are 5-symbol strings in the number of 177 in the form of data window linked in the network's topology by sliding sequence. The complexity of the linkage is verified through analyzing the topological properties of point of strength, strength distribution, weighted clustering coefficient, average shortest paths, betweenness centrality and subgroup in the complex network. The results indicate that the point of strength value of the former 32 nodes is larger, cumulative strength distribution is 73.27%, and most fluctuation models' linkages have the character with the same direction. However, it does not show a good correlation between weighted clustering coefficient and point of strength. There are some small cluster groups appearing in the network. These small cluster groups constitute two camps whose cores are YYYYY node and NNNNN node. The results also show that average shortest paths length is 6.969 and 11.3% of nodes occupying 1/4 of centrality function, and there are not many subgroups with close linkage, which verifies the complex characteristics of the linkage fluctuation in the network topology. This paper finds the power law, clustering and periodicity between two kinds of prices in the long run, which is of great significance in grasping the crude oil market, predicting oil price volatility reasonable, formulating price and avoiding risk.

Keywords: crude oil, future price, spot price, linkage

PACS: 89.30.aj, 89.75.Fb

^{*} Project Supported by the Humanities and Social Sciences Planning Funds of the Ministry of Education of China (Grant No. 10YJA630001) and Scientific Research Programm Ministry of Land and Resources of China (Grant No. GT-YQ-QQ-ZH-02-03).

[†] Corresponding author. E-mail: ahz369@163.com