

供应链道德风险的演化规律^①

徐绪松¹, 郑小京^{1, 2}

(1. 武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072; 2. 哈尔滨商业大学, 哈尔滨 150076)

摘要: 建立了以人为粒度(agent)的供应链道德风险有向多局域世界网络模型,给出了供应链道德风险的定义,确定了供应链道德风险复杂网络中人与人之间相互作用的交互规则及网络的演化规则,采用复杂网络分析方法,证明了供应链道德风险复杂网络拓扑特性的演化规律——其网络服从幂律分布,供应链道德风险多局域世界复杂网络满足无标度特性,该幂律取决于供应链特性的大小。

关键词: 供应链; 道德风险; 有向多局域世界复杂网络; 幂律分布

中图分类号: 273.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2012)08-0001-11

0 引言

文献[1-7]证实了供应链中存在某种程度的道德风险,而道德风险给供应链带来了许多负面影响,只要道德风险超过了由某种供应链结构所决定的阈值,它们就有可能损害供应链,即当且仅当超过某一阈值时,供应链中的道德风险才会对整个系统产生巨大的危害。然而,目前还没有正确深刻的确定这一阈值的方法,文献[8-10]初步探索了这一问题。根据复杂科学管理的无序-有序论,只有当系统处于有序与混沌的边缘时,整个供应链的适应性和创造能力才有可能被激发出来。供应链中存在一定的道德风险,但是,只要它没有超过阈值,就对供应链不会造成损害。因而,对供应链道德风险逾渗阈值的确定十分重要,它可以将供应链道德风险控制在某一个范围之内。为此必须清楚地知道供应链道德风险内在诱发机制和传递机制及其规律,这种规律对确定阈值有显明的作用。供应链道德风险演化规律的分析是确定供应链道德风险逾渗阈值的核心问题之一。文献[11-12]曾经初步讨论了道德风险演化规

律问题,认为供应链中的道德风险服从幂律分布。

对供应链道德风险的科学定义是该研究的首要问题。为此本文将给出道德风险的科学定义,并通过建立基于布尔网络的多局域世界有向网络模型,来分析供应链道德风险的演化规律。

1 供应链道德风险的定义

供应链实际上不是一个实体,是由多个节点企业按照一定的规则进行交易,使得各种资源流以最小内耗在系统中流动,并在不同的节点上进行转换,从而实现整个系统利益最大化的虚拟组织。在这一系统中,每个企业都无法控制其他企业的行为,只能通过协调的方式使得整个系统协同化,以提高其运作效率^[13]。实际上,协调是由特定的人去完成的,本文研究以人为粒度(agent)的供应链道德风险。

1.1 以人为粒度的供应链多局域世界有向网络模型

假设人是1个粒度,即1个Agent,每一个人都有自己的思想,都是有智能的、自治的、具有社

① 收稿日期: 2010-03-22; 修订日期: 2011-10-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771083; 71040001).

作者简介: 徐绪松(1945—),女,湖北嘉鱼人,教授,博士生导师. Email: xusong45@gmail.com

会性的 Agent. 他对供应链有双重影响——积极的与消极的两个方面. 道德风险正属于后者. 从人的这一粒度出发, 分析在供应链运作过程中所出现的道德风险.

将供应链视作多局域世界有向网络: 在每个企业, 根据特定的任务, 做不同工作的人之间进行合作, 形成了工作小组; 而小组与小组之间的合作, 则履行着企业中部门的职责. 如果把供应链视作一个系统, 这个系统由不同的、有一定关系的局域构成. 在这一系统中, 将按照人与人之间相互作用频率由大到小进行排序, 则为工作组、部门、企业. 把人认为是多局域世界网络中的节点, 他们之间的相互作用被看作是多局域世界网络中的边^[14-15]. 简单的静态供应链如图 1 所示.

如果将每一个人看成是具有智能性、自治性和社会性的 Agent, 那么供应链系统中的各个

Agent 之间的相互关系构成了复杂的多局域世界有向网络——布尔网络. 如图 2 所示.

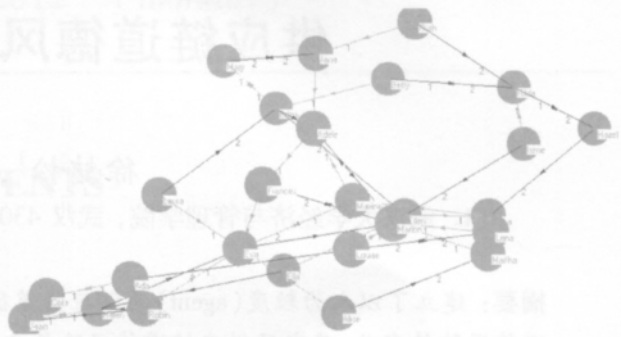


图 1 简单供应链网络

Fig. 1 A simple supply chain networks

注: 图 1 中每个节点表示企业中 1 个单独的部门, 每个边表示某些资源在部门之间的流动. 权值表示资源的数量. 集群的形成代表了某些企业. 这张图包含了 4 个根据资源流动相互作用的企业. 实际上, 这个图形是动态的, 每个企业总有一些人进入或退出, 因为他们的相互作用, 就使得供应链的配置不断变化.

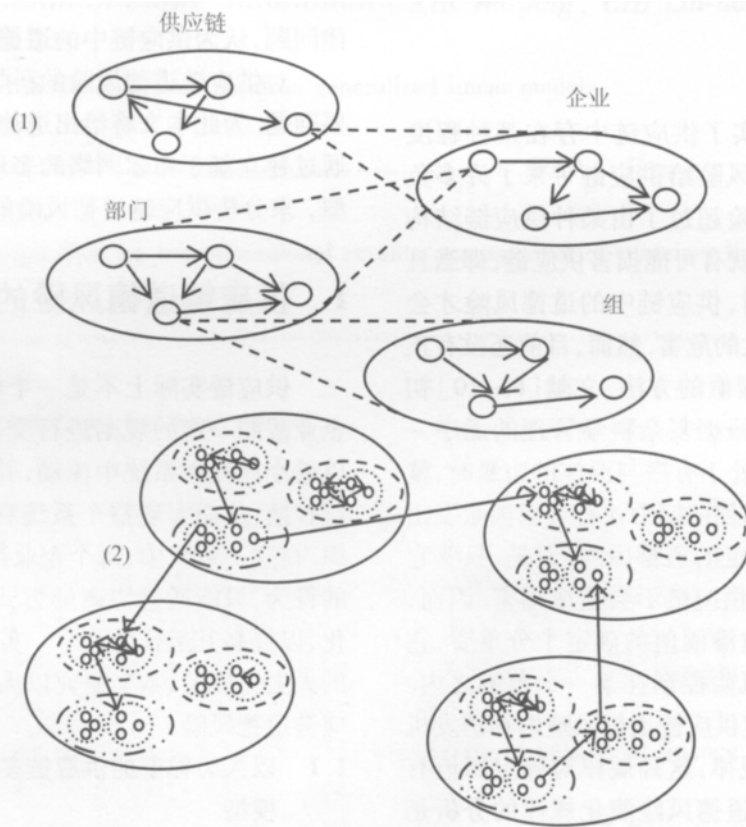


图 2 真实供应链模型

Fig. 2 A real supply chain model

注: 图 2 是真实供应链的模型, 描述了供应链的运作规则. 图中每个节点是 1 个 Agent, 代表了供应链中具有智能的、自治的和具有社会性的人. 模型可以描述为: 模型 = 〈环境, Agent〉, 环境 = 〈资源种类, 资源密度, 获得程度〉, Agent = 〈特性, 系列规则, Agent 学习运算法则〉, 特性 = 〈资源, 记忆半径, 记忆长度〉, 规则 = 〈被省略〉(描述谁会发生相互作用, 如何相互作用). 在图 2 中的子图中, 每一个阶段代表了不同间隔尺寸的 Agent, 把它们分别记为企业、部门、工作组和人. 通过交互作用, 所有低层的 Agent 都会涌现高层的 Agent.

这个交互作用在不同 Agent 之间的配置是动态的,这一动态性质会给分析供应链带来很多困难.

1.2 供应链的道德风险及其特征

本质上,所有部门中工作组所履行的功能都是由该组中不同的人在执行不同的任务时来完成的,部门和企业的功能涌现也遵循同样的道理.在这一过程中,只有每个人按照一定的由自身的合法系统和(或)影子系统^[16]规则来操作,才能够实现不同的功能.所以,当且仅当在了解了每个人的行为规则才可以清楚了解供应链系统或组织的特征与规律.然而,组织中的人可能并不会完全按照规则计划去做事,或者为了私利而破坏这种规则,这些行为就构成了人的道德风险.一般,在供应链各个部门中领导与其他人之间的交互作用相对来说比较大,在企业中企业负责人与其他人交互作用的频率和程度相对较大,如果他/她的行为出现问题,就会造成比一般职员更坏的后果.

供应链道德风险来源于人的道德风险,因为组织行为不属于真实独立决策,而是相关的人决定了做某事或不做某事,他们活化了组织的行为.每个人在他所在组织中都有一定的职能,如果他们依据自己的利益规则不做某事,那么将会产生道德风险.

供应链道德风险具有如下特征:①传播性.如果一个人道德败坏的行为没有受到惩罚,别人就会进行模仿,这样使得道德风险在供应链中传播;②临界性.道德风险一旦超越阈值,供应链将会被毁灭,这个阈值被称作道德风险逾渗的临界点.③时变性.道德风险由某一个人产生于某一时刻,可能在另一时刻失去效果,还有可能从一种种类转变为另一种种类.

1.3 基于布尔网络的供应链道德风险的定义

定义 1 将图 2 抽象为以人为粒度的布尔网络,在 Agent 与 Agent 之间资源流出和流入的值是相互作用的,可以用 $[x_i, \bar{x}_i]$ 量化,其中 \bar{x}_i 和 x_i 分别表示其上下限.当 Agent 之间资源流的实际值不在此范围时取 1,否则取 0.这就是说,1 表示了由于自私、懒惰、贪婪等使得在特定过程或工作中的两个人产生了道德风险.这种供应链布尔网络

具有拓扑性质,在网络演化的过程中将产生逾渗规模,称其为供应链的道德风险.

文献 [17-19] 曾经证明供应链中的 Agent 的动态过程就是 Markov 过程,而且是基本的随机过程.如果把系统中某个时刻发生的道德风险描绘成图,一系列的图集就是图的 Markov 过程,它产生了根据过程规律变化的图集的拓扑特征.利用统计学理论,可以挖掘一些关于网络、入度和出度、中间状态、核心等的分布规律.在这个意义上,可以更清楚的分析布尔网络中的道德风险,并且可获得导致涌现的临界点.

2 供应链道德风险有向多局域世界网络模型

2.1 供应链道德风险有向多局域世界网络模型的构建机制

考虑有向布尔网络 $G(t) = \{a_{ij}\}$, 这里 a_{ij} 表示从 i 到 j 的有向流, $a_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$, 意味着在供应链系统中 workflow 从代号为 i 的人到代号为 j 的人的过程.如上所述,每个人都有一定程度的道德风险,不同之处仅在于规模,所以供应链系统的网络一定就是系统中的道德风险网络.

下面将给出道德风险布尔网络的构建机制.

假定图中的节点构成了有向图,对任何一个节点,箭头的指向表明败德行为被模仿的情况,如果一个节点学习了这种行为,那么采用箭头的头部指向这一节点,尾部表示败德行为被学习的一方,这里有两种情况:一种是模仿者主动的学习产生道德风险的那些节点;另一种是指产生道德风险的那些节点主动的将自己的行为教给与之接触的人.当且仅当这两个条件同时被满足,道德风险才能在供应链系统中得以传递.

为了说明这一过程,本文给出节点的入度 d_{in} , 出度 d_{out} . 假定这一随机过程从时间 $t = 0$ 开始,系统的出事节点是 δ , δ_{out} 是出事节点的出度.那么在任意时刻 t , 每一个节点连接或删除某一节点时,对另一节点的选择概率可以由概率系列来表示,即 $G(t)$ 依据 $d_{out} + \delta_{out}$ 选择节点 v , 其意义为

按照与 $d_{out}(v_i) + \delta_{out}$ 成比例的概率 $P(v = v_i)$ 选择节点 v , 该概率被定义为

$$P(v = v_i) = \frac{d_{out}(v_i) + \delta_{out}}{t + \delta_{out}n(t)}$$

由此得出道德风险布尔网络的构建机制为优先连接与优先断开. 也就是说, 越容易被其他人的败德行为所感染, 并且对其进行模仿的人, 其自身更善于寻找这些可能被模仿的道德风险, 并与发生这一风险的人发生相互作用, 反之亦然.

2.2 供应链道德风险有向多局域世界网络模型的构建

本文给出 6 条规则, 它们分别体现了优先连接与优先断开机制. 当 $t \geq t_0$ 时, 根据以下 6 条规则构建供应链道德风险有向多局域世界网络模型, 该模型允许环的存在. 在从 $G(t)$ 到 $G(t + 1)$ 的变化过程中, 下面规则的任何个或任何几个将会在某一特定的时间 t 上随机发生. 用 d_{in}, d_{out} 分别表示局域中任何一个节点的入度、出度, $\delta_{in}, \delta_{out}$ 分别表示入度、出度的变化程度.

1) 以概率 β_1 添加 1 个新的局域世界. 即 β_1 为新企业进入供应链的概率.

2) 以概率 β_2 在任意选定的区域内增加 1 个节点 v ; 在该区域以概率 $d_{in} + \delta_{in}$ 选择另一个节点 w ; 增加 1 条从 w 到 v 的有向边. β_2 以及 $d_{in} + \delta_{in}$ 表示同一局域中主体主动模仿败德行为的情况.

3) 以概率 β_3 在任意选定的区域内增加 1 个节点 w ; 在该区域以概率 $d_{out} + \delta_{out}$ 选择另一个节点 v ; 增加 1 条从 v 到 w 的有向边. β_3 以及 $d_{out} + \delta_{out}$ 表示在同一局域中产生败德行为的主体主动向其他人传染这种情况.

4) 以概率 β_4 在任意选定的区域内以概率 $d_{out} + \delta_{out}$ 选择节点 v ; 以概率 $d_{in} + \delta_{in}$ 选择节点 w ; 增加 1 条从 v 到 w 的有向边. β_4 以及 $d_{in} + \delta_{in}, d_{out} + \delta_{out}$ 表示在同一局域中两个具有败德行为的主体相互学习对方的败德行为, 并改进自己行为的情况.

5) 以概率 β_5 在任意选定的区域内以概率 $(d_{out} + \delta_{out})'$ 选择节点 v ; 以概率 $(d_{in} + \delta_{in})'$ 选择节点 w ; 删除 1 条任意选定区域中的从 v 到 w 的有向边. β_5 以及 $(d_{out} + \delta_{out})', (d_{in} + \delta_{in})'$ 表示发现任

意局域中两个具有败德行为的主体, 并改正这种败德行为的情况.

6) 以概率 β_6 在任意选定的区域内以概率 $d_{in} + \delta_{in}$ 选择节点 w ; 以概率 $d_{out} + \delta_{out}$ 选择节点 v ; 增加 1 条从任意一个局域世界中现存节点 w 到任意的另外一个局域世界现存节点 v 的有向边. β_6 以及 $d_{in} + \delta_{in}, d_{out} + \delta_{out}$ 表示在任意不同局域中两个具有败德行为的主体在承担不同局域交易功能时, 相互学习对方的败德行为, 并改进自己行为的情况.

3 道德风险的拓扑性质: 布尔网络下的供应链道德风险的拓扑演化规律

为了研究方便, 设置两个参数

$$c_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{1 + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}$$

$$c_2 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_5 + \beta_6}{1 + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}$$

$G(t)$ 中入度为 i 的节点数量记作 $x_i(t)$, 出度为 i 的节点数量记作 $y_i(t)$. 定理 1 给出了布尔网络 $G(t)$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时, 整个演化过程中节点的入度和出度的分布情况.

定理 1 设对于确定的 $i \geq 0$, 存在常数 p_i 和 q_i (不大于 1 的非负数), 使得 $x_i(t) = p_i t + o(t)$ 和 $y_i(t) = q_i t + o(t)$ 成立, 当 $i \rightarrow \infty$ 时, 则有

$$p_i \sim C_{in} i^{-X_{in}}$$

$$q_i \sim C_{out} i^{-X_{out}}$$

其中, X_{in}, X_{out} 分别是入度、出度的幂率分布的大小; C_{in}, C_{out} 是正的常数; $X_{in} = 1 + 1/c_1, X_{out} = 1 + 1/c_2, c_1, c_2$ 是概率发生的相对水平.

定理 1 的证明见附录.

由定理 1, 规定箭头方向表示供应链中道德风险的传出与传入. 这是因为, 如果有一个人的败德行为没有惩罚, 那么它很容易被其他人所学习. 这种行为发生的频率越高, 所获得的私人利益越高, 越容易被学习. 定理 1 所说明的就是这种道德风险在供应链中产生、传染及其演变的规律——其入度、出度的分布服从幂律, 而不是正常情况下

假定的正态分布. 图 3 是供应链道德风险传染与模仿的情景.

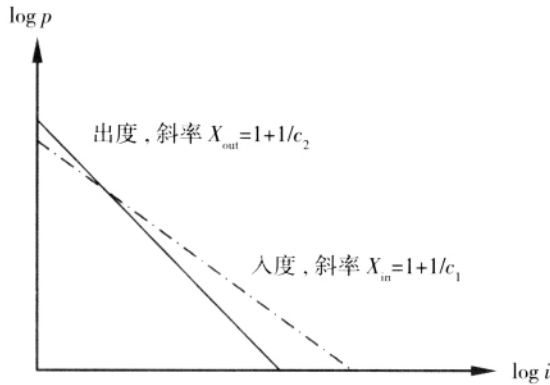


图 3 供应链道德风险的传染与模仿

Fig. 3 Infection and simulation of supply chain moral hazards

下面进一步证明供应链道德风险的多局域世界网络满足幂律分布. 给出定理 2.

定理 2 在定理 1 成立前提下, 假设 $i, j \geq 0$, 存在常数 f_{ij} (不大于 1 的非负数), 使得 $n_{ij}(t) = f_{ij}(t) + o(t)$. 并且, 当 $j \geq 1$ 及 $i \rightarrow \infty$ 时, 则有

$$f_{ij} \sim C_j i^{-X_{in}},$$

$$f_{ij} \sim D_j j^{-X_{out}}$$

当 C_j 和 D_j 为正的常数时, 有

$$X'_{in} = 1 + \frac{1}{c_1} + \frac{c_2}{c_1(\delta_{out} + 1_{\{\gamma\delta_{out}=0\}})},$$

$$X'_{out} = 1 + \frac{1}{c_2} + \frac{c_1}{c_2(\delta_{in} + 1_{\{\gamma\delta_{in}=0\}})}$$

定理 2 的证明见附录.

在定理 2 中, 幂指数内除了参数 c_1, c_2 之外 (这两个参数在定理 1 中已经给出了较详细的解释) 还有出度或入度的变化程度 δ_{out} 或 δ_{in} , 也就是道德风险传给另外一个人或者被另外一个人学习的过程中, 这种传递的程度大小, 以及参数 $1_{\{\gamma\delta_{out}=0\}}, 1_{\{\gamma\delta_{in}=0\}}$, 它们分别表明这种输入或输出过程中, 两者共同发生的可能性参变量.

从定理 2 可知, 道德风险的多局域世界网络满足幂律分布. 这就意味着在供应链系统中, 有极少一部分人在进行自己职责的过程中, 很容易被一些败德行为所迷惑, 并且很快地学习这些行为, 这就造成了道德风险在供应链中传递; 还有极少一部分人在履行自己职责的过程中, 经常对与自己接触的人宣传自己的败德行为所带来的好处,

试图扩散这种行为. 这两种人之中, 具有上述共同性质的人的比例较低. 这实际上就说明一种现象: 只有极少数的人的道德风险对整个供应链的运作过程起着极其严重的破坏作用, 而更大多数的人的行为还不能给供应链带来危害. 所以, 系统存在鲁棒性和脆弱性, 道德风险的这种特性使得通过它更加容易抓住道德风险的“咽喉”, 从而能够对其进行控制. 鲁棒性和脆弱性实际上也意味着如果供应链中道德风险随机发生, 供应链系统具有稳定性, 否则, 如果道德风险是蓄意造成的, 则系统将会很快崩溃. 这种鲁棒性与脆弱性取决于网络的拓扑结构的变化规律.

4 结束语

所有供应链都会产生道德风险, 即使在所有企业都是完全理性的情况下也不例外. 所以道德风险是供应链的内在特征, 不可能被剔除. 同时, 道德风险并非产生于企业, 而是产生于人. 由于 Agent 之间的交互作用, 道德风险会在人与人之间传递, 这种交互作用同时也是产生供应链宏观道德风险的原因. 由于供应链系统与供应链道德风险系统之间存在着一定的区别, 那么就可以知道, 在供应链中与其他人交互作用较多的人, 不一定是供应链道德风险发生频率较大、影响较为严重的人. 因此, 部门、企业中相互作用频率很大的领导人, 不一定能产生道德风险, 但是一旦产生, 由于其相互作用的对象数量太大, 导致了他们的这种行为比较容易被传递, 其危害更大, 这就对供应链道德风险的防范与控制提供了很好的思路.

通过分析和证明, 本文得出以下结论:

1) 供应链道德风险多局域世界有向网络的演化满足幂律分布, 并且该网络是无标度网络, 入、出度的幂可以分别描述为 $X_{in} = 1 + 1/c_1$, $X_{out} = 1 + 1/c_2$; 入度 - 出度的统计特性为

$$X'_{in} = 1 + \frac{1}{c_1} + \frac{c_2}{c_1(\delta_{out} + 1_{\{\gamma\delta_{out}=0\}})}$$

或

$$X'_{out} = 1 + \frac{1}{c_2} + \frac{c_1}{c_2(\delta_{in} + 1_{\{\gamma\delta_{in}=0\}})}$$

其中参数 δ_{out} , δ_{in} , $1_{\{\gamma\delta_{out}=0\}}$, $1_{\{\gamma\delta_{in}=0\}}$, 以及常数

$$c_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{1 + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}$$

$$c_2 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_5 + \beta_6}{1 + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}$$

均体现了整个供应链道德风险传递与演化的特征. 其中所有 β 分别表示道德风险在同一局域中以及不同局域间传入、传出以及道德风险消失的概率. 经过不断的传递, 道德风险呈现出幂律的特性, 这就意味着道德风险在一小部分履行某种职能的人身上发生概率较大, 而在绝大多数人身上发生概率较小.

2) 供应链道德风险多局域世界有向网络具有无标度特性. 这意味着供应链中每个人的道德风险并不是均匀的, 其中一部分人, 而且是极少一部分人, 容易产生某种性质的道德风险, 并且容易把它传递给与他/她有直接相互作用的人身上 (当然, 这种传递也许会形成闭环, 从而对该区域的道德风险起到非线性放大的作用). 这些人实

际上是该供应链中道德风险的主要产生者与传递者. 而绝大多数人员, 均不会产生道德风险, 也许会转嫁道德风险, 但不是供应链道德风险的主要携带者与传递者. 这就是幂律分布特征的本质所在.

3) Agent 的相互作用在其中起到了很大作用. 在本文设置的模型中, 通过学习与模仿直接相互作用的 Agent 的某些行为而实现其作用. 如果这一行为有利于供应链协同化的实施, 称之为供应链系统的创新 (innovation); 反之, 如果这一行为有利于败德行为的传播, 称之为供应链系统的内耗. 正是因为这种败德行为在供应链中被其他与之直接相互作用的 Agent 学习, 才会使整个系统中涌现出这种无标度的特性, 即这种无标度特征正好是帕累托定律的集中体现, 形成这一分布特征的主要原因就是优先连接与优先增长这一机制. 它说明了道德风险产生与传递的基本路径. 如果能识别这一部分“瓶颈”人群, 并且很好地控制, 那么就可以说, 能在很大程度上削弱该供应链的道德风险.

“瓶颈”人群的识别过程如图 4 所示.

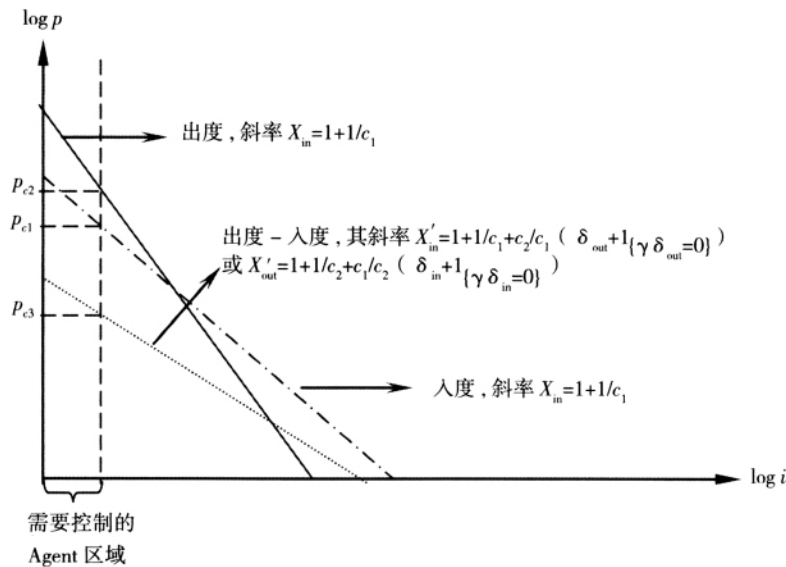


图 4 “瓶颈”人群的识别过程

Fig. 4 Identification process of “bottleneck” mass

在图 4 中, 可以根据入度、出度以及出度 - 入度的分布特征, 找到道德风险产生与传播最频繁、传播给最多其他 Agent 的那些 Agent, 这就需要发现在道德风险传出、传入以及传出 - 传入联合演

化过程中的对应导致系统崩溃的临界频率, 并在对这些拓扑特征排序的基础上根据这些临界频率选择这些需要控制的对象. 这些内容的关键在于发现这些临界值.

4) 道德风险在供应链中的传播, 不仅依赖于其传出的特征, 而且依赖于传出与传入同时实现的情况下才能发生. 这就使得应在更大程度上考虑传出 - 传入联合分布规律, 正如定理 2 所述的那样, 其幂指数中存在一些随机性因素, 这就使得传播不完全按照幂律分布特征进行, 图 5 描述了出度 - 入度联合分布.

从图 5 可以看出, 出度 - 入度联合分布处于正态分布与幂律分布之间, 这一特征与道德风险的传递特征实际上有很大的关系, 如果概率的阈值被确定出来, 那么根据这一阈值大小, 很容易估计出需要控制的 Agent 的数量. 将出度 - 入度的大小进行排序, 就可以有效地将供应链中的道德风险降低到安全范围之内. 这就是为供应链道德

风险防范与控制提供了对象, 使得道德风险的管理更加有效.

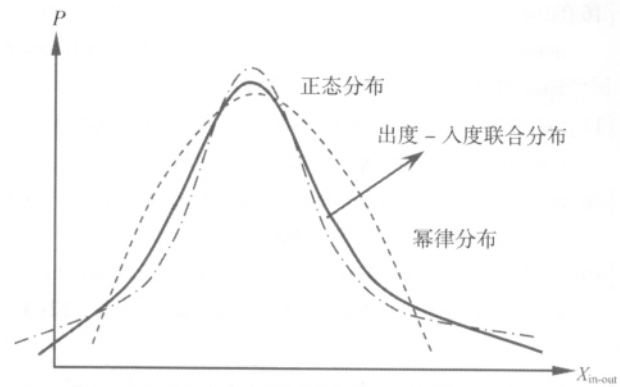


图 5 出度 - 入度联合分布

Fig. 5 Combination distribution of in-degree and out-degree

参考文献:

- [1] Mitchell P D, Zhu E (J), Hurley T M. Adverse selection, moral hazard, and grower compliance with BT corn refuge [M]// Just R E, Alston J M, Zilberman D. *Regulating Agricultural Biotechnology: Economics and Policy*, Boston MA: Springer, 2006.
- [2] Wagner W. International risk sharing and government moral hazard [J]. *Open Economics Review*, 2007, 18(5): 577 - 598.
- [3] Boyer M M. Contracting under ex post moral hazard and non-commitment [J]. *Review of Economics Design*, 2003, 8(1): 1 - 38.
- [4] Strand J. Employment and wages with sector-specific shocks and worker moral hazard [J]. *Journal of Economics*, 1996, 63(2): 151 - 173.
- [5] Page Jr F H. Mechanism design for general screening problems with moral hazard [J]. *Economic Theory*, 1992, 2(2): 265 - 281.
- [6] Page Jr F H. Dominant strategy mechanisms for contract auctions with risk aversion and moral hazard [J]. *International Journal of Game Theory*, 1994, 23(1): 25 - 42.
- [7] 李丽君, 黄小原, 庄新田. 双边道德风险条件下供应链的质量控制策略 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(1): 42 - 47.
Li Lijun, Huang Xiaoyuan, Zhuang Xintian. Strategy of quality control in supply chain under double moral hazard condition [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(1): 42 - 47. (in Chinese)
- [8] Toshihiko Mukoyama, Aysegul Sahia. Repeated moral hazard with persistence [J]. *Economic Theory*, 2005, 25: 831 - 854.
- [9] Lisboa M B. Moral hazard and general equilibrium in large economies [J]. *Economic Theory*, 2001, 18(3): 555 - 575.
- [10] Luis H, Braido B. General equilibrium with endogenous securities and moral hazard [J]. *Economic Theory*, 2005, 26(1): 85 - 101.
- [11] Huberman B A, Adamic L A. Information dynamics in the networked world [J]. *Lecture Notes in Physica*, 2004, 650: 371 - 398.
- [12] Venkat V. A theory of design of complex teleological systems: Unifying the darwinian and boltzmannian perspectives [J]. *Complexity*, 2007, 12(3): 14 - 21.
- [13] Zhang J, Ackerman M S. *Expertise Networks in Online Communities: Structure and Algorithms* [D]. University of Michigan, 2007.
- [14] Zhang J, Ackerman M S, Adamic L. *Community Net Simulator: Using Simulation to Study Online Community Network For-*

mation and Implications [D]. University of Michigan ,2006.

[15]Wang B ,Zhang Z Z ,Tang H W. Evolving scale-free network model with tunable clustering [J]. International Journal of Modern Physics B ,2005 ,25: 1 -8.

[16]Sarshar N ,Boykin O P ,Roychowdhury V P. Percolation search in power law networks: Making unstructured peer-to-peer networks scalable [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Peer-to-Peer Computing ,Berlin Heidelberg: Springer-Verlag ,2004: 145 -162.

[17]Cohen R ,Rozenfeld A F ,Schwartz N ,et al. Directed and non-directed scale-free networks [J]. Statistical Mechanics of Complex Networks ,2003 ,625: 23 -45.

[18]Smyth D ,Hubler A. A conductivity-dependent phase transition from closed-loop to open-loop dendritic networks [J]. Complexity ,2003 ,9(1): 56 -60.

[19]Du H F ,Feldman M W ,Li S Z ,et al. An algorithm for detecting community structure of social networks based on prior knowledge and modularity [J]. Complexity ,2007 ,12(3): 53 -60.

Evolution law of moral hazards in supply chains

XU Xu-song¹ , ZHENG Xiao-jing^{1 2}

1. School of Economics and Management , Wuhan University , Wuhan 430072 , China;
2. Harbin University of Commerce , Harbin 150076 , China

Abstract: A multi-local-world directed networks model based on persons’ interacting rules is given ,the moral hazards in supply chains are defined ,and the evolution law of topological features of the moral hazards in supply chain is given. So ,the interactive rules between agents in this complex networks are quantified. The evolution law of the topological structure’s character ,is proven to conform to power-law distribution. The result shows that multi-local-worlds of moral hazards in supply chain must be a scale-free ,with the component being decided by the character of the supply chain.

Key words: supply chain; moral hazards; multi-local-world directed networks; power-law distribution

附录

定理 1 的证明:

首先 进行一些基本的定义. 在初始状态 网络中共有 n_0 个顶点 那么 t 时刻的顶点数量 $n(t)$ 实际上等于 n_0 与均值为 $(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_5)(t - t_0)$ 的二项分布之和 这个过程服从一些正常概率论的 Chemoff 有界性原理 那么 对于足够大的时间 t 存在一个和的常数 c 有概率

$$P[|n(t) - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_5)t| \geq t^{1/2} \log t] \leq e^{-c(\log t)^2} \tag{A.1}$$

特别当 $t \rightarrow \infty$ 时 上面的概率为 $o(t)$.

对于给定的 $G(t)$ 在 $G(t)$ 到 $G(t+1)$ 过程中 根据优先连接规则 执行 2.2 中的规则 1) ,2) ,3) 和 5) ;根据优先删除规则 执行规则 6) ;对于 1 个具有特殊入度 i 的节点 它的入度将按照概率 $\frac{i + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t)}$ 增加 任何一个节点在 $G(t+1)$ 时具有入度为 $i+1$ 的概率应该为

$$(\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_6) x_i(t) \frac{i + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t)} - \beta_5 \left(1 - \frac{i + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t) - 2} \right) = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6) x_i(t) \frac{i + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t)} - \beta_5$$

所以根据此概率 $G(t+1)$ 入度为 i 的节点数减 1. 而在概率为

$$(\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_6) x_{i-1}(t) \frac{i - 1 + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t)} - \beta_5 \left(1 - \frac{i - 1 + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t) - 2} \right) =$$

$$(\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6) x_{i-1}(t) \frac{i - 1 + \delta_{in}}{t + \delta_{in}n(t)} - \beta_5$$

时, $G(t)$ 中节点入度为 $i-1$ 的节点度应该增加 1, 变成 i . 综合考虑这些结果, 期望概率为

$$E(x_i(t+1) | G(t)) = x_i(t) + \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{t + \delta_{in}n(t)} [(i-1 + \delta_{in})x_{i-1}(t) - (i + \delta_{in})x_i(t)] + (\beta_1 + \beta_2)1_{\{i=0\}} + \beta_3 1_{\{i=1\}} - \beta_5 \quad (A.2)$$

这里取 $x_{i-1}(t) = 0$, 并记 1_A 为一符号函数, 事件 A 发生, 记为 1, 否则记为 0.

对于固定的 i , 希望对式 (A.2) 两边同时取期望, 对于 $n(t)$ 来说唯一的问题在于式中右边的第 2 项. 为了解决这个问题, 需要考虑在式 (A.1) 中所作的弱条件, 对于概率 $1 - o(t^{-1})$, 有

$$|n(t) - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_5)t| = o(t^{3/5})$$

那么, 无论 $n(t)$ 如何取值, 有

$$\frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{t + \delta_{in}n(t)}(j + \delta_{in})x_j(t) = o(1) - \beta_5$$

对于每一个 j , 得到

$$E\left[\frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{t + \delta_{in}n(t)}(j + \delta_{in})x_j(t)\right] = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{t + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_5)}(j + \delta_{in})E x_j(t) + o(t^{-2/5})$$

因此, 式 (A.2) 两边同时取期望之后变成

$$E x_i(t+1) = E x_i(t) + \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{t + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_5)} [(i-1 + \delta_{in})E x_{i-1}(t) - (i + \delta_{in})E x_i(t)] + (\beta_1 + \beta_2)1_{\{i=0\}} + \beta_3 1_{\{i=1\}} - \beta_5$$

把 $E x_i(t) / t$ 改写为 $\bar{x}_i(t)$, 考虑到参数 $c_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6}{1 + \delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}$, 于是有

$$(t+1)\bar{x}_i(t+1) - t\bar{x}_i(t) = c_1 [(i-1 + \delta_{in})\bar{x}_{i-1}(t) - (i + \delta_{in})\bar{x}_i(t)] + (\beta_1 + \beta_2)1_{\{i=0\}} + \beta_3 1_{\{i=1\}} - \beta_5 + o(t^{-2/5}) \quad (A.3)$$

现在让 $p_{-1} = 0$, 并且当 $i \geq 0$ 时通过

$$p_i \triangleq c_1 [(i-1 + \delta_{in})p_{i-1} - (i + \delta_{in})p_i] + (\beta_1 + \beta_2)1_{\{i=0\}} + \beta_3 1_{\{i=1\}} - \beta_5 \quad (A.4)$$

来定义 p_i . 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 对于每一个 i , 由式 (A.4) 可以得到 $E(x_i(t)) = p_i t + o(t^{3/5})$; 由此, 可以得到 $x_i(t)$ 围绕 $E(x_i(t))$ 上下波动, 最终 p_i 服从幂律分布. 根据式 (A.4), 设定 $\kappa_i(t) = \bar{x}_i(t) - p_i$, 有

$$(t+1)\kappa_i(t+1) - t\kappa_i(t) = c_1 [(i-1 + \delta_{in})\kappa_{i-1}(t) - (i + \delta_{in})\kappa_i(t)] + o(t^{-2/5}) \quad (A.5)$$

重新记作

$$\kappa_i(t+1) = \frac{t - c_1(i + \delta_{in})}{t+1}\kappa_i(t) + \Delta_i(t) \quad (A.6)$$

式中

$$\Delta_i(t) = \frac{c_1(i-1 + \delta_{in})\kappa_{i-1}(t)}{t+1} + o(t^{-7/5})$$

为了证明式 (A.5) 对于每个 i , 必须严格使 $\kappa_i(t) = o(t^{-2/5})$. 以 i 进行归纳实现这一过程; 假设 $i \geq 0$ 及 $\kappa_i(t) = o(t^{-2/5})$. 注意到 $\kappa_{-1}(t) = 0$, 开始归纳. 考虑 $\Delta_i(t) = o(t^{-7/2})$ 和式 (A.6), 可以核对 $\Delta_i(t)$ 即可得到 $\kappa_i(t) = o(t^{-2/5})$. 这点的证明已经在式 (A.5) 中完成了.

下一个目标是解决在概率是 1 的时候, 有

$$x_i(t) / t \rightarrow p_i \quad (A.7)$$

为了证明这点, 采用 Azuma-Hoeffding 不等式. 如果 X 是由 n 个选择组成的序列决定的随机变量, 通过在最大程度 θ 上改变 X 的值, 则对于任意 $x \geq 0$, 有

$$P(|X - EX| \geq x) \leq 2e^{-x^2/(2n\theta^2)} \quad (A.8)$$

为了应用这一结果, 首先从 2.2 节的规则 1), 2), 3), 4), 5) 和 6) 中选择每个时间阶段所执行的过程. 设 A 是这一系列有限选择中的相应一个事件, 注意对于绝大多数 A 来说, 式 (A.5) 给出了以下推论

$$E(x_i(t) | A) = p_i + o(t) \quad (A.9)$$

则, 得到

$$P(|x_i(t) - E(x_i(t))| \geq t^{3/4} | A) \leq 2e^{-\sqrt{t}/16}$$

现在转向这一结果的更多细节, p_i 的数量表达式是由式 (A.4) 决定的, 改写式 (A.4), 有

$$(i + \delta_{in} + c_1^{-1}) p_i = (i - 1 + \delta_{in}) p_{i-1} + c_1^{-1} [(\beta_1 + \beta_2) 1_{\{i=0\}} + \beta_3 1_{\{i=1\}} - \beta_5]$$

这就使得有

$$p_i = \frac{(i - 1 + \delta_{in})_{i-1}}{(i + \delta_{in} + c_1^{-1})_{i-1}} p_{i-1} = \frac{(i - 1 + \delta_{in})!}{(i + \delta_{in} + c_1^{-1})!} \frac{(i + \delta_{in} + c_1^{-1})!}{\delta_{in}!} p_1, \tag{A.10}$$

$$p_0 = \frac{c_1^{-1}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}{\delta_{in} + c_1^{-1}} = \frac{\beta_1 + \beta_2 - \beta_5}{1 + c_1 \delta_{in}},$$

$$p_1 = \frac{1}{1 + \delta_{in} + c_1^{-1}} \left[\frac{\delta_{in}(\beta_1 + \beta_2 - \beta_5)}{1 + c_1 \delta_{in}} + \beta_3 c_1^{-1} \right]$$

这里,一般因为 x 是实数 n 是整数,则记 $(x)_n$ 为 $x(x-1)\cdots(x-n+1)$. 同样,在 x 不是整数的情况下用 $x!$ 来表示 $\Gamma(x+1)$. 在推导中忽略了一些细节,正如在方程(A.4)中所清晰描述的唯一解结果一样,通过检查得到的这一公式,给出的却是正确的解答. 如所期望的一样,可以检查 $\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1 - \beta_3 - \beta_5$, 当时间 t 足够大时,网络有 $[1 - \beta_3 - \beta_5 + o(1)]t$ 个顶点.

根据式(A.10)得到当 $t \rightarrow \infty$ 时,成立

$$p_i \sim C_{in} i^{-X_{in}},$$

$$X_{in} = (\delta_{in} + c_1^{-1}) - (-1 + \delta_{in}) = 1 + 1/c_1$$

换成其他参数,出度的计算过程也完全相同. 仅仅将 c_1 换成 c_2 ,便可以得到出度的分布

$$X_{out} = 1 + 1/c_2.$$

证毕.

定理2的证明:

定理2的证明和定理1的类似. 在定理1的证明中可以看到对于每一个 i 和 j 都有 $n_{ij}(t)/t \rightarrow f_{ij}$, 使得 f_{ij} 满足

$$f_{ij} = c_1(i - 1 + \delta_{in})f_{i-1,j} - c_1(i + \delta_{in})f_{i,j} + c_2(i - 1 + \delta_{out})f_{i,j-1} - c_2(i + \delta_{out})f_{i,j} + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=0, j=1\}} + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=1, j=0\}} \tag{A.11}$$

当然如果 i 或 j 取 -1 时,取 f_{ij} 为 0 (直观上讲,这可能是由某一节点按照某一概率连接的包括自己在内的 1 个环,因此在这一步中,其入度与出度都将随之而增长. 然而这使得在方程中计算 $E(n_{ij}(t))$ 时更复杂), 容易看出,对于固定的 i 和 j 这种效应的期望值为 $o(t)$. 在式(A.11)中已经给予比较深刻的阐述.

当 j 固定 $t \rightarrow \infty$ 时,从计算 f_{ij} 的期望开始进行推导.

式(A.11)的迭代方式表达为如下形式

$$\Lambda(f) = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=0, j=1\}} + (\beta_1 + \beta_3 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=1, j=0\}} \tag{A.12}$$

这里,引入 6 维排列的系数 $f = f_{ij}$ 上的线性算子 Λ . 符号 Λ 仅仅是为了方便,为了保证公式的相对简单,缩减因子的数量. 希望分析出现与式(A.12)右边的 6 项中任意项对于 f 的作用, Λ 唯一需要的特性就是允许这种分割是线性的.

很明显对于 Λ 的形式,方程(A.12)有唯一解. 运用线性变换写成

$$f_{ij} = g_{ij} + h_{ij}$$

这里

$$\Lambda(g) = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=0, j=1\}} \tag{A.13}$$

并且

$$\Lambda(h) = (\beta_1 + \beta_3 - \beta_5 + \beta_6) 1_{\{i=1, j=0\}} \dots$$

首先考虑 g . 当 $\beta_i < 1$ 时,有 $c_1, c_2 > 0$, 所以设定

$$b_j = \delta_{in} + \frac{1}{c_1} + \frac{c_2}{c_1}(j + \delta_{out})$$

按照 c_1 将式(A.13)拆成

$$(i + b_j) g_{ij} = (i - 1 + \delta_{in}) g_{i-1,j} + \frac{c_2(j - 1 + \delta_{out})}{c_1} g_{i,j-1} + \frac{(\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6)}{c_1} 1_{\{i=0, j=1\}} \tag{A.14}$$

注意,根据界限情况,对于所有 i 有 $g_{i0} = 0$. 这样,当 $j = 1$ 时,式(A.14)右边的第2项消失了,可以得知(忽略了其中一些代数上的细节)

$$g_{i1} = a \frac{(i - 1 + \delta_{in})!}{(i + b_1)!}$$

式中 a 是一个正常数, 其表达式为

$$a = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6) \frac{(b_1 - 1)!}{c_1(\delta_{in} - 1)!}$$

当 $j \geq 2$ 时, 式(A.14) 的最后一项总是为 0. 通过迭代可以获得 g_{ij} , 有

$$g_{ij} = \frac{c_2(j-1 + \delta_{out})}{c_1} \sum_{k=0}^i \frac{(i-1 + \delta_{in})_{i-k}}{(i+b_j)_{i-k+1}} g_{kj-1} \tag{A.15}$$

假设对于一些常数 A_{jr} , 对于所有 $1 \leq j \leq j_0$ 及所有 $i \geq 0$, 有

$$g_{ij} = \sum_{r=1}^j A_{jr} \frac{(i-1 + \delta_{in})!}{(i+b_r)!} \tag{A.16}$$

注意前面已经展示了当 $j_0 = 1$, 有 $A_{11} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_4 - \beta_5 + \beta_6$, 使得 $j = j_0 + 1$, 之后利用式(A.15) 和式(A.16), 可以得到

$$g_{ij} = \sum_{r=1}^{j-1} \frac{c_2(j-1 + \delta_{out})}{c_1} A_{j-1,r} \sum_{k=0}^i A_{kr} \frac{(i-1 + \delta_{in})!}{(i+b_r)_{i-k+1} (k+b_r)!} \tag{A.17}$$

当 $0 < y < x$, s 是一个整数, 且 $0 \leq s \leq i+1$, 可以直接验证得到

$$\sum_{k=s}^i \frac{1}{(i+x)_{i-k+1} (k+y)!} = \frac{1}{x-y} \left(\frac{1}{(i+y)!} - \frac{(s-1+x)!}{(i+x)! (s-1+y)!} \right) \tag{A.18}$$

合并式(A.17) 和式(A.18), 可以得到

$$g_{ij} = \sum_{r=1}^{j-1} \frac{c_2(j-1 + \delta_{out})}{c_1} A_{j-1,r} \frac{(i-1 + \delta_{in})!}{b_j - b_r} \left(\frac{1}{(i+b_r)!} - \frac{(b_j-1)!}{(i+b_j)! (b_r-1)!} \right)$$

对于不同数值的 r , 可以计算系数 $1/(i+b_r)!$. 注意到 $b_j - b_r = (j-r)c_2/c_1$, 式(A.16) 阐述了 $j = j_0 + 1$ 的情况. 假设

$$A_{jr} = \frac{j-1 + \delta_{out}}{j-r} A_{j-1,r}$$

对于 $1 \leq r \leq i-1$, 及

$$A_{jj} = - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{j-1 + \delta_{out}}{j-r} \frac{(b_j-1)!}{(b_r-1)!} A_{j-1,r}$$

实际上根据幂律对计算 A_{jr} 并不感兴趣. 观测到仅当 $A_{11} > 0$ 时, 对于每一个 $j \geq 1$, $A_{j1} > 0$, $r = 1$ 项在式(A.16) 起主导作用. 因此对于任意给定的 $j > 0$ 有

$$g_{ij} \sim C_j i^{-[1+1/c_1+c_2/c_1(1+\delta_{out})]} \tag{A.19}$$

忽略那相对麻烦的过程, 并且

$$A_{jr} = a(-1)^r \frac{(j-1 + \delta_{out})!}{\delta_{out}! (j-1)!} \binom{j-1}{r-1} \frac{(b_r-1)!}{(b_1-1)!} \tag{A.20}$$

和前面一样 a 为常数. 用上面的叙述通过对 j 的推论很容易验证这点.

同样的, 可以获得

$$h_{i0} = (\beta_1 + \beta_3 - \beta_5 + \beta_6) \frac{b_0!}{c_1 \delta_{in}!} \frac{(i-1 + \delta_{in})!}{(i+b_0)!} \tag{A.21}$$

及

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^i \frac{c_2(j-1 + \delta_{out})}{c_1} h_{kj-1} \frac{(j-1 + \delta_{in})_{i-k}}{(i+b_j)_{i-k+1}} = \sum_{r=0}^j B_{jr} \frac{(j-1 + \delta_{in})!}{(i+b_r)!} \tag{A.22}$$

式中

$$B_{jr} = a(-1)^r \frac{(j-1 + \delta_{out})!}{j! (\delta_{out} - 1)!} \binom{j}{r} \frac{b_r!}{c_1 \delta_{in}!}$$

所以

$$h_{ij} \sim C_j^* i^{-1+\delta_{in}-b_0} = C_j^* i^{-(1+1/c_1+c_2\delta_{out}/c_1)} \tag{A.23}$$

合并 g_{ij} 和 h_{ij} , 定理 2 得证

证毕.