

中药方剂的合作网络描述

A Collaboration Network Description on Traditional Chinese Medical Prescription Formulation System

何 阅/HE Yue¹, 张培培/ZHANG Pei-pei², 唐继英/TANG Ji-ying³, 韩雪芳/HAN Xue-fang³, 邱 荣/QIU Rong³, 陈其娟/CHEN Qi-juan³, 周月平/ZHOU Yue-ping³, 常 慧/CHANG Hui³, 何大韧/HE Da-ren³

1. 无锡市第一中学, 江苏无锡 214031
2. 江苏大学理学院物理系, 江苏镇江 212013
3. 扬州大学物理科学与技术学院, 江苏扬州 225002

1. Wuxi No. 1 Middle School, Wuxi 214031, Jiangsu Province, China
2. Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu Province, China
3. School of Physics Science & Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, Jiangsu Province, China

[摘要] 从复杂网络角度研究了中药方剂的实证统计性质, 包括平均路径长、集群系数、度分布律以及格子系数等; 认为由于中药方剂网具有“完全图集合”这个拓扑特征, 建议把它归入“广义合作网络”一类, 从而可以使用双粒子图做更好的描述, 并且定义“顶点项目度”和“项目大小”这两个更为重要的统计参量, 研究它们的分布规律。所得到的实证结果与作者提出的广义合作网络演化模型的结论完全符合。

[关键词] 复杂网络, 中药方剂, 统计参量, 合作网络

[中图分类号] O414.2, C811, O157.6, R289.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)11-0036-04

收稿日期: 2005-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(70371071)

作者简介: 何 阅, 女, 江苏省无锡市运河路 98 号无锡市第一中学教师, 扬州大学硕士生, 主要研究方向为非线性科学与复杂性科学;

E-mail: justlikesakura@126.com

何大韧(通讯作者), 男, 江苏省扬州市大学南路 88 号扬州大学物理科学与技术学院, 教授, 主要研究方向为非线性科学与复杂性科学; E-mail: drhe@yzu.edu.cn

蚀液与结石体直接全面接触。这对结石体是一种考验, 并增加了实验的安全性。

通过分析, 可以得到如下结论。

1) 浆液配比对粘土固化注浆帷幕的渗透性能影响较大, 固相加量对渗透性起决定性作用。

2) 重金属离子在帷幕中迁移时可生成沉淀物, 堵塞导水通道, 有利于帷幕对填埋场渗滤液的进一步封堵。

3) 不同重金属离子在帷幕中的迁移速度不同, 在实验条件下的迁移速度 $Hg^{2+} > Pb^{2+}$ 。

4) 粘土固化注浆帷幕应用在垃圾卫生填埋场中, 对渗滤液具有一定的防腐性能和抗酸稳定性。

参考文献 (References)

- [1] 郭薇. 垃圾处理的现代化之路 [N]. 中国环境报 (产经周刊), 2001-04-30
- [2] Philip L K. An investigation into contaminant transport processes through single -phase cement -bentonite slurry walls [J]. *Engineering Geology*, 2001, 20(1): 209~21
- [3] Kugler H, Ottner F, Froeschl H, et al. Retention of inorganic pollutants in clayey base sealings of municipal landfills [J].

Applied Clay Science, 2002, 21(1~2): 45~48

- [4] 龙晓燕, 胡中雄. 垂直隔离工程控制污染物运移的应用研究[J]. 工程勘察, 2000, 1: 11~15
- [5] 陈永贵, 张可能, 魏中超, 等. 高压摆喷灌浆与粘土固化注浆在渗漏治理中的应用[J]. 施工技术, 2003, 32(1): 41~43
- [6] 张可能, 陈永贵, 魏中超, 等. 粘土固化注浆在矿山污水库坝基防渗中的应用[C]. 见: 何继善. 防灾减灾工程理论与实践[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2001. 172~176
- [7] 张可能, 田庆余, 邓飞跃, 等. 土柱试验研究粘土固化注浆帷幕的阻滞性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(3): 473~477
- [8] 邓飞跃, 张可能, 杨明. 粘土固化注浆帷幕对有害物质的阻滞作用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(6): 524~526
- [9] JTJ051-93. 公路土工试验规程[S]
- [10] 张可能. 粘土固化浆液的结构形成过程及其注浆堵水研究 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1995
- [11] 卢龙, 雷良城, 林锦富, 等. 矿物表面特征和表面反应的研究现状及其应用[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(3): 354~358
- [12] 刘和平, 郑洁明, 刘巧丽. 铅和镉在粘土衬层中渗透、迁移、转化的研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(7): 56~60

(责任编辑 王 芷)

Abstract : We studied the empirical statistical properties of Traditional Chinese Medical Prescription Formulation system with a viewpoint of complex network. The properties include the average path length, clustering coefficient, degree distribution, grid coefficients etc. We suggest that Traditional Chinese Medical Prescription Formulation network can belong to the so-called "extended collaboration networks" due to the fact that it can be described by "a set of complete graphs", and therefore better described by a bi-particle graph and two more important statistical parameters namely "act-degree" and "act-size", and meanwhile their distributions can be defined. These empirical statistical results are in a very good agreement with the conclusions of a collaboration network's evolution model that was suggested by us.

Key Words : complex network, traditional Chinese medical prescription formulation system, statistical parameters, collaboration network

CLC Numbers : O414.2, C811, O157.6, R289.1

Document Code : A

Article ID : 1000-7857(2005)11-0036-04

1 引言

在许多实际或理论问题的研究中,可能把复杂系统基本单元之间的相互作用简化地表示为图论中顶点(即上述单元)之间的赋权或不赋权的“边”。这样,这些复杂系统就可以在—定规定下表示为一个网络。这是对复杂系统建模的一种新尝试^[1-6]。在这些研究中,1998年 Watts 和 Strogats(WS)^[1]的论文起了开创作用。论文报道了许多实际网络具有小的平均路径长 $\langle l \rangle$ (定义为两顶点间沿最短路径的边数的平均值)和大的集群系数 C (对每个有 k_v 个连边邻点的顶点 v ,定义 $c_v = E_v/[k_v(k_v+1)/2]$,其中 E_v 是邻点之间的实际边数, c_v 对所有顶点的平均值定义为 C),并且建议了介于规则与随机之间的小世界网模型。此后,Barabasi 和 Albert(BA)1999年著文建议了第2个著名的复杂网络模型,即无标度网的BA模型。无标度网的特征是度分布(描述具有相同边数(度 k)的顶点的出现概率 $P(k)$)显示的“幂律”关系,即 $P(k) \sim k^{-\gamma}$, γ 称为特征标度因子^[4]。此后,大量发表的复杂网络论文涉及到通讯、电子、生物、地理、环境、交通等众多领域中的许多实际系统的实证研究^[1,2]。

我们注意到社会网络中特殊的一类,即所谓“社会合作网络”^[7]。这类网络中的边通常表示它们的基本单元之间的某种合作关系,适于用双粒子图来描述^[1,7,8]。以电影拍摄制作为例,一类粒子可称为“项目”(act,例如电影影片),另一类粒子可以称为“参与者”(actor,例如演员)。一条连接2个不同粒子的边代表一个参与者参加一个合作项目。如果只考虑一类粒子(称为向一种单粒子图投影),就把2条共用1个另一类单粒子的边投影为这种单粒子之间的边。例如常常只讨论演员的合演关系,这时2个参与者粒子(演员)之间的边表示他们在同一部影片中的合作关系。如果他们曾在2部影片合演,则他们之间具有2条“重复边”,表示合作的频繁程度或强度,具有重要的意义。如果特别注意一个演员曾经演过几部影片,可以定义一个量 h_i ,称为它的“顶点项目度”,等于这个参与者粒子在双粒子图中连接的项目粒子数。如果特别注意一部影片同时聘用几个演员,可以定义一个量 T_j ,称为它的“项目尺度”,等于这个项目粒子在双粒子图中连接的参与者粒子数。这些参与者粒子由于在同一部影片(项目)中出演而在演员单粒子图中构成一个完全图,它们中的每一个的顶点度都等于 T_j-1 。当然,2个这样的完全图很可能共用1条甚至好几条边,但是如果计算多重边,顶点度等于 T_j-1 的结论仍旧成立。如果我们把完全图的概念推广到这种计算多重边的情况(即认为包含多重边,每2个顶点都连边的图仍叫做完全图),仍可以说网络是完全图的集合。

我们建议把合作网络的概念推广,以便用来描述各种各样可以用完全图的集合表示的非社会网络,并且建议了一个合作网的演化模型^[9],从中可以导出合作网络的一些共性。中药方剂网络就可以作为这样的网络的一个例子。每一种中药方剂中的每一种药材可以看为一个顶点,处于同一道方剂中的2种药材之间的相互作用关系(即在同一道中药方剂的制备过程中共同进行生化反应,形成对于特定病人具有良好效果的药剂的合作关系)可以看作顶点之间的边,每道方剂可以看成一些药材互相作用构成的完全图项目,各道方剂中共同的药材可以看作是这些项目之间联系的桥梁,这样就构成了一个中药方剂网络,如图1所示。

的桥梁,这样就构成了一个中药方剂网络,如图1所示。

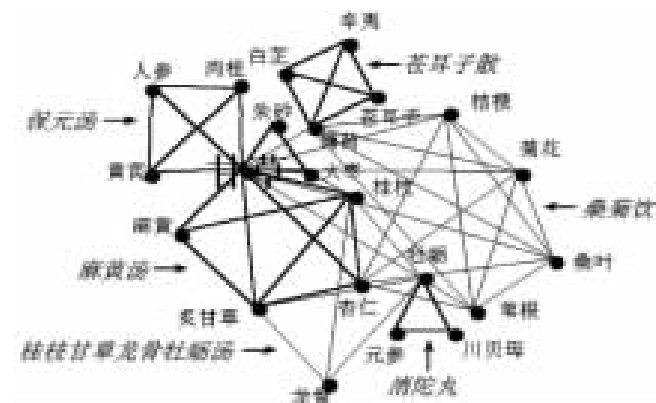


图1 中药方剂网络的完全图项目示意图

我们选用了文献[10,11]中的1536道中药方剂(完全图项目),681个顶点(药材)进行了统计。这些方剂是作为中华民族瑰宝的中药方剂中经过长期验证、经常使用的代表性部分。尽管数据量不太大,但是仍然可以得到不错的统计规律,并且和我们在其它合作网络中得到的结论以及我们的模型的模拟结果一致,说明统计仍旧是合理可信的。

2 模型简述^[9]

设初始 $t=0$ 时有 m_0 个顶点,已经联接成若干个完全图项目。每步时间演化过程增加一个新顶点,在旧顶点中按照一定法则选取 $T-1$ 个,把这 T 个顶点中两两之间尚未连接的也都连接一条边,构成一个新的完全图项目。如此一个项目、一个项目地构造出整个网络。

如果 T 为常数,而且上述选取 $T-1$ 个旧顶点的法则是:选取每个旧顶点 i 的概率正比于它的顶点项目度 h_i (顶点项目度线性优选法则,即选取演员是看他已经演过多少部影片),则仿照 BA 模型的准连续近似解法^[2],可列出 h_i 的准连续近似演化方程:

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = (T-1) \frac{h_i}{\sum_j h_j} \quad (1)$$

类似于 BA 模型的解法,可得到顶点项目度分布为:

$$P(h) = \frac{t}{(m_0+t)\beta} h^{-(\frac{1}{\beta}+1)} \quad (2)$$

即顶点项目度分布为幂律,标度因子 $\gamma = 1/\beta + 1 = (2T-1)/(T-1)$ 。它随常数项目含顶点数 T 的变化而变化, T 趋于无穷时, γ 趋于2。如上所述,当计算重复边时,总有 $k_i = h_i(T-1)$,由此可得重复边的顶点度分布为:

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad (3)$$

且 $v=\gamma$,即度分布 $P(k)$ 和顶点项目度分布 $P(h)$ 均为严格的幂函数,而且标度因子相同。

如果上述选取 $T-1$ 个旧顶点的法则改为随机选取,则类似

地仿照 BA 模型的准连续近似解法^[1,4], 有:

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} = (T-1) \frac{1}{m_0+t-1} \quad (4)$$

类似解得:

$$P(h) = Be^{\frac{1-h}{T-1}} \quad (5)$$

其中 $B = (t+m_0-1)/[(T-1)(m_0+t)]$, 即顶点项目度分布为指数规律, 斜率因子为 $\gamma = -1/(T-1)$ 。它也随常数项目含顶点数 T 的变化而变化, T 趋于无穷时, γ 趋于 0。类似地, 当计算重复边时, 总有 $k_i = h_i(T-1)$, 由此可得重复边的顶点度分布为:

$$\ln P(k) \propto -k/(T-1)^2 \quad (6)$$

这时度分布 $P(k)$ 和顶点项目度分布 $P(h)$ 均为严格的指数函数, 但是斜率因子不同。 $P(k)$ 分布的斜率因子为 $P(h)$ 分布的斜率因子的平方。上述 2 个极端情况的数值模拟结果与解析结论符合得很好。

如果上述选取 $T-1$ 个旧顶点的法则是以一定的概率 p 随机连接、以概率 $1-p$ 优选连接, 容易想到度分布 $P(k)$ 和顶点项目度分布 $P(h)$ 均应该在指数函数和幂函数之间, 可以用文献[12]建议的 SED 分布来描述。我们对 p 取 0.1~0.9 的情况作了数值模拟, 结果显示, 度分布 $P(k)$ 和顶点项目度分布 $P(h)$ 均为很好的 SED 分布, 而且两种分布的关键参数 μ 相同。

一般情况下 T 并不是常数。在我们调研的系统(如淮扬菜谱网、北京和扬州的公交网、中国旅游线路网等, 将另文报道)中, 项目含顶点数 T 的累计分布函数 $P(T \geq T_0)$ 都可以用一个泊松分布

的半支 $p(T) = \frac{1}{A} \frac{\lambda^{T+b}}{(T+b)!} \cdot e^{-\lambda}$ 的形式来拟合, 其中 λ 为函数的峰值,

T 为大于或等于峰值的整数, $1/A$ 为归一化因子。在这里 λ 取 8.5, b 取 0。如果令 T 为以 $P(T)$ 概率分布取值的随机数, 然后在旧顶点中线性优选地(即与其顶点项目度正比例地)选取 $T-1$ 个构成一个完全图项目, 则模拟结果表明: 顶点项目度分布 $P(h)$ 和度分布 $P(k)$ 都是幂律分布, 而且两种分布的幂律因子相同。如果令 T 为以 $P(T)$ 概率分布取值的随机数, 然后随机选取 $T-1$ 个旧顶点时, 数值模拟结果显示顶点项目度分布 $P(h)$ 和度分布 $P(k)$ 都是指数函数分布, 但是两种分布的斜率因子不相同(仍旧满足 $\nu \approx \gamma^2$)。如果 T 为以 $P(T)$ 概率分布取值的随机数, 然后以概率 p 随机选取, $1-p$ 线性优选 $T-1$ 个旧顶点, 数值模拟结果显示, 这时顶点项目度分布 $P(h)$ 和度分布 $P(k)$ 都是很好的 SED 分布, 但是两种分布的关键参数 μ 不一定完全相同。总的看来, 上述的结果说明, 当 T 不是常量, 而是以 $P(T)$ 概率分布取值的随机数时, 并不会对模型的结论造成严重的影响。顶点项目度分布和度分布总是近似一致的。大多数的实际系统的顶点项目度分布和度分布应该在无标度的幂律与随机性的指数函数之间。

3 中药方剂网的统计结果对模型结论的验证

图 2 的插图显示了统计得到的中药方剂网项目尺度 T 的分布, 图 2 的主图显示了统计得到的中药方剂网项目尺度的累计分布。如图所示, 可以用上小节所述的 $P(T)$ 概率分布函数比较好地拟合这些数据。中药一付方剂最多包括 15 种药物, 最少包括 1 种药物, 平均项目尺度为: $\langle T \rangle = 3.90$ 。图 2 的插图说明, 一道方剂由 3 种药材组成的可能性最大, 而更少或更多种药材组成的可能逐渐减少。这体现了中药方剂的特征。

图 3 显示了统计得到的中药方剂网顶点项目度累计分布和重复边顶点度的累计分布, 它们都显示很好的 SED 分布, 而且关键参数相近($\mu=0.45, 0.5$), 同样与我们上一节从模型分析和模拟得到的结论很好地符合。在中药方剂网中顶点项目度最大的是

甘草, 其次是茯苓、人参、当归、黄芪、白术等。这些都是药性平和的辅助药物, 或者是协调、加强主辅药材作用的协助药材。它们在许多不同方剂中被广泛地应用, 成为网络中完全图项目间的最大桥梁。反之, 顶点项目度很小的药材都是很少用的、具有某些独特功能的主、辅药, 例如刺猬皮、白果、白扁豆、百部、蚕砂等。中药方剂网的平均顶点项目度为: $\langle h \rangle = 9.21$, 也就是平均看来每种药材参与 9 个方剂多一些。图 3 显示的 2 个 SED 分布说明网络在形成过程中的动力学机制既有优选的因素, 又有随机的因素, 即构造方剂时既首选最常用的辅药(由于这些辅药参与的方剂很多, 说明它们对许多药物都具有有利的辅助作用), 又考虑各种不同的具体因素(病的种类、病情、病人类型、季节等)来选各种药材。由于具体因素太多, 互相又缺乏关联, 相当于随机选取。这应该是大部分合作网络的共同特征。

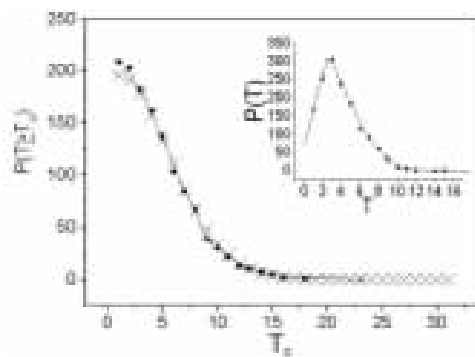


图 2 中药方剂网项目尺度 T 的累计分布
(插图显示项目尺度 T 的分布)的实证统计结果

注: 图中实心圆圈表示相应的统计数据。主图与插图中的光滑曲线仅代表对数据点的一种可能的光滑连接。主图中的大叉子符号才表示用 $P(T)$ 函数拟合的结果($\lambda=20.5, b=-19$)。

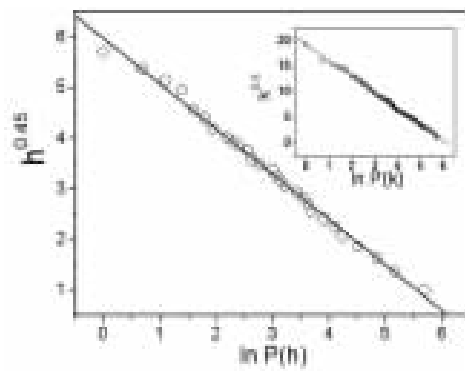


图 3 中药方剂网顶点项目度的累计分布
(插图显示重复边顶点度累计分布)的实证统计结果

注: 图中空心圆圈表示相应的统计数据。主图与插图中的直线表示数据的最小二乘方拟合的结果。

4 一些其它的统计结果

统计得到: $\langle l \rangle = 2.92, C = 0.61$ 。对比文献[3]和文献[1,2]中报道的其它研究结果, 可以认为中药方剂网络是一个小世界网。图 4 显示了统计得到的不计重复边的度分布。它仍旧是一个 SED 分布, 而且关键参数仍旧是 $\mu = 0.50$ 。与图 3 插图显示的计算重复边的度分布规律相比, 两种结果基本相同, 只是图 4 显示的统计规律性较差。

容易证明上述 $c_v = E_v/[k_v(k_v+1)/2]$ 的定义与下列定义等价^[1,13],

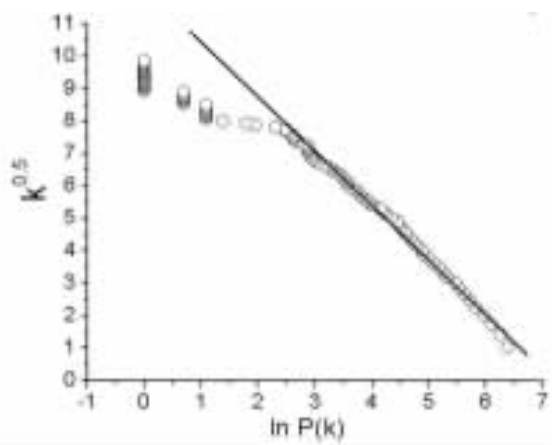


图4 中药方剂网不计重复边的顶点度
累计分布的实证统计结果

即:
$$C_3(k) \sim Q_i / E_i \quad (7)$$

其中 Q_i 指包括 i 顶点的实际三角形数, E_i 指包括 i 的最大可能三角形数。所以 C_{3i} 表示一个顶点 i 周围三角形格子的完备程度。类似地, C_3 表示 C_{3i} 的平均值, 即所有顶点周围三角形格子的平均完备程度。

G Caldarelli 等人^[13]指出, 在很多情况下 C_3 不能定量地表示网络的团簇特征。这是由于有些网络的团簇主体并不是三角形, 而是四边形。他们建议定义“四格子系数”来描述这些网络:

$$C_4(k) \sim Q_i / E_i \quad (8)$$

其中 Q_i 指包括 i 顶点的实际四边形数, E_i 指包括 i 的最大可能四边形数^[13]。类似地 C_4 表示 C_{4i} 的平均值, 即所有顶点周围四边形格子的平均完备程度。容易想到, 像中药方剂网这样具有许多种多边形团簇的网络, 似乎应该定义更加普遍的格子系数:

$$C_n(k) \sim Q_i / E_i \quad (9)$$

其中 Q_i 指包括 i 顶点的实际 n 边形数, E_i 指包括 i 的最大可能 n 边形数。类似地 C_n 表示 C_{ni} 的平均值, 即所有顶点周围 n 边形格子的平均完备程度。对于中药方剂网, 我们只统计了三、四、五、六这 4 种格子系数。结果为: 三格子系数平均值 $C_3=0.61$; 四格子系数平均值 $C_4=0.37$; 五格子系数平均值 $C_5=0.23$; 六格子系数平均值 $C_6=0.14$ 。这些结果表明, 中药方剂网中格子的完备性随 n 的增大而降低, 因此只统计到 $n=6$ 的情况也许是可行的。

E Ravasz 和 A L Barabasi 发现^[14]无标度性和高团簇性在许多实际网络中是共存的, 这可能用网络团簇结构的分形性质来解释, 而这种解释会引导向一个新的幂律:

$$C_3(k) \sim k^{-\nu_1} \quad (10)$$

即具有顶点度 k 的顶点的三格子系数遵从 k 变化时的幂律。E Ravasz 和 A L Barabasi 发现^[14], 相当一部分实际网的统计结果符合(10)式。中药方剂网可以说是一个高度团簇化的网络, 而且可能具有分形结构, 因此可以期望三格子系数、四格子系数、五格子系数及六格子系数都满足(10)式。然而, 我们的统计结果证明: 三、四、五、六这 4 种格子系数的累计统计都满足

$$\lg C_n(h \geq h_c) \sim h_c, \quad (11)$$

$$\text{和} \quad \lg C_n(k \geq k_c) \sim k_c, \quad (12)$$

也就是说, 格子系数对顶点度以及顶点项目度的依赖关系都是指数关系, 这和文献[14]的结论明显不同。详细情况将另文讨论。

5 结论

中药方剂的重要和实用性自不待言。然而, 它是一个太复杂的体系, 因此可能只能主要地依赖经验。我国科学家对中药体系的现代化研究已进行了长期不懈的努力, 然而, 达到对这个体系具有比较好的理解可能还是长期的任务。本文从一个完全不同的角度来看中药方剂体系, 强调它与许多所谓的“合作网络体系”的共同点。这些体系中许多参与者参与了很多合作项目, 故在研究中只考虑参与者在项目中的合作关系, 不讨论(或不存在)它们之间的竞争、对抗或其它类型的关系。可以用一个网络来简化地描述这样的系统, 定义参与者在项目中的合作关系为它们之间的边, 这样, 一个项目就可以用一个它包含的参与者两两连边所构成的完全图来表示。由于拓扑结构具有共同特征, 这样的网络统计性质也具有共同规律。首先, 项目是这类网络中的主导因素, 项目如何组成是网络演化的关键问题, 参与者的项目度分布(即参与者参与多少个项目的数目分布)很可能是这类网络最主要的统计性质, 在很大程度上左右顶点的度分布。其次, 通常这类合作网络都显示出处在幂律和指数规律之间的, 可能被一个 SED 分布函数更好地描述的项目度分布和顶点度分布。

在本文中我们报道了多重格子系数及其标度规律等另外一些新的网络统计参数。我们的研究说明, 这些统计结果也具有合作网络系统的普遍性(细节将另文报道)。本文得到的这样一些新理解当然不能立即有助于改进药方, 但是却可以使大家看到, 中药方剂系统的许多性质是完全合作体系普遍共有的, 这也许会对专业研究人员开阔思路起到借鉴的作用。

参考文献(References)

- [1] Newman M E J. The structure and function of complex networks [J]. *SIAM Review*, 2003, 45: 167
- [2] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 47
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393: 440
- [4] Barabasi A L, Albert. Emergence of Scaling in Random Networks R[J]. *Science*, 1999, 286: 509
- [5] 戴汝为, 操龙兵. 一个开放的复杂巨系统 [J]. *系统工程学报*, 2001, 16(5): 376
- [6] Chi L P, Cai X, et al. Structural properties of US flight network[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20 (8): 1 393
- [7] Wasserman S, Faust K. Social network analysis: methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- [8] Ramasco J J, Dorogavtsev S N, P-Satorras R. Self-organization of collaboration networks[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, 70: 036 106
- [9] Zhang P P, He Y, Zhou T, et al. A model describing the degree distribution of collaboration networks [J]. *submitted to Acta Phys. Sin.*, 2005
- [10] 朱玉祥. 中医处方指南[M]. 北京: 金盾出版社(第二版), 1996
- [11] 刘东亮, 等. 中医常用方剂手册[M]. 北京: 人民军医出版社, 1996
- [12] Laherrere J, Sornette. Stretched and exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales D[J]. *Eur. Phys. J. B*, 1998, 2 : 525
- [13] Caldarelli G, Satorras R P, Vespignani A. Structure of cycles and local ordering in complex networks[J]. *Eur. Phys. J. B*, 2004, 38: 183
- [14] Ravasz E, Barabasi A L. Hierarchical organization in complex networks[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 67: 026 112

(责任编辑 李慧政)