

张妍, 杨志峰. 2009. 一种分析城市代谢系统互动关系的方法 [J]. 环境科学学报, 29(1): 217-224

Zhang Y, Yang Z F. 2009. A method of analyzing the interactions in an urban metabolism system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(1): 217-224

一种分析城市代谢系统互动关系的方法

张妍, 杨志峰*

环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875

收稿日期: 2007-12-11 修回日期: 2008-07-21 录用日期: 2008-12-05

摘要: 提出一种集成了能值分析和生态网络分析, 研究城市代谢系统组间互动关系的方法. 基于城市复合生态系统和城市代谢的基本原理, 在确定城市系统代谢单元和代谢环节的基础上, 采用提出的方法, 分析了城市代谢单元之间掠夺、限制和共生的关系. 最后, 以中国北京、上海、天津、重庆、广州和深圳 6 大城市为例进行了实证研究. 结果表明, 天津、重庆、广州市社会经济子系统对自然生态子系统存在着掠夺关系; 北京、上海和深圳市自然生态子系统对社会经济子系统存在着限制关系; 实现城市代谢系统良性运行的前提在于调控代谢单元间的互动关系, 促进城市代谢单元间的协调共生.

关键词: 城市代谢; 能值分析; 生态网络分析; 代谢单元; 代谢环节

文章编号: 0253-2468(2009)01-217-08 中图分类号: X21 文献标识码: A

A method of analyzing the interactions in an urban metabolism system

ZHANG Yan, YANG Zhifeng*

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control School of Environment Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 11 December 2007; received in revised form 21 July 2008; accepted 5 December 2008

Abstract We integrated energy analysis with eco-network analysis to develop a method for use in analyzing the interactions in an urban metabolic system. Based on the principles of an urban complex ecosystem and urban metabolism, we determined the metabolic units and links and then investigated the interactions of the urban metabolism system, including exploitation, control and mutualism, by the suggested method. Finally, the integrated analysis method was employed to study the metabolic systems of Beijing, Shanghai, Guangzhou, Tianjin, Chongqing and Shenzhen. The results showed that the socioeconomic subsystems of Tianjin, Chongqing and Guangzhou exploited the natural ecological subsystems, while the natural ecological subsystems of Beijing, Shanghai and Shenzhen controlled the socioeconomic subsystems. For sustainable operation of urban metabolic processes, it is essential to regulate and control the relationships between urban metabolic units to improve their mutualism.

Keywords urban metabolism; energy analysis; ecological network analysis; metabolic unit; metabolic link

1 引言 (Introduction)

模拟生物代谢研究城市代谢的互动关系, 是解决城市代谢过程紊乱的根本途径 (Sahely *et al*, 2003). 1965 年 Wolman 将代谢引入城市, 认为城市系统的运作是一个新陈代谢的过程 (Wolman, 1965; White, 1994); 1993 年 Tjallingii 提出, 城市代谢过程的正常运转需要物质和能量输入, 同时这些

输入也带来生态环境问题, 通过剖析城市代谢机理能够提高城市代谢效率 (Tjallingii, 1993); 1999 年 Newman 等提出了城市代谢是基于资源输入与废弃物产出分析的生物系统模式 (Newman, 1999). 在城市代谢的理论层面上, 目前只是对代谢内涵、过程及模式进行了探讨, 而从结构和功能方面分析城市代谢系统的还很少涉及. 生态网络作为分析生态系统结构与功能相互作用的方法, 能够定量研究生态

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40701004); 教育部博士点基金 (No. 20070027033); 国家重点基础发展规划 (973) 项目 (No. 2005CB724204); 教育部科学技术研究重点项目 (No. 106026)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40701004), the Ph.D. Program Foundation of Ministry of Education of China (No. 20070027033), the National Basic Research Program of China (No. 2005CB724204) and the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 106026)

作者简介: 张妍 (1973-), 女, 副教授 (博士), E-mail: zhangyanxy@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

Biography: ZHANG Yan (1973-), female, associate professor (Ph.D.), E-mail: zhangyanxy@163.com; * **Corresponding author:** E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

网络中生态流向及相互作用的过程和强度,从而揭示出生态系统行为的整体性和复杂性 (Jirgensen *et al.*, 2006; Allesina *et al.*, 2004a; 2004; Fath, 2007a). 但是,目前生态网络多应用于自然生态系统食物链网的营养元素代谢 (Gattie *et al.*, 2006; Borrett *et al.*, 2006; Schramski *et al.*, 2006; 2007; Whipple *et al.*, 2007; Vasas *et al.*, 2006), 而涉及城市生态系统的生态网络分析很少 (Suh, 2005; Bailey *et al.*, 2004a; 2004b).

生态网络分析思想来源于 1973年 Hannon 将 Leontief 模型(输入-输出模型)应用于生态系统中物质、能量的流动分析 (Leontief, 1966; Hannon, 1973). 自 1976年 Patten 和 Finn 首次发表了生态网络流动分析的论文以来 (Patten *et al.*, 1976; Finn, 1976), 已有大量的关于生态网络分析的方法及应用研究的报道, 如结构路径分析 (Bamer, 1985; Newman, 2002; Borrett *et al.*, 2003; 2007; Lenzen, 2003; 2007; Fath, 2007b)、网络尺度分析 (Scotti *et al.*, 2007)、功能互动分析 (Rutledge *et al.*, 1976; Ulanowicz, 1991; 2004; 韩博平等, 1993b; 1995a; 樊爱军等, 1996; Fath *et al.*, 1998; 2003; 2004a; 2004b; 2004c; Bata *et al.*, 2007; Latham *et al.*, 2002; 2004)、网络综合分析 (Bosseman, 1989; Burns, 1989; Zorach *et al.*, 2003; Allesina *et al.*, 2003).

能值分析方法是联系经济系统与生态系统的桥梁, 能够为城市代谢研究提供统一量度 (Odum, 1988). 自能值理论创立以来, 已广泛应用于不同尺度的资源和经济发展状况分析与评估中, 如全球尺度 (Odum, 1971)、国家尺度 (Ugliati *et al.*, 1994)、地区和城市尺度 (Huang *et al.*, 2003; 2006; Lan *et al.*, 1994). Odum 创立的能值分析理论, 以能值 (Emergy) 这一全新的价值度量尺度为量纲, 以能值转换率 (Emergy Transformity) 和能值货币比 (Emergy/\$) 为转换介质, 克服传统分析方法中不同品质的能量无法比较以及复杂生态系统中能流、物流、信息流、货币流无法统一量度的难题, 实现了生态与经济价值的统一评价, 使得采用能值分析方法研究城市代谢系统成为可能 (张妍等, 2007). 在过去的 30年中, Odum 和其研究小组对能值转换率进行了多次修正, 但能值转换率的计算仍有许多不确定性因素.

本研究集成能值分析方法与生态网络分析方

法, 研究城市代谢系统中组分间的互动关系. 首先应用能值分析方法核算城市代谢系统中各种生态流, 如能量流、物质流、货币流和信息流等, 之后应用生态网络分析方法剖析城市代谢系统中的生态流向及基本单元间的互动关系, 并将此集成方法应用于 6个典型城市的研究中, 旨在为研究城市生态系统提供一种新思路.

2 研究方法 (Methodology)

2.1 生态网络

生态网络 (Ecological Network) 是模拟生物网络, 描述生态系统中不同分室间物质、能量流动的结构, 其基本单元为分室和路径. 分室是指生态系统中特定的功能单位, 路径是分室间物质、能量传递的通道. 生态网络中的节点, 也称分室 (compartment), 代表生态系统中特定的功能单位; 连接 2个分室的有向线称为流动路径 (flowpath). 对分室、流动路径以及网络性质的分析是生态网络研究的基础. 生态网络作为描述相互作用的形式工具, 能够定量分析城市代谢系统中相互作用的过程和强度, 从而揭示出系统行为的整体性和复杂性 (韩博平等, 1993a; 1995b).

生态网络中分室 i 和分室 j 之间的流动结构如图 1所示. f_{ij} 为分室 i 到 j 的流, t_i 、 y_i 分别为分室 i 的输入流和输出流, T_i 为分室 i 所有输入流量的和, Y_i 为分室 i 所有输出流量的和 (Fath, 2007a). 城市代谢系统大多属于非稳态系统, 因此, $T_i \neq Y_i$. 根据各分室间流量, 可构建生态网络流量矩阵, 反映分室间直接交换的流量的大小, 矩阵为:

$$F = [f_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

式中, f_{ij} 为分室 j 到分室 i 间的流量, n 为分室个数.

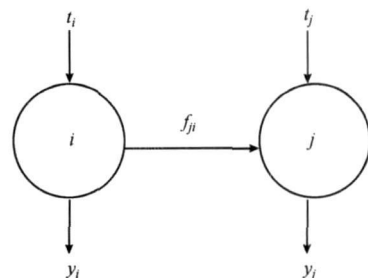


图 1 生态网络中分室间流动结构
Fig. 1 Flow structure of the eco-network

2.2 城市代谢生态网络

城市代谢系统概念模型由代谢主体和代谢环

境构成,图2中标出了系统中各种基本生态流.城市代谢主体为社会经济子系统,是城市代谢系统中“吞”、“吐”物质的可独立处理的单元.代谢环境包括内部环境和外部环境,图2中以虚框为基准划分了代谢系统的内部环境和外部环境.这里把内部环境定义为自然生态子系统,我们主要分析它与社会经济子系统之间的互动关系.社会经济子系统利用来自于自然生态子系统的可更新与不可更新资源进行生产生活,同时排放废弃物进入到自然生态子系统中;社会经济子系统还与外部环境进行着物质能量的交换.

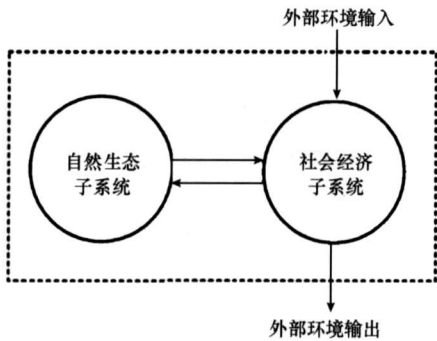


图2 城市代谢系统概念模型

Fig 2 Concept model in the urban metabolic system

本文模拟生物网络,建立了城市代谢生态网络模型,反映分室间生态流的流向、流量(图3).分室1为自然生态子系统,分室2为社会经济子系统,基本生态流为分室1对分室2输入流(f_{21})、分室2对分室1输出流(f_{12})、外部环境对分室2输入流(t_2)、分室2对外部环境输出流(y_2).依据能值分析的基本原理(Odum, 1996; Ulgati et al., 1998; Bakshi 2000),建立城市代谢系统能值流图(图4).集成能值和生态网络分析方法,量化城市代谢系统的基本生态流: f_{21} 用可更新资源与不可更新资源能值的和($R+N$)表示, f_{12} 用废弃物能值流(W)表示, t_2 用系

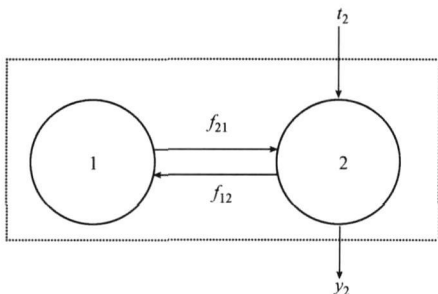


图3 城市代谢生态网络流动结构

Fig 3 Flow structure of the urban metabolic eco-network

统购买资源和服务能值流(F)表示, y_i 用系统输出货物和服务能值流(E)表示,具体见公式(2)~(6).

$$f_{21} = R + N \tag{2}$$

$$f_{12} = W \tag{3}$$

$$t_2 = F \tag{4}$$

$$T_1 = f_{12} \tag{5}$$

$$T_2 = t_2 + f_{21} \tag{6}$$

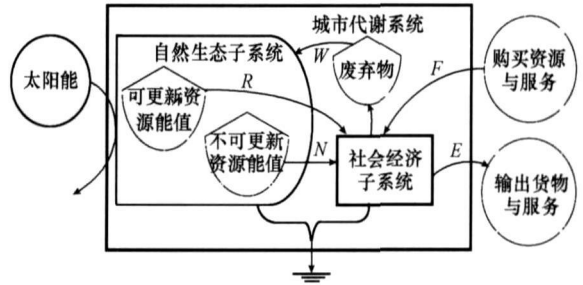


图4 城市代谢系统能值流动图

Fig 4 Energy flow diagram for the Beijing urban metabolic system

对于各种生态流的核算,遵循 Odum 提出的能值核算方法, R 主要由太阳能、风能、雨水化学能和势能、地球转动能和径流能构成,由于这些能量均是源自同一过程的复合产物,在归并中仅计入其中的最大项,以避免重复计算(如深圳可更新资源能值核算过程中,通过比较各能量能值,最后确定能值最大的雨水化学能和势能为可更新资源能值); N 为城市内所有燃料、土壤流失、石灰石、砂砾和铁矿等资源的能值之和; W 反映城市代谢系统的污染排放压力,为废水和废渣能值之和(在 Odum 能值核算方法中,只考虑了废水和废渣的能值,对废气考虑不足).

2.3 城市代谢系统互动关系

本研究中借鉴生态网络有效利用矩阵(Patten 1991),分析城市代谢系统中分室间的互动关系,以期找出城市社会经济子系统与自然生态子系统间的作用关系.有效利用矩阵定义为 D ,其元素 d_{ij} 被命名为分室间生态流的有效利用率(Fath, 2007a),可表示为:

$$d_{ij} = (f_{ij} - f_{ji}) T_i \tag{7}$$

对于本研究所建立的只有2个分室的模型来说,有效利用矩阵 D 可表示为:

$$D = (d_{ij}) = \begin{bmatrix} \frac{f_{11} - f_{11}}{T_1} & \frac{f_{12} - f_{21}}{T_1} \\ \frac{f_{21} - f_{12}}{T_2} & \frac{f_{22} - f_{22}}{T_2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

根据有效利用矩阵 D , 可得到无量纲的综合利用强度矩阵 U (Patten, 1991; Fath, 2007a):

$$U = (u_{ji}) = D^0 + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D^m + \dots = (I - D)^{-1} \quad (9)$$

式中, 矩阵 U 反映了生态网络中分室间综合作用的强度与方式, 单位矩阵 I 反映了流经各分室的流量产生的自我反馈作用, 矩阵 D 反映了分室间直接作用的强度与方式, D^k ($k > 2$) 则反映了分室间通过间接路径产生的相互作用. 在网络分析中, 间接作用的传递路径长度一定大于 1, 可以通过有效利用矩阵 D 的高级次幂来确定, 如 D^2 表示有效利用沿着 2 阶路径进行转换, D^3 表示有效利用沿着 3 阶路径进行转换 (Borrett *et al.*, 2003).

通过综合利用强度矩阵元素的正负号可以确定生态网络中分室间相互作用的方式. 对于本研究中所建立的只有 2 个分室的模型来说, 综合利用强度矩阵的符号矩阵为:

$$\text{sgn}(U) = \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix} \text{ 或 } \text{sgn}(U) = \begin{bmatrix} + & + \\ - & + \end{bmatrix} \quad (10)$$

($\text{sgn}(u_{21}), \text{sgn}(u_{12})$) = (+, -) 表示分室 2 对分室 1 存在着掠夺关系, ($\text{sgn}(u_{21}), \text{sgn}(u_{12})$) = (-, +) 表示分室 1 对分室 2 存在着限制关系. 矩阵 U 主对角线上元素都为 (+), 表示每一分室都是

自我互动的体系, 能够从网络中获得自我促进、自我发展的正向效益 (Patten *et al.*, 1976, 1991). 综合利用强度矩阵的符号矩阵 $\text{sgn}(U)$ 有 3 个 (+) 和 1 个 (-), 说明城市代谢系统有显著的正向影响, 存在着网络的共生作用.

3 结果 (Results)

以中国北京、上海、天津、重庆、广州和深圳 6 大城市为例, 应用能值分析法、生态网络分析法以及所建的城市代谢生态网络模型剖析城市代谢系统互动关系. 选取 2004 年 6 个城市的物质、能量、货币流动数据, 采用能值分析方法对城市代谢系统进行生态经济分析、评价. 主要数据来源于北京市统计年鉴 (2005 年)、上海市统计年鉴 (2005 年)、天津市统计年鉴 (2005 年)、重庆市统计年鉴 (2005 年)、广州市统计年鉴 (2005 年)、深圳市统计年鉴 (2005 年) 和中国环境年鉴 (2005 年). 原始数据乘以能值转换率就可以得到该项目的能值. 能值转换率是产出一单位能量所需另一类型能量的量, 我们这里以太阳光表示, 计算单位为太阳能焦耳, 符号为 sej . 原始数据统一转换为能值单位后, 归并为投入产出能值核算表 (见表 1), 再将能值流的值代入公式 (2)、(3)、(4)、(5) 和 (6), 得到城市代谢系统各种生态流计算值 (见表 2).

表 1 城市代谢系统能值核算表

Table 1 Energy analysis for evaluating an urban metabolic system

能值指标	太阳能值						能值转换率	引用能值转换率的来源
	北京	上海	天津	重庆	广州	深圳		
可更新资源 ($R, \times 10^{22} \text{ sej}$)	0.13	0.07	0.09	1.83	0.29	0.04		
1 太阳能 ($\times 10^{19} \text{ sej}$)	7.19	2.55	5.09	34.03	3.60	0.94	1 sej/J	Odum <i>et al.</i> , 2000
2 风能 ($\times 10^{20} \text{ sej}$)	1.22	0.97	1.65	0.84	0.37	0.18	$2.45 \times 10^3 \text{ sej/J}$	Odum <i>et al.</i> , 2000
3 雨水势能 ($\times 10^{20} \text{ sej}$)	0.92	0.03	0.06	35.89	10.42	0.69	$4.70 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum <i>et al.</i> , 2000
4 雨水化学能 ($\times 10^{21} \text{ sej}$)	1.22	0.72	0.94	14.68	1.83	0.38	$3.05 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum <i>et al.</i> , 2000
5 地球转动能 ($\times 10^{21} \text{ sej}$)	1.08	0.74	0.76	7.23	0.98	0.29	$5.80 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum <i>et al.</i> , 2000
6 径流能 ($\times 10^{20} \text{ sej}$)	2.69	5.29	1.60	84.19	7.39	0.19	$3.05 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum <i>et al.</i> , 2000
本地不可更新资源 ($N, \times 10^{22} \text{ sej}$)	7.29	2.57	9.49	14.12	6.12	0.01		
7 燃料 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	2.03	0.31	7.12	5.59	0.34	0.001	$6.69 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum, 1996
8 水土流失 ($\times 10^{21} \text{ sej}$)	3.29	3.59	6.27	19.53	1.85	0.04	$1.71 \times 10^9 \text{ sej/g}$	Huang <i>et al.</i> , 2005
9 石灰石 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	2.27	1.15	1.05	3.84	3.36	0.002	$1.68 \times 10^9 \text{ sej/g}$	Brandt-Williams, 2001
10 砂 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	1.51	0.76	0.70	2.56	2.24	0.003	$1.68 \times 10^9 \text{ sej/g}$	Cohen <i>et al.</i> , 2006
11 铁矿 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	1.14	0	0.004	0.16	0	0	$1.44 \times 10^9 \text{ sej/g}$	Odum, 1996
进口 ($F, \times 10^{22} \text{ sej}$)	84.97	59.56	17.13	3.04	24.36	39.05		
12 货物 ($\times 10^{23} \text{ sej}$)	6.70	3.26	0.98	0.09	1.15	3.12	$9.37 \times 10^{12} \text{ sej/\$}$	Jiang <i>et al.</i> , 2007
13 服务 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	9.04	4.39	1.32	0.13	1.55	4.21	$9.37 \times 10^{12} \text{ sej/\$}$	Jiang <i>et al.</i> , 2007
14 燃料 ($\times 10^{22} \text{ sej}$)	8.97	22.61	6.02	1.97	11.36	3.63	$8.55 \times 10^4 \text{ sej/J}$	Odum, 1996

续表 1

能值指标	太阳能值						能值转换率	引用能值转换率的来源
	北京	上海	天津	重庆	广州	深圳		
出口 ($E, \times 10^{22}$ sej)	21.31	32.87	10.65	1.24	11.66	45.23		
15 货物 ($\times 10^{23}$ sej)	1.93	2.97	0.96	0.11	1.05	4.09	6.34×10^{12} sej/£	Jiang <i>et al.</i> , 2007
16 服务 ($\times 10^{22}$ sej)	2.03	3.13	1.01	0.12	1.11	4.31	6.34×10^{12} sej/£	Jiang <i>et al.</i> , 2007
废物 ($W, \times 10^{22}$ sej)	11.38	4.63	1.33	2.81	3.01	2.88		
17 废水 ($\times 10^{22}$ sej)	3.02	3.68	1.09	2.14	2.03	1.96	1.80×10^6 sej/J	Nelson <i>et al.</i> , 2001, Huang <i>et al.</i> , 2005
18 固废 ($\times 10^{21}$ sej)	5.65	9.54	2.40	6.69	9.77	9.23	6.66×10^5 sej/J	Nelson <i>et al.</i> , 2001, Huang <i>et al.</i> , 2005
总能值 ($U, \times 10^{22}$ sej)	92.39	62.21	26.72	18.99	30.77	39.11		

Note: The total global empower was 15.83×10^{24} sej a⁻¹ in 2000 (Odum *et al.*, 2000).

表 2 城市代谢系统生态流计算值

Table 2 Values of eco-flows in an urban metabolic system

城市	$f_{21}/10^{22}$ sej	$f_{12}/10^{22}$ sej	$t_2/10^{22}$ sej	$T_1/10^{22}$ sej	$T_2/10^{22}$ sej
北京	7.42	11.38	84.97	7.42	92.39
上海	2.65	4.63	59.56	2.65	62.21
天津	9.59	1.33	17.13	9.59	26.72
重庆	15.94	2.81	3.05	15.94	18.99
广州	6.41	3.01	24.36	6.41	30.77
深圳	0.06	2.88	39.05	0.06	39.11

根据生态网络分析方法,由公式(1)得到流量矩阵 $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$,代入公式(7)和(8)可获得有效利用矩阵 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$,再代入公式(9)可得到综合利用强度矩阵 $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$,并根据公式(10)得到符号矩阵进而分析分室间的互动关系。

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 7.42 \\ 11.38 & 0 \end{bmatrix} & F_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 2.65 \\ 4.63 & 0 \end{bmatrix} \\
 F_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 9.59 \\ 1.33 & 0 \end{bmatrix} & F_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 15.94 \\ 2.81 & 0 \end{bmatrix} \\
 F_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 6.41 \\ 3.01 & 0 \end{bmatrix} & F_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.06 \\ 2.88 & 0 \end{bmatrix} \\
 D_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.35 \\ -0.04 & 0 \end{bmatrix} & D_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.43 \\ -0.03 & 0 \end{bmatrix} \\
 D_3 &= \begin{bmatrix} 0 & -6.18 \\ 0.31 & 0 \end{bmatrix} & D_4 &= \begin{bmatrix} 0 & -4.67 \\ 0.69 & 0 \end{bmatrix} \\
 D_5 &= \begin{bmatrix} 0 & -1.13 \\ 0.11 & 0 \end{bmatrix} & D_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.98 \\ -0.07 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_1 &= \begin{bmatrix} 0.99 & 0.34 \\ -0.04 & 0.99 \end{bmatrix} & U_2 &= \begin{bmatrix} 0.99 & 0.42 \\ -0.03 & 0.99 \end{bmatrix} \\
 U_3 &= \begin{bmatrix} 0.34 & -2.12 \\ 0.11 & 0.34 \end{bmatrix} & U_4 &= \begin{bmatrix} 0.24 & -1.10 \\ 0.16 & 0.24 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_5 &= \begin{bmatrix} 0.89 & -1.00 \\ 0.10 & 0.89 \end{bmatrix} & U_6 &= \begin{bmatrix} 0.93 & 0.92 \\ -0.07 & 0.93 \end{bmatrix} \\
 \text{sgn}(U_1) &= \begin{bmatrix} + & + \\ - & + \end{bmatrix} & \text{sgn}(U_2) &= \begin{bmatrix} + & + \\ - & + \end{bmatrix} \\
 \text{sgn}(U_3) &= \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix} & \text{sgn}(U_4) &= \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix} \\
 \text{sgn}(U_5) &= \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix} & \text{sgn}(U_6) &= \begin{bmatrix} + & + \\ - & + \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4 讨论 (Discussion)

4.1 城市代谢系统生态流

从表 1和表 2可以看出,在 6大城市代谢结构中,重庆可更新资源能值最高,其次为广州、北京、天津、上海和深圳;不可更新资源能值最高的也是重庆,其次为天津、北京、广州、上海和深圳.这说明,重庆市资源利用强度比较大,良好的自然地理条件不仅为城市发展提供丰富的可更新资源,而且提供了大量的不可更新资源;同时说明深圳市的发展并不是以本地资源为支撑的,属于外向型经济.北京市输入能值最大,其次为上海、深圳、广州、天津和重庆,说明北京市发展过度依赖于外部的投入,城市系统自给率比较低;上海市输出能值最高,其次为北京、广州、深圳、天津和重庆,说明上海市

对外贸易活动比较频繁,对外部环境的贡献比较大;重庆输入能值、输出能值最低,为北京市的 0.04 和上海的 0.04 倍,说明重庆市代谢流中外界对其贡献以及其对外界的贡献比较小。污染排放方面,北京、上海比较高,天津最低,说明天津在污染物排放压力比较小的情况下支持社会经济的发展,如果能够提高废物资源化水平,整体城市有效利用效率将会有很大提高。

4.2 城市代谢系统互动关系

由计算结果可知,城市代谢系统内部社会经济子系统与自然生态子系统之间是存在着掠夺和限制关系。天津、重庆、广州综合利用强度符号矩阵 $(\text{sgn}(u_{21}), \text{sgn}(u_{12})) = (+, -)$,表明社会经济系统对自然生态系统存在着掠夺关系;北京、上海和深圳市综合利用强度符号矩阵 $(\text{sgn}(u_{21}), \text{sgn}(u_{12})) = (-, +)$,表明自然生态系统对社会经济系统存在着限制关系。北京、上海和深圳市自然生态子系统的资源供给能力和污染消纳能力已不能支撑社会经济的发展,代谢系统运行大多依赖于外部资源的输入,说明这些城市的发展面临着来自于自然生态子系统的严重制约。重庆、天津和广州市处于社会经济快速发展时期,对本地资源环境的需求日益增强,存在着资源过度开发、环境污染超负荷排放的问题,说明这些城市的发展对自然生态系统造成非常大的压力。

5 结论 (Conclusions)

1) 本研究中基于城市代谢的基本原理,采用能值分析方法,克服了传统城市生态系统分析与评估中无法统一量化物质流、能量流、信息流和货币流的缺陷,并采用生态网络方法分析了城市代谢系统分室间互动关系,为城市生态系统研究提供了一种新思路。研究结果表明,集成能值分析法与生态网络分析法来研究城市代谢系统互动关系是可行的。

2) 城市代谢系统的互动关系表现为限制、掠夺和共生。现有城市代谢系统运行机制集中体现在限制和掠夺关系,而共生是未来城市循环经济发展能够实现的目标。通过对中国北京、上海、广州、天津、重庆和深圳 6 大城市的代谢机制研究,可知天津、重庆、广州社会经济子系统对自然生态子系统存在着掠夺关系;北京、上海和深圳市自然生态子系统对社会经济子系统存在着限制关系。

责任作者简介: 杨志峰 (1963—), 男, 教授, 博士。E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

参考文献 (References):

- Allesina S, Bondavalli C. 2003. Steady state of ecosystem flow networks: a comparison between balancing procedures [J]. *Ecological Modelling* 165 (2-3): 221-229
- Allesina S, Ulanowicz R E. 2004b. Cycling in ecological networks: Finn's index revisited [J]. *Computational Biology and Chemistry* 28 (3): 227-233
- Allesina S, Bondavalli C. 2004a. WAND: an ecological network analysis user-friendly tool [J]. *Environmental Modelling & Software* 19 (4): 337-340
- Bailey R, Allen J K, Bras B. 2004. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial systems. Part I: tracing flows [J]. *Journal of Industrial Ecology* 8 (1): 45-68
- Bailey R, Bras B, Allen J K. 2004b. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial systems. Part II: flow metrics [J]. *Journal of Industrial Ecology* 8 (1): 69-91
- Bakshi B R. 2002. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering [J]. *Computers and Chemical Engineering* 26 (2): 269-282
- Bamer M. 1985. A simple random path method for the analysis of flow networks [J]. *Ecological Modelling* 28 (3): 165-180
- Bata S A, Borrett S R, Patten B C, Whipple S J, *et al*. 2007. Equivalence of throughflow- and storage-based environments [J]. *Ecological Modelling* 206 (3-4): 400-406
- Borrett S R, Fath B D, Patten B C. 2007. Functional integration of ecological networks through pathway proliferation [J]. *Journal of Theoretical Biology* 245 (1): 98-111
- Borrett S R, Patten B C. 2003. Structure of pathways in ecological networks: relationships between length and number [J]. *Ecological Modelling* 170 (2-3): 173-184
- Borrett S R, Whipple S J, Patten B C, *et al*. 2006. Indirect effects and distributed control in ecosystems: temporal variation of indirect effects in a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River Estuary, USA: time series analysis [J]. *Ecological Modelling* 194 (1-3): 178-188
- Bossemán R W. 1989. Sensitivity of cycling measure derived from ecological flow analysis [J]. *Ecological Modelling* 48 (1-2): 45-64
- Brandt-Williams S. 2001. Energy of ecosystems in Handbook of energy evaluation in Handbook of Energy Evaluation [M]. Gainesville: University of Florida Center for Environmental Policy, 5-32
- Bums T P. 1989. Lindeman's contradiction and the trophic structure of ecosystems [J]. *Ecology* 70 (5): 1355-1362
- Cohen M J, Brown M T, Shepherd K D. 2006. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using energy synthesis [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (2-4): 249-269
- 樊爱军, 王开发. 1996. 生态网络中能量流动的分室模型分析 [J]. *重*

- 庆师范学院学报(自然科学版). 16(1): 51—55
- Fan A J, Wang K F. 1996. Analysis of compartment model of energy flow in econetwork [J]. Journal of Chongqing Teachers College (Natural Science Edition), 16(1): 51—55 (in Chinese)
- Fath B D, Borrett S R. 2006. A MATLAB function for network environment analysis [J]. Environmental Modelling & Software 21 (3): 375—405
- Fath B D, Cabezas H, Pawłowski C W. 2003. Regime changes in ecological systems: an information theory approach [J]. Journal of Theoretical Biology, 222(4): 517—530
- Fath B D, Grant W E. 2007. Ecosystems as evolutionary complex systems: Network analysis of fitness models [J]. Environmental Modelling and Software 22(5): 693—700
- Fath B D, Hales G. 2007. Cyclic energy pathways in ecological food webs [J]. Ecological Modelling 208(1): 17—24
- Fath B D, Killian M C. 2007. The relevance of ecological pyramids in community assemblages [J]. Ecological Modelling 208(2-4): 286—294
- Fath B D, Patten B C. 1998. Network synergism: Emergence of positive relations in ecological systems [J]. Ecological Modelling 107(2-3): 127—143
- Fath B D. 2004a. Distributed control in ecological networks [J]. Ecological Modelling 179(2): 235—245
- Fath B D. 2004b. Network analysis applied to large-scale cyber-ecosystems [J]. Ecological Modelling 171(1-3): 329—337
- Fath B D. 2004c. Network analysis in perspective: comments on WAND: an ecological network analysis user-friendly tool [J]. Environmental Modelling and Software, 19(4): 341—343
- Fath B D. 2007a. Network mutualism: Positive community-level relations in ecosystems [J]. Ecological Modelling 208(1): 56—67
- Fath B D. 2007b. Structural food web regimes [J]. Ecological Modelling 208(2-4): 391—394
- Finn J T. 1976. Measure of ecosystem structure and function derived from analysis flows [J]. Journal of Theoretical Biology, 56(2): 363—380
- Gattiedi K, Schramski J R, Borrett S R, et al. 2006. Indirect effects and distributed control in ecosystems: Network environment analysis of a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River Estuary USA: Steady-state analysis [J]. Ecological Modelling 194(1-3): 162—177
- 韩博平. 1993a. 生态网络与生态网络分析 [J]. 自然杂志, (5): 46—49
- Han B P. 1993a. Eco-network and eco-work analysis [J]. Chinese Journal of Nature (suppl): 46—49 (in Chinese)
- 韩博平. 1993b. 生态网络分析的研究进展 [J]. 生态学杂志, 12(6): 41—45
- Han B P. 1993b. Progresses on the analysis of econetwork [J]. Chinese Journal of Ecology, 12(6): 41—45 (in Chinese)
- 韩博平. 1995a. 生态网络中物质、能量流动的时间链分析 [J]. 生态学报, 15(2): 163—168
- Han B P. 1995a. The time chain analysis of matter and energy flow in econetworks [J]. Acta Ecologica Sinica, 15(2): 163—168 (in Chinese)
- 韩博平. 1995b. 关于生态网络分析理论的哲学思考 [J]. 自然辩证法研究, 11(7): 42—45
- Han B P. 1995b. Theoretical study on econetwork analysis [J]. Studies in Dialectics of Nature, 11(7): 42—45 (in Chinese)
- Hannon B. 1973. The structure of ecosystems [J]. Journal of Theoretical Biology, 41: 535—556
- Huang S L, Chen C W. 2005. Theory of urban energetics and mechanisms of urban development [J]. Ecological Modelling 189(1-2): 49—71
- Huang S L, Hsu W L. 2003. Materials flow analysis and energy evaluation of Taipei's urban construction [J]. Landscape and Urban Planning 63(2): 61—74
- Huang S L, Lee C L, Chen C W. 2006. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emergy synthesis versus material analysis [J]. Resources Conservation and Recycling 48(2): 166—196
- Jiang M M, Chen B, Zhou J B, et al. 2007. Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China [J]. Energy Policy, 35(9): 4704—4719
- Jørgensen S E, Fath B. 2006. Examination of ecological networks [J]. Ecological Modelling 196(3-4): 283—288
- Lan S F, Odum H T. 1994. Emergy evaluation of the environment and economy of Hong Kong [J]. Environmental Science, 6(4): 432—439 (in Chinese)
- Latham L G, Scully E P. 2002. Quantifying constraint to assess development in ecological networks [J]. Ecological Modelling 154(1-2): 25—44
- Latham L G, Scully E P. 2004. Network optimization model implies strength of average mutual information in ascendancy [J]. Ecological Modelling 179(3): 373—392
- Lenzen M. 2003. Environmentally important paths, linkages and key sectors in the Australian economy [J]. Structural Change and Economic Dynamics 14(1): 1—34
- Lenzen M. 2007. Structural path analysis of ecosystem networks [J]. Ecological Modelling 200(3-4): 334—342
- Leontief W W. 1966. Input-output economics [M]. New York: Oxford University Press, 56—78
- Nelson M, Odum H T, Brown M T, et al. 2001. "Living off the land": resource efficiency of wetland wastewater treatment. Advances in Space Research, 27(9): 1547—1556
- Newman M E J. 2002. The structure and function of networks [J]. Computer Physics Communications 147(1-2): 40—45
- Newman P W G. 1999. Sustainability and cities: extending the metabolism model [J]. Landscape and Urban Planning 44(4): 219—226
- Odum H T, Brown M T, BrandtWilliam S. 2000. Introduction and Global Budget. In Handbook of Emergy Evaluation [M]. Gainesville: University of Florida Center for Environmental Policy, 3—10
- Odum H T. 1971. Environment, Power and Society [M]. New York: Wiley, 331
- Odum H T. 1988. Self-organization, transformity, and information [J].

- Science, 242: 1132—1139
- Odom H T. 1996. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 154—200
- Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, *et al*. 1976. Propagation of cause in ecosystems. Patten B C. Systems analysis and simulation in ecology (Volume IV.) [M]. New York: Academic Press, 56—68
- Patten B C. 1991. Network ecology: indirect determination of the life-environment relationship in ecosystems. In: H. Gashi M, Bums T P. Theoretical studies of ecosystems: the Network Perspective [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 61—70
- Rutledge R W, Basore B L, Mulholland R J. 1976. Ecological stability: an information theory viewpoint [J]. Journal of Theoretical Biology, 57(2): 355—371
- Sahely H R, Dudding S, Kennedy C A. 2003. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 30(2): 468—483
- Schramski J R, Gattie D K, Patten B C, *et al*. 2006. Indirect effects and distributed control in ecosystems: distributed control in the environment networks of a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River Estuary, USA: steady-state analysis [J]. Ecological Modelling, 194(1-3): 189—201
- Schramski J R, Gattie D K, Patten B C, *et al*. 2007. Indirect effects and distributed control in ecosystems: distributed control in the environment networks of a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River estuary USA: Time series analysis [J]. Ecological Modelling, 206(1-2): 18—30
- Scotti M, Podani J, Jordn n E. 2007. Weighting scale dependence and indirect effects in ecological networks: a comparative study [J]. Ecological Complexity, 4(3): 148—159
- Suh S. 2005. Theory of materials and energy flow analysis in ecology and economics [J]. Ecological Modelling, 189(3-4): 251—269
- Tjallingii S P. 1993. Ecopolis: Strategies for Ecologically Sound Urban Development [M]. Leiden: Backhuys Publishers, 44—53
- Ulanowicz R E. 1991. Ecosystem flow networks: loaded dice? [J]. Mathematical Biosciences, 103(1): 45—68
- Ulanowicz R E. 2004. Quantitative methods for ecological network analysis [J]. Computational Biology and Chemistry, 28(5-6): 321—339
- Ulgati S, Brown M T. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems [J]. Ecological Modelling, 108(1-3): 23—26
- Ulgati S, Odom H T, Bastioni S. 1994. Energy use, environmental loading and sustainability: an energy analysis of Italy [J]. Ecological Modelling, (73): 215—268
- Vasas V, Jordn N E. 2006. Topological keystone species in ecological interaction networks: considering link quality and non-trophic effects [J]. Ecological Modelling, 196(3-4): 365—378
- Whipple S J, Bonett S R, Patten B C, *et al*. 2007. Indirect effects and distributed control in ecosystems: Comparative network environment analysis of a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River estuary, USA—Time series analysis [J]. Ecological Modelling, 206(1-2): 1—17
- White R R. 1994. Urban Environmental Management: Environmental Change and Urban Design [M]. Chichester: John Wiley, 42—50
- Wohlan A. 1965. The metabolism of the city [J]. Scientific American, 213: 179
- Zhang Y, Yang Z F, Li W. 2006a. Analyses of urban ecosystem based on information entropy [J]. Ecological Modelling, 197(1-2): 1—12
- Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. 2006b. Measurement and evaluation of interactions in complex urban ecosystem [J]. Ecological Modelling, 196(1-2): 77—89
- 张妍, 杨志峰. 2007. 北京城市物质代谢的能值分析与生态效率评估 [J]. 环境科学学报, 27(11): 1892—1899
- Zhang Y, Yang Z F. 2007. Energy analysis of urban material metabolism and evaluation of eco-efficiency in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(11): 1892—1899 (in Chinese)
- Zorach A C, Ulanowicz R E. 2003. Quantifying the complexity of flow networks: how many roles are there? [J]. Complexity, 8(3): 68—76