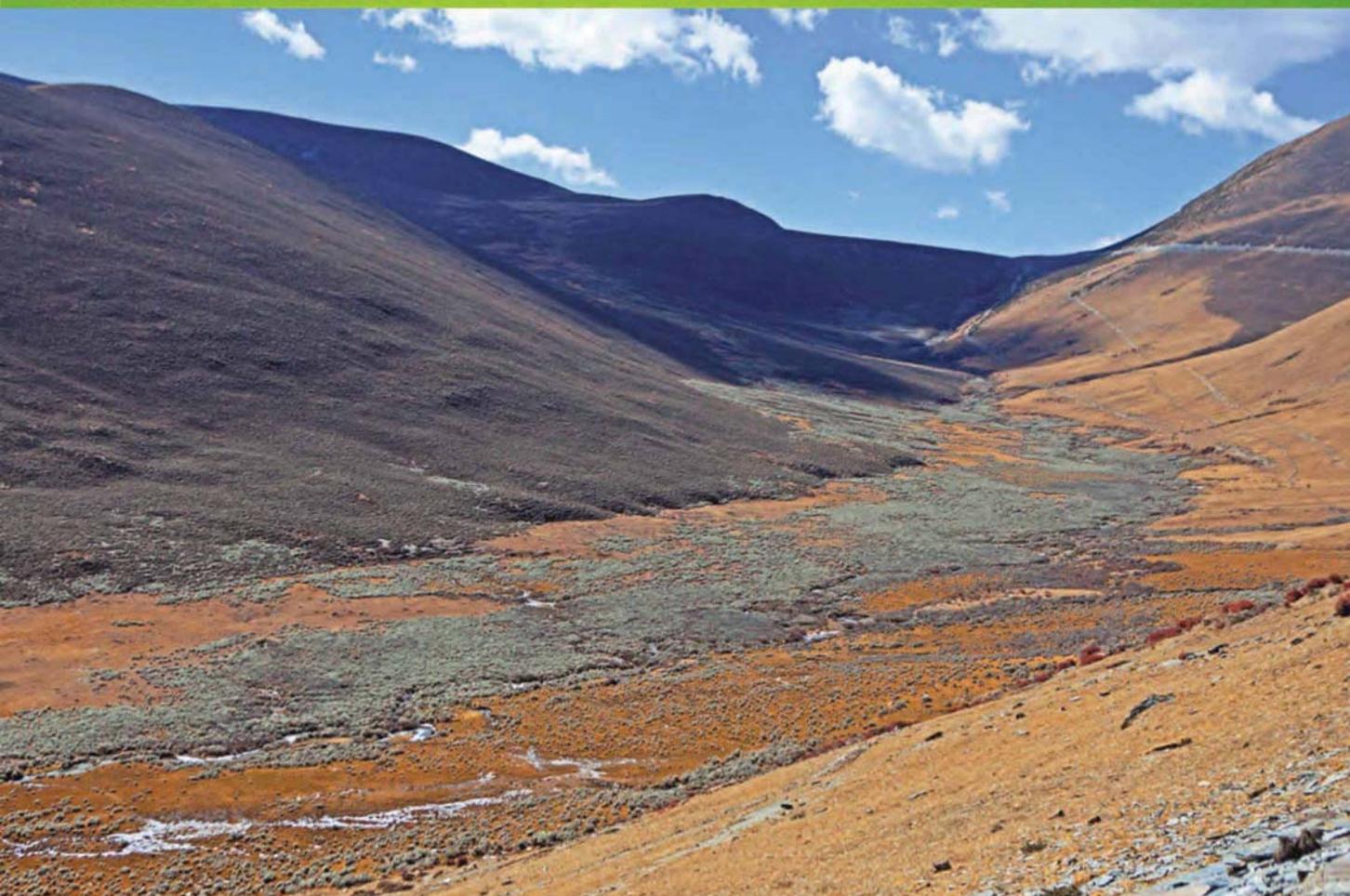


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 18 期      2013 年 9 月 (半月刊)

## 目 次

### 中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述 .....	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展 .....	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 .....	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 .....	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展 .....	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 .....	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 .....	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 .....	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 .....	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 .....	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 .....	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 .....	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 .....	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH <sub>3</sub> 挥发及氮肥利用率的影响 .....	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 .....	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 .....	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 .....	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 .....	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 .....	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 .....	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 .....	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 .....	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 .....	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 .....	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态 .....	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 .....	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 .....	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 .....	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 .....	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 .....	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 .....	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应 .....	张雪妮,吕光辉,杨晓东,等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征.....	温远光,雷丽群,朱宏光,等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联.....	刘金福,朱德煌,兰思仁,等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系.....	王文君,杨万勤,谭波,等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态.....	范跃新,杨玉盛,杨智杰,等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征 .....	李从娟,雷加强,徐新文,等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征.....	戴年华,邵明勤,蒋丽红,等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响.....	陈纯,李思嘉,肖利娟,等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构.....	刘沙沙,贾沁贤,刘喜方,等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律.....	潘影,徐增让,余成群,等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征.....	姚昕,朱广伟,高光,等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究.....	王传辉,吴立,王心源,等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应 .....	李正国,杨鹏,唐华俊,等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应.....	谢冬明,金国花,周杨明,等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征.....	王超,李新辉,赖子尼,等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力 .....	贾宝全,王成,邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化 .....	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例.....	周健,肖荣波,庄长伟,等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究.....	范敬龙,刘海龙,雷加强,等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析 .....	夏富强,唐宏,杨德刚,等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例.....	魏超,叶属峰,过仲阳,等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性 .....	梁君,徐汉祥,王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化.....	江志兵,刘晶晶,李宏亮,等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例.....	刘耕源,杨志峰,陈彬,等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例.....	徐飞,蔡体久,琚存勇,等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿.....	李惠梅,张安录,王珊,等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应.....	李春林,刘森,胡远满,等 (5952)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 514 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 59 \* 2013-09



**封面图说:** 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地,沟谷地带由于低平且水分较充足,生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线,以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统,高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明,易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关,显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而,这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

**彩图及图说提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305101008

刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 徐琳瑜, 张妍. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究: 以大连市为例. 生态学报, 2013, 33(18): 5926-5934.

Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Xu L Y, Zhang Y. Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5926-5934.

## 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究 ——以大连市为例

刘耕源, 杨志峰\*, 陈彬, 徐琳瑜, 张妍

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

**摘要:** 基于生态热力学的城市系统结构的研究是实现城市生态规划和环境管理等实际工作优化与决策的关键理论问题之一。基于生态热力学焓流核算方法, 建立大连市生态网络模型, 通过路径分析探讨了代谢长度与代谢路径数量、连通性的变化关系, 确定了城市代谢系统的基本营养结构, 以及各组分间的作用途径; 利用网络有效利用矩阵中正负号分布、数量比值, 确定了城市代谢系统各组分间的作用方式、共生状况, 最后揭示出固有网络结构中复杂的生态关系。结果表明: 大连是具有一个高度竞争性的部门共生体, 而且随着代谢长度的增加, 城市代谢系统中各组分间的作用途径更为多样, 代谢路径数量、连通性不断提高。该研究可为政策制定者确定如何在现有的经济基础上, 避免支付高额生态成本和重复发达国家城市建设中的末端控制模式, 推动社会系统的生态化转型实践, 促进城市的健康发展。

**关键词:** 大连; 生态网络; 城市代谢; 结构; 效用分析

### Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian

LIU Gengyuan, YANG Zhifeng\*, CHEN Bin, XU Linyu, ZHANG Yan

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

**Abstract:** Research on urban metabolism is a complex decision-making process having a direct impact on human health and the environment both locally and globally. The paradigm of urban metabolism has been formulated in an attempt to focus thinking towards a balanced co-evolution of the economic, physical and social environments while living within the carrying limits of the supporting ecosystems. Analyzing the structure and functioning of the urban metabolic system revealed ways to optimize its structure by adjusting the relationships among compartments, thereby demonstrating how ecological network analysis can be used in urban system research. A fresh perspective focuses on the traditional exergy-based accounting linking the analysis of exergy utilization in the sector of urban socio-economic system. Exergy provides a unified measure of various forms of materials and energy carriers, and thus qualified as a basic medium used in the bookkeeping to qualify ecological networks of exchange. The application of Extended Exergy Accounting (EEA) determines cumulative exergy consumption associated with not only raw material inputs but also labor and capital inputs and non-energetic externalities. Money can also provide a common currency by using economic valuation methods to capture the contribution of ecosystems. The proposed thermodynamic approach is not meant to replace, but to complement an economic approach.

Our objectives in this study were threefold. First, based upon the division of urban society sectors and accounting of EEA flux, we wanted to construct an urban metabolism network models without regard to the bank system and government. This model is divided into seven sub-systems, including: (1) Extraction (Ex), including mining and quarrying, oil

**基金项目:** 国家科技支撑项目(2012BAC05B02); 国家基金委创新研究群体科学基金(51121003); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41101564); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110003120031); 中国博士后科学基金面上资助项目(20110490014); 中央高校基本科研业务费专项资金

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-07-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

refining and processing, and the inflow of energy carriers from the external environment; (2) Conversion (Co), comprising heat and power plants; (3) Agriculture (Ag), including harvest, forestry, fishery, and food processing; (4) Industry (In), manufacturing industry except food industry and oil refineries; (5) Transportation services (Tr); (6) Tertiary sector (Te), including construction and other services; (7) Domestic sector (Do), households. The domestic sector has changed from a final consumption to an important labor exergy inflow transferring to other sectors. Second, use of EEA data of original works listed in the references enables to finish an urban ecosystem network analysis in the case study of Dalian. Finally, the assessment results of Dalian in order to gain insights into the economic processes oriented to sustainable urban development. It may present an initial diagnosis of resource utilization efficiency, input/output structure and environmental impact on urban scale and priority on funding of the whole sectors.

The results show that the indicates that Dalian, as a city with a “large and complete” structure, depends on the larger external systems surrounding the city which can supply resources and services that are lacking within the city. The thermodynamic efficiencies of individual sector in Dalian performed in a good level. The social system in Dalian was a highly competitive network, and there were eight competitive relations and only two mutualistic ones. The Do- and Ag-sector were the major controlling factors of the system. Do- and In-sector have the larger environmental burden. Such a knowledge is a necessary prerequisite to perform a reliable cost-benefit evaluation of urban sustainability strategies. It will be necessary to strengthen the urban metabolic functions described in our model in such a way that the impact on the environment can be significantly reduced, thereafter providing more specific guidance on how to develop ecologically sustainable cities.

**Key Words:** dalian; ecological network; urban metabolism; sturcture; utility analysis

城市是一个复合体,其研究不仅只与建成区相关,其范围还涵盖城市所包含的农业区域、渔业区域以及其他自然地区,而它们在规模、结构、功能之间已形成一套复杂的互动关系。近来,随着生态伦理的分野,基于新生态模式的城市生态模型不断涌现<sup>[1]</sup>。从理性生物学引出的系统生态学,用生态热力学观点来评价自然环境对城市生态经济系统中的价值,并由系统观点探究自然环境与城市经济的互动关系,其目的即在于打破传统生态学与经济学各自所建立的藩篱,实现对城市机理综合性的研究<sup>[2]</sup>。

生态热力学理论自诞生起,它的理论和应用始终处于矛盾中,这个脱离现实的表象却是掩盖在更加接近现实世界的分析范式中,出现了研究结果在城市实际政策指导上面的悬空。线性、简单的静态系统或者经验研究都易于操作,可是这样的应用是在强烈的约化现实或在强假设基础上成立的,这样的理论应用的没有可靠的稳定的理论基础,所以理论向更复杂的世界靠拢是必须的。因此,基于生态热力学的城市结构的研究是实现城市生态规划和环境管理等实际工作优化与决策的关键理论问题之一,通过对城市代谢结构的追踪和量化,摸清其运行机制,不但可以定量描述城市资源系统支撑和环境负荷,更可以找到城市系统结构的优化路径,提高其资源利用效率。对于中国而言,目前我国正处于一个快速工业化和城市化的进程当中,且能源结构中煤炭的主导地位在短时间内无法改变。而我国又是世界上仅有的还在进行产业结构规划的国家。因此,从结构分析和调整的角度来研究发展城市系统的可能性就是可行的,也是很有价值的一个切入视角。当前已有一些研究来描绘物质与能量网络。如 Leontief<sup>[3]</sup>率先提出投入产出分析后来被广泛应用到经济系统研究当中<sup>[4-6]</sup>。网络分析可以为生态系统研究者或管理者们提供关于生态系统中物质与能量的许多信息<sup>[7]</sup>。越来越多的生态网络研究方法,如循环路径、链接密度、连接度等已成为新的研究视角<sup>[8-10]</sup>。在生态食物链结构分析中,生态网络分析已经初步成熟<sup>[11-12]</sup>。当然,在城市这种生态经济系统,也可用于考察城市生态系统结构及探究不同情境下指标的变化情况。当前已有不少研究将部分产业作为生态网络研究对象进行了初步的尝试<sup>[13-15]</sup>。

而对于网络节点之间流的量化方法上面已有不少尝试。这里采用焵(Exergy,又称可用能),焵在热力学中定义为系统在所处环境中的最大作功能力,它提供了将物质与能源进行统一量化的途径<sup>[16]</sup>。焵有所谓三位一体性:系统在其环境中所具有的焵量,对于外界、系统及其环境而言,分别构成资源量、生态承载力和环境影响力<sup>[17-18]</sup>。在资源核算、生态模拟和环境影响评价等方面,近年出现了基于焵概念的研究热潮<sup>[19-23]</sup>,包括 Sciubba 提出的扩展焵分析,将劳动和资本和环境外部因素也考虑到整体的焵流计算之中<sup>[24-25]</sup>。当然,货币流也可以用来量化网络之间的物质能量交换,采用热力学的方法,并不是要取代货币流方法,而是从另一个视角来考察城市各部门间的网络结构。

所以,本研究的初衷在于以下两点:第一,城市结构的重新拆解,实际是将外生变量纳入的过程,而生态热力学焵流计算方法的发展,实现了对价值难以量化的输入的统一核算;城市结构的形式化过程是拟找到一个城市结构数理形式化的统一研究框架,考虑基于生态考虑的城市结构演化规律,揭示城市结构变化背后的驱动因素,而不是仅仅基于产业结构变化的假设来分析

产业结构调整对降低能源强度的作用,并没有实际意义。第二,解决城市生态系统的资源环境问题,似乎就是要城市在资源消耗——污染排放的过程链条上进行削减(国家在“十一五”规划纲要中提出单位 GDP 能耗降低 20%左右,主要污染物排放总量减少 10%的节能和减排两个约束性目标),但除了能源,还要“节什么、谁来节、减多少”等系统性的问题其实并不明确。因此,探索城市系统资源消耗、废弃物排放以及资源回用之间的关联关系,系统解析城市资源消耗的结构(组成结构与部门分配结构)特征,研究区域城市发展过程中资源消耗的变化规律及其代谢机理,有助于寻找、评估和实施低排放的资源利用模式,提高效率和循环利用水平,为政策制订提供科学的决策工具,实现城市资源消耗的生态管理与调控,从而更好更快的推行两型社会(资源节约型和环境友好型)的建设。

## 1 核算方法与模型构建

### 1.1 生态网络分析方法

生态网络分析方法是一种对环境的投入产出应用分析方法。最早 Leontief 发展了投入产出方法<sup>[26-27]</sup>,并赢得了诺贝尔经济学奖,后人并借此分析了经济系统各个产业节点之间相互依存关系<sup>[28]</sup>。首次将网络分析应用到生态系统是 Hannon<sup>[29]</sup>来研究生态系统中生态流的分布。生态网络分析(ENA)是一种系统导向的建模技术,用以研究生态系统的结构与通量,在模型里表述称节点和连接<sup>[7,12,30-34]</sup>。

自从 Patten 和 Finn 发表了一系列生态网络分析的文章后,后续生态网络分析的研究接踵而至。其中,Ulanowicz<sup>[35-36]</sup>根据物质或能量流之间相互作用的特点以及信息理论特点提出了势分析方法,他也将生态网络分析用于探讨节点直接混合的营养等级和互相关联性。Patten 和 Fath<sup>[32,37]</sup>发展了网络环境元分析方法,分析间接流影响<sup>[38]</sup>、网络放大效应<sup>[39]</sup>、网络同质化因素<sup>[39]</sup>以及网络的协同作用<sup>[40]</sup>。还有两个同源衍生生态网络的环境元分析及势分析<sup>[41]</sup>,对其内部直接和间接的流都进行了量化。

上述的方法构建了现今生态网络分析的框架基础,并已发展了相关的分析方法和指标体系<sup>[33,35,41-44]</sup>,主要的分析方法和指标列于表 1。

表 1 生态网络分析主要方法与指标

Table 1 Main methods and indices of ENA methodology

分析方法 Analytical method	目标与应用 Target and application	指标 Indicators
通量分析	计算每个节点内/间的生态系统物质和能量的流动参数。	网络通量,路径程度,循环度等
结构分析	通过向量矩阵及邻接矩阵分析节点间的互连模式。	通路数,通路长度
存量分析	确定沿间接途径非空间储存强度	存储质量,保留时间
效能分析	分析每个节点和它们共生节点之间的直接和间接的关系	共生综合指数,协同率
控制分析	分析每个节点在整个系统配置中发挥的控制能力	流的依赖程度,控制分布
(食物网的)营养级分析	分析计算物种的营养水平,找出生态系统内存在的循环	综合营养水平,营养链
信息理论分析	量化分析系统的整体性能(包括发展现状,多样性和成熟),而系统考虑为一个物质能量流的整体过程	发展能力,势,超载,冗余

### 1.2 城市代谢网络模型

基于 Wall<sup>[19]</sup>与 Sciubba<sup>[24]</sup>的方法,及 Chen 和 Chen<sup>[22]</sup>的早期工作,一个典型的系统图如图 1 所示。根据生态网络构建方法,将城市代谢系统中的众多功能体按照其各自的特点与功能进行分组,分为采掘业(Ex)、转化业(Co)、农业(Ag)、工业(In)、交通业(Tr)、第三产业(Te)和家庭(Do)7类,并考虑内、外部资源、能源、商品、劳动力等的投入和系统的耗散。为了避免重复计算,资本流并没有纳入进来,因为资本流中包括了劳动力和同等价值的商品。但是需要说明的是,也有纯资本流动的部门(如银行部门和政府部门等),由于缺乏可靠的数据,因此,该模型的边界内是不包括银行系统和政府部门的。

接下来根据系统的组分分类,将城市代谢系统中可用能流在系统各组分间的传递与转化表达为由节点与节点间路径连接构成的城市生态网络模型。在文献调查、专家咨询与调研以及现场考察的基础上,计算各节点之间的各项输入输出通量,计算各节点与环境之间的通量交换,从而确定网络各路经流的数值,包括本地的可更新资源(农产品,畜产品,木材等自然资源)、本地和国内外进口的不可更新资源(化石燃料、电力、矿石、产品等)、劳力资本、环境影响和损耗。

一个生态系统网络需要用直接流矩阵(F)来描述,它包括系统中所有节点间的流但不包括节点与外界的流,节点之间的流用 $f_{i,j}$ 来表示( $f_{i,j}$ 表示流从j到i)。

由于损耗的可加性,损耗的平衡模型可表现为:

$$IE_{a,i} + N_{e,i} + \sum_j^{j \neq i} f_{ij} - OE_{a,i} - \sum_j^{j \neq i} f_{ji} - E_{Loss,i} = 0 \quad (1)$$

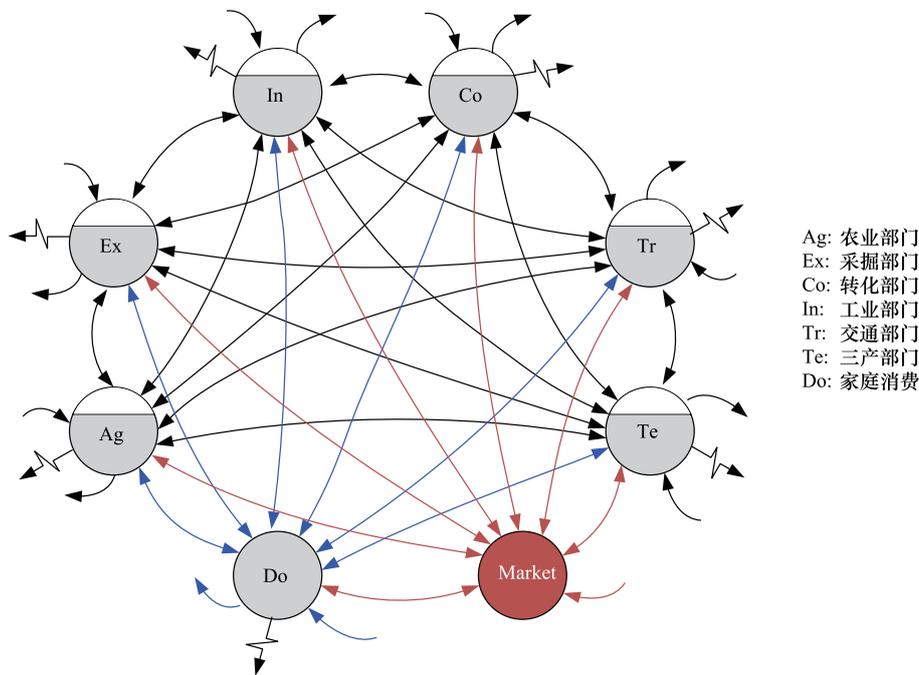


图 1 城市代谢结构生态网络模型系统图

Fig.1 Systems diagram for urban metabolism network model

式中,  $IE_{a,i} / OE_{a,i}$  是进口和出口的焓流,  $N_{e,i}$  是本地可更新自然资源输入到第  $i$  个节点,  $f_{ij} / f_{ji}$  是从/到  $j/i$  两个部门相互的输入和输出,  $E_{Loss,i}$  是第  $i$  个节点的焓损。在一般平衡的系统中, 采用以各部门元素为节点的矩阵反映本地输入输出、进出口和损失之间的流动。

劳力焓的核算参考相关文献<sup>[19,24]</sup>:

$$EE_{i,Do} = C_{i,Do} \cdot \frac{E_{tot}}{C_{i,E}} = C_{i,Do} \cdot \frac{E_{tot}}{C_{i,tot} - C_{i,Do}} \quad (2)$$

式中,  $C_{i,Do}$  表示第  $i$  个部门的劳力的资本通量,  $C_{i,E}$  表示第  $i$  个部门用于购买能载体 (即化石燃料、电力、热等) 的资本通量,  $C_{i,tot}$  表示第  $i$  个部门的总资本流动。因此, 扩展的焓分析分配劳动力, 给予同等的焓值计算总除以工作小时数。总的焓使用量为:

$$EE_{i,tot} = E_x + EE_{i,Do} \quad (3)$$

式中,  $EE_{i,tot}$  表示扩展焓总量,  $EE_{i,Do}$  表示劳力焓。

图 2 将各部门焓计算结果显示到一张流图上, 数值为对大连市 2009 年多部门扩展焓核算值。大连城市代谢网络模型构建所需数据主要来源于《大连统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》和 2010 年底大连市统计局开展的 2010 和 2011 年大连市能源统计报表的部分数据 (数据为 2009 年和 2010 年数据), 由于现有的中国城市统计年鉴中能源平衡表主要以企业为主, 如全部年主营业务收入 500 万元及以上工业企业能源消费分行业情况等, 所以这里的农业部门数据、交通部门和家庭部门数据是借助《辽宁省统计年鉴》中的能源平衡表进行折算。

## 2 基于扩展焓的城市代谢结构生态网络评估

为了研究城市代谢结构的方方面面, 本研究基于扩展焓建立多个生态网络分析指标, 指标的建立参照现有的网络分析指标<sup>[9,12,42,45-46]</sup>。

### 2.1 通量分析

每个节点通量计算: 进入量  $T_i^+ = \sum_{j=1}^n f_{ij} + IE_{a,i} + N_{e,i}$ , 流出量  $T_i^- = \sum_{j=1}^n f_{ji} + OE_{a,i} + E_{Loss,i}$ 。作为一个稳态节点的入流和出

流, 可以得到该节点总的系统通量值 ( $TST$ ) 为  $TST = I^T \cdot T \cdot I = \sum_{i=1}^n T_i$ , 式中,  $I$  是单位矩阵。该值表征系统经济总投资, 也表示系统消费总规模。

外部依赖程度 ( $EDD$ ), 这表明一个部门是否有强烈的进口依存度, 计算公式为:

$$EDD = \frac{\sum_{i=1}^n IE_{a,i}}{TST} \quad (4)$$

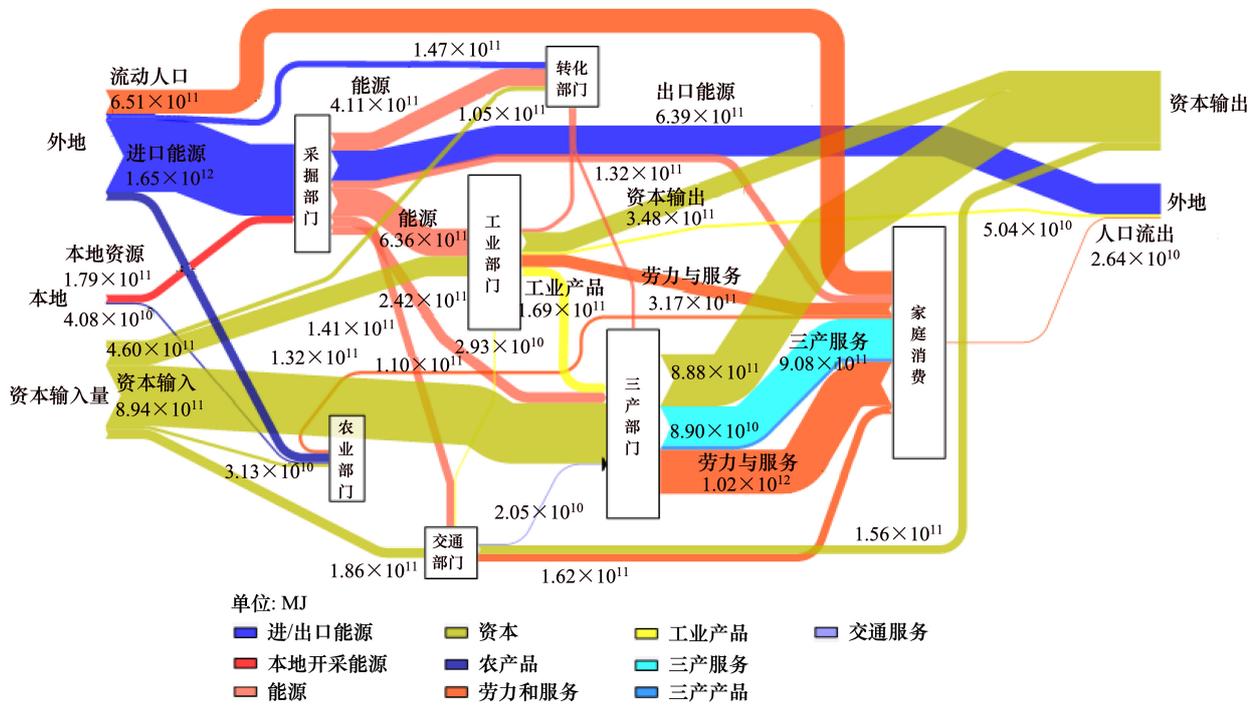


图 2 大连市代谢结构七大门扩展焓分析

Fig.2 Figure of Dalian's metabolic structure based on extended exergy accounting

EDD 的值越高,相应部门的依赖程度越大。

可再生性指数(RI)计算公式为:

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^n N_{e,i}}{TST} \tag{5}$$

这是利用当地资源与总通量的比值。从长远来看,只有具有较高的可再生性指标的经济模式才是可持续的。产量指数(YI),这表明整个系统的产量,被定义为:

$$YI = \frac{\sum_{i=1}^n OE_{a,i}}{TST} \tag{6}$$

### 2.2 效率分析

第一个指标  $\eta_{ec}$  是用来描述焓转换效率的:

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n f_{ji} + OE_{a,i}}{\sum_{j=1}^n f_{ij} + IE_{a,i} + N_{e,i}} = 1 - \frac{E_{Loss,i}}{T_i^+} \tag{7}$$

传递闭包入流矩阵( $N^I$ )和传递闭包出流矩阵( $N^O$ )可根据公式  $N^I = (I - T^{-1}F)^{-1}$  和  $N^O = (I - FT^{-1})^{-1}$  分别计算得出。基于马尔可夫链的  $N^I$  和  $N^O$  的解释,Pattern and Finn 构建了一系列反映生态系统结构和流的利用效率的指标。

入流路径长度(IPL)和出流路径长度(OPL)<sup>[30,47]</sup>

$$IPL^T = (IPL_i)^{n \times 1} = I^T \cdot N^O = \left( \sum_{j=1}^n n_{ji}^O \right)^{n \times 1} \tag{8}$$

$$OPL = (OPL_i)^{1 \times n} = N^I \cdot I = \left( \sum_{j=1}^n n_{ij}^I \right)^{1 \times n} \tag{9}$$

IPL 和 OPL 用以衡量网络中的任何两个节点之间间接连接的平均距离。

平均路径长度被定义为:

$$\overline{PL} = \frac{\sum_{i=0}^n f_{IEa,i} + \sum_{i=0}^n f_{Ne,i}}{TST} \tag{10}$$

循环指数是衡量网络中循环流的百分比<sup>[39]</sup>:

$$CI = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (n_{ji}/n_{ij} - 1) z_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_{ij} z_j} \quad (11)$$

### 2.3 效用分析

网络效用分析方法<sup>[37]</sup>是讲一个网络模型中的流用总系统通量(*TST*)标准化  $d_{ij} = \frac{f_{ij} - f_{ji}}{T_i}$  ( $j, i = 1, \dots, n$ ) 而后生成直接流矩阵  $D = D(F)$ 。然后考察矩阵中各节点两两之间的关系。效用矩阵  $U$ , 描述了所有直接和间接的关系,  $D$  矩阵为贡献权重:

$$U(F) = \sum_{m=0}^{\infty} D(F)^m = (I - D(F))^{-1} \quad (12)$$

由于  $\text{sgn}(U)$  可以提供网络节点间的交互关系(可能会变化为直接关系)和可以根据节点间“共生”关系的多少将网络进行分类。计算一个效用函数  $J(F)$  作为  $\text{sgn}(U)$  中正负号的比例。

$$J(F) = \frac{S_+(F)}{S_-(F)} \quad (13)$$

式中,  $S_+(F)$  是在矩阵  $U(F)$  中所有的正号数目,  $S_-(F)$  是所有的负号数目<sup>[48]</sup>。因此,  $J(F)$  就是矩阵中所有正号和负号总数之商。 $J(F)$  可以作为网络共生能源系统的目标函数<sup>[37]</sup>。当  $J(F) > 1$  时, 表明系统的整体的积极共生性要大于消极竞争性。

### 2.4 结构分析

在一个结构中长期耦合说明二者长期关联形成一种更有活力的网络<sup>[49]</sup>。节点耦合度( $CD_{ij}$ )定义为:

$$CD_{ij} = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^m \frac{P_{ij}^k \cdot n_{ij}^k}{k} \right) \cdot \left( \sum_{k=1}^m \frac{P_{ji}^k \cdot n_{ji}^k}{k} \right)} = \sqrt{(PL_{ij}^T \cdot K^{-1} \cdot n_{ij}) \cdot (PL_{ji}^T \cdot K^{-1} \cdot n_{ji})} \quad (14)$$

$$CD = 2 \cdot \left( \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j, i > j}}^n w_{ij} CD_{ij} \right) / (n^2 - n) \quad (15)$$

$$w^T = (w_1, w_2, \dots, w_n) = \left( \sum_{k=1}^n \gamma_{k1}, \sum_{k=1}^n \gamma_{k2}, \dots, \sum_{k=1}^n \gamma_{kn} \right)^T / \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \gamma_{ki} \right) \quad (16)$$

式中,  $w_i = \sum_{k=1}^n \gamma_{ki}$  用来第  $i$  个节点对整个网络系统的贡献程度。

### 2.5 环境影响分析

总环境负荷矩阵( $e$ )可以定义为通过增加环境排放与经济输出相关联的总的外部输出<sup>[50]</sup>。总环境负荷定义为:

$$e = R \cdot (I - D)^{-1} \cdot F \quad (17)$$

式中,  $R$  是一种环境负荷系数向量, 其中  $R_i$  是部门  $i$  的环境负荷输出。公式(17)考察来自不同部门的污染物排放变化相应其经济活动。该比率越高, 当地部门的压力越大。

## 3 计算及结果分析

大连市 2009 年七大行业的扩展焓计算结果如下。这里, 考察城市代谢系统部门内部通量分析、效率分析、效用分析、结构分析和环境影响分析。

### 3.1 通量分析

大连市七部门通量分析和效率分析表(表 2), 系统总焓通量(*TST*)为 6137 PJ, 开采部门占据最大比例(1690 PJ)。工业部门和服务部门, 作为两大龙头部门, 也占据了大量的焓使用, 这表明大连正在凭借很大的能源和资源来维系一个城市的结构和功能。高能耗, 造就了大连现在的高速发展, 这与中国 2003 年的情况很相似<sup>[51]</sup>。大连对外依存度很高, 全市对外依存度为 28.7%。采掘部门对外依存度为 66.41%, 可再生指数为 22.65%, 说明大连强烈依赖于能源进口。对于不同来源的能源依存度可能会存在相反的结果。

此外, 外省移民是大连的一个重要的扩展焓输入(6.3 PJ)。这说明大连作为一个移民城市, 开始高度劳动力密集的服务行业的发展和吸收外资, 并可以根据现在的情况作出一个特殊的行业战略。

### 3.2 效率分析

大连能源部门拥有最高的用能效率, 服务提供行业的用能效率最低, 这一结论与 Chen 和 Qi<sup>[51]</sup>对整个中国的计算结果一致。这表明化石燃料相比其他能源载体浓度更加集中。相比 Chen 和 Qi<sup>[51]</sup>的研究, 采掘部门、转化部门以及工业部门有着高的用能效率, 而大连农业和渔业发展较好, 效率较高, 达 42.13%, 其他部门效率指数  $\eta$  则处于平均水平, 说明独立部门的热力学效

率在一个比较好的水平。

表 2 大连市 7 部门通量分析和效率分析表  
Table 2 Flux and efficiency analysis properties of seven sectors

部门 Sectors	系统通量 <i>TST(PJ)</i>	外部依赖 指数 <i>EDD</i>	可再生 指数 <i>RI</i>	产量指数 <i>YI</i>	效率指数 $\eta$	入流路径 长度 <i>IPL</i>	出流路径 长度 <i>OPL</i>	循环指数 <i>CI</i>
开采部门 Extraction sector	1690	66.41%	19.21%	13.16%	91.45%	2.21	1.13	0.64%
转化部门 Conversion sector	850	23.46%	0.40%	0.55%	25.99%	1.75	1.77	0.55%
农业部门 Agricultural sector	450	27.61%	10.32%	16.44%	42.13%	2.15	1.87	1.19%
工业部门 Industry sector	1341	41.03%	0.00%	1.62%	30.03%	1.46	2.26	6.46%
三产部门 Tertiary sector	920	0.39%	0.00%	0.00%	27.82%	1.71	3.34	17.23%
交通部门 Transportation sector	283	0.00%	0.00%	0.00%	17.10%	1.29	2.41	0.41%
家庭消费 Domastic sector	1203	8.73%	0.00%	0.00%	-	2.82	2.33	22.93%

入流路径长度 (*IPL*) 和出流路径长度 (*OPL*) 测量在网络中任意两个节点的平均距离,或多少对任何间接连接的两个节点之间的连接距离。表 2 显示不同的排序相较基于焓效率。采掘部门和家庭部门的入流路径长度最大(分别为 2.21 和 2.82),出流路径长度以三产部门和交通部为为主,采掘业,转化业和农业的出流路径非常小。这其中的原因是三产部门和交通部门都需要直接或者间接的从其他部门输入。换句话说,三产部门和交通部门有较短的焓供应链,但是有个长的需求链。相反的,采掘部门、转化部门和家庭部门主要基于非可再生资源 and 劳力,并有相对较长的焓供应链。大连市系统的平均路径为 2.64,这意味着平均焓供应链的节点至少有 3 个。

### 3.3 效用分析

使用通量矩阵 *F*,建立了直接的流矩阵 *D* 和 *sgn(D)* 矩阵。跨对角线进行节点比较任意两个节点的直接关系,例如 (sd21, sd12) = (-, +) 说明这两个节点之间的关系是“竞争关系”; (sd43, sd34) = (+, -) 说明这两个节点之间的关系是“捕食”; (sd64, sd46) = (0, 0) 说明这两个节点之间的关系是“中立”。换句话说,直接流动的基础,开采业向采掘部门损失焓流,工业部门从农业部门获得焓流;并且,交通部门和工业部门没有直接的焓流交换。*sD* 矩阵显示开采业、加工业、家庭部门作为一种“净出口”直接投入到其他部门。*sD* 矩阵拥有相同数目的正负号,因为所有的节点都是输入输出守恒或者是 0。综合效用矩阵 *sgn(U)* 计算得出:

$$Sgn(U) = \begin{bmatrix} + & - & - & - & + & - & - \\ + & + & - & - & + & - & - \\ + & - & + & - & - & - & + \\ + & - & - & + & - & - & - \\ + & + & + & + & + & - & + \\ + & - & - & - & - & + & + \\ + & + & - & - & - & - & + \end{bmatrix}$$

$$J(F) = \frac{S_+(F)}{S_-(F)} = \frac{22}{27} = 0.815$$

结果发现效用矩阵 *U* 有几处不同。首先,所有的 *U* 矩阵元素都非零,这说明所有的节点都直接或间接的与对方产生关系。其次,当一些节点的关系已经改变时,需要考虑整个网络的变化。例如, (su32, su23) = (-, -) 说明 竞争-能源转化部门与农业部门是是竞争对手, (su53, su35) = (-, +) 说明掠夺-三产部门掠夺农业部门。第三,效用函数也不再是零和。总体而言,在效用矩阵中,有 8 项竞争关系(能量转化部门和农业部门, 能量转化部门和工业部门, 农业部门和工业部门, 能源转化部门和交通部门, 农业部门和交通部门, 工业部门和交通部门, 三产部门和交通部门, 工业部门和家庭部门),只有两个之间有互惠关系(采掘部门和三产部门,能源转化部门和三产部门)。这里有 22 个正符号有 27 个负符号,所以可以说,大连实际上它是一个高度竞争的城市代谢网络。

### 3.4 结构分析

结构耦合程度 (*CD*) 的指标衡量贸易系统的结构强度。所有的 *CD* 值都非零说明所有部门都紧紧耦合在这个社会网络系统之中,其中一些节点的耦合度,譬如工业部门和三产部门,工业部门和家庭部门,三产部门和家庭部门的耦合度很高,这表示这几个耦合节点会相互的干扰。一个部门的发展程度可以因为某个部门的影响而出现波动,甚至导致系统崩溃。家庭部门和农业部门是主要控制因素。

### 3.5 环境影响分析

7 个行业的环境负荷率不仅取决于净排放量。7 部门的环境承载力。其中家庭部门和工业部门有最大的环境负荷

( $e = 7.31$ 及 $8.10$ )而农业和三产的环境负荷仅为 $2.02$ 以及 $3.11$ 。考虑农业部门污染直接负荷为 $0$ ,但结果中显示农业部门环境负荷不为零。这表明其他部门也为农业部门提供了间接的环境负荷。

#### 4 讨论与结论

本研究完成了基于生态热力学的城市代谢结构网络模型构建与评价。从结构分析和调整的角度来研究城市代谢问题,旨在通过对城市系统结构的追踪和量化,摸清其运行机制,不但可以定量描述城市资源系统支撑和环境负荷,更可以找到城市系统结构的优化路径,提高其资源利用效率。根据生态网络构建方法,将城市代谢系统中的众多功能体按照其各自的特点与功能进行分组,分为采掘业(Ex)、转化业(Co)、农业(Ag)、工业(In)、交通业(Tr)、第三产业(Te)和家庭(Do)7类,并考虑内、外部资源、能源、商品、劳动力等的投入和系统的耗散。

本研究以大连为例,而中国现有年鉴数据统计存在失真问题,并有研究者指出,在煤炭统计数据上,“2000年,地方上报的煤炭消费量加总数据要比全国煤炭产量高4%。到了2010年,这个差值更是扩大到了惊人的22%”<sup>[52]</sup>,对于交通能源,“中国交通领域的能源统计口径与国际惯例出入较大,导致很难获取国内全口径交通领域能源消费数据”<sup>[52]</sup>。但现在并没有很好的解决统计局颁布数据失真问题的方法。本研究通过部门合并,从一定程度上避免了精细行业划分导致的偏差问题,可以从宏观尺度把握城市代谢网络结构。

本研究基于所构建的网络模型,对生态网络分析中用以度量网络结构的信息指标进行计算,从网络的结构效率与宽容度两方面分析网络结构。探讨城市生产者、消费者、分解者之间的生态关系和关联程度,城市生态关系包括生态组分间的掠夺、控制和共生等关系,以及亚组分间的竞争、中性、偏利共生、互利共生等关系,揭示出固有网络结构中复杂的生态关系。该研究借助生态网络方法,面向城市结构的复杂性城市结构,考虑基于生态考虑的城市结构演化规律,揭示城市结构变化背后的驱动因素,而不是仅仅基于产业结构变化的假设来分析产业结构调整对降低能源强度的作用,该研究为实现城市生态规划和环境管理的优化,以及促进城市的生态空间的合理发展具有一定的借鉴意义。

#### References:

- [ 1 ] McDonald G W, Patterson M G. Bridging the divide in urban sustainability: From human exemptionalism to the new ecological paradigm. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(2): 169-192.
- [ 2 ] Huang S L. *Energy Basis for Urban Ecological Economic System*. Taipei, China: Chan's Arch Books Co LTD, 2004.
- [ 3 ] Léontief W W. *The Structure of American Economy, 1919—1929: An Empirical Application of Equilibrium Analysis*. Cambridge: Harvard University Press, 1941.
- [ 4 ] Costanza R. Embodied energy and economic valuation. *Science*, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [ 5 ] Costanza R, Herendeen R A. Embodied energy and economic value in the United States economy: 1963, 1967, and 1972. *Resources and Energy*, 1984, 6(2): 129-163.
- [ 6 ] Casler S D, Hannon B. Readjustment potentials in industrial energy efficiency and structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1989, 17(1): 93-108.
- [ 7 ] Wulff F, Field J G, Mann K H. *Network Analysis in Marine Ecology: Methods and Applications*. Coastal and Estuarine Studies. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1989, 32: 284-284.
- [ 8 ] Ulanowicz R E. Identifying the structure of cycling in ecosystems. *Mathematical Biosciences*, 1983, 65(2): 219-237.
- [ 9 ] Patten B C. Energy cycling in the ecosystem. *Ecological Modelling*, 1985, 28(1/2): 1-71.
- [ 10 ] Williams R J, Martinez N D. Simple rules yield complex food webs. *Nature*, 2000, 404(6774): 180-183.
- [ 11 ] Dunne J A. The network structure of food webs // Pascual M, Dunne JA, eds. *Ecological Networks: Linking Structure to Dynamics in Food Webs*. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [ 12 ] Fath B D, Halmes G. Cyclic energy pathways in ecological food webs. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 17-24.
- [ 13 ] Chavez P S Jr, Sides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1991, 57(3): 295-303.
- [ 14 ] Graedel T E. On the concept of industrial ecology. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1996, 21(1): 69-98.
- [ 15 ] Hardy C, Graedel T E. Industrial ecosystems as food webs. *Journal of Industrial Ecology*, 2002, 6(1): 29-38.
- [ 16 ] Chen G Q, Jiang M M, Yang Z F, Chen B, Zhou J B. Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture. *Ecological Modelling*, 2009, 220(3): 397-410.
- [ 17 ] Jørgensen S E. Parameter estimation and calibration by use of exergy. *Ecological Modelling*, 2001, 146(1/3): 299-302.
- [ 18 ] Chen G Q. Exergy consumption of the earth. *Ecological Modelling*, 2005, 184(2/4): 363-380.
- [ 19 ] Wall G. Exergy conversion in the Japanese society. *Energy*, 1990, 15(5): 435-444.
- [ 20 ] Schaeffer R, Wirtshafter R M. An exergy analysis of the Brazilian economy: from energy production to final energy use. *Energy*, 1992, 17(9): 841-855.
- [ 21 ] Ertesvåg I S, Mielnik M. Exergy analysis of the Norwegian society. *Energy*, 2000, 25(10): 957-973.

- [22] Chen B, Chen G Q. Exergy analysis for resource conversion of the Chinese society 1993 under the material product system. *Energy*, 2006, 31(8/9): 1115-1150.
- [23] Chen Z M, Chen G Q, Zhou J B, Jiang M M, Chen B. Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in Chinese economy 2005. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1942-1965.
- [24] Sciubba E. Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy, An International Journal*, 2001, 1(2): 68-84.
- [25] Sciubba E. A revised calculation of the econometric factors  $\alpha$ - and  $\beta$  for the Extended Exergy Accounting method. *Ecological Modelling*, 2011, 222(4): 1060-1066.
- [26] Léontief W W. *The Structure of American Economy, 1919—1939: An Empirical Application of Equilibrium Analysis*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1951.
- [27] Léontief W W. *Input-Output Economics*. New York: Oxford University Press, 1966.
- [28] Miller R E, Blair P D. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [29] Hannon B. The Structure of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 41(3): 535-546.
- [30] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems // Patten B C, ed. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. New York: Academic Press, 1976.
- [31] Christensen V, Pauly D. Trophic Models of Aquatic Ecosystems. ICLARM Conference Proceedings, Malaysia: WorldFish, 1993, 26: 390-390.
- [32] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems*, 1999, 2(2): 167-179.
- [33] Fath B D. Network mutualism; positive community-level relations. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56-67.
- [34] Borrett S R, Fath B D, Patten B C. Functional integration of ecological networks through pathway proliferation. *Journal of Theoretical Biology*, 245: 98-111.
- [35] Ulanowicz R E. *Growth and Development: Ecosystem Phenomenology*. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [36] Ulanowicz R E. *Ecology: The Ascendent Perspective*. New York: Columbia University Press, 1997.
- [37] Fath B D, Patten B C. Network synergism; Emergence of positive relations in ecological systems. *Ecological Modelling*, 1998, 107(2/3): 127-143.
- [38] Higashi M, Patten B C. Dominance of indirect causality in ecosystems. *The American Naturalist*, 1989, 133(2): 288-302.
- [39] Patten B C, Higashi M, Burns T P. Trophic dynamics in ecosystem networks: Significance of cycles and storage. *Ecological Modelling*, 1990, 51(1/2): 1-28.
- [40] Patten B C. Network ecology; Indirect determination of the life-environment relationship in ecosystems // Higashi M, Burns T P, eds. *Theoretical Studies of Ecosystems; The Network Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [41] Scharler U M, Fath B D. Comparing network analysis methodologies for consumer-resource relations at species and ecosystems scales. *Ecological Modelling*, 2009, 220(22): 3210-3218.
- [42] Fath B D. Distributed control in ecological networks. *Ecological Modelling*, 2004, 179(2): 235-245.
- [43] Fath B D. Sustainable ecosystem patterns // *Modelling Socio-Natural Systems Symposium*. Stockholm, Sweden, 2006.
- [44] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 2004, 28(5/6): 321-339.
- [45] Cohen J E, Beaver R A, Cousins S H, DeAngelis D L, Goldwasser L, Heong K L, Holt R D, Kohn A J, Lawton J H, Martinez N, O'Malley R, Page L M, Patten B C, Pimm S L, Polis G A, Rejmanek M, Schoener T W, Schoenly K, Sprules W G, Teal J M, Ulanowicz R E, Warren P H, Wilbur H M, Yodzis P. Improving food webs. *Ecology*, 1993, 74(1): 252-258.
- [46] Hall C. What is maximum power? // Hall C, ed. *Maximum Power. The Ideas and Applications of H.T. Odum*. Niwot: University Press of Colorado, 1995.
- [47] Finn J T. *Flow Analysis: A Method for Tracing Flows Through Ecosystem Models [D]*. Athens, Georgia: Institute of Ecology, University of Georgia, 1977.
- [48] Lobanova E S, Finkelstein S, Herrmann R, Chen Y M, Kessler C, Michaud N A, Trieu L H, Strissel K J, Burns M E, Arshavsky V Y. Transducin  $\gamma$ -subunit sets expression levels of  $\alpha$ - and  $\beta$ -subunits and is crucial for rod viability. *The Journal of Neuroscience*, 2008, 28(13): 3510-3520.
- [49] Surra C A. Courtship types: Variations in interdependence between partners and social networks. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1985, 49(2): 357-375.
- [50] Lave L B, Cobas-Flores E, Hendrickson C T, McMichael F C. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(9): 420A-426A.
- [51] Chen G Q, Qi Z H. Systems account of societal exergy utilization; China 2003. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4): 102-118.
- [52] Tu J J. It Necessitates Energy Statistics Before Emission Reduction. [2012-08-07]. <http://www.noblecn.net/news/news2798.html>.

#### 参考文献:

- [2] 黄书礼. 都市生态经济与能量. 台北: 詹氏书局, 2004.
- [52] 涂建军. 减排需先过能源统计关. [2012-08-07]. <http://www.noblecn.net/news/news2798.html>.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

Development of agroecology in USA .....	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint .....	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China .....	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality .....	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications .....	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas .....	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China .....	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae) .....	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients .....	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i> .....	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO <sub>2</sub> concentrations .....	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field .....	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH <sub>3</sub> volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields .....	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear .....	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings .....	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China .....	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method .....	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands .....	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China .....	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area .....	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand .....	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe .....	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method .....	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species .....	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area .....	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguai, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition .....	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China .....	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species .....	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar, nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco .....	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i> .....	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i> .....	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ..... ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi ..... WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain ..... LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin ..... WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession ..... FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert ..... LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake ..... DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community ..... CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China ..... LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem ..... PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China ..... YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China ..... WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years ..... LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands ..... XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta ..... WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 ..... JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China ..... QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ..... ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert ..... FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city ..... XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong ..... WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) ..... LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season ..... JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example ..... XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China ..... LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city ..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
发 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元