

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

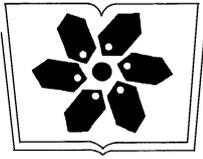
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第15期 Vol.33 No.15 **2013**

中国生态学学会
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 15 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 红树林生态系统遥感监测研究进展..... 孙永光,赵冬至,郭文永,等 (4523)
- 基于能值分析方法的都市代谢过程研究——理论与方法 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (4539)
- 关于生态文明建设与评价的理论思考 赵景柱 (4552)

个体与基础生态

- 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布..... 于婷婷,徐奎栋 (4556)
- 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制..... 方 涛,贺心然,冯志华,等 (4567)
- 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性..... 黄凯旋,张云,欧林坚,等 (4575)
- 模拟酸雨对蒙古栎幼苗生长和根系伤流量的影响..... 梁晓琴,刘 建,丁文娟,等 (4583)
- 有机酸类化感物质对甜瓜的化感效应..... 张志忠,孙志浩,陈文辉,等 (4591)
- 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性..... 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等 (4599)
- 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化..... 王煌平,张 青,翁伯琦,等 (4608)
- 不同类型土壤中分枝杆菌噬菌体分离率的比较..... 徐凤宇,苏胜兵,马红霞,等 (4616)
- 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响 卞雅姣,黄 洁,孙其松,等 (4623)
- 麻花秦艽种子休眠机理及其破除方法 李兵兵,魏小红,徐 严 (4631)
- 4 种金色叶树木对 SO₂ 胁迫的生理响应 种培芳,苏世平 (4639)
- 硫丹及其主要代谢产物对紫色土中酶活性的影响..... 熊佰炼,张进忠,代 娟,等 (4649)

种群、群落和生态系统

- 群落水平食物网能流季节演替特征..... 徐 军,周 琼,温周瑞,等 (4658)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (4665)
- 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征..... 朱秋莲,邢肖毅,张 宏,等 (4674)
- 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策..... 李媛媛,董世魁,朱 磊,等 (4683)
- 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化..... 刘 丽,徐明恺,汪思龙,等 (4692)
- 不同玉米品种(系)对玉米蚜生长发育和种群增长的影响 赵 曼,郭线茹,李为争,等 (4707)
- 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响..... 卢训令,丁圣彦,游 莉,等 (4715)
- 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响 刘 伟,门丽娜,刘新民 (4724)
- 铜和营养缺失对海州香薷两个种群生长、耐性及矿质营养吸收的差异影响
..... 柯文山,陈世俭,熊治廷,等 (4737)
- 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算..... 咎 梅,李登秋,居为民,等 (4744)

景观、区域和全球生态

- 基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例…………… 梁友嘉,徐中民,钟方雷,等 (4758)
- 人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异…………… 张华兵,刘红玉,侯明行 (4767)
- 基于 PCA 的滇西北高原纳帕海湿地退化过程分析及其评价…………… 尚文,杨永兴,韩大勇 (4776)
- 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价…………… 南颖,吉喆,冯恒栋,等 (4790)
- 呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价…………… 吴志丰,李月辉,布仁仓,等 (4799)
- 降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响…………… 郭群,胡中民,李轩然,等 (4808)

研究简报

- 我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系……………
…………… 王健健,王永吉,来利明,等 (4818)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说:石质山区的退耕还林——桂西北地区是我国喀斯特集中分布的地区之一,这里的石漠化不仅造成土地退化、土壤资源逐步消失、干旱缺水和土地生产力下降,而且还导致生态系统退化和植被消亡。桂西北严重的地质生态环境问题,威胁着当地居民的基本生存,严重制约了当地社会经济的发展。增加植被覆盖是防治石漠化的重要举措。随着国家退耕还林、生态移民等治理措施的实施,区域植被碳密度显著增加,生态环境有所好转。图为喀斯特地区农民见缝插针用来耕种的鸡窝地(指小、碎、分散的土地),已经退耕还林了。

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/stxb201204260597

刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的都市代谢过程研究——理论与方法. 生态学报, 2013, 33(15): 4539-4551.

Liu G Y, Yang Z F, Chen B. Urban metabolism process based on energy synthesis: Theory and method. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4539-4551.

基于能值分析方法的都市代谢过程研究 ——理论与方法

刘耕源, 杨志峰*, 陈彬

(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: 作为一个以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统, 城市所遵循的高投入、低产出、高污染的粗放型发展模式导致了严重的结构性隐患与环境问题。基于生物物理的视角考虑, 城市生态环境问题的出现, 与城市代谢不良密切相关。当前对城市代谢的研究视角多基于污染物排放和资源消费, 需要一种热力学的全新视角从整体角度来重新诠释可持续发展。开发了一种基于能值分析方法的都市代谢过程研究框架, 首先对城市的可持续发展进行热力学解析, 其次针对现有能值方法的局限, 结合自然系统对污染物的自净化及污染对经济系统和生态系统的损害程度测度方法, 从水体污染、大气污染和固体废物研究城市代谢对人群健康和自然生态系统的影响。研究有利于解决城市代谢不良的影响因子识别问题和代谢系统综合评价问题, 使政策制定者建立以生态为本的城市观, 推动社会系统的生态化转型实践, 力求突破当前城市发展的瓶颈, 促进城市的可持续发展。

关键词: 城市代谢; 能值; 生态热力学; 可持续发展

Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method

LIU Gengyuan, YANG Zhifeng*, CHEN Bin

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

Abstract: As the center of human activities and social civilization, city has developed at the cost of serious environmental degradation and huge eco-environmental pressure, which further lower the human living standard and impeded the sustainable development of the urban ecosystem. Current urban metabolic methods have broader views and focus more on ecological aspects — impact of emissions and resource consumption — but they lack a rigorous thermodynamic framework. Consequently, there is a need for modifying existing processes and developing new technologies that minimize environmental impact while providing stimulating ecological flow. This study developed an emergy-based framework for evaluating ecological objectives in traditional urban metabolic process. It started with a brief historical review of urban sustainable development and examines the controversial concept critically from a thermodynamic point of view. Then the assessment framework was proposed by reviewing and compiling existing data and studies on environmental issues available primarily at some sources, which includes resource accounting and environmental impact assessment. The direct and indirect emergy demand was assessed and quantied based on airborne/waterborne pollutants dilution patterns, and concepts of Life Cycle Impact Assessment. Such a framework is a necessary pre-requisite to perform a reliable cost-benefit evaluation of urban sustainability strategies, and provide guidance to policy decisions.

基金项目: 国家科技支撑资助项目(2012BAC05B02); 国家基金委创新研究群体科学基金资助项目(51121003); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110003120031); 中国博士后科学基金面上资助项目(20110490014); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41101564); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 低碳高端产业园区生态经济价值研究项目(26400150); 低碳高端产业园区标准构建项目(26400151)

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-10-23

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

Key Words: Urban metabolism; Emergy synthesis; Thermodynamic method; Sustainable development

现代城市是极度人为化的复杂生态巨系统,其物质、能量与信息转换过程之时空奇异涌现性导致现代城市“病”^[1-2]。从现代系统生态学和非平衡热力学角度对城市生命体的重新诠释提供一项专业化视角^[3-5],以客观统一参数衡量一般城市生态流变过程,为城市的系统生态特征的识别和演变机理研究提供坚实基础^[6]。同时,由于城市中经济、社会与自然系统交互作用的复杂性,相应城市代谢过程的生态热力学研究又必须聚焦于城市全过程的系统层面,需要整合系统生态学、城市生态学和生态热力学等研究方法,从而有力地促进这些学科理论的交叉、创新和发展。

1 研究现状

1.1 城市代谢研究进展

城市代谢是应用生物代谢作用的概念来阐述城市发展问题,这种观念借鉴的基础在于二者之间的相似性。例如城市系统到达最佳发展阶段,整个系统会通过内部循环过程不断的进行反馈、调整,该运行过程就类似于自然生态系统中的自组织机制。到目前为止,国内外学者已经进行了许多相关研究,产生了一定的科研成果。

城市代谢植根于工业代谢,根据质量守恒原理,对城市中物质从最初的开采,到工业生产、产品消费,直至变成最终的废物这一全过程进行跟踪。它通过建立物质衡算表,测算或估算物质流动与储存的数量及它们的物理和化学状态,描绘其进行的路线和动力学机制^[7]。在城市代谢的理论方面,许多学者进行了不同的界定和讨论^[8-14]。工业代谢研究的对象可以针对某种物质(如 CO)或某种物质成分(如铬、铅等重金属和硫、碳等元素),也可以针对与特定产品或对象(如电子芯片)相联系的物质流和能量流,通常在大河流域、国家等较大的范围内展开^[15]。后来的研究者在此基础上对城市代谢的概念进行拓展,提出城市家庭物质代谢、土地利用代谢响应、资源代谢等理论^[16-19],扩充了城市代谢的范围。并基于城市地理与系统论的观点提出城市本身一方面为新陈代谢的有机体,一方面是管理的机器,也就是将资源与物质转变为废弃物维持人类的生存与居住条件。研究者强调循环式的新陈代谢,即所谓的生态城市的主要目标是在输入和输出的需求和管理达到一种循环代谢的地步^[20]。目前,城市代谢的内涵与类型仍没有达成统一的认识,深入探讨与研究仍在继续。

对于城市模拟与代谢的评价也处于发展阶段。当前城市代谢研究方法正在从传统的定性分析向更为严格的定量化描述方向发展,以便找出经济系统中的物质流动与环境问题之间的关联关系,通过分析经济发展与物质流、能量流的结构变化,来研究城市代谢的动力机制与调控策略。城市代谢的研究方法可以分为物质核算法、货币核算法和生态热力学核算法。物质核算法关注于物质资源的分类及物质资源平衡表账户,通过收集统计数据分析城市系统中物质在整个生命周期的流动过程^[21-22]。早期城市代谢的研究多用物质核算方法,并已运用于多个城市的设计与管理中,如澳大利亚^[15]、香港^[23]、南通^[24]、台湾^[19-20]及其他城市^[25-26]。但此方法仍有一些无法解决的问题,如核算单位的不统一、物质集成技术的不完善和对能量流的忽视。货币核算法对于分析生态系统服务和自然资本的经济价值是有效的^[27-28],但是对于城市系统中有些功能的核算是以支付意愿获得的,带有较大的主观性^[27]。生态热力学核算法是联系经济系统与生态系统的桥梁,能够提供城市代谢核算的统一量度^[3]。生态学家研究并提出了大量以生态热力学为基础的目标函数来描述生态系统发展的组织原则,目前已有在城市方面应用的初探性研究^[3,4,20,29-33],并有学者在此基础上对方法进行改进,并演化出能值等概念^[43-41],并试图将越来越多当前关注的生态要素纳入核算体系中。但是由于数据和关注角度的因素仍存在对周边区域对城市的生态服务支持、外来污染侵袭及全球尺度的环境影响考虑不足的问题。当前研究多局限于反映局部的、短时间尺度内的或者是相对于人类健康和生态毒理而言的环境影响,并未能充分反映其因排放在产生潜在环境影响中的重要地位。城市的节能减排是我国建设资源节约型、环境友好型社会的第一步,其本质是资源减量化与生态重构,这要综合考虑物质性和非物质性两种投入及污染物的生态损失的核算,这就必须找到链接它们的关节点。这个研究的视角要充分考虑到与其他研究对接的理论基

础和完善的统一核算平台,才能落实到城市层面,满足构建基础理论模型和得到强有力的系统分析量化支持的双重目标,为提出和构建符合中国国情的城市发展的政策措施与长效机制提供理论与方法学依据。

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。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,物质与能源使用源头、产业结构、利用效率以及环境影响形成一个全生命周期的研究链条,因此,从都市代谢全过程的角度来研究都市发展是很有价值的一个切入视角,也是实现都市系统调控和动态规划的必要步骤。由于对于生态服务功能、跨尺度环境影响的忽视,当前的研究多基于投入产出表分析,重点剖析都市或区域产业代谢结构及效率,考虑产业经济效用最大化,从理论与方法方面已较成熟,如^[14,42-44],但是该方法多考虑都市产业部门,忽视了家庭消费、人口增长、自然支持环境等重要都市生态结点;而考虑生态意识的都市过程研究需要对都市过程进行重新拆解,定量各子系统间的运转机理与互动关系。

1.2 都市代谢的生态热力学观及研究进展

都市可持续发展争论已久。在环保学者和生态经济学家有一个普遍的共识,即经济增长是有极限的。经济增长会被“环境的再生能力和吸收能力”所限^[45]。另一方面,环境经济学家也证明了由于有限的资源供应,经济增长不可能持续出现。然而,“纯经济学家”却认为市场机制可以调节资源需求和增加环境吸收能力,环境保护应交由市场自我调节。因此,可持续增长也被尝试定义到环境可持续性框架之中。

所以都市代谢的可持续目标的内在矛盾可归纳为:“可持续”暗示了能源和资源的全球平均,而“发展”却暗示了生产和消费的持续增长。这就带来了都市为了保证自己的有限增长从哪吸引资源的问题?正如 Eisenmenger and Giljum 所说:任何现实主义的可持续发展定义都应该是减少而不是增加资源的开采和使用,这才是可以使全球平均消费和扩张率下降的唯一方法^[46]。因此,经济学的视角定义的可可持续发展观难以适应当前都市的需要,而都市的生态热力学观试图从另一种角度来解释都市的未来,至少如果用热力学来诠释发展,我们就不会站在“无限的增长”这一前提之下。根据热力学第二定律,所有的生产过程(即能量转换过程)都是耗散过程,最终把原材料转化成产品及伴随熵(将在过程中损失掉)。热力学第二定律决定了所有的能量转化过程中都存在熵增,即有损失^[47]。譬如 Hornborg 认为,“工业化意味着社会的熵转移”^[48]。当都市代谢发生时,代谢系统中的生产系统会产生负熵增,并释放到环境中,从而减少了社会经济的熵的总量。所以,都市规划或研究中常在都市的前面不断加上“生态”、“环境友好”等词汇界定,实际是将都市的自然系统看做是熵的传输管道,传递负熵到热井,使得整个系统的总熵趋于平衡。

进一步说,负熵的产生和传递也可以看作是资本化加剧的结果,使得当本地的自然资源,不能提供足够容纳负熵的热井容量时,就会加速相邻都市之间或区域之间的贸易形成负熵的空间代际转移。因此, Hornborg 说,我们用道德的手段去批评资本主义的生产与贸易似乎并不准确,而实际这是一种自然法则,它只是找到一个地方来平衡负熵^[48]。而这种说法似乎可以用现在世界贸易来证明,世界上大多数人都去参加全球的交易其实是不现实的,但现在结果似乎是越穷的人看似已经放弃了全球经济,越穷的国家越边缘化。这时一些国家和地区就会由于战争、殖民主义等因素自动的成为了“熵接收器”,形成这样的市场机制。

所以都市代谢的生态热力学观是随着人们对都市地位与作用的认识的变化所改变的,如同早起的人类中心主义到如今的生态中心主义,从以人为本的都市观转移到以生态为本的都市观,而用能值方法来研究都市代谢,正符合了这样的一种以生态为本的都市观。能值分析是 Odum 发展的一套庞大的用于描述生态系统及其他系统结构的理论体系^[49]。该理论解释了系统是如何利用能量来进行有效的进行组织。能值是以热力学第二定律为基础,并且建立了共同的考量单位——太阳能焦耳。后来能值被正式定义为体现(包被)能或记忆能量,即为生产任何产品或服务的直接或间接需求的能量总量。这一概念的提出也正值能源危机顶峰时刻,Odum 认识到生态系统在全球经济中所扮演的临界角色,经济活动的发展不仅制约于经济规则,而且受生

态限制。这一概念的提出就是用能量整合经济学与生态学。不能只从效率的高低和结构的繁复来定义城市的可持续,不少研究中已经开始用恢复力^[50]或者脉冲模式^[51]来重新定义城市的可持续发展。Odum 强调,可持续发展意味着城市的生产和消费的过程并不是线性的,而是相当于脉冲状^[51],当然,这并不只是城市系统,还包括周边区域,最终的可持续表现都在于促进人群福祉、加快社会转型、政治的公正、经济的公平分配和资源共享以及长期的生态平衡。Odum 提出,从长期来看,脉冲模式显然是更好地实现长期的效率和整体生产力,因此,政策必须从概念上放弃稳定的状态。因此,本文中提出的“平衡”实际意味着一个脉冲的动态“稳定”状态。

所以本文拟选择现有的生态热力学中能值分析计算方法,创新性的将周边区域对城市的生态服务支持、外来污染侵袭及全球尺度的环境影响纳入城市核算体系,重构城市代谢模型与指标,使政策制定者能够确定如何在现有的经济基础上,以及在向生态经济转型的关键发展时期,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,力求突破当前城市发展的瓶颈,促进城市的健康发展。

2 研究方法

2.1 现有城市代谢能值分析的瓶颈与解决方法

在用能值分析的方法来研究城市代谢问题时,仍然面临着一些困难与瓶颈,主要问题在于以下几个方面:

(1) 城市进出口产品复杂,能值转换率数据缺乏

能值转换率是城市代谢研究的基础数据之一,从 20 世纪 90 年代以来,已有不少学者从各个领域开展了能值转换率的核算,包括早期发表的 5 个能值使用手册 Folio 1—5^[52-56],为现有的能值研究提供了基础的数据平台,包括的基础矿产、能源、森林、湿地、粮食作物、不同地貌下土地能值流动和储存,为现有的能值分析提供了参考样本。经过众多能值学者多年的研究,能值转换率的覆盖范围逐渐扩大。后续的能值转换率主要参见于期刊发表的论文,包括全球 NPP 的能值转换率^[57],27 个化学元素的能值转换率^[58],还有不少学者针对中国农产品、能源和基础工业原料等^[59-63],一直被中国学者广泛沿用。

虽然能值转换率的数据在世界各国学者的丰富研究成果中不断增多,但是很多物质的能值转换率仍然十分缺乏。特别的,对于城市系统能值研究领域而言,如工农业原材料、化学品、家庭消费品、高新技术产品等都很难以查找,而且现有的一些研究中的产品能值转换率都与劳力和服务能值混在一起计算,难以剥离(劳力和服务问题的解决见下文)。所以本研究开发了结合生命周期评价的复杂进出口商品的能值核算方法,具体的步骤如下:

(a) 结合生命周期的材料清单方法和相关文献,收集复杂商品实际制造使用物质重量值(如:根据文献,典型的个人电脑,机箱 12358.27g,显示器 16187.29g,键盘 1157.02g,鼠标 177.06g,其中黑色金属使用比例 20%,玻璃比例 26%,铜比例 7%,塑料比例 23%,锌比例 2%,铝 14%,铅 6%等)。由此可算出组成电脑的原始材料重量。

(b) 根据基础原料的能值转换率核算出复杂商品能值投入量。

(c) 购买商品的价格实际是购买了商品中体现的服务和劳力,需要根据研究区域的能值货币比来核算,其中,进口商品按照进口地的当年能值货币比计算,出口商品按照本地当年能值货币比计算。

(2) 能值基准更新频繁,部分研究使用混乱

在能值手册 Folio 1^[52]中 Odum 等人针对地球运动,计算了矿产、能源的能值转换率,并探讨了能值转换率的计算方法,提出了随着地球运动中能量吸收的变化,能值转换率的基线值应由 1996 年的 9.44×10^{24} seJ/a 提升为 15.83×10^{24} seJ/a,也就是说 2000 年以前发表的能值转换率在 2000 年以后的应用中,应该乘以系数 1.68,从而保证能值转换率指标的准确性。此外,Campbell 在 1998 和 2000 年重新计算了潮汐能后采用了新的能值基准 9.26×10^{24} seJ/a^[77-78]。不少学者也在研究中运用了此基准,此基准与 Odum 2000 年前的能值转换率乘系数为 0.98(9.26/9.44)。

最近 Brown 和 Ulgiati^[64]的文章中用太阳能、潮汐能和地热能作为基础驱动力重新核算能值手册 Folio#1 文章中的能值基线,在这次核算中,太阳常数的测算和传送到地球的潮汐能估算的相对精确,但地热能仍有相对较大的不确定性,为了应对这种不确定性,Brown 和 Ulgiati 对地热数据做了一套蒙特卡罗模拟,并选择平均地热值作为贡献值。研究结果显示能值基线约为 15.20×10^{24} seJ/a,与之前 Odum 等人算出的全球能值基准 15.83×10^{24} seJ/a 略有不同。所以如果用最新的能值转换率,可以将 2000 年以前的能值转换率乘系数 1.61 ($15.20/9.44$)。

但是,很多学者并没有注意到基线更新的问题,很多能值转换率仍然采用了旧的基线或者在一套计算方法中引用的新旧基线能值转换率混杂使用问题,这也为能值转换率的推广和使用制造了一定程度的障碍。所以在能值分析中,应标注清楚使用的是哪种能值基准,有利于结果间的转换和比较。

(3) 能值转换率中劳力与服务未与产品分离,结果难以比较

如上文所述,早期的劳力和服务是包含在商品的计算之中的,甚至有些研究由于难以获得实际商品的重量直接用商品的购买价格来计算商品的能值转换率,这实际是对商品所包含的劳力和服务计算的理解存在误区。张攀^[65]指出,总体来说,劳力和服务可以划分开来,劳务是指投入系统的直接劳动力的能值,服务是指由于外部物质投入而间接带来的各种人工服务的能值。所以研究中,劳力是劳动力价格×区域能值货币比,反映了直接的人力投入,服务是在商品制造、运输过程中的人力服务能值,一般等于商品售价×区域能值货币比。而统计年鉴中商品的价值量通常同时包含商品的售价和在本地的人工投入,在难以分开的情况下可以统一核算为劳力和服务。这时在计算商品的能值转换率时,需要计算不包含劳力和服务的能值投入量,这种能值转换率可以在其他研究中直接使用,并可以比较不同水平的生产技术。Ulgiati^[63]建议也计算包含了劳力和服务的能值转换率,借此衡量不同区域的经济水平差异。

2.2 纳入城市生态环境影响的都市代谢模型

在能值方法中对于废物的处理一直是一个难题,Huang 等^[19]曾将其作为一种熵增的指标来辅助能值分析结果,但仍有不少研究错误的将废物作为产出的一部分来核算,本研究拟从环境影响的角度将都市代谢过程中废物的排放纳入到能值体系中。

每一个生产过程中都在生成有用的产品的同时也生产不受欢迎的副产物(作用到生态系统、人群健康、经济资产上),但大部分的能值研究并没有考虑排放对生态系统和人群完整性的影响,这也成为早期能值作为环境核算方法被人提出的一个质疑点。事实上,已有一些研究在此方面做了一定的推荐,Ulgiati 等人^[66]在 1995 就已经把关注点集中在需要在资源的能值核算需要考虑防止或修复可逆的损害。Ulgiati 和 Brown^[67]计算了不考虑大气扩散和化学服务的情况下用来稀释大气污染排放的能值投入量。Hau 和 Bakshi^[68]首次提出了利用生态指标 99 中的伤残调整健康生命年(DALYs)计算经济部门人群健康的生态累计可用能值。Brown 和 Ulgiati^[69]用能值方法计算了恢复生态系统健康所需能值投入量,并指出:1)当不可逆装的损害发生后,额外的能值资源需要输入,用以取代失去的资产或单位;2)如果不可能用新的资源替代,至少应该保守的估计自然或人为的资本损失,以确定一个过程产品的真实成本。Lei 和 Wang^[70]追踪澳门固体废物焚烧后炉渣粉煤灰的能值转换率。Zhang 等^[71]综合稀释和生态指标 99 的方法来评价中国钢铁生产的可持续性。综合现有研究,额外的能值成本计算应包括:1)自然过程对污染物的稀释和消减;2)通过技术手段提取、再循环的污染物;3)人造资产的损失的维修保养活动;4)可逆和不可逆的自然资本损害(如:生物多样性的丧失);5)可逆和不可逆的损害人体健康。因此,总能值使用量 U 可以计算如下:

$$U = R + N + F + F_1 + \dots + F_n \quad (1)$$

式中, R 和 N 分别表示能值的本地可再生能源和不可再生的资源, F 是进口货物和商品的能值(包括其相关的服务)和 F_i 包括环境与人类投入到污染防治中的能值(这里的 F 仅计算回用部分)。

为了清晰起见,如果计算焚烧污染物对城市建筑物外表面的损害,这种危害可以通过计算用于修复的能值投入 $F_i = A \times S_k F_{n,k}$,式中, A 是表面受损面积, $F_{n,k}$ 是单位面积需要修复(化学用品、劳力等)的投入。

图 1 显示了两种模式:(a)无废物处理设施模式;(b)有废物处理设施模式。该图是图 2 城市整体能值图的一个子系统。大气、水、固体废物进入废物处理系统就需要额外投入燃料、物资与劳动力。按照公式(1) F_1, \dots, F_n 在图中用 $L_{w,n}$ 表示。没有进入废物处理设施前,对人力资本的损失能值表示为 $L_{w,1}$,这意味着这些污染物造成人群健康影响,这反过来需要增加额外的固定投资,同时,其他种类的排放物,如酸雨或者湖泊富营养化,可能导致动植物的损失,这里用 $L_{w,2}$ 表示,表示自然资本退化的能值损失。未经处理的污染物排放后需要自然系统提供如稀释或者降解等生态服务使它们变得无害,这里用 R_w 表示这些能值。一般的城市都排放大量的污染物,所以为了防止或者减少进一步的污染损害,应该增加废物处理设施,如图 1(b)所示。废物处理系统可以有效的减少污染物排放(但是不为零),并输入额外的能源。这里,污染物排放造成的人群损失和自然损失就变成了 $L_{w,1}^*$ 和 $L_{w,2}^*$ (分别是 $L_{w,1}^* < L_{w,1}, L_{w,2}^* < L_{w,2}$)。另外,固体废物也造成相应的损害,可以通过测量土地占用和土地退化来表示损失的能值(即土地不可逆转的退化了),这里用 $L_{w,3}$ 表示。废物处置系统应该通过生态技术设计成可循环的(循环部分为 F_b)。这种回用应该使得总能值使用量 U 通过减少本地不可更新能值 N 的使用或者减少进口量 F 得到一定程度的减小。

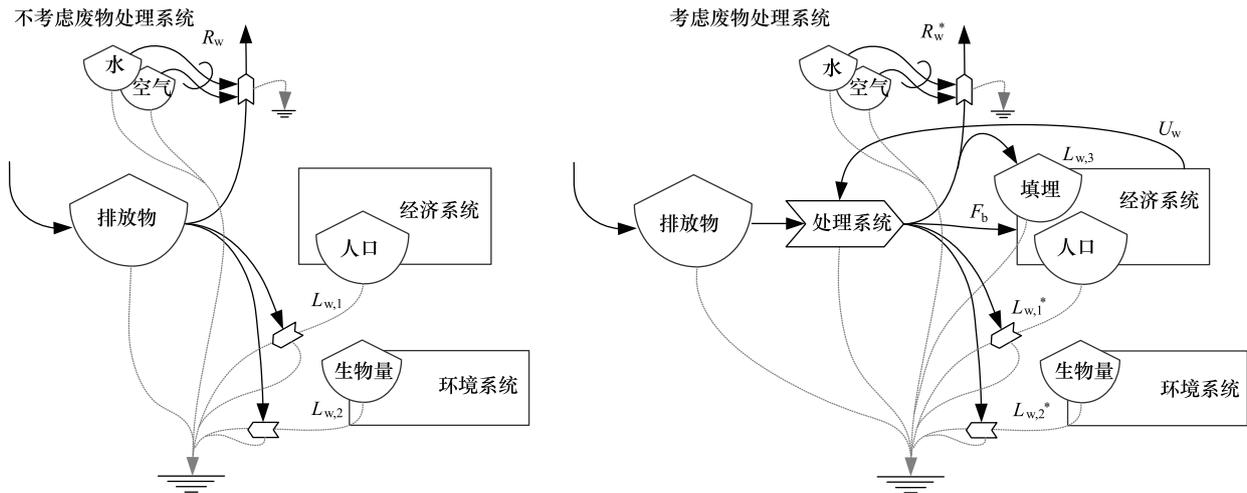


图 1 环境与经济系统直接或间接能值流核算

Fig. 1 Direct and indirect energy inflows from environment and economic system

用图 2 来描述城市代谢系统,其中所用的符号来自于 Odum^[49] 提出的能路语言。由于最外层的系统边界是地球,所以从外界投入的驱动力只有太阳能和引力。图中,最外面的黑框表示选定的城市系统,左侧的是外界投入的可更新能源,包括太阳能、地热、以及雨水、风、潮汐、波浪等,这些可更新资源以生态服务功能的形式间接的支持了城市代谢系统的生产和消费过程(如城市内植被的光合作用、自然界的碳循环、氧循环、作为稀释/净化/降解城市中的大气污染物/水污染物/固体废物等)。本地的一些资源,如土壤、木材、地下水等,也被城市代谢系统所使用。化石燃料和电力的能值是单独核算的,核算的过程取决于人类对其开采以及使用的整个过程投入。虽然化石燃料也是在随着地壳运动而慢慢更新,但是相比人类使用的速度,这些入流都考虑为不可再生能源。模型中,人类的角色体现的很明确,从事经济生产。

图 2 中,货币流使用虚线来表示的,货币流的方向与劳力的方向相反,所以可以用货币流来追踪劳力投入的情况。从图中可以看出,整个城市系统的代谢过程是依赖于自然的工作流程,但货币流相对独立;这就说明资金流在市场经济体系下是一套独立而完整的工作环境,作用是在于保证持续社会商品购买和服务提供的持续正常进行。

2.3 城市生态经济损失的能值量化方法

(1)生态服务的量化方法

自然界有自我净化的作用,当污染物排放到周边环境后自然界的大气和水体会提供稀释、淡化或分解

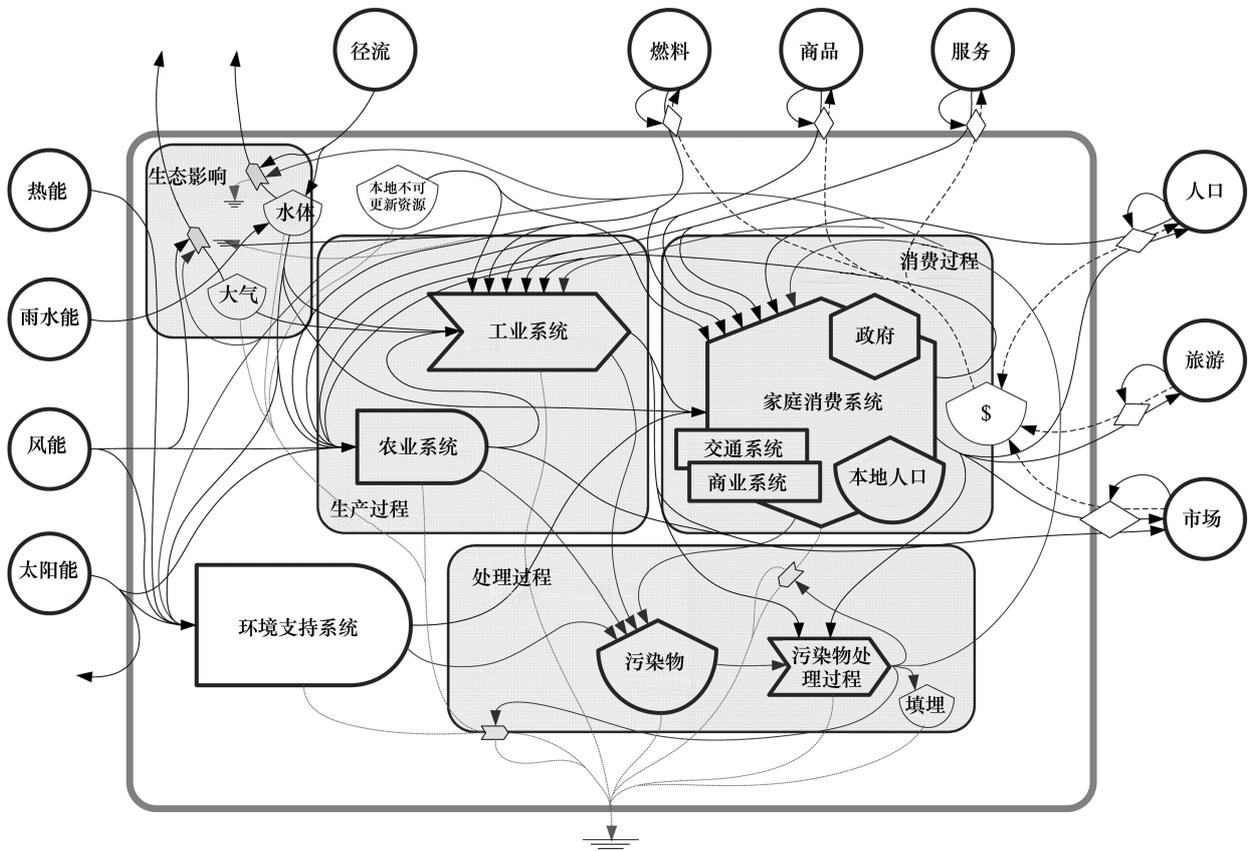


图2 城市代谢全过程系统模型

Fig.2 Energy flow system diagram of the urban metabolic system

服务,使得污染物浓度达到一个生态系统可接受的浓度范围。这些生态服务能值的计算方法可以根据排放浓度和背景浓度折算相关的能值转换率。例如,计算空气稀释二氧化氮排放所需的能值,就需要确定排放量、城市稀释浓度标准以及风的能值转换率。

稀释空气和水源污染的生态服务可以计算如下^[67]:

$$M_{air/water} = d \times \left(\frac{W^*}{c} \right) \tag{2}$$

式中, $M_{air/water}$ 表示稀释所需空气/水的重量, d 是空气/水的密度, W 是每年的第 i 个污染物的浓度, c 是法规或科学研究证实的污染物“可容忍浓度”。公式(2)应适用于每一种污染物。这里,使用“可容忍浓度”的假设,说明这些污染物至少在某种浓度是可以接受的。相反,如果背景浓度分别确定是“ c ”,这将意味着这个污染或多或少接近工业时代之前的水平。而实际上环境服务所能给与的比想象的更多,因为没有不能被环境吸收消减的污染物,但仍然需要设定一个“可容忍浓度”,这样,一旦用来稀释消减的空气或水的质量可知,就可以计算这些空气或水的能量,并计算式(1)的环境服务价值。如果只是考虑这些污染物被转运,那么可以计算稀释用空气或水环境的动能,如果考虑其消解污染物的化学反应,那么还需计算稀释用空气或水的化学能。

释放到大气中的化学污染物:

$$[F_{w,air} = R_{w,air} = N_{kinetic} \times tr_{air} = (M_{air} \times v^2/2) \times tr_{wind}]_i \tag{3}$$

排入水体中的化学污染物:

$$[F_{w,water} = R_{w,water} = N_{chem} \times tr_{chem,water} = (M_{water} \times G) \times tr_{chem,water}]_i \tag{4}$$

公式(3)(4)分别适用于第 i 污染物释放;

式中, M_{air} 表示稀释空气的质量, $N_{kinetic}$ 表示稀释空气的动能, tr_{air} 表示风的能值转换率, v 表示平均风速,

$N_{\text{chem,water}}$ 表示水的化学可用能(=驱动化学转换的能力), $tr_{\text{chem,water}}$ 表示水的化学潜能。的转换率, G 为单位水体相对于参考值(海水)的吉布斯自由能(4.94J/g)。

如果污染物是余热(假设余热是直接释放到大气中), 必须考虑生态系统对其冷却稀释的服务。冷却计算程序开始从系统总热量的释放量(估算, 系统本身总能源使用量+转换降解热)。现在的科学界接受这样的事实, 就是释放到空气中的热量会使得系统平均温度 T_0 提高到一个新的平衡温度 T_e 。假设, “可容忍的温度提高量” 只比平均环境温度高 1°C , 那么所需稀释的空气和水的重量可以按照如下公式计算:

$$M_{\text{air/water}} = Q_{\text{released}}/\rho \times (\Delta T) = Q_{\text{released}}/\rho \times (1^\circ\text{C}) \quad (5)$$

式中, M 表示系统用于降低排放温度所需的空气/水的重量, ρ 表示空气/水的热容量。一旦用于降低排放温度所需的空气/水的重量已知, 可以用公式(3)来计算。

最后, 总的环境提供的服务功能需要考虑同时稀释各种污染物的因素, 可以计算为:

$$R_w^* = \text{Max}(R_{w,\text{air},i}^*) + \text{Max}(R_{w,\text{water},i}^*) \quad (6)$$

值得一提的是, 这种方法是一种简化模拟的方法, 并没有考虑污染物的扩散以及在大气和水体中的化学过程, 它依赖于一个隐含的假设, 即可用于稀释的空气/水始终是足够的。

(2) 生态和经济损失的量化方法

目前已有很多学者试图用于整合污染物排放与其对环境的影响。这将是一个非常有效的整合方法, 需要能用实际的排放值来量化实际的自然资源和人力资本的损害值, 例如, 由于污染造成生态系统的退化或人体健康的损害、土地占用或土地退化、人造资产的损害以及其他相关的经济损失、生物多样性的减少等。

本研究中, 初步的损失评估参考 Eco-indicator 99 的评估框架^[72]。这种框架与终端生命周期影响评价方法相似, 在其整体环境影响评价过程固有的存在着很大的不确定性。但是这种方法仍然能够提供提供一个计算损失的途径。反映自然资源的损失, 这里引入受影响的生态系统中物种可能消失的比例(PDF法); 反映人们对遭受污染损害的关注以及对损害程度的测度, 我们引入世界银行、世界卫生组织提出采用的由于污染而使人类健康受到影响的 DALY 法——伤残调整健康生命年, 这种方法是由美国的 Murray 教授首先提出, 并在 1993 年世界银行发布的世界发展报告中采用^[36,72-73]。DALYs 同时考虑了早亡所损失的寿命年和病后失能状态下(特定的失能严重程度和失能持续时间)生存期间的失能寿命损失年。因此, DALY 含义是指疾病从发生到死亡所损失的全部寿命年。

需要说明的是, 利用 Eco-indicator 99 的评估框架采用(PDF 和 DALY 方法)量化污染物对生态系统和人群健康的影响是具有测量或统计的优势。但是需要注意如下几点: 1) 在 Eco-indicator 99 的评估框架中提供的数据只限于欧洲(大多数情况下仅为荷兰的数据), 如果用于评估其他国家的情况需要进行修正^[74], 这里, 我们强烈呼吁数据库的更新; 2) Eco-indicator 99 的评估框架认为污染物浓度和造成的影响之间的剂量反应关系是线性的而不是逻辑斯蒂曲线^[36], 这在一定的假设前提是正确的, 但是也表明该方法只适用于污染物浓度的减缓变化, 不适合排放量的较大波动, 如突发的环境污染事故。3) 这种方法只适用于有明确受当地排放影响的人群并其在此长期居住的大区域, 单独的产业部门由于没有明确的稳定的受影响居住人群, 并不适合用此类方法进行评价。

污染物排放对人体健康的影响, 可以看作是一个额外的资源投资的间接需求。人力资源(考虑其复杂性: 生活质量, 教育, 知识, 文化, 社会价值观和结构, 层次的角色, 等等)可以被视为当地的缓慢的可再生能源储存流程。而且还关联社会支持及其各部门的资产。当这种资产和关联的损失以及投资的损失存在, 这种损失必须联系到的城市变化和创新的過程。人群健康能值损失的计算公式可以表达为:

$$L_{w,i}^* = \sum m_i^* \times \text{DALY}_i \times \tau_H \quad (7)$$

式中, $L_{w,i}^*$ 表示受影响人群的能值损失; i 表示第 i 种污染物; m_i^* 表示释放的污染物中化学物质的重量, DALY 是其在 Eco-indicator 99 的评估框架中的影响因子, $\tau_H =$ 区域总能值/总人口。每个受影响的人群, 都是用投入的资源发展出了专业知识或工作能力和社会组织, 当这类人群损失了, 就需要重新投入资源重新培养。

PDF 在 Eco-indicator 99 的评估框架中表示潜在消失物种比例(PDF)^[72]。这种影响可以量化为当地的生态资源损失的能值,计算方法同上:

$$L_{w,2}^* = \sum m_i^* \times \text{PDF}(\%)_i \times E_{\text{Bio}} \quad (8)$$

式中, $L_{w,2}^*$ 表示受影响的自然资源的损失;PDF (%) 表示潜在灭绝比例,单位是 $\text{PDF} \times \text{m}^2 \times \text{a} \times \text{kg}^{-1}$ 。在 Eco-indicator 99 的评估框架中的数据表明潜在灭绝比例如果是 1,意味着一年内会有一平米的所有物种消失,或者说一年期间 10m^2 的范围内会有 10% 的物种消失。 E_{Bio} 表示单位生物资源的能值($\text{seJ} \times \text{M}^{-1} \times \text{a}^{-1}$),可以用本地的荒地生物资源、农业资源、林业资源、畜牧业资源和渔业生产的能值来计算。

如前所述,还有其他一些能值损失, $L_{w,j}$, 包括污染排放引起的城市资产的损害,细节参照 Ulgiati 等人 1995 年的文章^[66]。

(3) 对污染物处理处置设施的能值投入量化方法

根据 Ulgiati 等人^[76]的研究,对污染物处理处置设施的能值投入量的计算是为了与因污染物排放而造成的损失相比较。本研究中,投入到污染物处理处置设施的能值输入量已经包含在总使用能值。因此,在考虑废物处理的情况下,对污染物处理处置设施的能值投入总量(E_w)不会被添加到城市总能值消耗中,以避免重复计算。此外,回收和回用的材料(F_b)不计入出口能值中。

本研究中城市废物包括工业废水、城市生活垃圾、城市污水以及由化石燃料燃烧和垃圾焚烧造成的废气排放。在系统能值投入方面,包括处理过程中的劳力投入、燃料、水、电力和资本(机器)投入。而回用部分,由于数据的原因,只考虑了固体废物堆肥产生沼气和回用物质。

另外,由于垃圾当前的主要处理方式还是填埋,所以对城市资本的损失考虑为垃圾填埋场设置而占据土地造成的损失。这可以通过能值/面积比或者土壤生成能值密度折算成城市资本损失,其中:用能值/面积比折算是考虑了损失的最上限(平均能值密度的经济活动),用土壤生成能值密度是按损失的最下限来折算的(平均环境强度)。在本研究采用第一种方式来进行能值损失折算($L_{w,3}$),其他情况可以根据不同的系统情况进行选择。

2.4 环境影响修正后的能值指标

基于基本能值核算方法^[49]和污染物排放生态环境影响量化方法,重新修正能值评价指标:

(1) 能值产出率

$$EYR = U / (F + G + P_2I + P_2I_3) \quad (9)$$

式中, U 表示总能值使用量(其中 $U = R + N + F + G + P_2I + P_2I_3$), R 表示当地可再生资源, N 表示不可再生的资源, F 表示进口燃料, G 表示进口的物资与商品, P_2I 表示购买服务, P_2I_3 表示支付外来劳力的能值。

EYR 表示总能值使用量与进口能值使用量的比例,该指标表征系统经济投资的有效性。通过 EYR 值的比较,可以了解不同系统对本地资源或进口商品的依赖程度。 EYR 值越高,对本地可再生或不可再生资源的能力越高。当然,如果利用可再生资源,这个过程是可持续的;如果过度开发不可更新资源,也将会是不可持续的过程。

当考虑了生态资本和经济资本的损失之后,该指标的计算公式变为公式(10),能值损失被视为间接负输入,也就是系统需要为这种损失再次进行输入。

$$EYR' = (U + E_w^* + L_{w,1}^* + L_{w,2}^* + L_{w,3}^*) / (F + G + P_2I + P_2I_3 + U_w^* + L_{w,1}^* + L_{w,2}^* + L_{w,3}^*) \quad (10)$$

(2) 环境承载率

环境承载率(ELR)由公式(11)所示。是当地的不可再生能值和购买能值(包括服务)的总和与本地可再生能值的比,该指标显示间接的环境资源对整个系统的贡献力度。环境承载率越小,表明对可更新资源的依赖程度越大。如一个完整的自然生态系统就完全依靠可再生资源投入。同时,该指标越高,也说明系统本地环境资源的压力越大:

$$ELR = (N + G + F + P_2I + P_2I_3) / R \quad (11)$$

公式(12)表示考虑了生态资本和经济资本的损失之后的环境承载率计算:

$$ELR' = (N + G + F + P_2I + P_2I_3 + U_w^* + L_{w,1}^* + L_{w,2}^* + L_{w,3}^*) / R \quad (12)$$

(3) 可持续性发展指数

可持续发展指数可根据上面公式(9)、(10)、(11)、(12)计算得出:

$$ESI = EYR/ELR \quad (13)$$

$$ESI' = EYR'/ELR' \quad (14)$$

该指数考虑单位环境负荷(ELR)下的总的经济效益(EYR)。

3 结论

本文试图完整的建立基于能值的城市代谢系统综合核算体系。基于现有城市核算的难点与缺失点,在更好的理解系统和更好的构建完整城市代谢体系的同时,建立了完整的基于生态热力学城市代谢系统综合核算体系。

(1) 确定研究系统的边界,收集城市代谢过程资料和数据。

(2) 利用系统能路语言,绘制系统图。

(3) 编制城市代谢分析表

包括本地资源、输入的不可再生资源、输入货物及劳务、货物输出、废物流(环境影响)等,计算从系统外部输入系统的能值流(可再生资源、粗放使用的系统内自然资源、系统内集约型资源、从外界输入的化石燃料与矿物、从外界输入的财货与劳务等)以及从系统内部向外输出的能值流(加工或未加工的原材料输出,流向其他省市及出口国外的商品流以及劳务流)。同时,货币流作为商品和服务的一般等价物在系统内部流通。

1) 可更新资源,不可更新物质流、能流核算方法 建立城市代谢更新资源、不可更新物质流、能流清单,通过能值基准、修正文献中能值转换率,计算其投入产出能值。

2) 基于生命周期评价的复杂进出口商品的能值核算方法 利用生命周期评价方法拆解复杂进出口商品的材料与服务(体现在复杂商品制造过程中的能值),分项计算其能值。

(4) 污染物及温室气体的生态损失能值核算方法研究

依照 Eco-Indicator 99 的划分标准,结合自然系统对污染物的自净化及污染对经济系统和生态系统的损害程度测度方法(伤残调整健康生命年 DALY 法和物种潜在消失比例 PDF 法),从城市生产过程和消费过程研究污染物对人群健康、自然生态系统和经济系统的影响。

(5) 用以稀释进化污染物生态服务能值核算方法

按照对污染物的最大稀释量核算生态服务能值的最大提供值。

(6) 时间尺度上城市代谢系统的一体化核算和指标评价。

其中,根据收集资料绘制系统能值图是关键的一步。绘制系统能值图后,编制能值分析表汇总计算城市的主要物质、能量、信息、资金、人口等各种生态流,得到能值指标值,进一步实现从系统结构、系统结构、代谢强度、环境负荷、缓冲容量五个生物物理层面因素系统分析城市生态系统健康特征。

而后续的研究将以此理论与方法框架为基础,针对不同城市的特点,进行城市代谢全过程能值核算研究,本研究有利于解决城市代谢不良的影响因子识别问题和代谢系统综合评价问题,使政策制定者建立以生态为本的城市观,推动社会系统的生态化转型实践,力求突破当前城市发展的瓶颈,促进城市的可持续发展。

References:

- [1] Duan N. Material metabolism and circular economy. China Environmental Science, 2005, 25(3): 320-323.
- [2] Huang G H, Chen B, Qin X S. Study of diagnosing, preventing and controlling illnesses of modern cities. Journal of Xiamen University of Technology, 2006, 14(3): 1-10.
- [3] Odum H T. Systems Ecology. New York; John Wiley and Sons, 1983.
- [4] Jørgensen S E. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2000, 3(3): 419-430.

- [5] Chen Z M, Chen B, Chen G Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 322-329.
- [6] Huang S L. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management*, 1998, 52(1): 39-51.
- [7] Erlach B, Serra L, Valero A. Structural theory as standard for thermoeconomics. *Energy Conversion and Management*, 1999, 40(15/16): 1627-1649.
- [8] Wolman A. The metabolism of cities. *Scientific American*, 1965, 213(3): 179-190.
- [9] Newman P W G, Birrel R, Holmes D. Human settlements in state of the environment Australia // Australia: State of the Environment Advisory Council. Melbourne: CSIRO Publishing, 1996.
- [10] Xi D L. The regional implementation of resources comprehensive utilization. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2000, (1): 15-17.
- [11] Ouyang Z Y, Wang X Q, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [12] Peng X Y, Hou X R. The theoretic and practical analysis of relationship between material input and income comparison between China and other countries. *China Soft Science*, 2000, (9): 33-38.
- [13] Wang R S, Zhou Q X, Hu D. *The Control Methods of Urban Ecology*. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 31-40.
- [14] Chen X Q, Zhao T T, Guo Y Q, et al. Material input and output analysis of Chinese economy system. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(4): 538-547.
- [15] Ayres R U. Toxic heavy metals; materials cycle optimization. *The National Academy of Sciences of the United States of America*, 1992, 89(3): 815-820.
- [16] Liu J R, Wang R S, Wang Z, Yang J X. Metabolism and driving forces analysis of Chinese urban households. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2672-2676.
- [17] Zhao W, Yang Z F, Li W. Optimization of energy structure in eco-urban construction. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(6): 54-59.
- [18] Luo T W, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zheng H. Dynamics of urban food-carbon consumption in Beijing households. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [19] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: emergy synthesis versus material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [20] Huang S L, Kao W C, Lee C L. Energetic mechanisms and development of an urban landscape system. *Ecological Modelling*, 2007, 201(3/4): 495-506.
- [21] Fischer-Kowalski M. Society's metabolism: the intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860—1970. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2(1): 61-78.
- [22] Tao Z P. *Ecological Rucksack and Ecological Footprint: The Weight and the Area Concept of Sustainable Development*. Beijing: Economic Science Press, 2003: 20-25.
- [23] Warren-Rhodes K, Koenig A. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971—1997. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, 11(4): 429-438.
- [24] Yu S T, Huang J X. Studies on material metabolism in the regional system — A case study of Nantong city, Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 212-221.
- [25] Yan W H, Liu Y M, Huang X, Hu Y J. The changes of urban metabolism and effects of waste creation in Shenzhen, Guangdong province. *Urban Problems*, 2003, 8(1): 40-44.
- [26] Huang X J, Yu S T, Ma Q F, Li L L, Zhai W X. Studies on material metabolism response of regional land use change. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 1-8.
- [27] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farberk S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Suttonk P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 38(7): 253-260.
- [28] Seidl A F, Moraes A S. Global valuation of ecosystem services: application to the Pantanal da Nhecolandia, Brazil. *Ecological Economics*, 2000, 33(1): 1-6.
- [29] Lan S F, Odum H T. Emergy evaluation of the environment and economy of Hong Kong. *Journal of Environmental Science*, 1994, 6(4): 432-439.
- [30] Sui C H, Lan S F. Emergy analysis of Guangzhou and Shanghai urban ecosystem. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2006, 19(4): 1-3.
- [31] Lu H F, Peng S L, Ren H, Chen L. Emergy-based indices system for regional analysis of industrial ecosystem. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(2): 68-72.
- [32] Chen G Q. Exergy consumption of the earth. *Ecological Modelling*, 2005, 184(2/4): 363-380.
- [33] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y, Zhang L X, Zhao Y W, Jiang M M. Emergy-based urban ecosystem health assessment: a case study of Baotou, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(3): 972-981.
- [34] Szargut J, Morris D R, Steward F R. *Emergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*. Washington DC: Springer, 1998.
- [35] Pu J, Liu G L, Feng X. Application of the cumulative exergy approach to different air conditioning systems. *Energy and Buildings*, 2010, 42(11): 1999-2004.
- [36] Ukidwe N U, Bakshi B R. Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input-output benchmark

- model. *Energy*, 2007, 32(9): 1560-1592.
- [37] Chen G Q. Scarcity of exergy and ecological evaluation based on embodied exergy. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2006, 11(4): 531-552.
- [38] Chen Z M, Chen B, Chen G Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 322-329.
- [39] 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.
- [40] Ertesvåg I S. Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000. *Energy*, 2005, 30(5): 649-675.
- [41] Peiró L T, Méndez G V, Sciubba E, Durany X G. Extended exergy accounting applied to biodiesel production. *Energy*, 2010, 35(7): 2861-2869.
- [42] Zhong Q F, Chen X K. *Input-Output Analysis*. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 1986: 131-132.
- [43] Xu Y J, Zhang Z T, Shi L, Chen J N. Material flow analysis in Guiyang. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(12): 1688-1691, 1699-1699.
- [44] Nakamura S, Nakajima K. Waste input-output material flow analysis of metals in the Japanese economy. *Materials Transactions*, 2005, 46(12): 2550-2553.
- [45] Daly H E, Farley J. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington DC: Island Press, 2003.
- [46] Eisenmenger N, Giljum S. Evidence from societal metabolism studies for ecological unequal trade // Hornborg A, Crumley C L, eds. *The World System and the Earth System: Global Socioenvironmental Change and Sustainability Since the Neolithic*. Walnut Creek: Left Coast Press, 2006.
- [47] Capra F. *The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems*. New York: Anchor Books, 1996. Carpenter S, Walker B, Anderies M, Abel N. From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765-781.
- [48] Hornborg A. Introduction: conceptualizing sociological systems // Hornborg A, Crumley C L, eds. *The World System and the Earth System: Global Socioenvironmental Change and Sustainability Since the Neolithic*. Walnut Creek: Left Coast Press, 2001.
- [49] Odum H T. *Environmental Accounting: EMERGY and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996: 370-370.
- [50] Walker B H, Anderies J M, Kinzig A P, Pyan P. Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: introduction to the special issue. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 1-12.
- [51] Odum H T. *Environment, Power, and Society for the Twenty-First Century: The Hierarchy of Energy*. Columbia: Columbia University Press, 2007.
- [52] Odum H T, Brown M T, Brandt-Williams S. *Handbook of Emery Evaluation A Compendium of Data for Emery Computation Issued in a Series of Folios. Folio #1: Introduction and Global Budget*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2000.
- [53] Odum H T. *Handbook of Emery Evaluation A Compendium of Data for Emery Computation Issued in a Series of Folios. Folio #2: Emery of Global Processes*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2000.
- [54] Brown M T, Bardi E. *Handbook of Emery Evaluation A Compendium of Data for Emery Computation Issued in a Series of Folios. Folio #3: Emery of Ecosystems*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2001.
- [55] Brandt-Williams S. *Handbook of Emery Evaluation A Compendium of Data for Emery Computation Issued in a Series of Folios. Folio #4: Emery of Florida Agriculture*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2002.
- [56] Kangas R C. *Handbook of Emery Evaluation A Compendium of Data for Emery Computation Issued in a Series of Folios. Folio #5: Emery of Landforms*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2002.
- [57] Brown M T, Protano G, Ulgiati S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. *Ecological Modelling*, 2010, 222(3): 879-887.
- [58] Suchet P A, Probst J L, Ludwig W. Worldwide distribution of continental rock lithology: implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1038-1052.
- [59] Dong X B, Ulgiati S, Yan M C, Zhang X S, Cao W S. Energy and eMergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. *Energy Policy*, 2008, 36(10): 3882-3892.
- [60] Lu H F, Bai Y, Ren H, Campbell D E. Integrated emery, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: implications for agricultural policy in China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2727-2735.
- [61] Li L J, Lu H F, Ren H, Kang W L, Chen F P. Emery evaluations of three aquaculture systems on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 526-534.
- [62] Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Tao F R, Li Z, Yang Z F, Chen G Q. Emery account for biomass resource exploitation by agriculture in China. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4704-4719.
- [63] Geng Y, Zhang P, Ulgiati S, Sarkis J. Emery analysis of an industrial park: the case of Dalian, China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22): 5273-5283.
- [64] Brown M T, Ulgiati S. Updated evaluation of exergy and emery driving the geobiosphere: a review and refinement of the emery baseline. *Ecological Modelling*, 2010, 221(20): 2501-2508.
- [65] Zhang P. *A Study on Emery Analysis Evaluation and Optimization of Complex Industrial Ecosystem [D]* Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [66] Ulgiati S, Brown M T, Bastianoni S, Marchettini N. Emery-based indices and ratio to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological*

- Engineering, 1995, 5(4): 519-531.
- [67] Ulgiati S, Brown M T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions; the case of electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(4): 335-348.
- [68] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of energy analysis. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 215-225.
- [69] Brown M T, Ulgiati S. Energy, transformity and ecosystem health // Jørgensen S E, Costanza R, Xu F L, eds. *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005: 333-352.
- [70] Lei K P, Wang Z S. Energy synthesis and simulation for Macao. *Energy*, 2008, 33(4): 613-625.
- [71] Zhang X H, Jiang W J, Deng S H, Peng K. Energy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998—2004. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(11): 1030-1038.
- [72] Goedkoop M, Spriensma R. *The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment; Methodology Report*. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 2000.
- [73] Murray C J L, Lopez A D, Jamison D T. The global burden of disease in 1990; summary results, sensitivity analysis and future directions. *Bulletin of the World Health Organization*, 1994, 72(3): 495-509.
- [74] Zhang X H, Deng S H, Wu J, Jiang W J. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on energy. *Ecological Engineering*, 2010, 36(5): 685-696.
- [75] Ulgiati S, Brown M T, Bastianoni S, Marchettini N. Energy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological Engineering*, 1995, 5(4): 519-531.
- [76] Ulgiati S, Bargigli S, Raugi M. An energy evaluation of complexity, information and technology, towards maximum power and zero emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(13/14): 1354-1372.
- [77] Campbell D E. Energy analysis of human carrying capacity and regional sustainability; an example using the state of maine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51(1/2): 531-569.
- [78] Campbell D E. A revised solar transformity for tidal energy received by the earth and dissipated globally; implications for Energy Analysis // Brown M T, ed. *Energy Synthesis: Theory and Applications of the Energy Methodology*. Proceedings of the 1st Biennial Energy Analysis Research Conference. Gainesville, FL: Center for Environmental Policy, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000: 255-264.

参考文献:

- [1] 段宁. 物质代谢与循环经济. *中国环境科学*, 2005, 25(3): 320-323.
- [2] 黄国和, 陈冰, 秦肖生. 现代城市“病”诊断、防治与生态调控的初步构想. *厦门理工学院学报*, 2006, 14(3): 1-10.
- [10] 席德立. 浅谈资源综合利用的区域实施. *中国资源综合利用*, 2000, (1): 15-17.
- [11] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [12] 彭新育, 候先荣. 中国与其他国家物质消耗-收入关系的比较分析. *中国软科学*, 2000, (9): 33-38.
- [13] 王如松, 周启星, 胡聘. 城市生态学调控方法. 北京: 气象出版社, 2000: 31-40.
- [14] 陈效迷, 赵婷婷, 郭玉泉, 宋升佑. 中国经济系统的物质输入与输出分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2003, 39(4): 538-547.
- [16] 刘晶茹, 王如松, 王震, 杨建新. 中国城市家庭代谢及其影响因素分析. *生态学报*, 2003, 23(12): 2672-2676.
- [17] 赵伟, 杨志峰, 李巍. 面向生态城市建设的能源结构优化研究. *安全与环境学报*, 2005, 5(6): 54-59.
- [18] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 郑华. 北京城市化进程中家庭食物碳消费动态. *生态学报*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [22] 陶在朴. *生态包袱与生态足迹*. 北京: 经济科学出版社, 2003: 20-25.
- [24] 于术桐, 黄贤金. 区域系统物质代谢研究——以江苏省南通市为例. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 212-221.
- [25] 颜文洪, 刘益民, 黄向, 胡玉佳. 深圳城市系统代谢的变化与废物生成效应. *城市问题*, 2003, 8(1): 40-44.
- [26] 黄贤金, 于术桐, 马其芳, 李璐璐, 翟文侠. 区域土地利用变化的物质代谢响应初步研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 1-8.
- [30] 隋春花, 蓝盛芳. 广州与上海城市生态系统能值的分析比较. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(4): 1-3.
- [31] 陆宏芳, 彭少麟, 任海, 陈烈. 产业生态系统区域能值分析指标体系. *中山大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(2): 68-72.
- [42] 钟契夫, 陈锡康. *投入产出分析*. 北京: 中国财政经济出版社, 1986: 131-132.
- [43] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 陈吉宁. 贵阳市物质流分析. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(12): 1688-1691, 1699-1699.
- [65] 张攀. 复合产业生态系统能值分析评价和优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 15 Aug. ,2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring
..... SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al (4523)
- Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (4539)
- Theoretical considerations on ecological civilization development and assessment ZHAO Jingzhu (4552)

Autecology & Fundamentals

- Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season
..... Yu Tingting, XU Kuidong (4556)
- Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring
..... FANG Tao, HE Xinran, FENG Zhihua, et al (4567)
- The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring
..... HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al (4575)
- Effects of simulated acid rain on growth and bleeding sap amount of root in *Quercus mongolica*
..... LIANG Xiaoqin, LIU Jian, DING Wenjuan, et al (4583)
- Allelopathic effects of organic acid allelochemicals on melon ZHANG Zhizhong, SUN Zhihao, CHEN Wenhui, et al (4591)
- Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes
..... WU Jiamei, JI Xionghui, HUO Lianjie, et al (4599)
- Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide
..... WANG Huangping, ZHANG Qing, WENG Boqi, et al (4608)
- Comparison of isolation rate of mycobacteriophage in the different type soils
..... XU Fengyu, SU Shengbing, MA Hongxia, et al (4616)
- Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars
..... BIAN Yajiao, HUANG Jie, SUN Qisong, et al (4623)
- The causes of *Gentiana straminea* Maxim. seeds dormancy and the methods for its breaking
..... LI Bingbing, WEI Xiaohong, XU Yan (4631)
- Physiological responses of four golden-leaf trees to SO₂ stress CHONG Peifang, SU Shiping (4639)
- Influence of endosulfan and its metabolites on enzyme activities in purple soil
..... XIONG Bailian, ZHANG Jinzhong, DAI Juan, et al (4649)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level XU Jun, ZHOU Qiong, WEN Zhouhui, et al (4658)
- Population dynamics of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (4665)
- Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region
..... ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al (4674)
- Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration
..... LI Yuanyuan, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (4683)
- Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure
..... LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, et al (4692)
- Effects of different maize hybrids (inbreds) on the growth, development and population dynamics of *Rhopalosiphum maidis* Fitch ...
..... ZHAO Man, GUO Xianru, LI Weizheng, et al (4707)
- Effects of forest canopy structure on understory vegetation characteristics of Funiu Mountain Nature Reserve
..... LU Xunling, DING Shengyan, YOU Li, et al (4715)

- Influence of restoring cropland to grassland on dung beetle assemblages in Wuchuan County, Inner Mongolia, China
 LIU Wei, MEN Lina, LIU Xinmin (4724)
- Cu and nutrient deficiency on different effects of growth, tolerance and mineral elements accumulation between two *Elsholtzia*
haichouensis populations KE Wenshan, CHEN Shijian, XIONG Zhiting, et al (4737)
- Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang
 ZAN Mei, LI Dengqiu, JU Weimin, et al (4744)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- An spatial ecosystem services approach based on LUCC: a case study of Ganzhou district of Zhangye City
 LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei, et al (4758)
- Spatiotemporal characteristics of *Spartina alterniflora* marsh change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural
 processes and human activities ZHANG Huabing, LIU Hongyu, Hou Minghang (4767)
- Process analysis and evaluation of wetlands degradation based on PCA in the lakeside of Napahai, Northwest Yunnan Plateau
 SHANG Wen, YANG Yongxing, HAN Dayong (4776)
- On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, et al (4790)
- Evaluation and simulation of historical range of variability of forest landscape pattern in Huzhong area
 WU Zhifeng, LI Yuehui, BU Rencang, et al (4799)
- Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in inner mongolia temperate steppe
 GUO Qun, HU Zhongmin, LI Xuanran, et al (4808)
- Research Notes**
- Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic
 zones of mid and eastern China WANG Jianjian, WANG Yongji, LAI Liming, et al (4818)

《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 赵景柱 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)

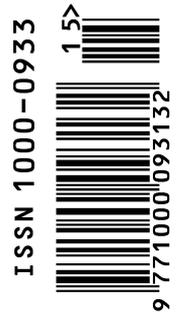
第33卷 第15期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 15 (August, 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	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
主编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第8013号		



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