

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

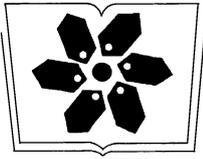
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

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 32 卷 第 7 期      2012 年 4 月      (半月刊)

## 目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架.....	孙然好,许忠良,陈利顶,等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应.....	李 敏,王 垠,牟晓飞,等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb( II )和 Cd( II )的生物吸附及其影响因素.....	姜 晶,李 亮,李海鹏,等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应.....	韩立新,汪有科,张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法.....	施晓清,杨建新,王如松,等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例.....	..... 赵卉卉,王 远,谷学明,等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价.....	白琳红,王 卫,张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理.....	..... 王艳红,吴晓民,朱艳萍,等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究.....	..... 何春霞,孟 平,张劲松,等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布.....	张利青,彭晚霞,宋同清,等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系.....	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响.....	王西存,于 毅,周洪旭,等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响.....	金陵波,周 峰,姚 涓,等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期.....	..... 徐岩岩,张佳华,YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化.....	王明田,曲辉辉,杨晓光,等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响.....	高晓容,王春乙,张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响.....	朱小红,马中文,马友华,等 (2119)
丛枝菌根真菌对积根净离子流及锌污染下积苗矿质营养的影响.....	肖家欣,杨 慧,张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响.....	杨再强,张 静,江晓东,等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态.....	刘 蕾,申国珍,陈芳清,等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献.....	周小刚,郭胜利,车升国,等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局.....	陈志阳,杨 宁,姚先铭,等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性.....	郑 宁,张劲松,孟 平,等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究.....	..... 徐少君,曾 波,苏晓磊,等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的初期影响 ..... 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 ..... 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 ..... 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....  
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

**专论与综述**

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 ..... 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

**问题讨论**

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 ..... 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

**研究简报**

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 ..... 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 322 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 37 \* 2012-04



**封面图说:** 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201104180505

施晓清, 杨建新, 王如松, 赵吝加. 产业生态系统资源代谢分析方法. 生态学报, 2012, 32(7): 2012-2024.

Shi X Q, Yang J X, Wang R S, Zhao L J. An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2012-2024.

## 产业生态系统资源代谢分析方法

施晓清\*, 杨建新, 王如松, 赵吝加

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 产业生态系统是由企业群、资源及环境组成的社会-经济-环境复合生态系统。资源代谢是其功能运行的重要保障。资源代谢在时间和空间尺度上的耗竭及阻滞是造成严重生态环境问题的主要原因。根据生态学原理, 运用物质流分析手段解析了产业生态系统的物质流、能流及资金流结构, 构建了产业生态系统资源代谢分析模型, 提出了资源输入-使用-输出-循环共生四方面的资源代谢分析指标体系和基于模糊综合分析的资源代谢问题树分析方法。在此基础上提出了基于循环共生网络结构模型的生态管理模式。以期产业资源的生态管理提供方法支撑。

**关键词:** 产业; 生态系统; 资源流; 代谢分析

## An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems

SHI Xiaoping\*, YANG Jianxin, WANG Rusong, ZHAO Linjia

State Key Lab for Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Industrial ecosystems are complex social-economic-environmental systems that are comprised of industrial communities (a group of industrial enterprises), resources and environment. Resources metabolism is an important support for industrial ecosystem function. Resource depletion and metabolism blocking on both temporal and spatial scale is the major causes of eco-environmental stress. Based on the ecological principles and MFA methodology, this paper analyzed the structure of industrial ecosystems' material flow, energy flow and money flow, and suggested the framework model of resources metabolism for industrial ecosystems. This model consists of six sub-modules including a resources exploitation module, a raw material production module, a product exchange center module, a consumption module, a waste collection and control module. To complement this model, an analysis indicator system based on input-use-output-circular symbiosis for resources metabolism was also proposed. The indicator system includes four categories of indicators: resource input, resource use, environmental stress and circular-symbiosis. Resource input indicators include raw material input, water resource input and energy input; resource use indicators include raw material use, water resource use, energy use and product use; environmental stress indicators include waste discharge and specific material discharge; circular symbiosis indicators include cleaner production, waste control and sustainable use of resources and symbiosis potential. Based on the indicator system, an assessment method by using Fuzzy Analysis and Problems Tree tool for resources metabolism analysis was explored. In addition, an ecological management model was established based on a circular-symbiosis network consisting four modules: a main community module including associated factories; an upstream community module including the factories associated with the main community; a downstream community module including the factories and consumers associated with the main community; a reuse community module including collection, category, process and control

基金项目: 国家自然科学基金项目(70773109, 71033005)

收稿日期: 2011-04-18; 修订日期: 2012-02-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shixq@cees.ac.cn

factories. The four modules are connected by material flow so that the entire system forms a singular network. By implementing metabolism analysis, the major issues occurring at individual modules or connections can be identified. In turn, the network structure may be optimized through industrial symbiosis management.

The following conclusions were drawn: (1) Circular function is weak in traditional industrial ecosystem in comparison to natural ecosystems. Environmental stress comes from resource overuse and excessive waste emissions. (2) Based on the material flow process, the indicator system can effectively reflect the characteristics of resources metabolism. Thus this system can be used as a guide for improving the efficiency of resources use and reducing environmental stress. (3) The method analyzing metabolism effectiveness based on the indicator system and Problems Tree tool is efficient and practical. It can allow decision makers to immediately understand the major problems within different processes and thus make suitable decisions to solve them. (4) The ecological management model based on the ecological networks provides a feasible method to identify and address issues associated with resources metabolism. Applying this model can allow identified stresses on the eco-environment to be released. (5) The approach for resources metabolism analysis proposed in this paper focuses more on processes in comparison to the MFA methods that are implemented at the national and urban scale. This approach may complement MFA methodology.

This method has been applied in the resource flow analysis of the pulp and paper industry in Wuhan, China. Ongoing work will focus on the research of corresponding policies and databases.

**Key Words:** industry; ecosystem; resources flow; metabolism analysis

物质流是自然生态系统存在和发展的基础。通过长期的自然演替,自然生态系统已形成了以食物网为结构特征的良性物质循环模式,以此推动着自然生态系统向可持续发展的方向。人类社会的发展是以自然生态系统提供的资源和环境为物质基础的,其产业生态系统在发展过程中对自然资源的消耗以及将废弃物排放到自然环境中的过程形成了“资源流”,这种资源流对自然生态系统原有的物质循环产生了干扰,表现为资源代谢在时间和空间上的耗竭和阻滞,导致当今以全球生态安全、区域生态服务以及人群生态健康等三大生态危机为代表的严重的生态环境问题。科学评估产业生态系统的“资源流”的生态环境影响及其改善潜力,为产业结构的调整以及解决人类发展过程中的生态环境胁迫提供重要的决策依据以及有效管理方法已迫在眉睫。

## 1 资源代谢研究基础

1935年英国植物学家 Tensley 提出的生态系统的概念以及 1989年通用汽车公司的科学家 Frosch 和 Gallopoulos 提出的产业生态系统的概念<sup>[1]</sup>,为从产业生态系统的角度研究资源流的规律奠定了理论基础。早期资源代谢的研究主要从城市代谢与污染物路径分析两方面展开<sup>[2]</sup>。1965年 Abel Wolman 发表了第 1 篇有关城市代谢的文章,揭示了城市物质代谢引发的环境问题<sup>[2]</sup>。10世纪 70年代 Newcombe 及 Duvigneaud 等分别研究了香港及布鲁塞尔的物质代谢,分析了城市发展的物质消耗对资源和环境的影响<sup>[2-3]</sup>。在这一时期 Huntzicke 及 Ayres 等分别对洛杉矶地区汽车排铅及 Hudson-Raritan 流域从 1885年到 1985年 100a 间的重金属元素的源、路径和汇进行了研究<sup>[4]</sup>。1989年 Ayres 提出产业代谢的分析,目的是通过物质减量化和物质循环协调经济发展和资源环境保护的关系<sup>[5]</sup>。为分析资源进入经济消费系统后的路径和特征, Baccini 和 Brunner 在 1991年提出了物质流和元素流的分析框架<sup>[6]</sup>。20世纪 90年代,德国 Wuppertal 研究所又提出了物质流帐户体系(MFA),它提供了定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具<sup>[7]</sup>。2001年欧盟制定了一个分析国家经济系统物质流的方法指南<sup>[8]</sup>。我国学者在资源流分析及其应用研究方面也进行了积极的探讨<sup>[9]</sup>。

当前物质流研究主要在国家、区域、城市及其行业尺度展开了广泛的研究。在国家尺度上研究侧重于国家经济-环境系统的物质流总量的输入输出分析<sup>[10-12]</sup>以及国家物质流帐户的研究<sup>[13-14]</sup>;区域尺度主要开展了物质的输入和输出以及基于物质流分析的区域生态环境影响分析<sup>[15-16]</sup>,城市尺度侧重城市物流分析指标、帐

户及其生态环境影响和生态调控分析<sup>[17-19]</sup>,行业的物质流分析主要是在建筑<sup>[20]</sup>、半导体<sup>[21]</sup>、金属<sup>[22]</sup>、及啤酒<sup>[23]</sup>等行业的应用研究。工业园区尺度展开了元素流的分析<sup>[24]</sup>。

物质流分析及其评估方法的研究主要有基于投入-产出分析模型的物质流分析方法的研究<sup>[25-27]</sup>、生命周期评价方法的研究<sup>[28-29]</sup>、工业共生网络的研究<sup>[30-32]</sup>、可持续过程指数<sup>[33]</sup>、焓的分析<sup>[34]</sup>、信息熵分析<sup>[35]</sup>。

通过分析已有研究成果可以显见,资源流研究在宏观尺度物质流分析方法中已取得了丰硕的研究成果,其应用研究也取得了一定的进展。但当前的物质流分析方法在物质流指标与生态环境影响关联分析方面较弱而且在中小尺度的研究也欠缺<sup>[36]</sup>,并缺少从生态系统角度对资源代谢进行基于过程的系统评估方法的研究。产业生态学为“资源流”分析和评估奠定了理论基础和方法指导。论文根据产业生态学原理运用物质流分析思路针对产业生态系统的结构特征提出了产业生态系统各组分间的资源流、物流和资金流结构模型,在此基础上,针对系统物质减量化、生态环境影响和循环共生潜力,提出了资源的输入-使用-废弃物排放-循环共生四阶段的资源流分析指标体系和基于模糊综合分析的资源代谢问题树分析方法。并提出了基于循环共生网络模型的产业生态系统资源生态管理模式。以期产业系统“资源流”的生态管理提供科学方法指导,为协调产业发展与生态环境胁迫问题的解决,促进循环经济的实现提供有效的管理方法支撑。

## 2 产业生态系统资源流分析

产业生态系统的结构具有明显的空间、时间及资源结构特征<sup>[37]</sup>。根据其资源流结构特征及其社会经济功能的不同,依国际产业分类(ISIC)可分17个部门和99个行业。我国有三次产业的划分:农业(种植、林业、牧业、渔业)、工业(制造、电力、供水、建筑)、其他(流通和服务)。在这些产业中资源结构具有独特的资源链及资源网的特征。在资源网结构中共生机制是一个重要的影响因素。各产业中的组分通过资源流相互作用共同推动着产业生态系统功能的实现,在这过程中也产生了对周围生态环境的影响。资源链及资源网越完整,产业生态系统对生态环境的不利影响越小,资源流结构决定了资源代谢的效率及影响。因此,通过资源流结构的解析可为资源代谢分析和生态管理模式的建立提供科学依据。

### 2.1 产业生态系统代谢模型

根据产业生态学原理<sup>[38]</sup>,产业生态系统以资源流为基础可分为开采者、生产者、消费者及分解者四个子系统,为了简化问题的分析,本文将开采者与生产者统一归为生产者<sup>[37]</sup>,将产业生态系统分为生产者、消费者和分解者3个子系统。其中生产者子系统由开采者和生产者组成。主要包括开采自然资源的企业以及生产原材料的初级生产企业组成,功能是开发自然资源并生产初级消费者所需要的原材料;消费者子系统主要是生产配件的各级生产企业、生产最终产品的生产企业、供应及销售商、终端消费体,功能是利用资源完成系统的经济及社会活动功能;分解者子系统包括废品收购站、废品分类厂、废品加工厂、垃圾处理厂,功能是将开采者、生产者、消费者排放的废弃物收集、分类、再资源化及无害化处理。其中各子系统通过资源流(物质和能源)及资金流相互作用相互影响构成一个有机整体完成整个产业生态系统的各种功能,而且资金流是伴随资源流和物流而产生的。根据物质流分析的思路得到如下资源流图,整个资源流图由3个子系统间及3个子系统内部的资源流、物流及资金流的作用关系构成(图1)。

依据产业生态系统资源流结构分析,在解析资源代谢过程的基础上,本文提出了理想的资源流代谢模型(图2)。整个模型由6个模块组成:资源开采模块,原料生产模块,产品生产模块,商品流通模块,消费模块,废物收集处理模块。其中,资源开采模块的功能是从自然生态系统中获取自然资源,通过流通中心将自然资源流向原料生产模块,在这个过程中一部分废物流向废物收集处理模块,余下的废弃物直接流向自然生态系统;原料生产模块的功能是将自然资源加工成原材料供产品生产企业使用,在这个过程中资源以原材料的形式流向产品生产模块,另外模块内的各企业通过共生关系也存在资源或物流关系,原材料模块中的废物流向废物处理模块;产品生产模块的功能是将原材料加工成产品供消费模块使用,在这个过程中,资源以产品形式通过流通中心流向消费模块,其产生的废物流向废物收集处理模块,模块中的各企业通过共生关系也存在资源或物流的关系。流通模块的功能是通过市场功能实现各模块的资源 and 废物的流动。消费功

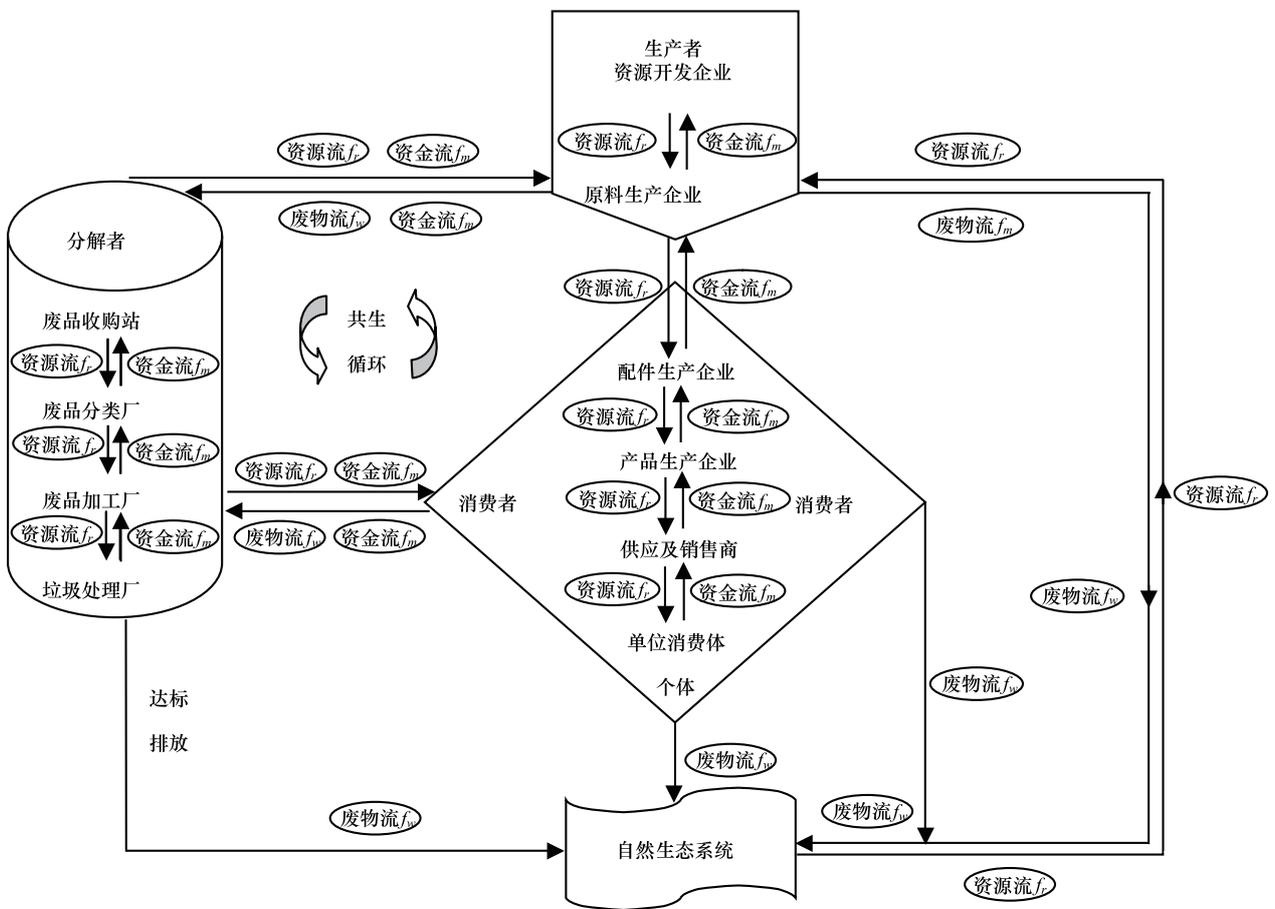


图1 产业生态系统资源流、废物流及资金流结构图

Fig.1 Material, waste and money flow of industrial ecosystem

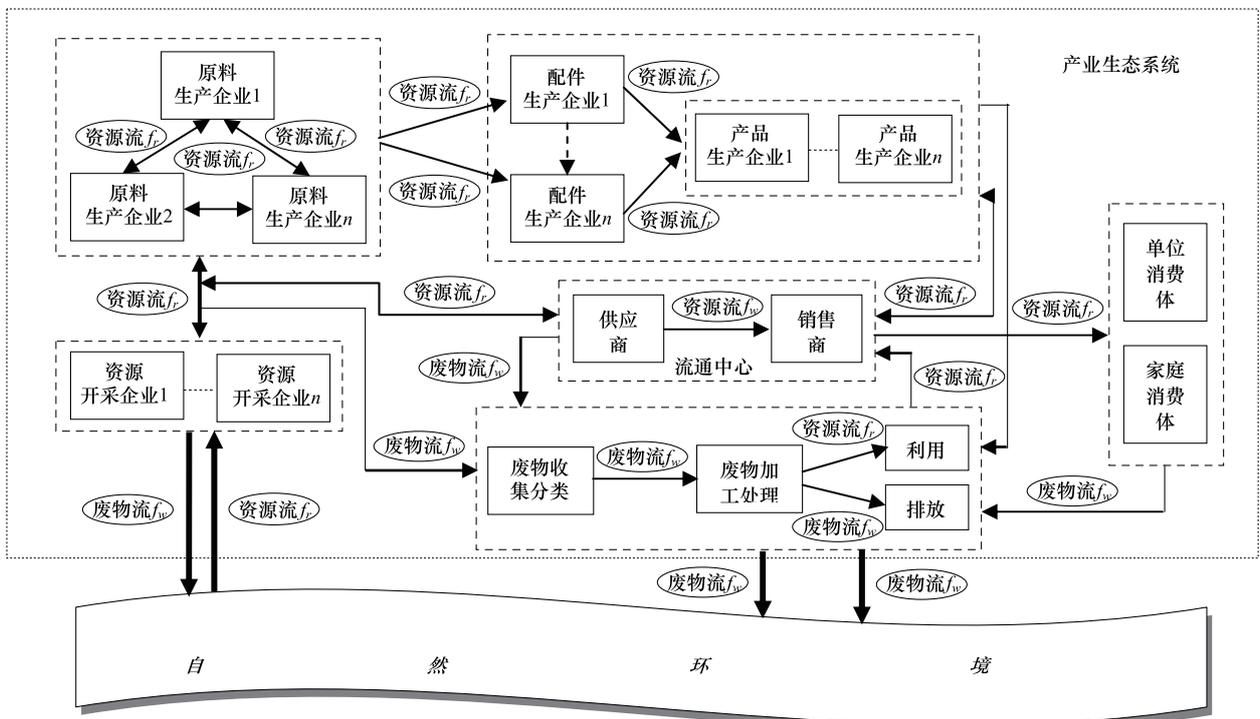


图2 产业生态系统资源代谢模型

Fig.2 The resources metabolism model of industrial ecosystems

能是消费产品以满足人类生活和社会活动需求,其间进入消费模块的资源大部分以产品的形式在一定时间内暂时留存下来或在模块中流动(旧货利用),经过报废期逐渐流向废弃物收集和处理模块,另一部分直接以废弃物的形式直接流向废弃物收集处理模块。废弃物收集处理模块的功能主要是资源化和无害化,即收集各模块流出的废弃物,加工处理后将废弃物资源化通过流通中心模块再流向各功能模块,或将废弃物无害化处理后再流向自然生态系统。

### 2.2 产业生态系统资源流综合分析

通过代谢模型各模块功能的分析可得:产业生态系统资源流的源是自然生态系统,其路径是自然生态系统-资源开采企业-原料生产企业-产品生产企业-消费体-废弃物收集处理企业-自然生态系统或产业生态系统各子模块,其中各企业间或企业与消费者间的资源流动一般还要借助流通中心完成,流通中心(供应商,销售商)是资源流动的市场媒介。资源流的汇分成两种:一种是终点汇:自然生态系统,资源通过产业生态系统最终是以废弃物的形式流向自然生态系统的,自然生态系统对其同化作用后,各元素又参与到的物质循环,而这种容量在一定的时间内是有限的。同时如果是新的物质则只会在自然生态系统中留存下来;另一种是暂存汇:消费系统(包括消费个体及消费部门),资源以固定资产的形式在一定的时间内暂时留存在系统内,最后在报废期内经过流通中心通过废弃物处理中心处理后再逐渐流向自然生态系统。

在整个资源代谢的过程中,对生态环境产生胁迫的问题产生于资源在每个模块的输入-使用-输出过程中产生的资源需求压力及其废弃物排放压力,这种胁迫的程度还取决于系统共生及废弃物资源化和无害化能力的强弱。这些方面是产业生态系统资源代谢分析的基础。资源代谢分析的目的主要是为资源减量化和废弃物最小化提供科学依据。当前总体上,产业生态系统在资源循环和废弃物处理方面的功能还较弱,因此,在资源减量化和废弃物最小化方面存在巨大的潜力,资源代谢分析将有助于系统资源使用效率的提升和减轻对生态环境的胁迫。

## 3 产业生态系统资源代谢分析方法

### 3.1 资源代谢的生态环境胁迫

产业生态系统的代谢就是系统对资源的获取、利用直至废弃物排放的全过程(图3)。表现为资源流在系统及其子系统输入、消耗、储存及输出。这里的资源指产业生态系统中需要使用的各种自然资源以及向自然系统排放的各种废弃物。产业生态系统的资源代谢对自然生态系统的物质循环产生了严重的生态环境胁迫。表现为3个方面:①在资源获取时,因过度开采及废弃物排放造成生态环境的退化,如森林资源的过度砍伐导致生物多样性降低,水土流失及森林调节气候功能的丧失等;②在资源利用(生产和消费)时,因

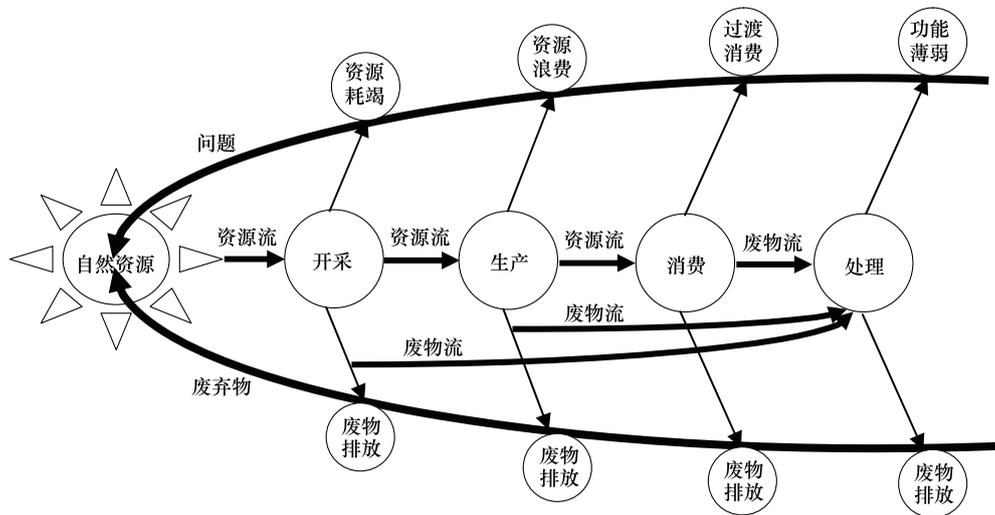


图3 产业生态系统生态环境胁迫问题鱼刺图

Fig. 3 The fishbone chart for eco-environmental stress of industry ecosystem

利用效率低下或消费过度导致资源消耗量及废弃物剧增,引发严重的生态环境问题,如资源短缺和环境污染;③排放废弃物时,因处理功能薄弱而超出环境容量并伴有大量有毒有害物质最终导致严重的环境污染和生态破坏。由此可见,在不同的资源代谢阶段具有不同的生态环境问题,需要一套系统的针对不同阶段问题的评价方法,才有利于问题的辨识和管理。

### 3.2 资源代谢分析指标体系

从产业生态系统资源流模型及其生态环境胁迫问题鱼刺图分析,产业生态系统资源代谢状况取决于资源在系统及其子系统输入-利用-输出过程中的质量和效率。表现为资源开采是否满足生态承载力,资源利用是否有效率,废弃物排放是否符合环境容量,系统循环共生的潜力是否能保证系统自生的需要。这里的资源包括原材料、水以及能源。资源代谢分析将为管理资源的有效利用提供科学依据,因此,分析框架将以资源流过程为基础,针对资源的减量化和废弃物最小化目标而构建。

本研究以资源流输入-利用-输出为框架,从资源输入,消耗及存量,污染排放,以及系统循环共生四个方面构建产业生态系统资源代谢分析指标体系(表1)。在资源输入中分别分析原材料输入、水资源输入及能量输入,其中包括:特定时间的资源输入总量,主要分析物质消耗总量的变化趋势是否符合发展规划;资源输入生态效率,主要分析单位资源消耗的经济产出价值是否有效率;进口资源占本地资源的比例,主要分析资源的对外依存度,这些指标可为系统资源输入的减量化提供科学依据。物质消耗指标主要分析资源使用强度(单位产品资源的使用)以及物质在系统中的留存量,分析使用强度是否符合行业的先进标准;留存量分析系统潜在的物质处理压力,这些指标可为系统资源使用的物质减量化提供科学依据。

表1 产业生态系统资源代谢分析指标体系

Table 1 Indicator system of resources metabolism for industrial ecosystems

过程指标 Process indicators	一级指标名 The first layer indicators	二级指标名 The second layer indicators	指标表达式 Formula	评价依据 Assessment criteria	表征说明 Explanation
资源输入 Resource input	原材料输入	原材料输入总量	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij}$	发展规划	$Q_{ij}$ 为 $t$ 时间 $i$ 物质的消费量;物质消耗比较分析
		原材料输入效率	$\frac{TV}{TQ}$	行业先进水平	$TV$ : 工业增加值, $TQ$ : 原材料输入总量;资源输入效率
		进口资源占总资源比例/%	$\frac{TQ_e}{TQ} \times 100$	<50	$TQ_e$ : 进口资源总量;资源对外依存度
	水资源输入	新鲜水输入总量	$\sum_{i=1}^m fW_i$	发展规划	$fW_i$ 为 $t$ 时间新鲜水消耗量;新鲜水消耗比较分析
		水资源输入效率	$\frac{TV}{fW}$	行业先进水平	$fW$ : 水输入总量;水输入效率
	能量输入	能源输入总量	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij}$	发展规划	$E_{ij}$ 为 $t$ 时间 $i$ 种能源消耗量;能源消耗比较分析
		能源输入效率	$\frac{TV}{TE}$	行业先进水平	$TE$ : 能源输入总量;能源生态效率
	资源使用 Resource use	原材料使用	单位产品原材料消耗量	$\frac{TQ}{TP}$	行业先进水平
水资源使用		单位产品新鲜水消耗量	$\frac{fW}{TP}$	行业先进水平	水资源消耗强度
能源使用		单位产品能源消耗	$\frac{TE}{TP}$	国家标准	能源消耗强度
产品使用		单位时间产品留存量	$\sum_{i=1}^m (P_i - D_i)$	趋势分析	$P_i$ 是 $t$ 时间产品总量, $D_i$ 是 $t$ 时间产品处理量;物质留存量
环境胁迫 Environmental stress	废弃物排放	废弃物排放总量	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij}$	发展规划	$W_{ij}$ 为 $t$ 时间 $i$ 污染物的排放量;污染物排放比较分析
		废弃物排放效率	$\frac{TV}{TW}$	行业先进标准	$TW$ 为废弃物总量;分析生态容量占用效率

续表

过程指标 Process indicators	一级指标名 The first layer indicators	二级指标名 The second layer indicators	指标表达式 Formula	评价依据 Assessment criteria	表征说明 Explanation
系统循环共生 Circular-symbiosis	特殊物质排放	废弃物排放强度	$\frac{TW_a}{TP}, \frac{TW_l}{TP}, \frac{TW_s}{TP}$	行业先进水平	$TW_a$ 为废气排放总量; $TW_l$ 为废水排放总量; $TW_s$ 为废固排放总量; 分析废弃物排放强度
		废弃物排放达标率	$\{R_a, R_l, R_s\}$	国家标准	$R_a, R_l, R_s$ 为工业(废气、废水、废渣)排放达标率
		有毒重金属达标率/%	$R_m = \frac{Ns}{N} \times 100$	100	$N_s$ 为达标企业数; $N$ 企业总数; $R_m, R_c, R_o$ 分别为重金属、温室气体、POPs 排放达标率
	清洁生产	温室气体排放达标率/%	$R_c = \frac{Ns}{N} \times 100$	100	
		持久性有机污染物排放达标率/%	$R_o = \frac{Ns}{N} \times 100$	100	
		清洁生产达标率/%	$R_{cl} = \frac{Ns}{N} \times 100$	100	$N_s$ 为达标企业数; $N$ 企业总数; $R_{cl}$ 达标率
	废弃物治理	清洁能源使用率/%	$ER = \frac{CE}{TE} \times 100$	发展规划	$CE$ 为清洁能源使用量
		废弃物治理率	$\{GR_a, GR_l, GR_s, GR_h\}$	100	$GR_a, GR_l, GR_s, GR_h$ 为工业(废气、废水、废渣)及生活垃圾治理率
		工业固废资源化率/%	$IR = \frac{TI_r}{TW_s} \times 100$	100	$TI_r$ 为工业固废资源化量
	资源的可持续利用	生活固废资源化率/%	$LR = \frac{TL_r}{TW_s} \times 100$	100	$TL_r$ 为生活固废资源化量
可再生资源使用率/%		$\{NR, NE\} = \frac{Q_r}{TQ} \times 100$	行业先进水平	$NR$ 为再生原材料使用率, $NE$ 为再生能源使用率; $Q_r$ 为再生资源量; 自然资源持续利用	
再生材料或能源使用率/%		$MR = \frac{Q_{NR}}{TQ} \times 100$	行业先进水平	$Q_{NR}$ 是再生材料或能源使用量,	
共生潜力	中水回用率/%	$RW = \frac{Q_w}{TW_w} \times 100$	行业先进水平	$Q_w$ 是中水使用量, $TW_w$ 是水使用总量; 系统资源循环利用	
	共生减污潜力	$TJ = \sum_{i=1}^m (J_{ai} + J_{li} + J_{si})$	趋势	$J_a, J_l, J_s$ 为通过生态链的构筑减少的废气、废水和废渣的量; $i$ 为废弃物种类	
	共生减量潜力	$TL = \sum_{i=1}^m (L_{qi} + L_w + L_{ei})$	趋势	$L_q, L_w, L_e$ 为通过生态链的构筑减少的原材料、水和能量的量; $i$ 为资源种类	
	共生经济效益	$TK = \sum_{i=1}^m (Q_i \times C_i - C_{oi}) + \sum_{i=1}^n Z_i$	趋势	$Q_i$ 及 $C_i$ 为 $i$ 种原材料、能源或水的使用量及价格; $C_{oi}$ 为成本; $Z_i$ 为减少排污节约的费用	

输出分析主要分析污染物排放胁迫程度,包括废弃物质排放以及特殊物质排放,其中废弃物质排放主要分析排放占用生态容量效率是否达到行业先进水平、单位产品废物排放是否达到行业先进水平以及废弃物达标排放率是否符合要求;特殊物质排放主要分析重要的影响人体健康和全球生态环境的特殊物质,主要分析重金属、温室气体及其持久性有机污染物的排放达标情况,可以分析这些物质的排放对环境的潜在影响,这些指标可为系统的废弃物最小化提供科学依据。

系统循环共生指标主要分析系统自净及恢复的潜力。主要包括表征系统自净和恢复能力的清洁生产及废弃物治理指标,其中清洁生产分析清洁生产达标率和清洁能源使用,废弃物治理分析废弃物治理率、工业固废资源化率及生活固废资源化率,其中工业固废是指生产过程中产生的固废,生活固废指消耗某产品过程中产生的固废;表征持续利用和共生潜力分析指标,分析自然资源的持续利用和系统资源循环利用的可再生资

源和再生材料的使用率以及中水回用率,共生潜力分析包括共生减污潜力和共生经济效益。共生减污潜力表示系统生态重建的能力,共生经济效益表示系统经济运行的能力,两者是系统共生建立的基础指标。循环共生指标分析系统资源代谢自调节能力的强弱。

关于指标还需要说明,输入-使用-输出过程各指标的评价依据是根据现有的权威参照依据而设定,只有表征产品使用过程资源暂存汇压力的产品留存量没有评价依据,只分析其趋势。而共生潜力指标都没有评价依据,主要用来分析系统自调节的潜在能力。其中,减污潜力主要分析在现有技术条件支撑下通过共生系统污染减排的能力,而减量潜力分析在现有技术条件下通过共生系统可减少资源使用量的能力。

### 3.3 资源代谢综合分析方法

根据资源流评价指标体系,资源流代谢评价可分3个层次:第一层过程指标包括资源输入、物质消耗、污染排放以及系统循环共生,主要分析系统资源代谢总体情况;第二层一级指标主要分析原材料、水以及能源的输入、使用以及消耗的总分类情况,以及从清洁生产、废弃物治理、资源的可持续利用以及共生潜力表现的系统循环共生情况;第三层二级指标主要从总量、效率、依存度、强度、达标率、使用率、潜力等分析资源的输入、使用、输出、系统自生的具体情况。通过建立问题分析树来评价资源代谢。评价依据主要选取国家、地方及行业标准,背景和本底值,类比值,科学研究已公认的生态效应,国家和地区发展目标等。二级指标的计算公式见指标体系表1,综合指标的计算如下,权重运用层次分析法求得<sup>[39]</sup>。

由于代谢状况是一个相对的概念,本文提出用健康度  $Y$  表示资源代谢状况,数值的量化和处理方法如下:设  $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$  是原始指标值,  $O_i(m_i)$  ( $m_i$  是指标符号,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 是指标  $m_i$  的归一化值,  $0 \leq O_i \leq 1$ ,  $S_i$  是在  $t$  时刻的目标值。在代谢分析中,对于一些指标,值越大表示代谢状态越好;而对于另外一些指标则相反,值越大表示代谢状态越差。对于这两种指标值分别通过以下两种方式进行归一化:

对于值越大表示代谢状态越好的指标,数据处理公式为:

$$O_i(m_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_i \geq S_i \\ \frac{x_i}{S_i}, & \text{if } x_i < S_i \end{cases} \quad (1)$$

对于值越小表示代谢状态越好的指标,数据处理公式为:

$$O_i(m_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_i \leq S_i \\ \frac{S_i}{x_i}, & \text{if } x_i > S_i \end{cases} \quad (2)$$

由于各代谢水平间的界限是有梯度的,因此,本文使用模糊等级评判方法进行分析。设评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是有限集,评判因素集为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ,单因素  $u_i$  的评判结果是  $V$  上的 Fuzzy 集,对确定的  $u_i$ ,可用  $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$  表示,其中  $r_{ij}$  表示对于第  $i$  个因素  $u_i$  获得第  $j$  个评语的隶属度。当每个因素都被评定之后,就可获得矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ,称评判矩阵,它是  $U$  到  $V$  的 Fuzzy 关系。根据各因素对系统影响的权重,用运用层次分析法求得  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  表示各因素的权重系数分配,它与评判矩阵  $R$  的合成,就是对各因素的综合评判。 $Y = W \circ R = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。

本文设评语集为  $V = \{E, G, M, B, D\}$ ,  $V = \{E, G, M, B, D\}$ ,其中,  $E$  表示产业生态系统代谢处于理想状态;  $G$  表示产业生态系统代谢处于较好状态;  $M$  表示产业生态系统代谢处于一般状态;  $B$  表示产业生态系统代谢处于较差状态;  $D$  表示产业生态系统代谢处于恶化状态。隶属函数分级见图4。

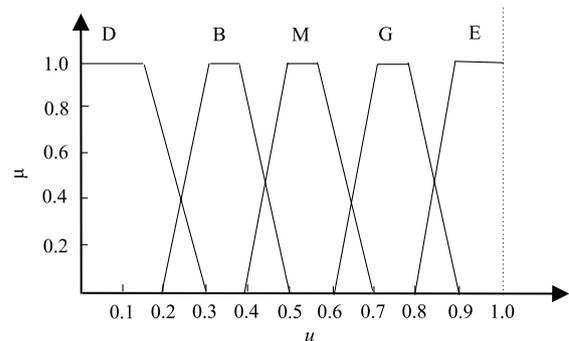


图4 隶属函数分级示意图

Fig. 4 Membership function diagram

为了便于管理者根据清晰了解问题的根源,从而采取切实可行的管理方法。本文提出采用问题树图分析资源代谢状况。问题树图是根据指标体系中的指标和健康度绘制而成(图5),其中每一层的健康度都可通过综合评判值Y求得,因此,每一层指标通过健康度的分析可得到相应的状况等级并运用对应的等级色度表示。问题树图可很清晰地表示出各指标所反映的代谢状况等级,在了解产业生态系统资源代谢总体状况的同时,可以得知影响总体状况的具体影响因素,为管理者提供了科学的决策依据。

#### 4 生态管理模式

传统产业资源的管理由于偏重于资源的经济和社会效益而忽视资源的生态效益,只注重资源的经济成本而无视资源的生态成本,片面强调过程末端的环境管理而忽视系统的生态管理<sup>[40]</sup>,导致资源开发、生产、利用和排放等管理部门因条块分割而低效,不仅浪费了大量的资源而且还造成了严重的生态环境破坏。产业资源生态管理是解决当今产业资源代谢问题的有效途径。

产业资源生态管理的内涵就是在系统观的指导下,运用系统工程理论和生态学原理为产业生态系统资源流的生态重组和生态设计,促进生态产业循环链为基础的产业资源共生网络机制的形成提供管理方法和政策保障,实现产业资源开发的经济效益、社会效益和生态效益的协调统一。产业资源生态管理需要遵循整体性、协调共生、循环及和谐发展原则,产业资源生态管理的核心就是构建资源循环链为基础的物质循环-企业共生的生态网络机制<sup>[37]</sup>。

因此,产业生态系统生态管理模式就是基于循环共生生态网络的管理。根据资源流结构解析和产业生态学原理,可以构建资源循环共生网络结构模型(图6)。产业生态系统资源循环共生网络结构由五部分组成:主体产业群、上游产业群、下游产业群、自然环境、资源化及无害化系统,各子系统通过产业链相连构成网络结构,其中主体产业群主要由相关行业企业组成,上游产业群由提供原材料、水和能源的企业组成,下游产业群主要由使用产品的企业和相应的消费群体构成,自然环境提供物质资源、水和能源,资源化和无害化系统主要由废物收集、分类、加工和无害化处理企业组成,完成产业生态系统各子系统废弃物的资源化和无害化处理。在这个循环共生网络系统中,主体产业各企业通过相应的产业链完成产品的制造功能,同时它与上游产业群通过相应的产业链完成原料和能源供给功能,与下游产业群通过产业链完成产品使用功能。各产业群产生的废弃物都通过资源化及无害化系统实现废物的再利用和无害化排放。根据产业生态系统资源代谢分析结果,针对主要的代谢问题,通过产业生态学原理和相应的生态工程构建适宜的生态产业链以及相应的政策法规支撑体系,从而完成物质在产业生态系统及自然生态系统的良性循环。实现产业生态系统资源的生态管理。

#### 5 讨论与结论

(1)通过产业生态系统资源流结构解析构建了资源代谢分析及其循环共生网络结构模型,提出了基于资源流过程的输入-使用-输出-循环共生四方面的资源代谢分析指标体系,为提升系统资源使用效率及减缓对生态环境的胁迫提供了分析工具。

(2)以资源代谢过程分析指标体系为基础,运用模糊综合分析和问题树分析手段提出了资源代谢分析方法。鉴于分析方法是基于资源流过程指标及代谢健康分析,因此能清晰反映系统资源在输入-使用-输出-循环共生各阶段的代谢状况,从而为管理者系统地了解资源流问题及其循环共生潜力提供了分析手段。

(3)基于循环共生网络结构模型提出了资源生态管理模式,该模式系统考虑了主体产业及其上下游产业群与系统循环共生系统之间的耦合关系,为产业生态系统的资源生态管理提供了一种有效的途径。

(4)与国家及城市尺度的物质流分析方法比较,产业生态系统的资源代谢分析方法更突出了资源代谢过程及其引发生态环境胁迫的问题环节的分析,对现有物质流分析方法做了有益补充。

(5)研究结果已在造纸行业展开了应用研究,结果表明本文提出的方法有助于管理者及时了解产业生态系统资源代谢问题,并运用生态管理方法加以解决。

(6)产业生态系统资源的生态管理的实现需要一套相应的数据库和政策法规体系的支撑。

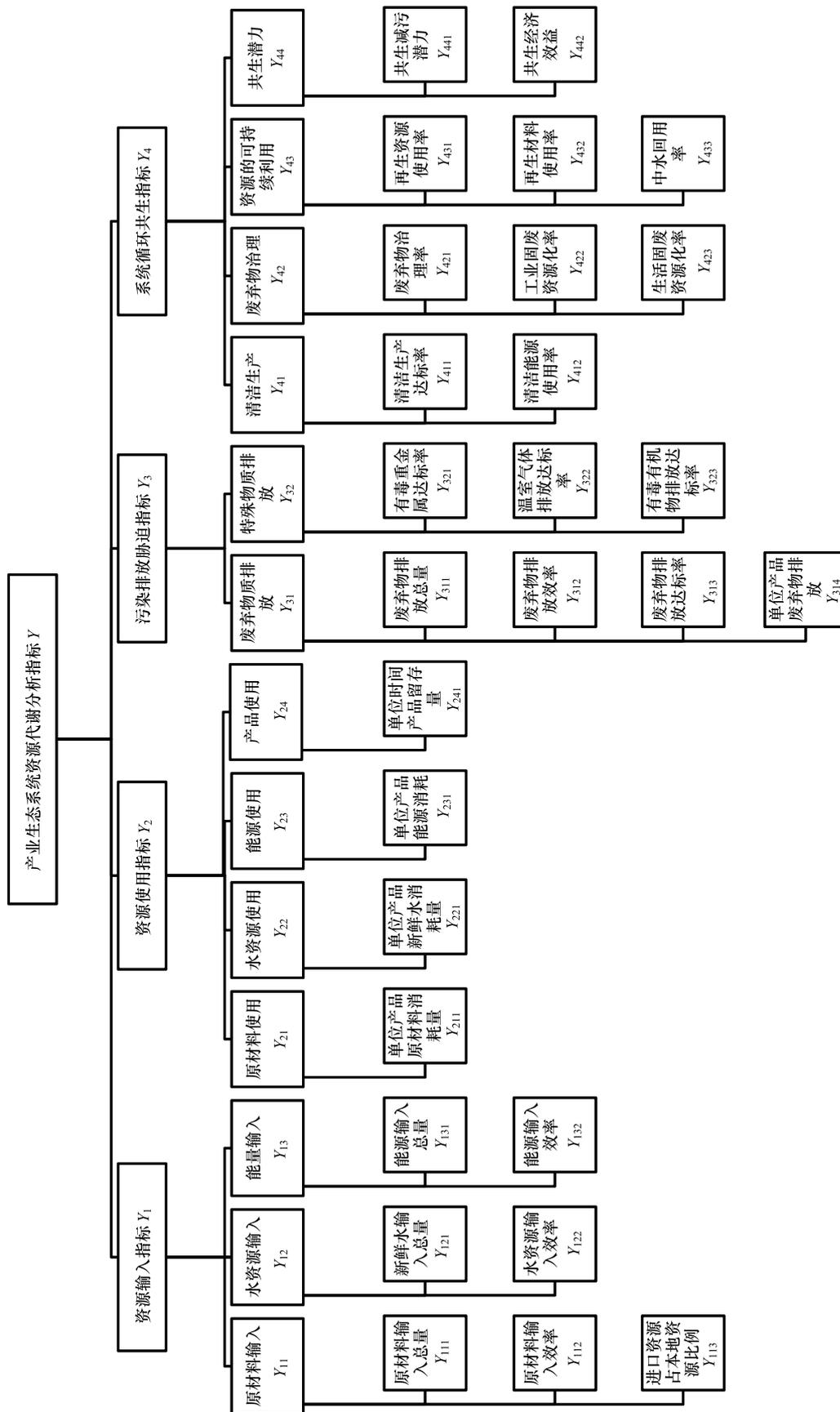


图5 资源代谢问题树 Fig.5 Problems tree for resources metabolism

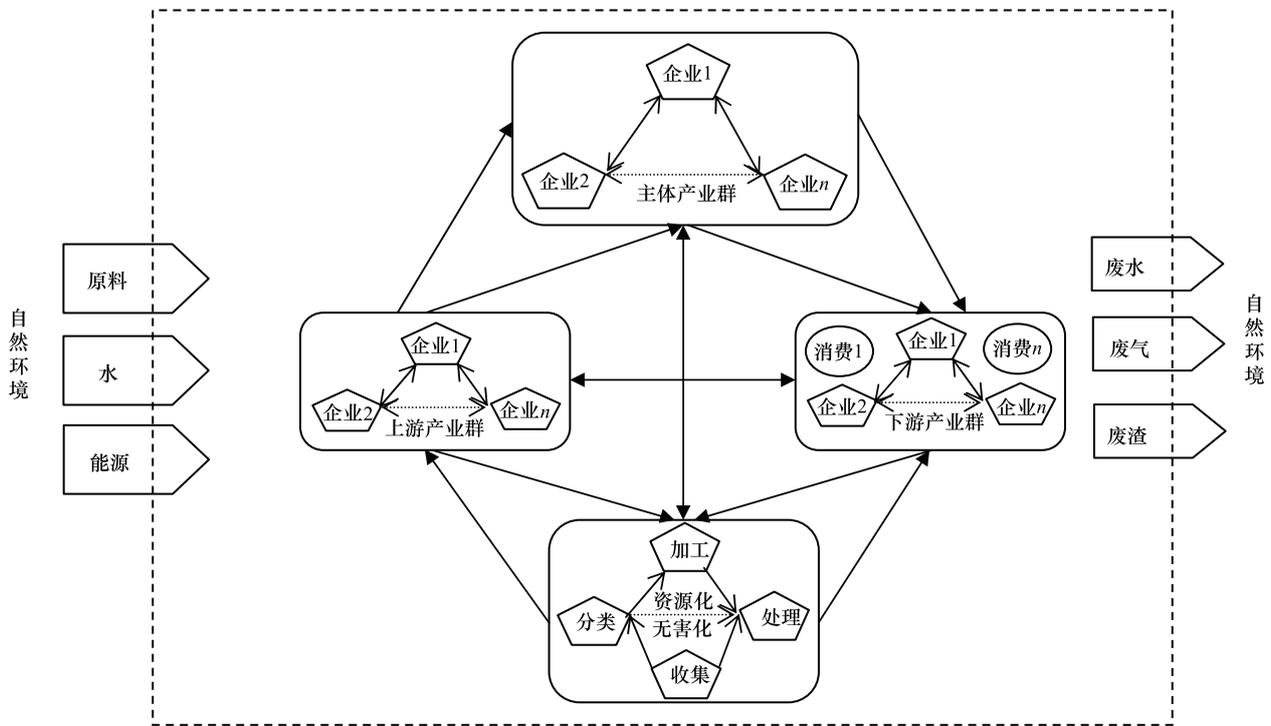


图6 循环共生网络结构模型

Fig. 6 Structure model of circular-symbiosis network

**致谢:**感谢中国科学院生态环境研究中心周伟奇研究员及澳大利亚 Halinka Lamparski 工程师对本文写作的帮助。

#### References:

- [ 1 ] Froesch R A, Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, 261(3): 144-152.
- [ 2 ] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. New York: Lewis Publishers, 2004.
- [ 3 ] Newcombe K, Kalma J D, Aston A R. The metabolism of a city: the case of Hong Kong. *Ambio*, 1978, 7(3):3-15.
- [ 4 ] Huntzicker J J, Friedlander S K, and Davidson C I. Material balance for automobile-emitted lead in Los Angeles basin. *Environmental Science and Technology*, 1975, 9(5): 448-457.
- [ 5 ] Ayres R U. *Industrial Metabolism Technology and Environment*. Washington, DC: National Academy Press, 1989.
- [ 6 ] Baccini P, Brunner P H. *The Metabolism of the Anthroposphere*. Berlin: Springer, 1991.
- [ 7 ] Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, Palm V. *The Conaccount Agenda: The Concerted Action on Material Flow Analysis and Its Research and Development Agenda*. Germany: Wuppertal Institute, 1998.
- [ 8 ] Schutz H, Steurer A, Eurostat. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: a Methodological Guide*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- [ 9 ] Li T S, Wei Y Q. The current situation and prospect of the study on industrial ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 869-877.
- [ 10 ] Duan N, Liu K L, Sun Q H, Li Y P. Accounting and analyzing of material metabolism and environmental impact for Chinese economic system in. *Soft Science*, 2009, 23(3): 1-5.
- [ 11 ] Russi D, Gonzalez-Martinez A C, Silva-Macher J C, Giljum S, Martínez-Alier J, Vallejo M C. Material flows in Latin America. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5/6): 704-720.
- [ 12 ] Chen X Q, Qiao L J. Material flow analysis of Chinese economic-environmental System. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 17-23.
- [ 13 ] Allen F W. Building material flow accounts in the United States: a case study in public sector innovation. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5/6): 785-791.
- [ 14 ] Murakami S, Yamanoi M, Adachi T, Mogi G, Yamatomi J. Material flow accounting for metals in Japan. *Materials Transactions*, 2004, 45(11): 3184-3193.

- [15] Saurat M, Bringezu S. Platinum group metal flows of Europe, Part1. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5/6): 754-767.
- [16] Huang H P, Bi J, Li X M, Zhang B, Ying J, Shi L. Material flow analysis (MFA) of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2578-2586.
- [17] Van Berkel R, Fjita T, Hashimoto S, Geng Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the eco-town program 1997—2006. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1544-1556.
- [18] Chen B, Yang J X, Shi Yao, Ouyang Z Y. Framework and indicator system of urban material flow analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [19] Shi L, Lou Y. Methodology and procedure for urban-wide material flows analysis. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 196-200.
- [20] Chen Y M, Zhang T Z. Analysis of material flow of residential buildings in Beijing. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2005, 22(3): 80-83.
- [21] Duan N, Xie H Y, Qin F. A study on product metabolism for China semiconductor industry. *Research of Environmental Sciences*. 2006, 19(1): 1-5.
- [22] Cain A, Disch S, Twaroski C, Reindl J, Case C R. Substance flow analysis of mercury intentionally used in products in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(3): 61-75.
- [23] Li N, Hu D, Feng Q. Material and energy consumption and environmental impacts of beer industry in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1373-1378.
- [24] Wu J N, Shi L. Phosphorus metabolism in industrial parks: a case study of Yixing economic development zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2397-2405.
- [25] Nagasaka S, Nakajima K, Kondo Y, Nagasaka T. The waste input-output approach to materials flow analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(4): 50-63.
- [26] Sendra C, Gabarrell X, Vicent T. Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Cleaner Production*. 2007, 15(17): 1706-1715.
- [27] Xu Y J, Zhang T Z. Regional material flow analysis model based on three-dimensional physical input-output table. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(3): 356-360.
- [28] De Benedetto L, Klemeš J. The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach, to support the strategic decision-making process. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(10): 900-906.
- [29] Yang J X. Toward a product-orientated environmental management: life cycle assessment. *Chinese Journal of Environmental Science*. 1999, 20(1): 100-103.
- [30] Sokka L, Melanen M. Industrial symbiosis contributing to more sustainable energy use-an example from the forest industry in Kymenlaakso, Finland. *Journal of Cleaner Production*. 2011, 19(4): 285-293.
- [31] Yuan Z W, Bi J. Evolution mechanism of eco-industrial symbiosis network and its analytical framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3182-3188.
- [32] Wang Z H, Yin J H. Research on operation pattern of industrial symbiosis network in eco-industry park. *China Soft Science Magazine*. 2005, (2): 80-85.
- [33] Krotscheck C. and Narodoslowsky M. The sustainable process index: a new dimension in ecological evaluation. *Ecological Engineering*, 1996, 6(4): 241-258.
- [34] Rosen M A, Dincer I. Exergy as the confluence of energy, environmental and sustainable development, *Exergy, an International Journal*, 2001, 1(1): 3-13.
- [35] Rechberger H, Brunner P H. A new, entropy-based method to support waste and resource management decisions. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(4): 809-816.
- [36] Huang H P, Bi J, Zhang B, Li X M, Yang J, Shi L. A critical review of material flow analysis (MFA). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 368-379.
- [37] Shi X Q. A theoretical framework on ecological management for industrial resource. *China Population, Resources and Environment*. 2010, 20(6): 80-86.
- [38] Graedel T E, Allenby B R. *Industrial Ecology*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [39] Shi X Q, Ouyang Z Y. Urban eco-security and its dynamic assessment method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3237-3243.
- [40] Wang R S. Integrative eco-management for resource, environmental and industrial transformation. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2003, 23(2): 130-138.

#### 参考文献:

- [9] 李同升, 韦亚权. 工业生态学研究现状与展望. *生态学报*, 2005, 25(4): 869-877.

- [10] 段宁, 柳楷玲, 孙启宏, 李艳萍. 中国经济系统物质代谢核算及其环境压力分析. 软科学, 2009, 23(3): 1-5.
- [12] 陈效迷, 乔立佳. 中国经济-环境系统的物质流分析. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17-23.
- [16] 黄和平, 毕军, 李祥妹, 张炳, 杨洁. 区域生态经济系统的物质输入与输出分析——以常州市武进区为例. 生态学报, 2006, 26(8): 2578-2586.
- [18] 陈波, 杨建新, 石磊, 欧阳志云. 城市物质流分析框架及其指标体系构建. 生态学报, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [19] 石磊, 楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法. 环境科学研究, 2008, 21(4): 196-200.
- [20] 陈永梅, 张天柱. 北京住宅建设活动的物质流分析. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 80-83.
- [21] 段宁, 谢海燕, 秦福. 我国半导体工业的产品代谢研究. 环境科学研究, 2006, 19(1): 1-5.
- [23] 李娜, 胡聃, 冯强. 中国啤酒生产的物质、能量消耗及环境影响分析. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1373-1378.
- [24] 武娟妮, 石磊. 工业园区磷代谢分析——以江苏宜兴经济开发区为例. 生态学报, 2010, 30(9): 2397-2405.
- [27] 徐一剑, 张天柱. 基于三维物质投入产出表的区域物质流分析模型. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 1-5.
- [29] 杨建新. 面向产品的环境管理工具: 产品生命周期评价. 环境科学, 1999, 20(1): 100-103.
- [31] 袁增伟, 毕军. 生态产业共生网络形成机理及其系统解析框架. 生态学报, 2007, 27(8): 182-3188.
- [32] 王兆华, 尹建华. 生态工业园中工业共生网络运作模式研究. 中国软科学, 2005, (2): 80-85.
- [37] 施晓清. 产业生态系统及其资源生态管理理论研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6): 80-86.
- [36] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
- [39] 施晓清, 欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3237-3243.
- [40] 王如松. 资源、环境与产业转型的复合生态管理. 系统工程理论与实践, 2003, 23(2): 130-138.

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research ..... SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)

Response of sinapate esters in *Arabidopsis thaliana* to UV-B radiation ..... LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)

Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by *Chlorella pyrenoidosa* and its influential factors ..... JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)

Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels ..... HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)

An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems ..... SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)

Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province ..... ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)

Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province ..... BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)

Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus *Chaetomium globosum* L18 from *Curcuma wenyujin* ..... WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)

Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China ..... HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)

Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau ..... ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)

Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification ..... LI Yilin (2066)

Effects of *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars ..... WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)

Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community ..... JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)

Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China ..... XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)

Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province ..... WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)

The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China ..... GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)

Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin ..... ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)

Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata*) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination ..... XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)

The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of *Chrysanthemum* leaves ..... YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)

Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China ..... LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)

Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau ..... ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)

Life history and spatial distribution of a *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China ..... CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)

The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy ..... ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)

Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS ..... XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)

Early nitrogen deposition effects on CO<sub>2</sub> efflux from a cold-temperate coniferous forest soil ..... WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)

Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors ..... DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)

Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (*Cyprinus carpio*) in Xiaolangdi Reservoir ..... SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)

Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method ..... TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)

Host searching behaviour of *Apanteles cypris* Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ..... ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)

The effect of hedgerows on the distribution of *Harmonia axyridis* Pallas in agroforestry systems ..... YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)

Induction of early resistance response to *Alternaria alternate* f. sp. *mali* in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ..... WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping et al (2239)

**Review and Monograph**

Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change ..... WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)

Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species *Sonneratia apetala* ..... PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)

**Discussion**

Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors ..... YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding et al (2271)

Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species ..... YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)

**Scientific Note**

Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China ..... LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)

Effects of *Meloidogyne incognita* on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ..... LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.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 70.00 元