

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

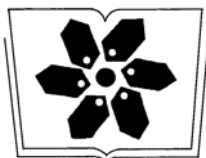
中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **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19期

2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究
..... 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响
..... 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝怪柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例
..... 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 宗 宁, 石培礼, 蔺 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良, 崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

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/stxb201304180738

施晓清, 李笑诺, 杨建新. 基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例. 生态学报, 2013, 33(19): 6398-6410.

Shi X Q, Li X N, Yang J X. Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: A case study of a virtual symbiosis network. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6398-6410.

基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析 ——以虚拟共生网络系统为例

施晓清*, 李笑诺, 杨建新

(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: 资源流代谢失调是造成产业生态环境问题的主要原因之一, 对其实施基于共生网络的生态管理是解决问题的一项重要的重要举措。运用全生命周期的思想构建了产业资源共生网络及其管理框架, 并运用全生命周期评价的方法, 借助生命周期评价软件 GaBi4, 分别选取 EI99 (Eco-Indicator 99)、CML2001 EP 评价体系, 以武汉市造纸产业为例, 通过设计合理的资源流网络关系及中水、废纸和污泥利用共生路径构建虚拟造纸产业共生网络, 对比分析了共生设计系统与原有共生系统的各生态环境影响。并运用市场价值法对共生设计系统的经济效益进行了分析。结果表明: 共生设计系统总的环境影响、生态系统质量、人体健康、资源损耗值的环境影响分值分别为 1166.445、814.509、148.893、203.045, 比原有系统分别减少 23.91%、19.15%、46.56%、22.26%; 其中富营养化、气候变化的影响分别比原有系统降低 56.25%、16.62%。同时共生设计系统通过污水、废纸及污泥的回用, 在不考虑市场波动的情况下, 可获得 1018—7252 万元的经济效益。可见, 通过构建共生网络的生态管理是提高资源利用效率的有效手段之一, 在一定条件下可取得明显的环境和经济效益。

关键词: 共生网络; 物质流分析; 生态管理; 生命周期评价; 造纸产业

Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network

SHI Xiaoqing*, LI Xiaonuo, YANG Jianxin

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

Abstract: Resources metabolic disorder is one of the main reasons for the eco-environmental problems caused by industrial development. The eco-management based on symbiosis network is an important initiative to solve this problem. Based on the Life Cycle Assessment (LCA) method, a network system of industrial symbiosis and its management framework of resources flow are proposed in this study. The management framework consists of goal, method, symbiosis system, evaluation system, and data support system. The management goal is the principles of reduce-reuse-recycle. The management method includes green exploitation, green product, green supply chain, green consumption, and green collection and green disposal. The network symbiosis system includes enterprise community module, virgin material exploitation module, consumer module and wastes disposal module. The evaluation system is based on life cycle assessment. Taking pulp and paper industry in Wuhan as an example, a virtual symbiosis network of pulp and paper industrial ecosystem is built through designing the suitable network relationships of resources flow and symbiosis paths of reclaimed water, waste paper, sludge use. Using GaBi 4 software and the evaluation system of EI99, CML2001 EP, we compared various eco-environmental effects between designed symbiotic system and original symbiotic system. By using market value method, the economic benefits of the symbiosis system were also analyzed.

The results showed that: (1) the score values of symbiosis system on the overall environmental impact, ecosystem quality, human health, resources damage are 1166.445, 814.509, 148.893, 203.045 respectively, which are decreased

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71033005); 国家自然科学基金面上项目 (71173208)

收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-07-18

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

23.91%, 19.15%, 46.56%, 22.26% respectively than that of the original symbiotic system. Paper section plays a significant role for reducing environmental impact by using recycled materials; (2) Comparing the designed symbiotic system and the original symbiotic system, the former exhibits decrease in acidification/eutrophication, ecotoxicity, land use, carcinogenicity, climate change, ozone layer depletion, radiation, respiratory organic pollution, respiratory inorganic pollution, and fossil fuels. For ecosystem quality, the designed symbiotic system exhibits significant decrease in acidification/eutrophication; for human health, it exhibits significant decrease in ozone layer depletion and radiation; for resources extraction, it exhibits significant decrease in fossil fuels. While it also exhibits 0.86% increase in land transformation and significant increase in mineral resource depletion. The reasons come from reagent chemicals production for waste disposal. (3) The designed symbiotic system shows 56.25% and 16.62% decrease in the influence of eutrophication effect and climate change respectively than the original symbiosis system. It showed significant decrease in NO_x , NH_3 and N_2O in the air and significant decrease in chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD) and phosphate in the water. Waste water disposal section and waste paper disposal section played an important role in decreasing the influence. The paper section played a significant role for the decrease. (4) Under the condition of not considering market fluctuation, symbiosis design system can acquire significant economic benefits about 10.18—72.52 million RMB through the reuse of sewage, waste paper and sludge.

Therefore, in theory, eco-management based on symbiosis network is one of the effective ways to improve the efficiency of resource use and may obtain significant environmental and economic benefits. The future work is to apply the methods into a real system.

Key Words: symbiosis network; material flow analysis; eco-management; life cycle assessment; pulp and paper industry

如何管理资源流使其在产业生态系统得到高效利用并与自然生态系统物质流相协调是当今产业生态领域面临的挑战之一。产业资源流生态管理研究的核心是通过研究资源在产业生态系统的流动路径及其在支撑各功能运行过程中生态环境及经济效应,利用生态学、经济学等原理和方法对现有资源流路径进行重构和优化,使系统获得良好的生态效率,从而保障资源的可持续利用^[1]。

资源流管理的研究始于 20 世纪六七十年代,主要从物质流在系统中的输入和输出及元素在系统中的迁移转化规律及生态环境影响两个视角展开研究^[2-60]。目前在国家、城市、区域、产业、家庭尺度,针对物质、元素、废弃物、产品等展开了广泛的研究。如结合生命周期评价^[2-7]、投入产出分析^[8-13]、物质流评价指标体系^[14-17]、共生网络构建^[18-23]等方法从国家经济系统^[24-28,42-45]、区域经济系统^[29-34]、产业部门^[35-41]等不同角度开展了多方面的研究。其中,基于产业共生网络展开资源流生态管理的研究是当前相关研究的前沿热点问题,目前在评估产业共生系统废物资源化(利用整体系统全球排放模型计算城市污泥与废油回收能量的减排潜力,利用生态效率指标计算尾矿再利用的单位产品输入、输出效率)^[46-47]、基础设施共享(利用基础设施管理优化模型模拟热电联产供热服务)^[48]的环境效益方面;在用生命周期评价方法比较造纸产业末端废纸处置方式(焚烧发电产热、回收再利用、填埋、堆肥等)的环境效益^[49-52]、识别不同纸产品(新闻纸、涂布白板纸、瓦楞纸箱)等环境影响、最大的工艺过程及产品生命周期阶段^[53-57]的环境影响、比较不同工艺、原材料和产品的环境影响^[58-60]等方面已取得了一定的进展。可见,当前相关研究主要集中在废弃物、不同工艺、产品及不同生命周期阶段的影响分析上,基于共生网络的生态管理效益分析研究还不多见。本研究在产业资源流共生管理框架研究的基础上,运用生命周期分析工具以武汉市造纸系统为例展开产业共生管理效益分析的模拟研究。针对造纸产业主要的资源代谢问题,通过构建虚拟造纸产业共生网络,运用 LCA 方法对比分析了虚拟网络共生设计系统与原有共生系统的环境影响及共生设计系统的经济效益,为产业系统资源生态管理提供了科学依据和方法支撑。

1 研究方法

1.1 产业资源共生管理框架

传统产业生态系统资源流路径为自然资源-原料开采部门-原料供应部门-生产部门-货物运输部门-消费群体-自然环境,资源流呈线性的特征导致了严重的生态环境问题。基于共生网络的资源管理通过产业共生链设计和废物回收处理使得废弃物得到再利用,资源流由线性变成环形构成网络,从而减轻对自然资源和自然环境的胁迫。针对产业资源流生命周期的特征,本研究提出基于生命周期视角的产业资源流共生管理框架:由管理目标、管理方法、共生系统、系统评估、数据支持五部分构成(图 1),其中管理目标指依据资源减量化、物质再循环及废物再利用三原则构建资源共生机制,提高资源利用效率并使废弃物资源化而得到再利用,为实现社会、经济、环境的协调发展和效益共赢提供支持;管理方法为资源流的全生命周期管理,包括产业链

前端的原料绿色开采、制造部门的绿色生产、企业间物质能源循环利用的绿色设计、销售过程的绿色物流及产业链末端的绿色回收等;共生系统是由原料开采部门、生产部门、物流管理部门、消费群体、废物回收处理部门及各部门间的物质、能源利用关系构成的共生体;系统评估指根据管理目标,利用全生命周期评价体系评估共生系统的生态环境影响;数据库(实地调研数据、文献数据、统计数据等)为系统评估提供数据支持。由于产业生态系统的发展是一个动态发展的过程,管理者通过反馈系统将依据评估结果不断调整管理目标方案,使产业系统资源得到持续利用。

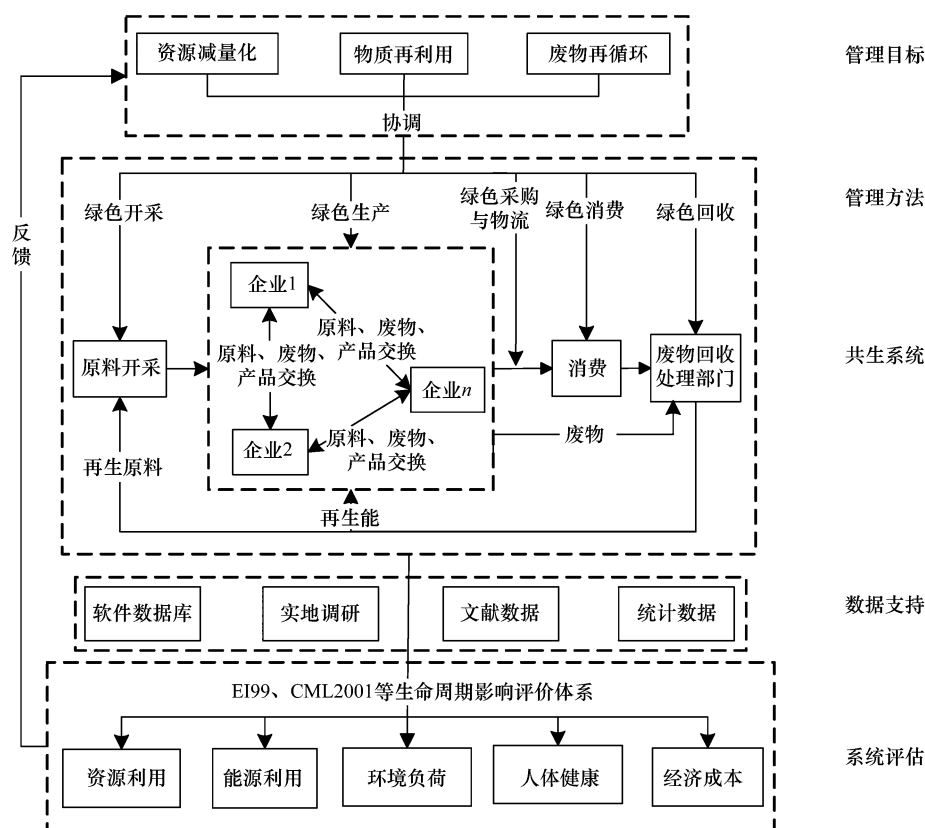


图1 产业资源流共生管理框架

Fig.1 The symbiosis management framework of industrial resources flow

1.2 基于 LCA 的分析方法

生命周期评价是产业生态学中分析产品全生命周期生态环境影响的基本方法,即从产品最初的原材料采掘到产品报废最终废弃物处理进行全过程的跟踪,定量定性相结合分析全过程生态环境影响的一种评价方法。主要分析步骤包括定义目标与确定范围、清单分析、影响评价和结果解释等;评价指标体系包括资源利用指标、能源利用指标、环境负荷指标、人体健康指标及经济成本指标等5个方面,每一指标又由复杂的多元参量组成,但目前尚无统一的指标体系;已开发 CML 方法、生态指数模型(EI)、工业产品环境设计方法(EDIP)等多种评价方法。从1990年国际环境毒理学与化学学会(SETAC)在有关生命周期评价的国际研讨会上首次提出 LCA 的概念,1993年 SETAC 制订 LCA 的技术框架,到2006年 ISO14040/44 标准的完善使之成为国际标准化分析框架,LCA 方法逐渐走向成熟,并广泛应用于能源、农业、森林和造纸、食品、化工、建材、电子、废弃物处理等产业。

本研究以 GaBi 4 教育版为评价工具,采用 EI99 方法进行系统建模和生命周期影响评价。如表1所示,EI99 方法包括3方面的环境损害类型和11个环境影响类型。其中,生态系统质量通过每年每平方公里内物种的相对减少(PDF)进行衡量;人体健康采用健康指数残疾调整生命年(DALYs)评估有毒物质暴露导致的健康损害;资源损耗通过附加能量^[61]表示由于人为消耗使资源数量和质量降低,进而导致将来开采时需要额外付出的能量。计算包括确定环境影响种类、分类、特征化、标准化、分组、赋予权重等六个步骤,末端的单一指标表征清单物质对研究系统的最终环境影响。

2 研究对象

2.1 研究对象概况

造纸业作为国民经济发展的基础原材料工业在各国产业中占据重要地位。而其在生产过程中因资源消耗以及排放废水、废气、废渣等造成的生态环境问题也备受关注。武汉市是华中地区最大的都市,中国工业基地和综合交通枢纽。造纸业是武汉市9大重点行业之一,同时又是水体污染物排放的主要来源。2007年造纸业主要水体污染物指标 COD、BOD 的排放量分

别占武汉市 9 大重点行业排放总量的 28.8% 和 55.9%。通过武汉市造纸业生态系统资源代谢问题辨识^[62],得出武汉市造纸业在原材料和能源利用及水资源循环方面都亟待提高。为此本文构建了武汉市造纸产业虚拟共生系统,并运用全生命周期评价方法比较分析了共生设计系统与原有共生系统的生态环境效应。

2.2 系统边界

由于造纸产业系统产品种类繁多,对系统上下游产业以及消费环节都做了归类处理,统计单位均为吨(t),功能单位为 1 t 纸产品(主要包括原纸、纸板、纸箱、包装纸等)。研究的系统由造纸工业(制浆、造纸、纸制品制造)、造纸下游产业、消费环节、废纸回收与处理部门、污染治理部门(图 2)。其中造纸工业包括 1 个制浆部门、40 个造纸部门、61 个纸制品制造部门;造纸下游产业包括印刷业、出版业等以纸产品为中间产品的造纸相关产业;由于数据支持的限制,纸品消费环节忽略贮存、分配、运输、销售环节;废纸回收与处理部门指回收废纸并以废纸为原料经过碎解、脱墨、筛选、除沙等工艺再处理得到纸浆、再生纸等产品的部门;污染治理部门主要是造纸污水处理部门。研究系统不包括运输过程。在造纸产业生态系统中,各单元间通过资源、能源的相互关联形成共生关系。本研究以 2007 年为时间段,对投入造纸系统的原材料、添加剂、能源等尽量追溯至生命周期源头,跟踪产品、污染物至末端消费、处理、再利用全过程,分析比较武汉市虚拟造纸共生设计系统与原有共生系统基于生命周期分析的生态环境影响。

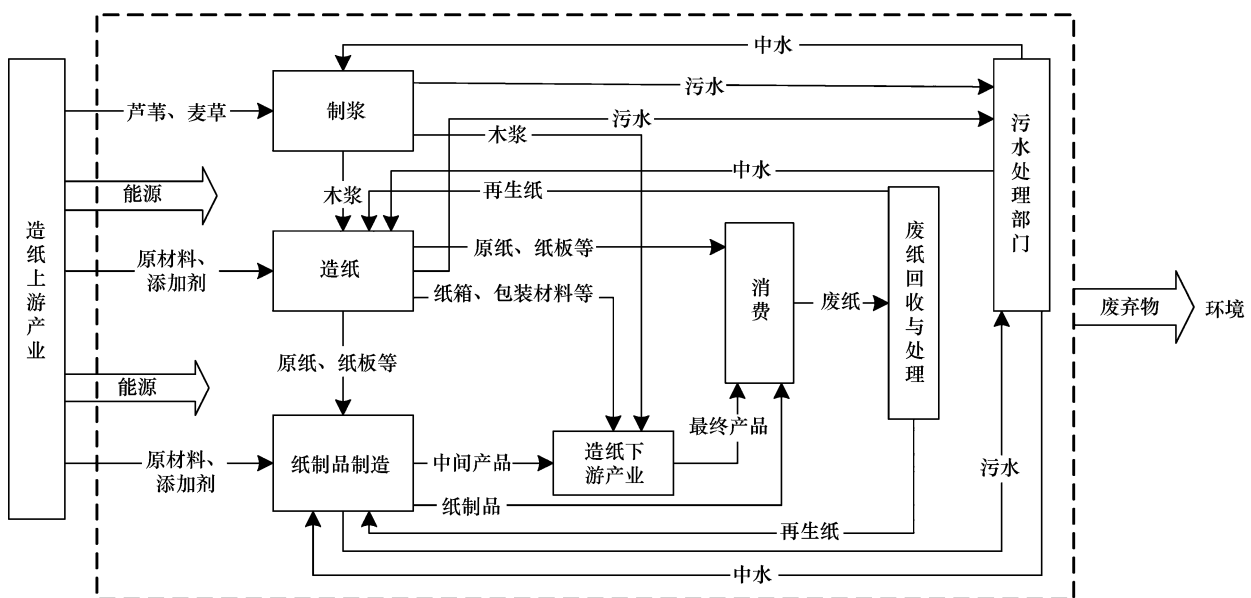


图 2 武汉市虚拟造纸产业生态系统边界(虚线内)

Fig.2 The boundary of virtual pulp and paper industrial ecosystem in Wuhan (within the dotted line)

2.3 资源流共生网络结构框架

根据 2007 年对武汉市 102 家造纸企业的调研数据以及实际造纸系统各部门组成,按照理想的物流关系,虚拟构筑造纸原有系统各部门间物质交换关系,其资源流路径结构如图 3 所示,系统中资源流包括输入各部门的主要原材料、能源、水、添加剂(仅统计了纸制品制造部门)和造纸行业的代表性污染物。由于约 96% 的造纸废水未经处理就直接排入自然水体^[62],因此无污水处理部门;废纸回收部门多以人工散收为主,回收机制的不完善导致数据较难获得,因此未设置废纸回收部门,假设造纸虚拟系统中的废纸全部排入环境。

共生网络结构的不完善或不协调可能造成各部门因条块分割而低效,不仅浪费大量的资源而且会造成严重的生态环境破坏。结合武汉市造纸业生态系统共生网络投入产出表^[62],针对武汉市废水及废纸循环利用率低、造纸污泥产生量及环境危害大等问题,设置产业链末端污水的处理再利用、废纸的回收回用、污泥的资源化利用等共生路径,通过对武汉市造纸产业链的延伸和部门间资源交换的优化实现多个生产体系或环节之间的系统耦合^[63],建立一个物质和能量多级利用、良性循环且转化效率高、经济效益与生态效益双赢的造纸产业生态系统虚拟共生网络结构(图 4)。

2.4 数据来源与假设

对图 3、图 4 中的数据假设及建模过程中的数据来源作如下说明,未特殊说明的路径和数据都是调研值:

(1) 由于很难获得真实的企业间的资源交换数据,因此设计路径①、②的资源交换量时,做如下假设:造纸部门的木浆、纸制品制造部门的原纸与纸板消耗分别全部由本地制浆部门、造纸部门提供,3 个生产部门的其它产品全部供给本地纸产品制造部门(出版业、印刷业等)和最终消费环节。

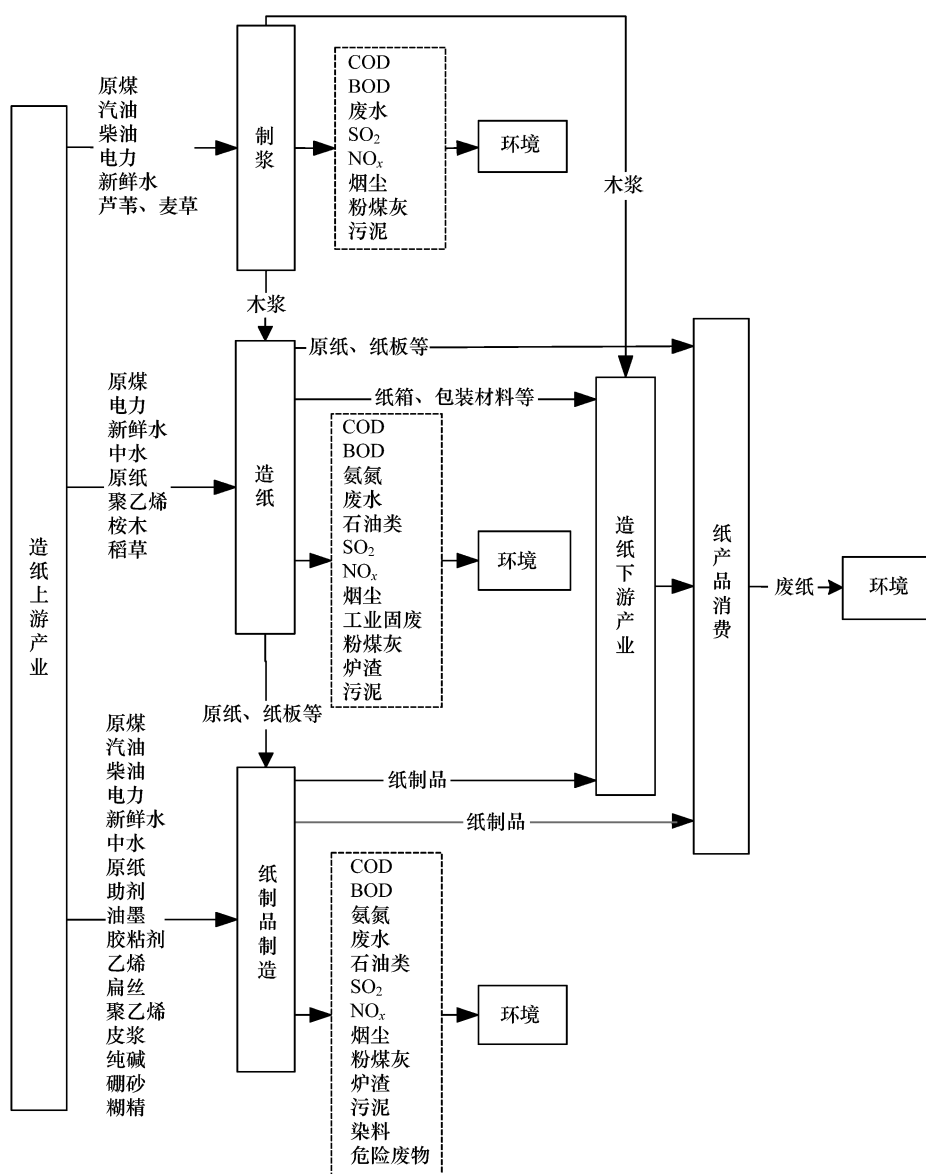


图3 武汉市造纸虚拟原有共生系统资源流图

Fig.3 The resources flow of virtual original symbiosis system for pulp and paper industry in Wuhan

(2) 污水处理部门是共生网络优化的关键部门之一,制浆、造纸、纸制品制造、废纸回收与处理部门产生的废水经污水处理部门处理后经路径③、④、⑦、⑨实现水资源的良性循环,其中污水处理部门的中水产生量按质量守恒计算,根据调研数据得到三大生产部门处理4%废水产生的污泥量如图4所示,以此类推得到污水处理部门处理100%污水产生的污泥量,文章只分析了污泥资源化产生的经济效益,没有评价其环境影响,路径⑤、⑨按行业清洁生产的最低标准为 $\geq 60\%$ ^[64]计算,污水处理部门的其它清单数据参考文献^[65]。

(3) 废纸回收与处理部门是共生网络优化的另一个关键部门。假设最终消费的纸产品部分进入废纸回收与处理部门,经过处理的废纸以纸浆、再生纸的形式通过路径③、④作为造纸原材料重新投入造纸产业,实现资源的高效利用,水耗、综合能耗、废水、COD、BOD、SS数据参照《清洁生产标准——造纸工业(废纸制浆)》^[64]中的一级标准,其它清单数据参考文献^[53]。

(4) 路径⑧参考文献^[66]设为农业、工业再利用两条途径,其中农业利用以堆肥为主,工业利用以生产建材为主。

(5) 利用 GaBi4 软件建模和评价过程中,系统中各单元过程输入输出流的清单数据来源于软件中的 ELCD、PE、Plastics Europe 数据库。其中纸制品制造部门的油墨、扁丝、糊精、皮浆和硼砂由于消耗量很少且数据库中缺乏数据支持,建模过程中忽略;胶粘剂为 Simapro 软件中的物质清单导入;助剂无具体说明物质种类,用絮凝剂近似替代;废纸回收与处理部门的化学药品因无具体说明,建模过程中忽略。此外,考虑到电力生产在生命周期中的重要性及中国发电能源结构的地域性特点,参考文献^[54]修改软件数据库中电能生命周期清单为2007年华中电网的相关参数。

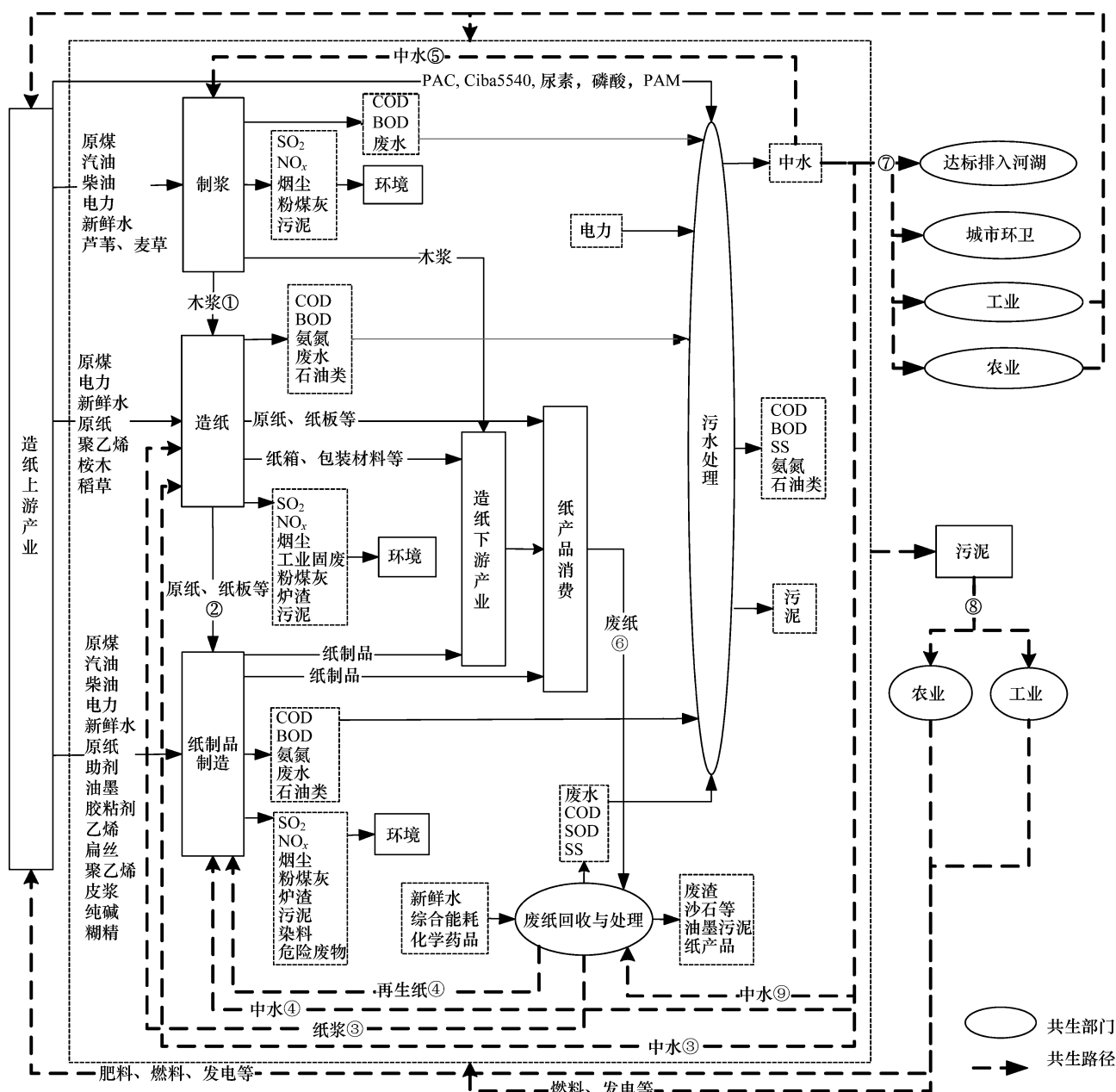


图4 武汉市造纸产业虚拟共生设计系统网络图

Fig.4 The resources flow network of virtual symbiosis design system of pulp and paper industrial in Wuhan

3 结果与分析

3.1 生态环境影响分析

3.1.1 各类环境影响结果解释与比较

运用 EI99 HA 方法经过标准化和加权之后得到单一的环境影响分值,单位为 Pt,表征共生设计前后网络各环境影响类型对生态系统环境影响的大小(表1,图5)。总体看来,虚拟共生设计系统环境效益明显,总的环境影响、生态系统质量、人体健康、资源损耗的分值分别为 1166.445、814.509、148.893、203.045,比原有系统分别减少 23.91%、19.15%、46.56%、22.26%。其影响因素分析如下:

对生态系统质量的影响最大的因素是土地使用,原因是为了提供纸制品制造部门使用的胶粘剂而引起的土地使用的改变(橡胶地占用了土地资源)。酸化/富营养化的减排潜力最大为 49.91%,造纸部门通过优化造纸原料结构对酸化/富营养化的改善效益达 91.11%;其次为生态毒性(23.37%)、土地使用(18.80%)、土地功能变化(-0.86%),其中污水处理部门原料消耗中的磷酸制备过程需消耗胶粘剂,导致共生设计后土地功能变化值略有增加。制浆、造纸与纸制品制造 3 个部门对生态系统质量的

减排贡献率分别为 0.12%、93.17%、10.04%，造纸部门的减排效应最显著是由于再生纸替代、中水回用等措施对土地使用、酸化/富营养化、生态毒性的影响都很大，分别为 93.15%、91.11%、85.86%；污水处理和废纸回收两个部门对生态系统质量的影响不足 1%，同时消纳了制浆、造纸和纸制品制造部门的废纸和污染物，又将再生产品（中水、再生纸等）以水资源和原材料的形式提供给这 3 个部门，其带来的正环境效应远大于负面环境影响。

表 1 生命周期影响评价分值 (Pt)

Table 1 The score of life cycle impact assessment

影响类别 Impact category		制浆 Pulping		造纸 Papermaking		纸制品制造 Paper manufacturing		污水处理 Waste water treatment	废纸回收 Waste paper recycling	总计 Total	
		原有系统	设计系统	原有系统	设计系统	原有系统	设计系统	设计系统	设计系统	原有系统	设计系统
		Original system	Design system	Original system	Design system	Original system	Design system	Design system	Design system	Original system	Design system
生态系统质量 Ecosystem quality	酸化与富营养化	5.906	5.695	12.624	1.017	6.993	5.755	0.294	0.022	25.523	12.784
	生态毒性	0.233	0.208	0.716	0.136	1.182	1.121	0.163	0.004	2.131	1.633
	土地功能变化	0.000	0.000	0.000	0.000	23.084	23.084	0.197	0.000	23.084	23.282
	土地使用	92.902	92.902	173.164	5.592	690.637	672.568	5.748	0.000	956.702	776.810
	总计	99.040	98.805	186.504	6.746	721.896	702.529	6.403	0.026	1007.440	814.509
人体健康 Human health	致癌性	0.303	0.240	0.843	0.116	0.605	0.531	0.081	0.007	1.752	0.974
	气候变化	0.372	-0.833	4.663	1.267	20.406	20.118	0.541	0.121	25.441	21.213
	臭氧层损耗	0.001	0.0004	0.003	0.0004	0.001	0.0004	0.000	0.000	0.005	0.001
	放射性	0.025	0.011	0.082	0.010	0.013	0.006	0.001	0.001	0.120	0.029
	无机物致呼吸损伤	49.792	48.091	112.792	11.686	74.271	63.480	3.109	0.202	236.856	126.569
	有机物致呼吸损伤	0.009	0.008	0.022	0.003	0.094	0.092	0.001	0.000	0.125	0.105
	总计	50.503	47.517	118.405	13.083	95.390	84.228	3.733	0.331	264.298	148.893
资源损耗 Resources	化石燃料消耗	23.132	19.157	57.110	6.118	180.929	175.689	1.399	0.388	261.170	202.751
	矿产资源耗竭	0.006	0.002	0.019	0.002	0.002	0.001	0.288	0.000	0.027	0.294
	总计	23.138	19.160	57.129	6.121	180.931	175.690	1.686	0.388	261.198	203.045
总计 Total		172.681	165.482	362.038	25.949	998.217	962.446	11.822	0.745	1532.937	1166.445

对人体健康的影响最大的因素是无机物致呼吸损伤，其次是气候变化，二者的贡献率高达 99%，前者是由于造纸部门制造原纸产生了大量的烟尘、NO_x、SO₂，后者是由于纸制品制造部门消耗的电能、蒸汽、丙烯腈等能源和原料的生产过程均产生大量二氧化碳。臭氧层损耗的减排潜力最大为 80%，其次为放射性（75.83%）、无机物致呼吸损伤（46.56%）、气候变化（16.62%）、有机物致呼吸损伤（16%）。制浆、造纸与纸制品制造 3 个部门对人体健康的减排贡献率分别为 2.59%、91.26%、9.67%，造纸部门的减排效应最显著是由于再生纸替代、中水回用等措施对气候变化、臭氧层损耗等影响都高达 70% 以上；共生网络中制浆部门的气候变化值为-0.833，反映了减少芦苇、麦草等原料消耗对气候变化有正的环境效益；污水处理和废纸回收两个部门对人体健康的影响不足 3%。

对资源损耗影响最大的因素是化石燃料消耗，是由纸制品制造部门的助剂消耗丙烯腈等石油化工产品和造纸部门的原纸消耗原煤、石油等燃料引起。共生网络中矿产资源耗竭增加了 0.267，是由于污水处理、废纸回收过程都消耗大量的能源、化学药品，其生产需开采矾土等矿石。制浆、造纸与纸制品制造 3 个部门对资源损耗的减排贡献率分别为 6.84%、87.71%、9.01%，造纸部门的减排效应最显著是由于再生纸替代对化石燃料消耗的影响高达 87.69%；污水处理和废纸回收两个部门对资源损耗的影响约为 1.02%。

考虑到电力生产在生命周期中的重要性及中国发电能源结构的地域性特点，修正数据库中电能生命周期清单，但从分析结

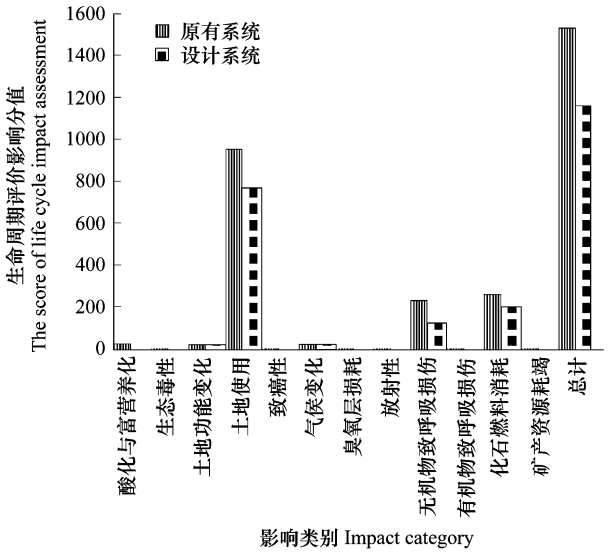


图 5 共生设计系统与原有共生系统各环境影响比较

Fig. 5 Environmental impact comparison between designed symbiosis system and original symbiosis system

考虑到电力生产在生命周期中的重要性及中国发电能源结构的地域性特点，修正数据库中电能生命周期清单，但从分析结

果看,与其它清单物质相比,各个单元过程中电力对环境影响的贡献率较小。另外,由于华中地区火力发电的能源结构中燃煤发电所占的比重较燃油、燃气大,电力的环境影响以气候变化、化石燃料和无机物呼吸道损害为主。

3.1.2 水体富营养化分析

若造纸废水未经处理直接排入水域,废水中含有的 COD、BOD、氨氮等污染物将造成严重的水体富营养化。利用 CML2001 EP 方法分析比较虚拟共生设计造纸系统与原有共生系统的富营养化潜值,结果用磷酸盐当量(kg)表示(表 2,图 6)。

表 2 生命周期富营养化影响潜值分析(kg/t)
Table 2 The analysis of life cycle eutrophication potential

影响类别 Impact category		制浆 Pulping		造纸 Papermaking		纸制品制造 Paper manufacturing		污水处理 Waste water treatment	废纸回收 Waste paper recycling	总计 Total	
		原有系统 Original system	设计系统 Design system	原有系统 Original system	设计系统 Design system	原有系统 Original system	设计系统 Design system	设计系统 Design system	设计系统 Design system	原有系统 Original system	设计系统 Design system
		Original system	Design system	Original system	Design system	Original system	Design system	Design system	Design system	Original system	Design system
大气排放 Emission to air	氨	0.343	0.343	0.653	0.027	0.070	0.002	0.000	0.000	1.065	0.372
	NO _x	0.976	0.923	2.155	0.195	1.384	1.176	0.061	0.005	4.515	2.356
	氧化亚氮	0.146	0.144	0.282	0.013	0.03	0.001	0.000	0.000	0.458	0.157
	总计	1.465	1.41	3.09	0.235	1.484	1.179	0.061	0.005	6.038	2.885
淡水水体排放 Emission to fresh water	BOD	0.044	0.000	0.207	0.005	0.016	0.000	0.007	0.000	0.267	0.012
	COD	0.229	0.026	0.813	0.040	0.136	0.067	0.052	0.003	1.178	0.188
	总溶解有机碳	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.065	0.000	0.000	0.065	0.065
	氨	0.001	0.001	0.028	0.001	0.003	0.000	0.014	0.000	0.031	0.016
	氨盐	0.006	0.003	0.019	0.002	0.264	0.262	0.000	0.000	0.289	0.268
	硝酸盐	0.009	0.004	0.029	0.003	0.003	0.001	0.000	0.001	0.040	0.008
	氮	0.000	0.000	0.001	0.000	0.059	0.059	0.000	0.000	0.061	0.059
	含氮有机物	0.004	0.002	0.012	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.017	0.003
	磷酸盐	0.035	0.034	0.066	0.002	0.008	0.001	0.000	0.000	0.108	0.038
	磷	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002
	总计	0.327	0.069	1.178	0.053	0.554	0.454	0.073	0.004	2.074	0.664
总计 Total		1.792	1.479	4.268	0.288	2.038	1.633	0.134	0.009	8.112	3.549

纵向按部门结果显示,共生设计系统构建对于改善水体富营养化效果显著,富营养化值由 8.112 kg/t 纸制品降为 3.549 kg/t,制浆、造纸与纸制品制造 3 个部门的减排贡献率分别为 6.86%、87.22%、5.92%。造纸部门的减排效应最显著是由于用再生纸浆、再生纸代替原纸减少了 NO_x 的排放,但 NO_x 仍然为主要的富营养化物质,对共生设计系统富营养化的影响为 66.38%。污水处理部门和废纸回收部门的减排效应分别体现在 BOD、COD 和氮磷(所有含 N、P 的排放物)含量的减少,这两个共生部门对水体富营养化影响较小(仅为 4.03%)。

横向按富营养化物质类别显示,共生设计系统与原有系统比较,对富营养化影响减排最大的依次为 BOD(95.51%)、COD(84.04%)、含氮有机物(82.35%)、硝酸盐(80%)、氧化亚氮(65h72%)、氨(65.07%)、磷酸盐(64.81%)等。其中 BOD、COD 的减少说明污水处理部门对改善水体富营养化效果显著;氮、磷含量的减少是由于造纸部门利用废纸回收部门提供的再生纸浆、再生纸减少了原浆和原纸的消耗。

3.2 经济效益分析

通过对武汉市虚拟造纸产业生态系统的环境影响评价,可以看出共生网络是一种非常有效的资源管理方式,对减小造纸产业对生态系统的生态环境影响效果明显,以下通过市场价值法对其经济效益进行分析(表 3)。经济效益为总收益与总成本之差。这里需要说明的是,由于缺乏数据支持以下分析不考虑市场的影响。

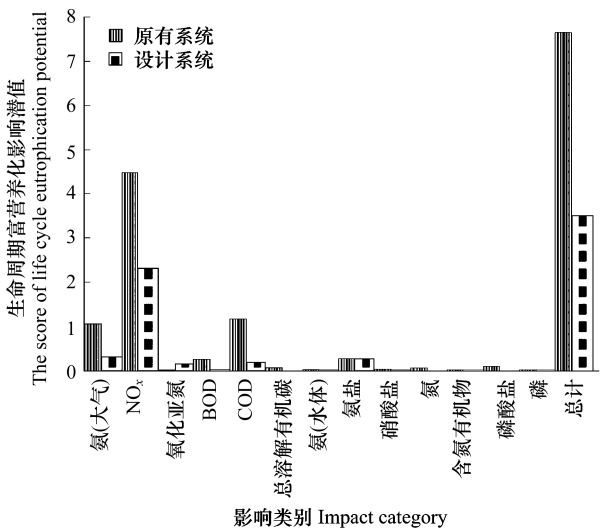


图 6 共生设计系统与原有共生系统各部门环境影响富营养化影响潜值比较

Fig.6 The eutrophication potential effect comparison between designed symbiosis system and original symbiosis system

表 3 共生网络经济效益分析
Table 3 The benefit analysis of symbiosis network

经济效益分析 Economic benefit analysis				
	污水处理 Waste water treatment	废纸回收 Waste paper recycling	污泥处置(生产肥料) Sludge disposal (producing fertilizer)	污泥处置(生产普通砖) Sludge disposal (producing bricks)
参数及意义 Parameters and significance	B_1 :共生网络污水处理的经济效益,元 C_4 :中水输送管道建设与维护费用,元 C_1, C_2, C_3 :分别为污水处理费、工业用水价格、环卫用水价格,元/t; Q_1, Q_2, Q_3 :分别为造纸污水排放量、工业用中水量、环卫用中水量,t	B_2 :废纸回收部门的经济效益,元 C_1 :废纸回收部门总成本,元 $P_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, P_2$:分别为纸产品价格,再生纸生产节约的木材、水、化工原料、煤和电成本,废纸加工制浆节约的成本,废纸回收价格,元/t Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 :分别为废纸回收部门为消费部门提供的纸产品量、为纸制品制造部门提供的再生纸量、为造纸部门提供的纸浆量和废纸回收量,t	B_3 :共生网络污泥堆肥的经济效益,元 C_1 :堆肥项目投资成本,元 P_1, C_2, C_3 :分别为危废处理企业处理造纸污泥的价格、肥料价格、污泥堆肥处理成本,元/t Q_1, Q_2 :原有造纸系统污泥产生量、共生网络污泥产生量,t Q_3 :肥料量,t	B_4 :共生网络污泥制砖的经济效益,元 P_1, Q_1, Q_2 意义同上 Q_3 :污泥生产的普通砖数量,个/t C_1 :污泥制普通砖节约的成本,元/个
公式 Formula	$B_1 = C_2Q_2 + C_3Q_3 - C_1Q_1 - C_4$	$B_2 = P_1Q_1 - C_1 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6)Q_2 + C_7Q_3 - P_2Q_4$ Q_4 为 386734.2 t P_2 为 1 元/kg ^[69] Q_3 为 32872.4 t C_7 为 2000 元/t ^[70]	$B_3 = P_1Q_1 + Q_2(C_2Q_3 - C_3) - C_1$	$B_4 = P_1Q_1 + Q_2Q_3C_1$
数据及来源 Data and resource	Q_1 为 29815050.37 t C_1 为 0.356 元/t(药剂费 0.25 元,电耗 0.2 度,电价 0.53 元/度) ^[67] Q_2 为 19980769.6 t,分别为制浆、造纸、纸制品制造、废纸回收部门节约 13188000 t、4628956.2 t、249479 t、1914334.4 t 工业用水 Q_3 为 3088035.1 t C_2 为 1.65 元/t ^[68] C_3 为 1.5 元/t ^[68] 按照武汉市行政区域面积和供水系统费用模型得 C_4 为 927.6 万元 ^[62]	Q_2 为 15469.37 t C_2 为 760 元/t,按按木价格计算 ^[71-72] C_3 为 297 元/t ^[71] C_4 为 76.8 元/t ^[71] C_5 为 490 元/t ^[71] C_6 为 376.3 元/t ^[71] Q_1 为 241708.9 t P_1 为 5000 元/t ^[73] C_1 为 84598 万元 ^[73] ,包括原料、车间、化学品等的总成本	P_1 为 400 元/t ^[74] 利用堆肥的方式,每吨污泥可生产肥料 Q_3 (有机肥料或有机-无机复混肥料)为 0.34 t ^[75] C_3 为 170 元/t ^[75] C_2 为 860 元/t ^[75] C_1 为 13080.5 万元 ^[75] Q_2 为 1007917.2 t Q_1 为 39893.6 t	Q_3 为 3333 个/t,每块普通砖消耗 0.3 kg 污泥 ^[76] C_1 为 0.007 元 ^[76] Q_2 为 1007917.2 t Q_1 为 39893.6 t P_1 为 400 元/t ^[74]
共生网络经济效益 Economies of symbiosis network	1771 万元	7252 万元	1018 万元	3947.8 万元

根据以上分析,通过设置污水处理、废纸回收和污泥处置 3 个部门以及改善系统内部各部门间的物质、资源交换构建的武汉市虚拟造纸产业生态系统共生设计网络在理论上能取得一定的经济效益。

4 讨论与结论

依据全生命周期的思想提出了基于共生网络的产业资源生态管理框架,通过分析资源流路径构建了武汉市虚拟造纸产业共生网络,对比了虚拟造纸产业共生设计系统与原有共生系统的生态环境影响并分析了共生设计系统的经济效益,得到如下结论:

(1)共生设计网络系统在总的环境影响、生态系统质量、人体健康、资源损耗方面的影响比原有系统都有明显减少,其中造纸部门通过使用再生原材料对影响改善的作用最突出。

(2)共生设计网络系统在酸化与富营养化、生态毒性、土地使用、致癌性、气候变化、臭氧层损耗、放射性、无机物致呼吸损伤、有机物致呼吸损伤、化石燃料消耗方面的影响比原有系统都有不同程度的减少,其中对生态系统质量改善效果显著的是酸化/富营养化,对人体健康影响改善明显的是臭氧层损耗、放射性,对资源损耗影响改善显著的是化石燃料消耗;但土地功能变化值比原有系统增加 0.86%,矿产资源耗竭值由 0.027 增至 0.294,初步分析为废水处理与废纸回收再利用部门使用的化学试剂的生产导致。

(3)共生设计网络系统在富营养化影响上比原有系统有明显减少。其中造纸部门的改善贡献率最大;NO_x是主要的富营

养化物质,大气中对共生网络富营养化改善贡献最大的依次为 NO_x 、氨、氧化亚氮;水体中对共生网络富营养化改善贡献最大的依次为 COD、BOD、磷酸盐等;污水处理部门和废纸回收部门对水体富营养化影响较小,但对共生系统减排贡献大。

(4)共生设计网络系统在气候变化上的影响比原有系统减小明显。其中造纸部门对气候变化改善的贡献最大,共生网络中制浆部门的气候变化值为-0.833,反映了其对气候变化的正环境效益。

(5)利用市场价值法分析共生设计网络系统污水处理、废纸回收、造纸污泥资源化利用(生产肥料和普通砖)等共生路径的费用效益,结果表明均可在理论上取得一定的经济效益。

(6)基于共生网络的产业生态系统生态管理具有明显的生态环境效益,同时可取得一定的经济效益。但虚拟系统由于设置了理想的条件,与实际系统会有一定的差异,而且本研究未考虑市场和运输的影响,未来在数据支持的情况下还需在实际系统中作进一步分析效验。

致谢:德国 PE 公司提供 GaBi 4 教育版软件,中国科学院生态环境研究中心李锋副研究员对本文写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] 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.
- [2] Li N, Hu D, Wang J Z, Feng Q, Liang L, Li J. The study on material metabolism of typical beer enterprises in China. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2008, (7) : 226-227, 229-229.
- [3] Liu T X, Hu D. Environmental impact of residential building construction in Beijing: 1949—2003—assessing the construction materials environmental impact by LCA. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2006, 23(2) : 231-241.
- [4] Bouman M, Heijungs R, van der Voet E, van den Bergh J C J M, Huppes G. Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics*, 2000, 32(2) : 195-216.
- [5] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, Zuo T Y. Resource depletion and environmental impact analysis of magnesium produced using pidgeon process in China. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(8) : 1456-1461.
- [6] Kytzia S, Faist M, Baccini P. Economically extended-MFA: a material flow approach for a better understanding of food production chain. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/10) : 877-889.
- [7] Park J A, Hong S J, Kim I, Lee J Y, Hur T. Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(4) : 456-462.
- [8] Xue H, Kumar V, Sutherland J W. Material flows and environmental impacts of manufacturing systems via aggregated input-output models. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(13/14) : 1349-1358.
- [9] Pablo Muñoz J, Hubacek K. Material implication of Chile's economic growth: Combining material flow accounting (MFA) and structural decomposition analysis (SDA). *Ecological Economics*, 2008, 65(1) : 136-144.
- [10] Nakamura S, Nakajima K. Waste input-output material flow analysis of metals in the Japanese economy. *Materials Transactions*, 2005, 46(12) : 2550-2553.
- [11] Nakamura 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.
- [12] Xu Y J, Zhang T Z. Application of physical input-output table to material flow analysis in Yima City. *China Environmental Science*, 2006, 26(6) : 756-760.
- [13] 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.
- [14] Xu M, Zhang T Z. Material flow analysis of fossil fuel usage in the Chinese economy. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(9) : 1166-1170.
- [15] Liu B, Xiang H, Wang S L. Key index for assessment of circular economy development in China based on the material flow analysis. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(4) : 65-68.
- [16] Ščasny M, Kovanda J, Hák T V. Material flow accounts, balances and derived indicators for the Czech Republic during the 1990s: results and recommendations for methodological improvements. *Ecological Economics*, 2003, 45(1) : 41-57.
- [17] Huang X F, Zhu D J. Material input analysis of Shanghai economic and environmental system. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(3) : 96-99.
- [18] Zhang Y, You C, Zhang S S, Liu S L, Zhang J. Study on eco-industrial composite symbiosis network for iron and steel industrial park. *Modern Chemical Industry*, 2008, 28(4) : 74-77, 79-79.
- [19] Jin X G, Liu Y. A formation mechanism analysis on electronic waste recycling symbiosis network. *Ecological Economy*, 2011, (1) : 116-119.
- [20] Zhou H, Li J, Song Y J. Study on the complexity and management model of urban industrial symbiosis network. *Areal Research and Development*, 2011, 30(3) : 35-38, 43-43.

- [21] Van Berkel R, Fujita 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.
- [22] Mirata M, Entairah T. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation; the case of the Landskrona industrial symbiosis programme. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(10/11): 993-1002.
- [23] Domenech T, Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks; the case of Kalundborg. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 10: 79-89.
- [24] Wang Q, Gu X W, Wang J, Ding Y. China's environment; load and efficiency. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2007, 28(4): 589-591.
- [25] Chen X Q, Zhao T T, Guo Y Q, Song S Y. Material input and output analysis of Chinese economy system. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(4): 539-547.
- [26] Li G, Zhang Y W, Sun F Y. Study on material requirement of environmental-economic system in China. *China Soft Science*, 2005, (11): 39-44.
- [27] Russi D, Gonzalez-Martinez A C, Silva-Macher J C, Giljum S, Martinez-Alier J, Vallejo M C. Material flows in Latin America. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5/6): 704-720.
- [28] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, Moriguchi Y, Rodenburg E, Rogich D, Schutz H. *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*. Washington: World Resources Institute, 1997.
- [29] Wang J, Zhou Y, Liu J H, Yue S Y. Study on theory and application of material flow analysis. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(4): 60-64.
- [30] Ding P G, Tian L, Chen B. Material flow characteristics and evolution of environmental-economic system in Hainan Province from 1990 to 2008. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 66-71.
- [31] Li J, Jin J, Chen L J. Material flow analysis on industrial structure in eco-industrial park. *Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics*, 2006, 26(10): 73-76.
- [32] 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.
- [33] Kämpf J H, Robinson D. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings*, 2007, 39(4): 445-453.
- [34] Sendra C, Gabarrell X, Vicent T. Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1706-1715.
- [35] Du T, Cai J J. Study on material, energy, pollutant flows for iron and steel enterprise. *Iron and Steel*, 2006, 41(4): 82-87.
- [36] Shi Z G. Material flow analysis of automotive industry. *Shanghai Automotive*, 2006, (7): 9-11.
- [37] Chen X Q, Guo Y Q, Cui S P, Wang Z H, Zuo T Y. Material-energy metabolism and environmental implications of cement industry in Beijing. *Resources Science*, 2005, 27(5): 40-46.
- [38] Lu X H, Yang J X, Chen B, Lü B. Effects of industrial solid waste exchange chain on regional material flow. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(11): 147-153.
- [39] Torres M T, Barros M C, Bello P M, Casares J J, Rodríguez-Blas M. Energy and material flow analysis: Application to the storage stage of clay in the roof-tile manufacture. *Energy*, 2008, 33(6): 963-973.
- [40] Dellink R B, Kandelaars P P A A H. An empirical analysis of dematerialisation; application to metal policies in The Netherlands. *Ecological Economics*, 2000, 33(2): 205-218.
- [41] Hekkert M P, Joosten L A J, Worrell E. Analysis of the paper and wood flow in The Netherlands. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 30(1): 29-48.
- [42] Guo X Y, Song Y, Wang Y. Substance flow analysis of copper resources in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4): 665-673.
- [43] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 238-242.
- [44] Joosten L A J, Hekkert M P, Worrell E. Assessment of the plastic flows in the Netherlands using STREAMS. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 30(2): 135-161.
- [45] 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.
- [46] Liu Q, Jiang P P, Zhao J, Zhang B, Bian H D, Qian G R. Life cycle assessment of an industrial symbiosis based on energy recovery from dried sludge and used oil. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(15): 1700-1708.
- [47] Salmi O. Eco-efficiency and industrial symbiosis-a counterfactual analysis of a mining community. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1696-1705.
- [48] Meneghetti A, Nardin G. Enabling industrial symbiosis by a facilities management optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 35: 263-273.
- [49] Villanueva A, Wenzel H. Paper waste-recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments. *Waste Management*, 2007, 27(8): S29-S46.
- [50] European Environment Agency. Paper and Cardboard-Recovery or Disposal? (2006- 06- 30) [2012- 07- 28]. <http://www.eea.europa.eu/>

- publications/technical_report_2006_5.
- [51] Finnveden G, Ekvall T. Life-cycle assessment as a decision-support tool-the case of recycling versus incineration of paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, 24(3/4): 235-256.
- [52] Merrill H, Damgaard A, Christensen T H. Life cycle assessment of waste paper management: the importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(12): 1391-1398.
- [53] Zheng B, Zhao X X, Ma X Q, Zhang L. Life cycle assessment and its application. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2004, (3): 9-1.
- [54] Ren L J. Methodology Research and Typical Paper Products of Life Cycle Assessment [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [55] Poopak S, Agamuthu P. Life cycle impact assessment (LCIA) of paper making process in Iran. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(24): 4860-4870.
- [56] Salazar E, Samson R, Munnoch K, Stuart P. Identifying environmental improvement opportunities for newsprint production using life cycle assessment (LCA). *Pulp and Paper Canada*, 2006, 107(11): 32-38.
- [57] Bloemhof-Ruwaard J M, Van Wassenhove L N, Gabel H L, Weaver P M. An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. *Omega*, 1996, 24(6): 615-629.
- [58] Liang S, Zhang T Z, Xu Y J. Comparisons of four categories of waste recycling in China's paper industry based on physical input-output life-cycle assessment model. *Waste Management*, 2012, 32(3): 603-612.
- [59] Das T K, Dee P, Houtman C. Evaluating chemical-, mechanical-, and bio-pulping processes and their sustainability characterization using life-cycle assessment. *Environmental Progress*, 2004, 23(4): 347-357.
- [60] Duke University. Paper Task Force. (1995-12-19) [2012-07-28]. http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:K4UpycAZYz0J:scholar.google.com/&hl=zh-CN&as_sdt=0.
- [61] Song X L, Xu C, Yang J X, Lv B, Zhao L N. A method for life cycle management of industrial solid waste and its case study. *China Environmental Science*, 2011, 31(6): 1051-1056.
- [62] Zhao L J. Study on Eco-management Method for the Resources of Industrial Ecosystem [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [63] Wang R S. Integrative eco-management for resource, environment and industrial transformation. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2003, 23(2): 125-132.
- [64] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Cleaner Production Standard-Waste Paper Pulping (paper industry). Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [65] Shen L. Life Cycle Assessment on Treatment Systems of Paper-Making Wastewater-A Case Study on Stora Enso Suzhou Paper Co., Ltd [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010.
- [66] Cong G P, Shi Y Q, Ding L B, Pan A X, Shi F, Fang G G. Biomass resource utilization of paper mill sludge. *Biomass Chemical Engineering*, 2011, 45(5): 37-44.
- [67] Engineering Network of China's Sewage Treatment. The Application of EWP Efficient Sewage Purification in Pulp Sewage Treatment. [2012-07-28]. <http://www.dowater.com/jishu/2010-06-03/26724.html>.
- [68] Water China. Raising Water Price from This Month in Wuhan City. [2012-07-28]. <http://www.waterchina.com/main/Web/Article/2006/04/02/2209441562C71086.aspx>.
- [69] T-paper. Difficult Long-term Prices of Waste Paper Recycling. [2012-07-28]. <http://www.whpaper.com/news/news-56.html>.
- [70] China Paper Network. Customs Report Shows Promising Waste Paper Use. [2012-07-28]. <http://www.paper.com.cn/news/topicnews/wastepaper107.htm>.
- [71] Bicycle. Recycled Paper. [2012-07-28]. <http://baike.baidu.com/view/753043.htm>.
- [72] China Timber Information Network. December The Eucalyptus Price of Zhanjiang in December. [2013-04-08]. <http://www.wood168.com/priceall/14519.html>.
- [73] Cathy. Report on the Feasibility of the Newsprint Using Waste Paper (Offset Printing Paper). [2012-07-28]. <http://wenku.baidu.com/view/c00c8cbbf121dd36a32d8229.html>.
- [74] Li S K, Lin R, Cai X P. Dilemma and outlet of the paper sludge treatment. *Environment*, 2010, (Z1): 24-25.
- [75] Shouguang Government. The Treatment and Resource Utilization of Paper Sludge. [2012-07-28]. <http://www.shouguang.gov.cn/GGFW/TZDX/2009/02/07/081309366.html>.
- [76] Wang N, Wu T S. Comprehensive of paper residue and sludge. *Pollution Control Technology*, 2005, (1): 27-28. (未链接到本条英文信息 请核对)

参考文献:

- [1] 施晓清, 杨建新, 王如松, 赵齐加. 产业生态系统资源代谢分析方法. *生态学报*, 2012, 32(7): 2012-2024.
- [2] 李娜, 胡聃, 王建中, 冯强, 梁亮, 李佳. 中国典型啤酒企业的物质代谢研究. *现代农业科技*, 2008, (7): 226-227, 229-229.

- [3] 刘天星, 胡聘. 北京住宅建设的环境影响: 1949—2003 年——从生命周期角度评价建筑材料的环境影响. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(2): 231-241.
- [5] 高峰, 聂祚仁, 王志宏, 左铁镭. 中国皮江法炼镁的资源消耗和环境影响分析. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1456-1461.
- [12] 徐一剑, 张天柱. 物质投入产出表在义马市物质流分析中的应用. 中国环境科学, 2006, 26(6): 756-760.
- [13] 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): 356-360.
- [14] 徐明, 张天柱. 中国经济系统中化石燃料的物质流分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1166-1170.
- [15] 刘滨, 向辉, 王苏亮. 以物质流分析方法为基础核算我国循环经济主要指标. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 65-68.
- [17] 黄晓芬, 诸大建. 上海市经济-环境系统的物质输入分析. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3): 96-99.
- [18] 张芸, 游春, 张树深, 刘素玲, 张敬. 钢铁工业园区生态产业复合共生网络的设计与评价. 现代工业, 2008, 28(4): 74-77, 79-79.
- [19] 靳现凯, 刘宇. 电子废弃物资源化共生网络生成机理分析. 生态经济, 2011, (1): 116-119.
- [20] 周慧, 李健, 宋雅杰. 城市产业共生网络的复杂性与管理模式分析. 城市研究与开发, 2011, 30(3): 35-38, 43-43.
- [24] 王青, 顾晓薇, 王军, 丁一. 本国环境载荷与环境效率研究. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(4): 589-591.
- [25] 陈效述, 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): 539-547.
- [26] 李刚, 张彦伟, 孙丰云. 中国环境经济系统的物质需求量研究. 中国软科学, 2005, (11): 39-44.
- [29] 王军, 周燕, 刘金华, 岳思羽. 物质流分析方法的理论及其应用研究. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 60-64.
- [30] 丁平刚, 田良, 陈彬. 海南省环境经济系统的物质流特征与演变. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 66-71.
- [31] 李健, 金珏, 陈力洁. 生态工业园区产业结构物质流分析. 现代财经-天津财经大学学报, 2006, 26(10): 73-76.
- [35] 杜涛, 蔡九菊. 钢铁企业物质流、能量流和污染物流研究. 钢铁, 2006, 41(4): 82-87.
- [36] 史占国. 汽车产业物质流分析研究. 上海汽车, 2006, (7): 9-11.
- [37] 陈效述, 郭玉泉, 崔素平, 王志宏, 左铁镭. 北京地区水泥行业的物能代谢及其环境影响. 资源科学, 2005, 27(5): 40-46.
- [38] 逯馨华, 杨建新, 陈波, 吕彬. 工业固废生态链的构建对区域物质流的影响. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(11): 147-153.
- [42] 郭学益, 宋瑜, 王勇. 我国铜资源物质流分析研究. 自然资源学报, 2008, 23(4): 665-673.
- [43] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. 中国环境科学, 2006, 26(2): 238-242.
- [53] 郑彬, 赵绪新, 马晓茜, 张凌. 生命周期评价方法及其应用. 中国资源综合利用, 2004, (3): 9-12.
- [61] 宋小龙, 徐成, 杨建新, 吕彬, 赵丽娜. 工业固体废物生命周期管理方法及案例分析. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1051-1056.
- [62] 赵吝加. 工业生态系统资源生态管理方法研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2011.
- [63] 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): 125-132.
- [64] 国家环境保护总局. 清洁生产标准: 造纸工业 (废纸制浆). 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [65] 沈兰. 造纸废水治理工艺的生命周期分析——以苏州紫兴纸业有限公司为例. 苏州: 苏州科技学院环境科学与工程学院, 2010.
- [66] 丛高鹏, 施英乔, 丁来保, 盘爱享, 时锋, 房桂干. 造纸污泥生物质资源化利用. 生物质化学工程, 2011, 45(5): 37-44.
- [67] 中国污水处理工程网. EWP 高效污水净化器在造纸污水处理的应用. (2010-06-03) [2012-07-28]. <http://www.dowater.com/jishu/2010-06-03/26724.html>.
- [68] 中国水星. 武汉市本月起上调自来水价. (2006-04-03) [2012-07-28]. <http://www.waterchina.com/main/Web/Article/2006/04/02/2209441562C71086.aspx>.
- [69] 天平纸业. 废纸回收涨价难长远. (2010-01-29) [2012-07-28]. <http://www.whpaper.com/news/news-56.html>.
- [70] 中国纸网. 海关报告显示废纸利用大有可为. (2002-04-26) [2012-07-28]. <http://www.paper.com.cn/news/topicnews/wastepaper107.htm>.
- [71] Bicye. 再生纸. (2011-12-09) [2012-07-28]. <http://baike.baidu.com/view/753043.htm>.
- [72] 中国木业信息网. 12 月份广东地区湛江地区桉木原木价格. (2012-12-29) [2013-04-08]. <http://www.wood168.com/priceall/14519.html>.
- [73] Cathy. 使用废纸生产新闻纸 (胶印书刊纸) 的可行性报告. (2011-11-22) [2012-07-28]. <http://wenku.baidu.com/view/c00c8cbbf121dd36a32d8229.html>.
- [74] 李书坤, 林荣, 蔡西萍. 造纸污泥处理的困境与出路. 环境, 2010, (Z1): 24-25.
- [75] 寿光市政府. 造纸污泥处理与资源化利用. (2009-02-07) [2012-07-28]. <http://www.shouguang.gov.cn/GGFW/TZDX/2009/02/07/081309366.html>.
- [76] 王宁, 吴铁山. 造纸废渣和污泥的综合利用. 污染防治技术, 2005, (1): 27-28.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

A review of ecosystem services and research perspectives	MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
Sexual interference in non-human primates	YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review	HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
Proximate and ultimate determinants of food chain length	WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi	 LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen	 XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve	 ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	 ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	 YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	 LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	 LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	 WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	 CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress	 WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings	 YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area	 MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells	 WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants	 TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages	 YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta	 PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings	 SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity	 ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO ₂	 SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	 MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	 ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation	 LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi	 QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China	 YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River	 HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau	 ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《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 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, 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 90.00 元