

DOI: 10.5846/stxb201107221083

施晓清, 李笑诺, 赵吝加, 杨建新. 武汉市造纸行业资源代谢分析. 生态学报, 2012, 32(24): 7706-7715.

Shi X Q, Li X N, Zhao L J, Yang J X. Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7706-7715.

武汉市造纸行业资源代谢分析

施晓清*, 李笑诺, 赵吝加, 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: 资源代谢问题是造成产业系统生态环境影响的主要原因。在分析武汉市造纸行业资源代谢的基础上从资源输入-资源使用-环境胁迫-系统循环共生 4 个方面构建武汉市造纸行业资源代谢分析指标体系。运用模糊综合评判法和问题树模型对 2007 年武汉市造纸业的原材料、水、能源等资源的代谢与全国造纸行业平均水平进行了比较分析。结果表明: (1) 武汉市造纸业资源代谢水平总体上评价等级为优, 但某些指标与全国平均水平比还略有差距; (2) 从资源输入角度分析, 原材料输入生态效率及水资源输入生态效率等级为优, 能源输入生态效率等级为良; (3) 从资源使用角度分析, 单位产品的原材料消耗及单位产品的水资源消耗等级为优, 单位产品的能源消耗等级为良; (4) 从环境胁迫角度分析, 单位污染物工业总产值及单位产品污染物排放等级均为优, 污染物达标排放率等级为良; (5) 从系统循环共生分析, 企业清洁生产达标率等级为良, 资源持续利用及污染物治理等级为优, 而中水回用率等级为差。通过代谢分析可得, 武汉市造纸行业能源输入生态效率、单位产品能源消耗与全国平均水平比还有一定距离, 整个行业中企业清洁生产比例还具有提升的空间; 中水回用方面较弱, 需要特别加强。

关键词: 资源代谢; 指标体系; 模糊综合评判; 造纸业

Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China

SHI Xiaqing*, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, 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 metabolism problems are the main reason resulting in the eco-environmental impacts of industrial system. Material flow analysis is a methodology that focuses on tracking and quantifying a substance or substance group as it moves through a system and is the primary tool used to understand the metabolic processes of anthropological activity. Based on analyzing the resources metabolism of the pulp and paper industry in Wuhan by the methodology of MFA, an analysis indicator system was built, which included four aspects: resources input, resources consumption, environmental stress and circular symbiosis. The fuzzy comprehensive evaluation method and the problem tree model were used to evaluate metabolism of raw materials, water, and energy of the pulp and paper industry in Wuhan. Five grades were included: excellent, good, moderate, bad and very bad. The results were compared with the national average level in 2007. The results showed that the evaluation grade of resources metabolism of the pulp and paper industry in Wuhan is excellent, while it is still slightly lower than the national average level. When evaluating the resources metabolism separately by resources input, resources consumption, environmental stress and circular symbiosis, we found that: (1) The grades of the ecological efficiency of raw material input, energy input and water input were excellent, good and excellent respectively; (2) The grade of the energy consumption per unit product was good, and that of the water consumption per unit product and the raw material consumption per unit product were excellent; (3) the grades of the output value per unit pollutant and the pollutant emission per unit product were excellent, and the grade of the compliance rate of pollution emission was good;

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71033005, 70773109)

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2012-07-30

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

(4) The grade of the proportion of cleaner production was good, and that of the pollution treatment and the sustainable utilization of resources were excellent, but that of reuse water rate was bad.

Based on the resources metabolic analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, we can draw some conclusions as follows: (1) The problems on energy consumption, water consumption and pollution discharge mainly arise from pulp and paper production, suggesting great potentials on reduction of energy and water consumption and pollution emission in these processes. (2) Comparing with national average level, the use rate of the wastepaper pulp is higher and that of the wood pulp is lower. (3) The ecological efficiency of the energy input and the energy consumption per unit product are below the national average level, and the proportion of cleaner production is also below the reference value. They all should to be improved. (4) There is great potential for improvement in reuse of water resource.

This study demonstrates the use of resources metabolism analysis approach we posed before, and highlights the need for the evaluation standard and database for analysis of the resources metabolism for industrial ecosystems.

Key Words: resources metabolism analysis; indicator system; fuzzy comprehensive evaluation; pulp and paper industry

工业系统资源代谢问题是人类社会经济活动对生态环境造成胁迫的主要原因之一。从生态系统的角度对工业系统进行资源代谢分析,辨识资源在流动过程中造成系统生态环境问题的各种影响因素,可为提高工业系统资源利用效率及减少废弃物的排放提供科学依据。

物质流分析方法是分析物质在一个系统中代谢状况的工具,它是研究在一定时空条件下系统物质流及其存量的系统评估方法^[1]。20 世纪 70 年代开始在资源保护和环境管理中得到应用,主要研究方向有城市代谢、污染物或元素流分析以及宏观经济系统的物质输入输出分析。现有的分析方法总体来说有两种:一种是基于过程的物质流分析;一种是宏观经济系统的物质流分析。前一种主要是分析物质流的源、路径与汇,后一种是分析系统物质的输入和输出。目前还缺乏针对产业生态系统中的基于过程的资源代谢分析方法。为了弥补这一不足,根据本研究资助项目在前期研究中提出的产业生态系统资源代谢分析方法^[2],借鉴物质流分析思路,以武汉市造纸行业为研究对象,在分析武汉市造纸行业资源代谢路径的基础上从资源输入-资源使用-环境胁迫-循环共生 4 个方面构建武汉市造纸行业资源代谢分析指标体系。运用模糊综合评判法和问题树模型将 2007 年武汉市造纸行业的原材料、水、能源等资源的代谢状况与全国造纸行业平均水平进行了比较分析。

1 研究边界

1.1 研究区概况

本研究选取武汉市造纸行业为研究对象。武汉市面积 8494 km²,是长江中下游特大城市之一,华中最大的都市,中国重要的工业基地、科教基地和综合交通枢纽,具有重要的战略地位。武汉市水资源总量 3.309×10⁹ m³。在 11 条主要河流中有两条水质为劣 V 类,占总数的 18%;在 70 个主要湖泊中有 36 个水质属于劣 V 类,占总数的 52% (图 1)^[3]。总体上武汉市水资源丰富,但水质状况不容乐观。

工业废水排放是造成水质污染的主要因素。造纸业是武汉市九大重点行业之一^[4]。大量造纸含污废水进入自然水体是水体污染的主要来源之一。2007 年其主要水体污染物 COD、BOD 的排放量分别为 5497.14 t 和 1779.39 t,分别占武汉市九大重点行业排放总量的 28.8% 和 55.9%^[4]。鉴于造纸业在武汉市国民经济中占有重要地位以及其污染排放对武汉市水体的严重影响,对其进行资源代谢分析,为系统了解武汉市造纸业资源利用中导致生态环境问题的成因具有重要意义。

1.2 研究边界确定

系统边界的确定是资源代谢分析的关键影响因素之一^[5]。模拟自然生态系统的共生网络结构,定义造纸业共生网络由造纸业系统、上游产业、下游产业、消费体、废纸回收和污染治理部门及其生态环境构成 (图 2)。其中,造纸业系统指制浆、造纸、纸制品制造等生产部门;上游产业指为造纸业提供原材料和零部件等的

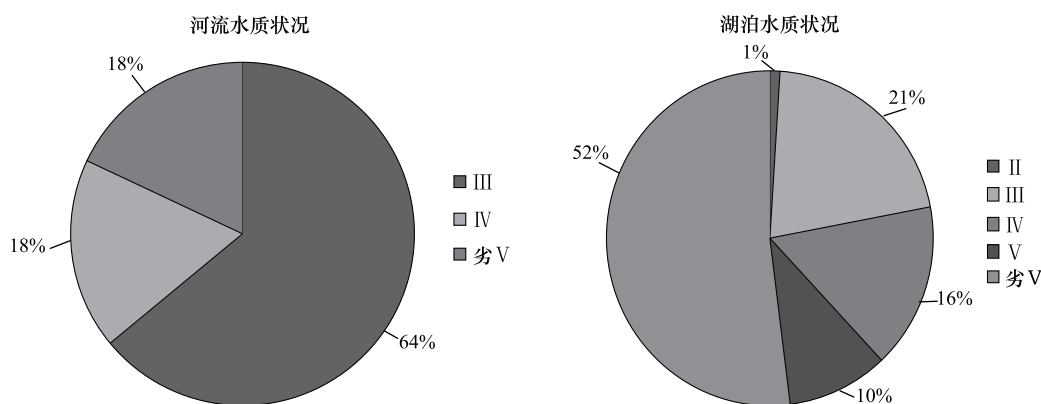


图1 2007年武汉市水质状况

Fig. 1 Water quality of Wuhan in 2007

产业系统;下游产业指利用造纸业产品生产的产业系统;消费体指直接消费造纸业产品的消费者;废纸回收及污染治理部门指废品回收及污染治理企业系统;生态环境主要由生物环境、非生物环境、物质资源组成^[2]。在造纸业共生网络中,各部分通过资源、能源的供给相互关联形成共生关系,其中造纸业作为主导工业,而其余组分称为造纸业共生体。在本研究中,以2007年为时间段,受数据支持的限制,仅以武汉市造纸业系统作为研究边界(图2中虚线方框),研究造纸业的资源代谢状况。

2 分析方法

2.1 资源代谢分析

借鉴物质流分析方法^[6],对武汉市造纸业资源的输入输出进行分析。按照国家行业分类标准将造纸企业划归为制浆、造纸和纸制品加工等三大部门。其中造纸又包括机制纸及纸板制造、手工纸制造、加工纸制造三个子部门,纸制品加工包括纸和纸板容器制造、其他纸制品制造两个子部门。在所调查的武汉市造纸业数据中没有属于手工纸制造子部门的企业。造纸业的资源代谢过程就是造纸系统内以及与外界环境的物质交换过程,主要包括造纸业原材料、能源及水资源输入、产品生产、产品输出以及废弃及污染物排放等四个过程。以全国第一次污染源普查数据为支持,按照产业链上下游顺序构建武汉造纸业资源代谢分析图(图3)。需要指出的是:纸浆制造部门中原材料输入包括植物、废纸等制浆原材料,能源输入包括原煤、汽油、柴油、电力等,水资源输入指从外界环境中输入的水量,产品为纸浆,污染物主要为COD、SO₂、氮氧化物、烟尘等;造纸部门中原材料输入包括木浆、非木浆、废纸浆,能源输入包括原煤和电力,水资源输入指从外界环境中输入的水量,产品包括各类原纸、纸板,污染物主要为COD、烟尘等;纸制品制造部门中原材料输入指各类原纸、纸板以及化学添加剂,能源输入主要为原煤和电力,水资源输入指从外界环境中输入的水量,产品为各类纸制品,污染物主要为烟尘、氮氧化物、SO₂等。

2.2 指标体系

2.2.1 指标体系构建

依据支持项目前期提出的资源代谢分析指标体系框架,在分析武汉市造纸业资源流的基础上,构建武汉市造纸业资源代谢分析指标体系(表1)。该指标体系分目标指标、一级指标、二级指标共3个层次,上一级指标包含对应的下一级指标。目标指标由资源输入、资源使用、环境胁迫、系统循环共生等4个方面构成。一级

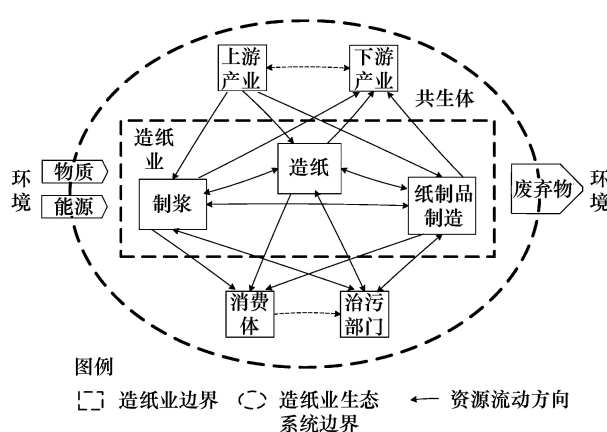


图2 造纸业共生网络结构

Fig. 2 Symbiosis net structure of the pulp and paper industry

指标由输入生态效率、使用强度、输出生态效率、清洁生产、污染物治理、资源可持续利用等指标构成。二级指标由对应输入生态效率指标的原材料输入生态效率、水资源输入生态效率及能源输入生态效率指标;对应资源使用强度的单位产品原材料消耗量、单位产品新鲜水消耗量以及单位产品能源消耗量指标;对应输出生态效率的 COD 及氨氮排放生态效率、污染物达标排放率指标;对应清洁生产的清洁生产达标率指标;对应污染治理的污染物治理率指标;对应资源持续利用的可再生资源使用率、再生材料使用率以及中水回用率指标等构成。

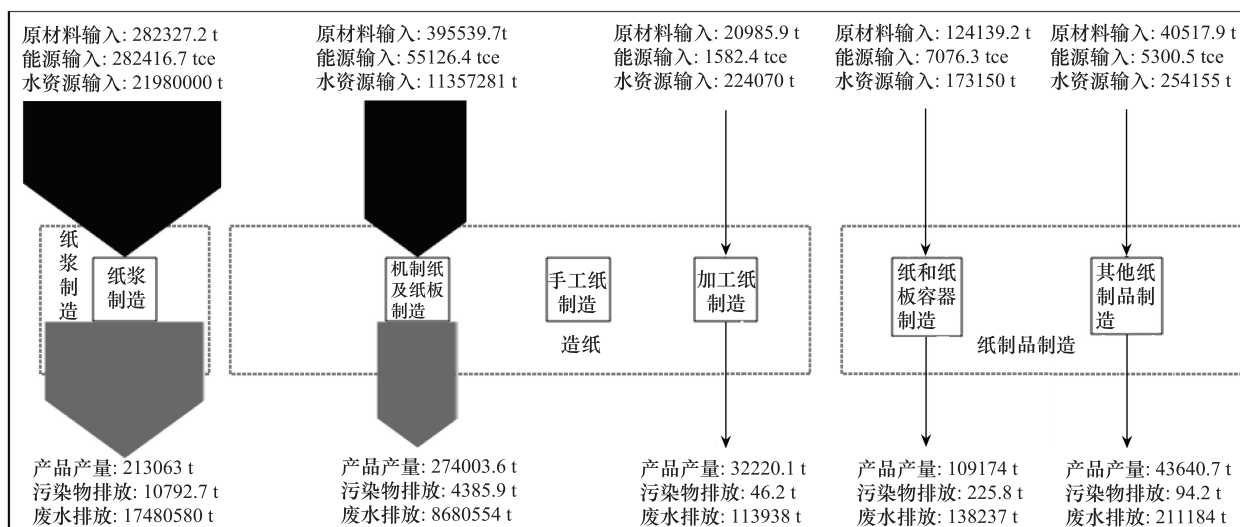


图 3 2007 年武汉市造纸业资源代谢图

Fig. 3 Resources metabolic map of the pulp and paper industry in Wuhan in 2007

从整体分析,指标体系中资源输入、资源使用和环境胁迫指标主要分析系统与外界环境在原材料、水、能源及废弃物等物质交换过程中资源流动效率以及对环境造成的影响;而系统循环共生指标则从清洁生产、污染物治理、资源持续利用等方面来评价造纸业系统循环共生的能力。

需要指出的是:(1) 为了突出重点,在污染物排放指标中只计算了造纸业主要水体污染物指标 COD 和氨氮;(2) 限于数据支持,二级指标参考值统一采用全国平均值,若无数据支持则采用理想值。

2.2.2 指标值计算

二级指标的原始指标值由第一次全国污染源普查数据计算获取,二级指标参考值由 2008 造纸年鉴、2008 中国能源统计年鉴、造纸行业清洁生产标准等资料获取,具体计算方法见表 1。对所有二级指标值进行[0, 1]区间标准化处理,采用标准化公式如下:

对于值越大越好的指标

$$u_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq R_i \\ x_i/R_i & x_i < R_i \end{cases} \quad (1)$$

对于值越小越好的指标

$$u_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq R_i \\ R_i/x_i & x_i > R_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i 表示第 i 个指标的原始值, R_i 表示第 i 个指标的参考值。

一级指标和目标指标的综合指标值由其下级指标的标准化值逐级加权求和计算获取。所采用的计算公式为: $A_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times w_j$ (a_{ij} 表示第 i 个上一级指标下的第 j 个指标标准化值, w_j 表示第 j 个指标的权重, A_i 表示第 i 个上级指标)。

表 1 武汉市造纸业资源代谢分析指标体系

Table 1 The analysis indicator system of resources metabolism of pulp and paper industry of Wuhan							
目标指标 Target indicator	一级指标 The first level indicators	二级指标 The second level indicators	二级指标表达式 Expression of the second level indicators	二级指标原始值 Original value of the second level indicators	二级指标参考值 Reference value of the second level indicators	单位 Unit	参考值及其来源 Reference value
资源输入	原材料输入	原材料输入生态效率	工业总产值/原材料输入总量	3910.65	2590.04	CNY/t	②③
Resource input	水资源输入	水资源输入生态效率	工业总产值/水输入总量	79.2	38.19	CNY/t	②③
	能源输入	能源输入生态效率	工业总产值/能源消耗总量	8968.55	11466.85	CNY/tce	②③④
资源使用	原材料使用	单位产品原材料消耗量	原材料消耗总量/产品总量	1.2	1.57	t/t	②③
Resource consumption	水资源使用	单位产品新鲜水消耗量	水消耗总量/产品总量	55.12	106.21	t/t	②③
	能源使用	单位产品能源消耗量	能源消耗总量/产品总量	0.49	0.35	tce/t	②③④
环境胁迫	污染物排放	COD 排放生态效率	工业总产值/COD 排放量	574188.9	243519.7	CNY/t	②③
Environmental stress		氨氮排放生态效率	工业总产值/氨氮排放量	2.11×10 ⁸	1.28×10 ⁷	CNY/t	②③
		单位产品 COD 排放	COD 排放量/产品总量	0.01	0.02	t/t	②③
		单位产品氨氮排放	氨氮排放量/产品总量	2.1×10 ⁻⁵	3.2×10 ⁻⁴	t/t	②③
		污染物达标排放率	达标企业数/企业总数×100%	74.29	100	%	①
系统循环共生	清洁生产	清洁生产达标率	达标企业数/企业总数×100%	71.88	100	%	①
Circular symbiosis	污染物治理	污染物治理率	污染物治理量/污染物排放量×100%	95.11	100	%	①
	资源持续利用	可再生资源使用率	可再生资源用量/原材料总量×100%	17	18.6	%	②③
		再生材料使用率	废纸原材料用量/原材料总量×100%	58.5	27.1	%	②③
		中水回用率	中水使用量/用水总量×100%	15	51	%	②③

①理想值,②全国平均水平,③造纸年鉴 2008,④中国能源统计年鉴 2008; 原材料:包括纸浆(木浆、非木浆、废纸浆)、各类纸及纸板、化学用品(油墨、扁丝、胶粘剂等添加剂);产品:包括原纸、瓦楞纸、纸板、加工纸、纸制品、副产品等;可再生资源:原材料中木纤维、草及竹纤维等可再生纤维浆的原材料;再生材料:废纸浆做原材料部分

采用层次分析法^[7]确定各二级指标、一级指标、目标指标相对于其上级指标的相对权重并逐级计算全部二级指标相对于目标的总权重。指标体系的层次结构如图 4 所示。

通过专家问卷调查,采用 1-9 标度法对指标体系涉及的六个判断矩阵进行相对重要性打分。利用特征根法对每份问卷进行单层次排序计算并检验一致性(CR<0.1 则通过检验)^[8],具体计算过程利用 Matlab 软件编程实现,单层次排序结果反映出各指标相对于上级指标的重要程度,可以作为在该层次下指标的相对权重。最后利用加权几何平均法聚合各个专家的排序结果,得到各相邻指标层的相对权重(w)(表 2)。

表 2 各相邻指标层的相对权重

Table 2 The relative weight between adjacent index layers							
目标指标到综合指标 The target indicators to the synthetical indicator	w	一级指标到目标指标 The first level indicators to the target indicator	w	二级指标到一级指标 The second level indicators to the first level indicator	w	二级指标到一级指标 The second level indicators to the first level indicator	w
A	0.227	A ₁	0.272	A ₁₁	1	C ₁₅	0.215
B	0.277	A ₂	0.443	A ₂₁	1	D ₁₁	1
C	0.273	A ₃	0.285	A ₃₁	1	D ₂₁	1
D	0.223	B ₁	0.315	B ₁₁	1	D ₃₁	0.412
		B ₂	0.36	B ₂₁	1	D ₃₂	0.273
		B ₃	0.325	B ₃₁	1	D ₃₃	0.315
		C ₁	1	C ₁₁	0.222		
		D ₁	0.478	C ₁₂	0.135		
		D ₂	0.311	C ₁₃	0.239		
		D ₃	0.211	C ₁₄	0.189		

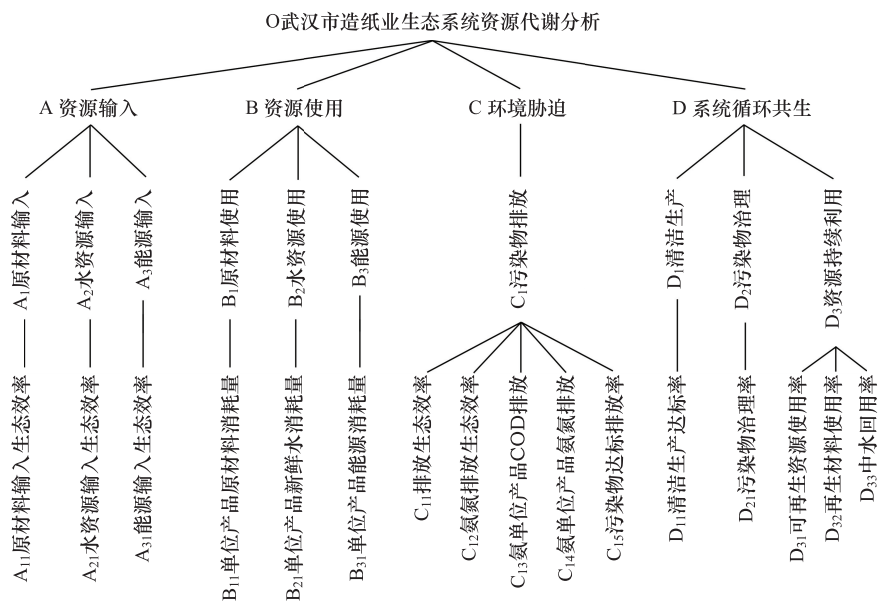


图 4 武汉市造纸业资源代谢分析指标体系层次结构

Fig. 4 Hierarchy structure of the indicator system on resources metabolism of the pulp and paper industry in Wuhan

相对于总目标而言,一级指标 A_i 所包含的指标 A_{ij} ,其层次总排序的权重 w_{ij} 为: $w_{ij}=w_A\times w_{Ai}\times w_{Aji}$,同理可分别得到 B_{ij},C_{ij},D_{ij} 相对于总目标的总权重,见表3。

表 3 武汉市造纸业资源代谢分析二级指标标准化值及总权重

Table 3 The second indicators' standardized values and total weights of resources metabolism of Wuhan pulp and paper industry					
二级指标	标准化值 (a_i)	总权重 (w_i)	二级指标	标准化值 (a_i)	总权重 (w_i)
The secondary level indicators	Standardized value	Total weight	The second level indicators	Standardized value	Total weight
原材料输入生态效率	1	0.088	单位产品 COD 排放	1	0.068
Eco-efficiency of raw materials input			COD discharge per product		
水资源输入生态效率	1	0.079	单位产品氨氮排放	0.93	0.048
Eco-efficiency of water input			NH ₃ -N discharge per product		
能源输入效率	0.782	0.06	污染物达标排放率	0.743	0.07
Eco-efficiency of energy input			Compliance rate of pollution discharge		
单位产品原材料消耗量	1	0.079	清洁生产达标率	0.719	0.1
Material consumption per product			Compliance rate of cleaner production		
单位产品新鲜水消耗量	1	0.109	污染物治理率	0.951	0.07
Fresh water consumption per product			Pollution treatment rate		
单位产品能源消耗量	0.727	0.09	可再生资源使用率	0.92	0.017
Energy consumption per product			Rate of renewable resources use		
COD 排放生态效率	1	0.056	再生材料使用率	1	0.014
Eco-efficiency of discharge of COD			Rate of reuse resources use		
氨氮排放生态效率	1	0.032	中水回用率	0.285	0.02
Eco-efficiency of discharge of NH ₃ -N			Rate of recycled water use		

2.3 模糊综合分析法

利用模糊综合评判法,根据标准化指标值的大小分析武汉市造纸业的资源代谢水平^[9]。设评判因素为标准化指标值或综合指标值的大小,评价集为{优、良、中、差、极差}。利用隶属函数(图5)判断各指标隶属等级,作为评价各指标代谢水平的依据。所谓的隶属函数就是用一个[0,1]闭区间的函数刻画一个元素属于一个模糊集合的程度,函数值越大,隶属程度也越大,它能够描述差异的中间过渡,这是精确性对模糊性的一种逼近。根据各二级指标的权重系数向量 W_i 和由隶属函数得到的隶属度评判决策矩阵 R_i ,经过合成运算

即可得到各一级指标的模糊综合评判结果 $\tilde{O}_i = W_i \circ R_i = [o_{i1}, o_{i2}, o_{i3}, o_{i4}, o_{i5}]$, 基于此得到各子集的综合评判矩阵:

$$R = [\tilde{O}_1, \tilde{O}_2, \cdots, \tilde{O}_i]^T = \begin{bmatrix} o_{11} & \cdots & o_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n1} & \cdots & o_{n5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

以此类推, 由下一级指标的权重系数向量和综合评判矩阵经过合成运算得到上一级指标的综合评判矩阵。在本文中, 由目标层的权重系数向量和综合评判矩阵经过合成运算即得到武汉市造纸业生态系统资源代谢的模糊综合评判结果为 $[0.656, 0.316, 0, 0.013, 0.015]$, 评判等级为优。运算公式如下:

$$\tilde{O} = W \circ R = [w_1, w_2, w_3, w_4] \begin{bmatrix} \tilde{O}_1 \\ \vdots \\ \tilde{O}_4 \end{bmatrix} = [o_1, o_2, o_3, o_4, o_5] \quad (4)$$

各二级指标标准化指标值, 各一级指标、目标指标的综合指标值计算结果以及资源代谢水平的隶属等级、隶属度见表 4、表 5、表 6。

表 4 武汉造纸业资源代谢分析指标体系——目标指标

Table 4 Indicator system of resources metabolism of the pulp and paper industry in Wuhan——Target indicators							
目标指标 Target indicator	综合指标值 Synthetical indicator value	隶属等级 Membership grade	隶属度 Membership				
			优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Bad	极差 Very bad
资源输入 Resource input	0.938	优	0.715	0.285	0	0	0
资源使用 Resource consumption	0.911	优	0.675	0.325	0	0	0
环境胁迫 Environmental stress	0.932	优	0.785	0.215	0	0	0
系统循环共生 System's circular symbiosis	0.796	良	0.456	0.478	0	0.057	0.069

表 5 武汉造纸业资源代谢分析指标体系——一级指标

Table 5 Indicator system of resources metabolism of the pulp and paper industry in Wuhan——The first level indicators							
一级指标 Top indicator	综合指标值 Synthetical indicator value	隶属等级 Membership grade	隶属度 Membership				
			优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Bad	极差 Very bad
原材料输入 Raw material input	1	优	1	0	0	0	0
水资源输入 Water input	1	优	1	0	0	0	0
能源输入 Energy input	0.782	良	0	1	0	0	0
原材料使用 Raw material use	1	优	1	0	0	0	0
水资源使用 Water use	1	优	1	0	0	0	0
能源使用 Energy use	0.727	良	0	1	0	0	0
污染物排放 Pollution discharge	0.932	优	0.785	0.215	0	0	0
清洁生产 Cleaner production	0.719	良	0	1	0	0	0
污染物治理 Pollution treatment	0.951	优	1	0	0	0	0
资源持续利用 Resources sustainable use	0.742	优	0.685	0	0	0.268	0.047

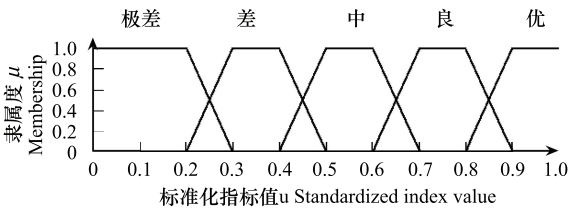


图 5 隶属函数示意图

Fig. 5 Subordinate function schematic diagram

表 6 武汉造纸业资源代谢分析指标体系——二级指标

Table 6 Indicator system of resources metabolism of pulp and paper industry in Wuhan——The second level indicators

二级指标 Secondary indicator	标准化值 Standardized value	隶属等级 Membership grade	隶属度 Membership				
			优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Bad	极差 Very Bad
原材料输入生态效率 Eco-efficiency of raw materials input	1	优	1	0	0	0	0
水资源输入生态效率 Eco-efficiency of water input	1	优	1	0	0	0	0
能源输入生态效率 Eco-efficiency of energy input	0.782	良	0	1	0	0	0
单位产品原材料消耗量 Material consumption per product	1	优	1	0	0	0	0
单位产品新鲜水消耗量 Fresh water consumption per product	1	优	1	0	0	0	0
单位产品能源消耗量 Energy consumption per product	0.727	良	0	1	0	0	0
COD 排放生态效率 Eco-efficiency of discharge of COD	1	优	1	0	0	0	0
氨氮排放生态效率 Eco-efficiency of discharge of NH ₃ -N	1	优	1	0	0	0	0
单位产品 COD 排放 COD discharge per product	1	优	1	0	0	0	0
单位产品氨氮排放 NH ₃ -N discharge per product	0.93	优	1	0	0	0	0
污染物达标排放率 Compliance rate of pollution discharge	0.743	良	0	1	0	0	0
清洁生产达标率 Compliance rate of cleaner production	0.719	良	0	1	0	0	0
污染物治理率 Pollution treatment rate	0.951	优	1	0	0	0	0
可再生资源使用率 Renewable resources using rate	0.92	优	1	0	0	0	0
再生材料使用率 Reuse materials using rate	1	优	1	0	0	0	0
中水回用率 Recycled water using rate	0.285	差	0	0	0	0.85	0.15

2.4 问题树模型构建

为了直观地辨识系统的资源代谢水平及其所存在的问题。根据上述资源代谢指标体系及其模糊综合评价的结果,构建武汉市造纸业资源代谢分析问题树模型(图 6)。在模型中,每一个上一级指标的资源代谢水平都是由其节点下指标的资源代谢水平所决定的,以全国造纸行业平均水平为参照值,其中评级为优的指标达到或者超过全国平均水平,评级为良、中、差、极差的指标分别表示了与全国平均水平相差的程度。每一评级等级对应一种图样(图 6)。

3 数据分析

3.1 代谢结构分析

从资源流图(图 3)可得,武汉市造纸业三大生产部门——制浆、造纸、纸制品制造输入原材料量比例约为 33:48:19;输入能量比例约为 80:16:4;输入水资源量比例约为 65:34:1。三个部门的产品产量比例约为 32:45:23;污染物排放量比例约为 69:29:2,其中 COD 排放量比例约为 54:45:1,SO₂ 排放量比例约为 90:8:2,烟尘排放量比例约为 58:34:8,氮氧化物排放量比例约为 86:11:3;废水排放量比例约为 66:33:1,除了原材料和产品外,其余资源均表现出从产业链上游到下游逐渐减少的趋势,反映出造纸业能耗、水耗、污染物排放量集中在产业链中上游,其中制浆和造纸部门在能耗、水耗、污染物排放及废水排放方面是主要的问题部门。武汉市

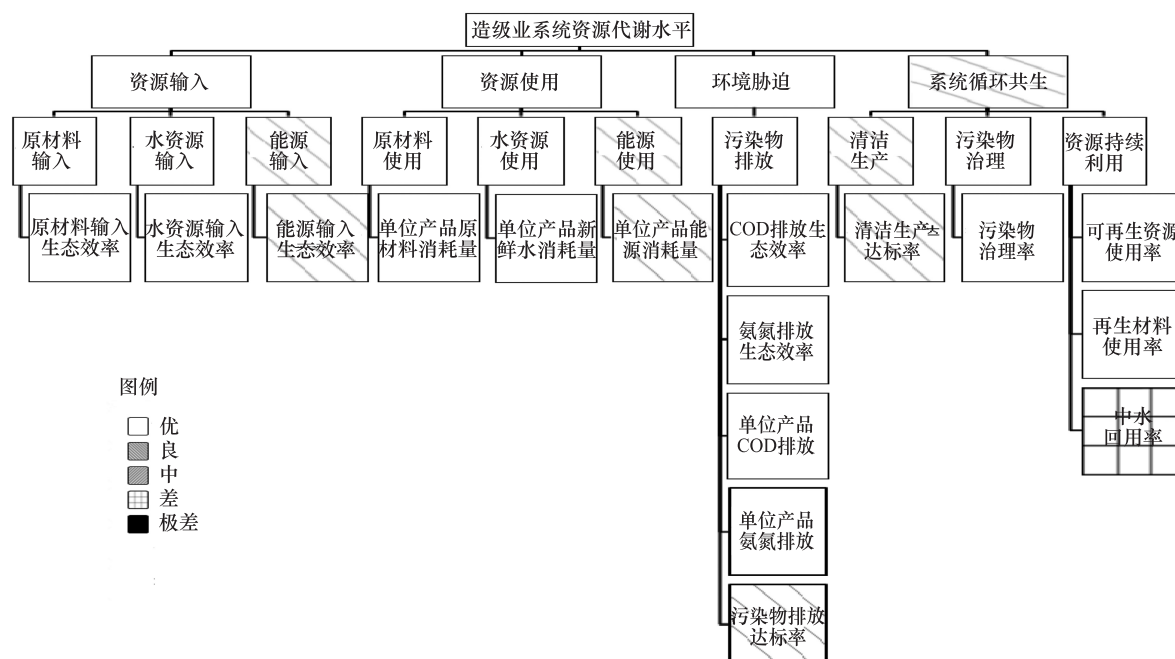


图6 武汉市造纸业资源代谢分析问题树

Fig. 6 The assessment tree of resources metabolism analysis of the pulp and paper industry in Wuhan

造纸业木浆、草浆、废纸浆的比例约为 10:13:77,而同期全国 3 种浆的比例为 22:19:59^[10]。相比之下,武汉市造纸业废纸浆使用比例优于全国平均水平。

3.2 代谢水平分析

从资源代谢分析问题树图中可以看出,武汉市造纸业资源代谢综合能力评级为优,但与全国造纸业的平均水平还有一定距离,相差 10.3%。资源输入、资源使用、环境胁迫指标综合分析等级为优,基本与全国造纸行业平均水平持平。涉及原材料及水资源代谢的两个一级指标全部为优,说明武汉市造纸业的原材料及水资源使用强度及其输入效率达到全国平均水平;涉及能源代谢的两个一级指标全部为良,说明武汉市造纸业在能源输入效率和单位产品能源消耗方面还有提升的空间;涉及污染物排放的一个一级指标评级为优,说明武汉市造纸业污染物排放控制水平达到全国造纸行业平均水平,但其二级指标污染排放达标率等级为良。系统循环共生能力与全国平均水平还有相当距离,相差 20.4%。在涉及造纸业生态系统内部资源循环共生的 3 个一级指标中,清洁生产评级为良,污染物治理及资源持续利用评级为优,但中水回用率评级为差,与全国平均水平相差 71.5%。说明还需进一步提高武汉市造纸业的清洁生产达标率,特别需要努力提高系统的水资源持续利用水平。

4 结论与讨论

通过对武汉市造纸行业资源代谢结构及其基于模糊综合评判的问题树模型分析,可得武汉市造纸业资源代谢总体水平与全国造纸行业平均水平相比等级为优,主要结论及问题如下:

- (1) 武汉市造纸业能耗、水耗、污染排放方面的主要问题出现在制浆和造纸部门;
- (2) 武汉市造纸业与全国平均水平比较,其废纸浆利用比例优于全国平均水平;
- (3) 从资源输入输出分析,原材料输入效率和利用强度、水资源输入效率和利用强度、污染物控制水平等已达到全国平均水平,能源输入生态效率以及单位产品的能源消耗等与全国造纸行业平均水平比较具有一定的差距,需要进一步提高;
- (4) 从系统循环共生分析,企业清洁生产达标率还有提升的空间,水资源持续利用水平与全国造纸业平均水平差距较大;特别是水资源循环利用方面急需改善;

(5) 由于数据支持的限制,本文只对照全国造纸行业的平均水平进行了分析,下一阶段将逐步开展参照行业标准以及行业先进水平进行深入系统分析,将有助于该行业资源代谢功能的进一步提升。

致谢:作者十分感谢周伟奇研究员对本文英文摘要的修改和建议,以及李友明教授、毛显强教授、李军副教授、徐卫华副研究员、王宣同高工、李金香高工等对本文确定权重工作的大力支持。同时感谢评审专家对本文提出了很好建议。

References:

- [1] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis. New York: Lewis Publishers, 2004.
- [2] Shi X Q. A theoretical framework on ecological management for industrial resource. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(6): 80-86.
- [3] Wuhan Environmental Protection Bureau. Wuhan Environmental State Bulletins in 2007. (2008-04-08) [2011-07-20]. <http://www.whepb.gov.cn/frontpage/pubinfo/PubinfoDetail.action?id=0000000000000022291>.
- [4] Wuhan Bureau of Statistics. Wuhan Statistical Yearbook 2008. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [5] Graedel T, Allenby B. Industrial Ecology. 2nd ed//Shi H, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 278-291.
- [6] Wu J N, Shi L. Nitrogen metabolism in industrial parks: a case of Yixing economic development zone. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6208-6217.
- [7] Vaidya O S, Kumar S. Analytic hierarchy process: an overview of applications. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [8] Wan N F, Jang J X, Xu J X, Wu J C. Application of the analytic hierarchy process to pest management in the rice fields of Shanghai City. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2997-3002.
- [9] Shi X Q, Zhao J Z, Ouyang Z Y. Urban eco-security and its dynamic assessment method. Acta Ecological Sinica, 2005, 25(12): 3239-3245.
- [10] China Technical Association of Pulp and Paper Industry. Chinese Pulp and Paper Yearbook 2008. Beijing: China Light Industry Press, 2008.

参考文献:

- [2] 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.
- [3] 武汉市环境保护局. 2007 年武汉市环境状况公报. (2008-04-08) [2011-07-20]. <http://www.whepb.gov.cn/frontpage/pubinfo/PubinfoDetail.action?id=0000000000000022291>.
- [4] 武汉市统计局. 武汉统计年鉴 2008. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [5] 格雷德尔, 艾伦比. 产业生态学 (第二版)//施涵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004: 278-291.
- [6] 武娟妮, 石磊. 工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例. 生态学报, 2010, 30(22): 6208-6217.
- [8] 万年峰, 蒋杰贤, 徐建祥, 吴进才. 层次分析法在上海市农田有害生物治理中的应用. 生态学报, 2005, 25(11): 2997-3002.
- [9] 施晓清, 赵景柱, 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): 3239-3245.
- [10] 中国造纸学会. 中国造纸年鉴 2008. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.