

# 流域清洁生产及其潜力分析方法研究

谢明辉, 乔琦, 孙启宏

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

**[摘要]** 运用清洁生产的基本原理与方法,在兼具工业生态学理论、循环经济理论、可持续发展理论、系统论等理论上,结合我国清洁生产实践要求,将清洁生产的实施层次由企业内部提升为流域层次,探讨了流域清洁生产的理论基础,构建了基于系统动力学的流域清洁生产潜力分析方法。以辽河流域为案例,较系统地分析了该流域的清洁生产潜力,计算了流域清洁生产对于减排的贡献,并基于以上结果提出了辽河流域清洁生产的总体行动路线。

**[关键词]** 流域清洁生产;潜力;系统动力学

**[中图分类号]** F426.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)03-0070-10

## 1 前言

目前,清洁生产在企业层面上的实践已取得了显著的成果,包括清洁生产技术评价、清洁生产标准等研究,但随着经济的发展与环境问题的复杂化,越来越需要在更高层次和更大范围内实现清洁生产,因此,区域和流域清洁生产研究应运而生。其中,区域清洁生产研究范围较小,主要集中在工业园区层次,并已初步形成了一些理论基础<sup>[1-3]</sup>。而流域清洁生产由于所面对的流域范围较大,其中涉及污染跨界和上下游、左右岸等问题,从可查阅的国内外文献来看,有关流域清洁生产的概念提及甚少。孟伟等<sup>[4-8]</sup>曾在《流域水质目标管理技术研究》中提及对流域中不同使用功能和保护目标的地表水域应实施水质分级管理,对于流域内技术水平与排放限值要求不同的企业实施分级环境经济政策,以促进流域清洁生产与循环经济的整体实现,这是国内首次从宏观意义上提及流域清洁生产的概念。

流域清洁生产是将工业生态学 and 循环经济理论相结合,同时融入系统论的方法,将清洁生产的对象拓展到流域社会经济系统,从流域经济活动入手,包括流域总体布局、经济发展规划、产业结构调

整等方面,结合流域水质管理目标和流域水环境容量,兼顾上下游经济发展需求,以控制区-控制单元体系为框架,提出合理的行业清洁生产配置方案,实现流域资源的合理利用、废物的资源化和最小化,促进流域经济社会的可持续发展。

## 2 流域清洁生产的概念

### 2.1 内涵

相比企业清洁生产、行业清洁生产和区域清洁生产,流域清洁生产需要考虑的因素更为繁多,各因素之间的关系也相对复杂。不但要考虑流域水质管理目标和水资源承载力,还要兼顾流域上下游经济发展需求,通过对流域重点行业的过程控制与监管,实现源头削减甚至消除污染物产生的目标。同时作为一个动态体系,流域清洁生产更不容易控制和掌握。因此,在流域内全面推行清洁生产,是对污染末端治理和传统发展模式的根本变革和创新,是走新型工业化道路、促进企业经济效益和环境效益双赢、实现流域可持续发展的重要途径。

1) 可持续内涵。流域清洁生产以可持续发展为指导,以维护生态环境良性发展为原则。在发展的同时要保证和促进流域水资源的完整性和

**[收稿日期]** 2012-12-17

**[基金项目]** 中国工程院院士科技咨询专项(9631013);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07202-001-005)

**[作者简介]** 谢明辉(1981—),男,安徽淮北市人,助理研究员,主要从事清洁生产技术和政策研究;E-mail: huibird82@163.com

生态环境的良性循环,要做到资源、环境与经济的协调发展。

2)社会经济内涵。流域清洁生产跟社会经济发展水平是紧密联系的,是以可预见的社会经济发展水平为依据的。社会经济发展水平决定着用水结构,也影响着流域清洁生产水平的高低。同时,清洁生产技术水平的合理优化配置是一种典型的社会经济活动,体现了清洁生产的经济价值所在,提升了流域经济资源优化的合理性。

## 2.2 特征

流域清洁生产不同于企业清洁生产,但又兼具区域清洁生产的部分特征,主要特征如下所示。

1)系统性。流域清洁生产除涉及环境系统外,还包括社会经济系统,其优化配置方案的合理性与流域经济水平密切相关,这点在前文已有论述,在此不再累述。

2)针对性。流域清洁生产更多关注的是水体污染物,这点与区域清洁生产有所不同,区域清洁生产不仅关注水体污染物还需关注大气污染物和固体废物,但流域清洁生产针对的主要是水体污染防治,这是由流域污染防治的特征所决定的。流域清洁生产通过对清洁生产方案的优化配置,实现水资源的高效利用和源头削减水体污染物的产生,从而减少对流域水体污染物的排放。

3)跨界性。流域一般具有跨市、跨省甚至跨经济带的特征,如长江、黄河流域等地跨我国东、中、西部3个经济带,既有自然条件的差异,又存在着上、中、下游区域经济发展的差异。因此,在实施流域清洁生产时,必须充分考虑这些特点,遵循“分区、分级”的理念,以反映流域清洁生产在区域差异、水质差异下实施的差异性。

4)优先性。流域水体自上而下具有累积性,即下游的每个行政区域不仅接受了上游排出的污水(源头区域除外),而且还排出了污染本行政区域和下游河段的污水。一般来说,越往下游走,水质越坏。因此,流域清洁生产一般优先配置在流域上游或是水质标准较高的区域,特别是在诊断识别过程中,对上、中、下游同行业的产污强度的比较需要区别对待。

## 2.3 理论基础

流域清洁生产是基于工业生态学、循环经济理论和可持续理论,并结合系统论分析方法,指导在流域层面实施的清洁生产。因此,其理论基础主要

包括工业生态学、循环经济、可持续理论和系统论四大块。

1)工业生态学。1989年9月,美国物理学家、哈佛大学教授Robert等发表文章<sup>[9]</sup>,从生态系统角度提出了产业生态系统和产业生态学的概念。产业生态学主要研究社会生产活动中自然资源从源、流到汇的全代谢过程及其组织管理体制,以及生产、消费、调控行为的动力学机制、控制论方法及其与生命支持系统的相互关系,通过重组和调整工业系统,将环境因素整合到经济过程之中,使之与生物圈相兼容,从而能持久生存下去。由于工业生产与生态环境之间的关系是关注的热点问题,所以目前对于产业生态学的研究集中在工业生态学方面<sup>[10-12]</sup>。

2)循环经济。20世纪90年代,人们认识到当代资源枯竭和环境问题日益恶化的根本原因是由于人类以高开采、低利用、高排放为特征的线性经济模式造成的。为此提出应在资源环境不退化甚至得到改善的情况下促进经济增长,建立一种以物质闭环流动为特征的经济,即循环经济。循环经济把经济活动组织成为一个“资源—产品—再生资源”的反馈式流程,所有资源和能源得到合理和持久的利用,从而把经济活动对自然环境的影响降低到尽可能小的程度。循环经济本质上是一种生态经济,它运用生态学规律指导人类社会的经济活动,可以为优化人类经济系统各个组成部分之间的关系提供整体性的思路,为工业化以来的传统经济转向可持续发展的经济提供战略性的理论范式,从而从根本上消解长期以来环境与发展之间的尖锐冲突<sup>[13]</sup>。

3)可持续理论。可持续发展是我国的基本国策,也是我国必须长期坚持的经济社会发展战略目标。它要求在发展经济的同时,正确处理经济发展与人口、环境、资源的关系,使环境和资源既能满足经济发展目标的需要,又能满足人民日益增长的物质和文化生活的需要。清洁生产实行源头削减和对产品生产实施全过程控制,可以避免和减少因末端治理不彻底而造成的二次污染;减少需要末端处理的污染物总量和处理设施的建设规模,降低一次性投资和运行费用,可以带来显著的经济效益;改善职工的劳动条件和工作环境,有效保护职工安全,减轻对职工健康的不良影响,提高职工劳动积极性和工作效率,同时也保护了公众健康;有利于

企业树立良好的社会公众形象,提高企业的环保声誉和产品竞争能力<sup>[14,15]</sup>。

4)系统论。系统论是流域清洁生产研究的重要理论基础之一,这是由于流域清洁生产是由经济系统和环境系统中多个不同的要素构成的。各个要素复杂多变,因此整个系统存在较大的不确定性,需要从系统论的角度去解决问题。系统论的创始人贝塔朗菲给系统论的定义是“处在一定相互联系中与环境发生关系的各组成部分的整体”。这其中包含两层含义:一是系统由互相联系的要素构成;二是系统与环境发生关系,它不是孤立的。要素是组成系统的各个部分,是构成系统的实体,离开要素,系统就不存在。但是系统又不是要素的简单相加,它还包括要素间的相互关系,要素有机地组织起来才构成系统整体<sup>[16]</sup>。

### 3 流域清洁生产潜力分析方法

流域清洁生产潜力是指通过流域行业清洁生产优化配置,在整个流域实现减排中清洁生产的贡献情况,而由于使用清洁生产技术降低污染负荷导致末端处置设施稳定性和长期性提升而产生的间接效益,则不在研究范围之内。目前,清洁生产潜力分析方法主要集中在微观层次,即单个企业或行业层面,如清洁生产审核、物质流分析、绩效分析、情景分析、最佳可行性技术分析和生命周期评价等,但这些方法都有各自的适用性。而对于宏观层次(区域、流域)的清洁生产潜力分析方法目前尚无系统研究,考虑到流域清洁生产作为一个经济和环境耦合的复杂系统,选用系统动力学这一常用于解决复杂系统问题的方法去分析流域清洁生产潜力是可行的,因此笔者拟采用系统动力学的方法对流域清洁生产潜力定量分析方法进行探讨。

系统动力学是一种研究复杂系统行为的方法,适于研究随时间变化的复杂系统问题,最初由麻省理工学院 Jayw Foster 教授于 1956 年创立。它基于系统论,并吸收控制论、信息论的精髓,融结构与功能、物质与信息、科学与经验于一体,沟通了自然科学与社会科学的横向联系,是一门交叉性、综合性很强的学科。系统动力学从系统的微观结构入手,构造系统的基本结构并建立模型,进而借助计算机模拟技术分析系统的动态行为,预测系统的发展趋势,并可作为实际系统特别是社会、经济、生态、资源复杂大系统的“实验室”。模型的主要功能在于

向人们提供一个进行学习与政策分析的工具。目前,系统动力学已广泛应用于社会、经济、生态、科研、医学等各个领域<sup>[17]</sup>。

#### 3.1 模型设计

系统动力学虽然应用于水环境领域的研究较多,但这些研究都仅限于流域水资源承载力方面的研究,而对流域清洁生产潜力分析的研究基本没有。因此,本文选用系统动力学,结合情景分析,同时兼顾流域的环境、社会、经济、政策体系的配套管理,构建了流域清洁生产潜力分析的系统动力学模型(SDM-BCPP)。该模型包括一个主体模块和两个辅助模块,主体模块为流域清洁生产潜力分析的基础模块,具有行业普适性;两个辅助模块分别为流域清洁生产诊断识别模块和流域清洁生产趋势分析模块,前者用于识别诊断流域清洁生产的重点行业,后者用于确定模型中的参数变量。三个模块的关系如图 1 所示。

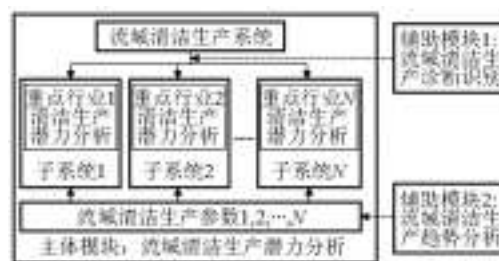


图 1 流域清洁生产潜力分析主体模块与辅助模块的关系示意图

Fig.1 The relationship between main modules and assistant modules of basin cleaner production potential

##### 3.1.1 主体模块:流域清洁生产潜力分析

主体模块由多个独立的子系统组成,每个子系统对应一个行业或子行业的清洁生产潜力分析。每个子系统都由行业产值变化率、万元产值新水耗量、污染物产污强度、污染物进水浓度、污染物削减率、污染设施进水量、废水回用率等变量构成。考虑到水体污染的国控指标为化学需氧量(COD)和氨氮,因此可选择这两个指标为流域清洁生产参数,不同流域应根据实际情况增加或删减相应的特征污染物。其中经济变量(行业产值变化率)一个,其变化趋势一般根据国家产业规划及流域经济发展规划界定;其余全为环境变量,跟流域清洁生产有关的是万元产值新水耗量、产污强度、废水回用



率这几个变量,其余的变量跟末端治理方式有关,子系统结构图如图2所示。

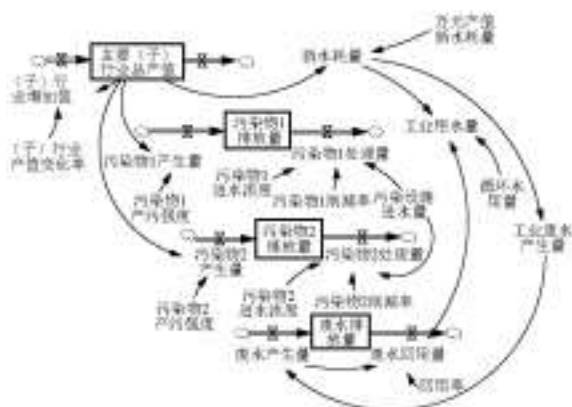


图2 子系统清洁生产潜力分析系统动力学模型图  
Fig.2 The system dynamics model of cleaner production potential for subsystem

主体模块应层层分解至具有一定数据可比性且技术集中度较高的子行业层次,以便于进行清洁生产趋势分析。一个独立的子系统包含25个变量参数、9个状态方程、4个速率方程以及大量的辅助方程,其中主要的几个状态方程如下:

$$L(\text{子})\text{行业产值}_k = (\text{子})\text{行业产值}_j + (DT) \times$$

$$(\text{子})\text{行业产值变化率} \quad (1)$$

$$L\text{万元产值新水耗量}_k = \text{万元产值新水耗量}_j + (DT) \times \text{万元产值新水耗量变化率} \quad (2)$$

$$L\text{产污强度}_k = \text{产污强度}_j + (DT) \times \text{产污强度变化率} \quad (3)$$

$$L\text{进水浓度}_k = \text{进水浓度}_j + (DT) \times \text{进水浓度变化率} \quad (4)$$

$$L\text{削减率}_k = \text{削减率}_j + (DT) \times \text{削减率变化率} \quad (5)$$

式(1)~(5)中, $L$ 指某(子)行业; $K$ 为目标年(2015年); $J$ 为基准年(2007年)。

### 3.1.2 辅助模块1:流域清洁生产诊断识别

清洁生产主要通过降低产污强度来实现污染物的源头削减和过程控制,因此产污强度越大的企业应作为清洁生产的重点。此外,考虑到流域污染介质在上下游的累积性,越靠近源头区域、水质功能级别越高的行业应优先实施清洁生产。因此,流域清洁生产主要行业的诊断识别应同时考虑产污强度和所在控制区的水质目标,其重要性与产污强度成正比、与水质标准限值成反比,三者关系如式(6)所示。

$$\text{流域内某行业清洁生产的重要性} = \frac{\text{行业在流域的污染物产生量}}{\text{行业在流域的产值} \times \text{所在控制区的地表水标准限值}} \quad (6)$$

本文从流域污染物产生特征入手,结合流域水质改善目标,提出基于产污强度和水质目标的流域清洁生产诊断方法。该模型可用式(7)表示。

$$I_i = \frac{\sum_{a=1}^x G_{aj}}{\sum_{a=1}^x E_{ai} \cdot K_{aj}} \quad (7)$$

式(7)中, $i$ 为行业类别(1,2,...,n); $j$ 为污染物种类(1,2,...,m); $a$ 为控制区(1,2,...,x); $I_i$ 为行业 $i$ 清洁生产重要度; $G_{aj}$ 为流域 $a$ 控制区内行业 $i$ 的污染物 $j$ 的产生量; $E_{ai}$ 为流域 $a$ 控制区内行业 $i$ 的行业总产值; $K_{aj}$ 为流域 $a$ 控制区水质改善目标中污染物 $j$ 的标准限值。

流域清洁生产诊断识别的具体程序是通过通过对流域内各行业清洁生产重要度的计算,选择重要度较大的行业作为流域清洁生产的主要行业。

### 3.1.3 辅助模块2:流域清洁生产趋势分析

关于流域清洁生产趋势分析,传统的做法是将

行业清洁生产指标(产污强度)与清洁生产标准进行比对,计算出产污强度的降低程度,从而分析清洁生产的发展趋势。但此方法忽视了区域特征对清洁生产技术实施的影响,同时由于清洁生产标准更新速度较慢,多数清洁生产标准已满足不了目前流域清洁生产技术发展趋势的分析要求,特别是达到1级标准的行业。因此,笔者经过大量的调研,从基础数据出发,结合流域“分区、分类、分级”的管理理念,提出了基于目标距离法的流域清洁生产趋势分析,目前该方法在清洁生产方面的应用尚属首次。

目标距离法是一种通过界定预期目标再进行趋势分析的方法,起源于1990年的加权过程中,常用于生命周期评价(LCA)的加权过程,后被发展成为定量评价方法。目标距离法用于生命周期影响评价过程,通过某种环境效应的当前水平与目标水

平(标准或容量)之间的距离来表征某种环境效应的严重性,距离越大,影响越大。对目标既可采用科学目标,如环境干扰的极限浓度或数量,也可采用政策目标(如政府削减目标)和管理目标(各种排放标准、质量标准或行业标准等)。

本文将目标距离法应用到流域清洁生产产污强度的趋势分析中,结合统计学原理,对相同行业、

相同子行业、相同规模、相同企业类别、相同产品的产污强度进行系统分析,通过计算各企业清洁生产产污现状与目标之间的距离,表征其产污强度的降低程度,再通过企业加权、规模加权、子行业加权的方式,得出流域内该行业清洁生产产污强度的降低程度,分析流域内行业清洁生产的趋势,模型可用式(8)表示。

$$R_c = \sum_{X=1}^k \frac{E_X}{E} \left[ \sum_{Y=1}^3 \left( \frac{E_{XYG}}{E_{XY}} \sum_{i=1}^n W_{XYGi} \cdot R_{XYGi} + \frac{E_{XYB}}{E_{XY}} \sum_{j=1}^m W_{XYBj} \cdot R_{XYBj} \right) \right] \quad (8)$$

式(8)中, $X$ 为子行业类别(1,2,⋯,k); $Y$ 为规模类型(1、2、3分别代表大型、中型、小型); $i$ 为A类企业(1,2,⋯,n); $j$ 为B类企业(1,2,⋯,m); $R_c$ 为行业某污染物产污强度降低度; $E$ 为行业产值; $E_X$ 为该行业子行业 $X$ 的产值; $E_{XY}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下的产值; $E_{XYG}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下A类企业产值之和; $E_{XYB}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下B类企业产值之和; $W_{XYGi}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下A类企业 $i$ 在所有A类企业中的产值占比; $W_{XYBj}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下B类企业 $j$ 在所有B类企业中的产值占比; $R_{XYGi}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下A类企业 $i$ 的产污强度降低率,可用公式(9)计算。

$$R_{XYGi} = \frac{C_{XYGi} - \min\{C_{XYGi}\}}{C_{XYGi}} \quad (9)$$

式(9)中, $C_{XYGi}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下A类企业 $i$ 的产污强度。

$R_{XYBj}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下B类企业 $j$ 的产污强度降低率,可用公式(10)计算。

$$R_{XYBj} = \frac{\left( C_{XYBj} - \frac{\sum_{i,j=1}^{n,m} G_{XYGi} + G_{XYBj}}{E_{XY}} \right)}{C_{XYBj}} \quad (10)$$

式(10)中, $C_{XYBj}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下B类企业 $j$ 的产污强度; $G_{XYGi}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下A类企业 $i$ 的产污量; $G_{XYBj}$ 为该行业子行业 $X$ 在规模 $Y$ 下B类企业 $j$ 的产污量。

### 3.2 程序设计

流域清洁生产潜力分析的程序如图3所示。



图3 流域清洁生产潜力分析程序图  
Fig.3 Procedure of basin cleaner production potential analysis

### 3.3 方案设计

流域清洁生产潜力分析的方案设计根据流域经济转型方式的不同,可以分为产业优化方案设计、结构调整方案设计和布局优化方案设计。考虑到结构调整和布局优化是对流域内行业产业系统进行调整布局,包括流域行业集聚区的跨经济带、跨上下游、跨控制区的战略转移等,不仅需要考虑流域清洁生产重点度的变化,还需考虑结构调整和布局优化后污染源与流域间的扩散距离,涉及较多的环境污染机理研究,相关研究内容将在“十二五”水专项中展开。因此,本文仅对产业优化方案下流域清洁生产潜力分析进行研究。

产业优化主要是指通过提高工艺水平,推广清洁生产技术,以实现产业资源能源产出率,减少污染物的产生和排放。具体的情景方案设计如下。

1)方案1:现状方案。保持现有状况不变,即现有清洁生产和末端治理水平不变,模型如式(11)所示。

$$P_o = \sum E_{oi}(1+a_i)^k C_{oi}(1-R_{oi}) \quad (11)$$

式(11)中, $P_o$ 为目标年现状方案下流域(行业)的污染物排放量; $E_{oi}$ 为基准年(子)行业*i*产值; $a_i$ 为(子)行业*i*经济年均增长率; $C_{oi}$ 为(子)行业*i*基准年产污强度; $R_{oi}$ 为(子)行业*i*基准年末端治理设施的削减率

2)方案2:优化方案(清洁生产方案)。指在现有方案的基础上,通过实施清洁生产技术,结合清洁生产趋势分析,逐年降低万元产值新水耗量、COD产污强度和氨氮产污强度,同时综合考虑现有污染处置设施的技术参数,预测分析实施清洁生产对污染物排放量的削减程度,模型如式(12)所示。

$$P_c = \sum E_{ci}(1+a_i)^k C_{ci}(1-R_{ci}) \quad (12)$$

式(12)中, $P_c$ 为目标年优化方案下流域(行业)的污染物排放量; $C_{ci}$ 为目标年(子)行业*i*的产污强度, $C_{ci} = C_{ci}(1-R_{ci})$ 。

3)方案3:综合方案(清洁生产+末端治理方案)。指在现有方案的基础上,通过实施清洁生产技术,降低万元产值新水耗量、COD产污强度和氨氮产污强度,同时对实施清洁生产后的污染处理设施进行趋势分析,提高末端处理设施的COD削减率、氨氮削减率等指标,进一步预测实施清洁生产和提高末端治理对整个流域减排的潜力,模型如式(13)所示。

$$P_{c+t} = \sum E_{ci}(1+a_i)^k C_{ci}(1-R_{ci}) \quad (13)$$

式(13)中, $P_{c+t}$ 为目标年综合方案流域(行业)的污染物排放量; $R_{ci}$ 为目标年(子)行业*i*末端治理设施的污染物削减率。

## 4 案例分析:辽河流域清洁生产潜力分析

### 4.1 辽河流域清洁生产诊断识别

辽河流域水体污染物主要为COD和氨氮,因此以这两个指标来识别诊断该流域清洁生产主要行业。目前,辽河流域内蒙古控制区和吉林控制区不存在工业体系,因此仅需在辽宁控制区识别诊断流域清洁生产主要行业,在同一控制区进行识别诊断时无需考虑水质目标,故可根据产污强度进行识别诊断。结果表明,辽河流域清洁生产主要行业为造纸及纸制品业;啤酒酿造业;黑色金属冶炼及压延加工业;医药制造业;印染加工业;石油加工、炼焦

及核燃料加工业这六大行业(见图4)。

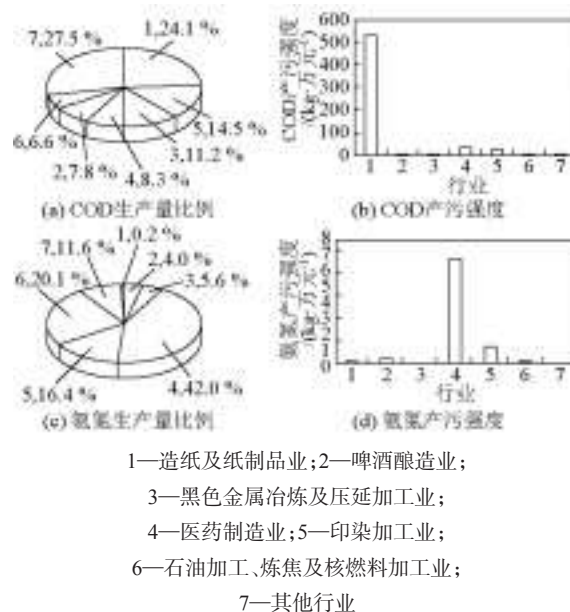


图4 2008年辽河流域主要行业污染物产生量及产生强度比较

Fig.4 Comparison of water pollutants generation and intensity by main industry in Liaoh River basin in 2008

2008年这六大行业工业产值占流域工业总产值的44.2%,COD和氨氮产生量分别占流域总量的72.5%和88.4%。其中,造纸及纸制品业、印染加工业、黑色金属冶炼及压延加工业这3个行业的COD产生量最大,分别占COD产生总量的24.1%、14.5%和11.2%。医药制造业,石油加工、炼焦及核燃料加工业,印染加工业的氨氮产生量较大,分别占氨氮产生总量的42.0%、20.1%和16.4%,医药制造业和啤酒酿造业的COD产生强度也较大。

### 4.2 辽河流域清洁生产潜力分析模型整合

辽河流域清洁生产潜力分析模型主体模块与辅助模块结构如图5所示。其中主体模块中的每一个子行业都有一个如图5下半部分由氨氮排放量、COD排放量和废水排放量这3个状态变量组成的子系统,受篇幅所限,模型结构图只画出了制药行业生物制药子行业的子系统。

### 4.3 辽河流域清洁生产趋势分析

根据辽河流域清洁生产诊断识别结果,结合本文建立的流域趋势分析方法学,辽河流域清洁生产主要行业趋势分析结果如表1所示。



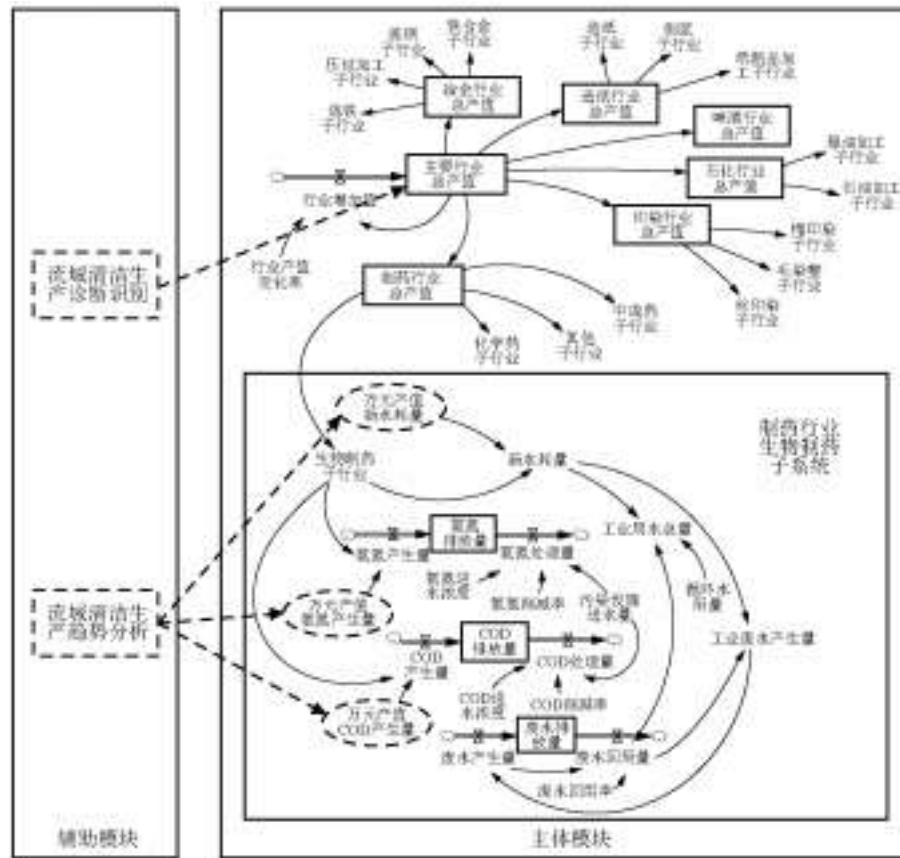


图5 辽河流域清洁生产潜力分析系统动力学模型

Fig.5 The system dynamics model of basin cleaner production potential in Liaohe River basin

表1 辽河流域清洁生产指标趋势分析结果

Table 1 Trend analysis results on cleaner production index in Liaohe River basin

行业	子行业	行业产值变化率	新鲜水耗强度	COD产污强度	氨氮产污强度	COD削减率	氨氮削减率
冶金	炼钢		-17.04	-20.03	-20.76		
	炼铁		-22.70	-19.20	-19.19		
	压延加工	+28 (+5)	-25.65	-30.74	-28.88	+1.6	+7.6
	铁合金冶炼		-23.17	-21.70	-22.80		
造纸	制浆		-4.54	-8.35	-4.55		
	造纸	+20 (+4.6)	-12.29	-17.35	-19.69	+4.7	+8.8
	纸制品加工		-20.21	-17.95	-29.92		
石化	原油加工	+61(+10)	-11.48	-31.57	-38.58	+1.8	+3.5
	石油加工	+11(+2.2)	-8.73	-18.86	-23.94		
啤酒	啤酒	+55(+9)	-12.00	-14.00	-27.00	+0.8	+2.9
制药	化学药		-32.77	-44.73	-43.15		
	其他	+101(+15)	-31.08	-29.60	-61.88		
	中成药	+76(+12)	-64.36	-70.56	-5.40	+2.2	+10.9
	生物制药	+271(+30)	-17.34	-4.32	-5.46		
印染	棉印染		-25	-26	-30		
	毛染整	+72(+10)	0	0	0	+1.7	+4.4
	丝印染		-1	-1	-1		

注:括号中数据为相关产业规划的年均数据;正负号表示在原有的基础上增加或减少

#### 4.4 辽河流域清洁生产潜力分析结果

将表1中的数据代入流域清洁生产潜力分析模型,结果如图6和图7所示。从图6中可以看出,方案2即可实现冶金、造纸和石化的COD减排;而方案3中冶金、造纸、石化、制药更是分别实现了COD的减排,分别为24.08%、18.88%、18.75%和5.52%。考虑到造纸、冶金、石化行业污染物排放量比较大,因此,这3个行业将是辽河流域清洁生产COD减排潜力较大的行业。

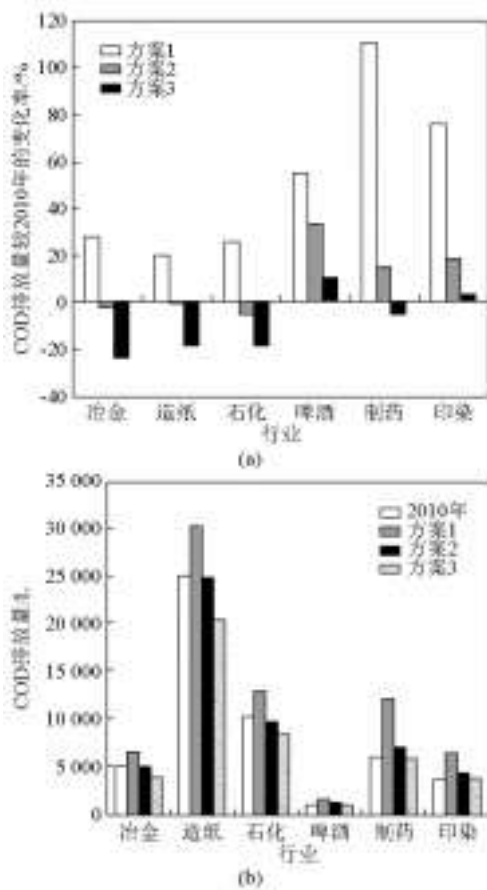


图6 辽河流域重点行业2015年COD排放量较2010年变化情况图

Fig.6 Prediction of COD emission from main industries in Liaohe River basin in 2015 compared with that actually in 2010

其中制药行业由于受益于国家政策,在“十二五”期间飞速发展的同时将带来大量的COD排放。但由于医药行业整体的COD产污强度降低空间较大,因此,在方案3中还是实现了COD减排。

由于啤酒行业工艺流程短,又是我国早期开展清洁生产国际合作的示范行业,且目前辽河流域啤

酒行业的所有企业均已达到了清洁生产一级水平,因此该行业产污强度降低空间不大。同时,目前该行业的COD和氨氮的削减率已经分别达到了95.28%和82.33%,污染物削减率提升空间不大。这两点原因直接导致了该行业COD和氨氮排放量在2015年没有实现较2010年的减排,方案3中氨氮排放量虽然较2010年实现了减排5.42%,但仍低于同期流域减排规划目标。由此可见,在没有更为减污增效的清洁生产技术推广应用之前,该行业不宜作为清洁生产减排的重点行业,应通过产业结构调整的经济手段来控制行业的污染物排放。

印染行业也未能实现COD减排,考虑到产污强度降低空间较大,应积极从生产工艺下手,加强过程控制,加大清洁生产技术的投入,因此,应作为流域清洁生产COD减排的重点行业。

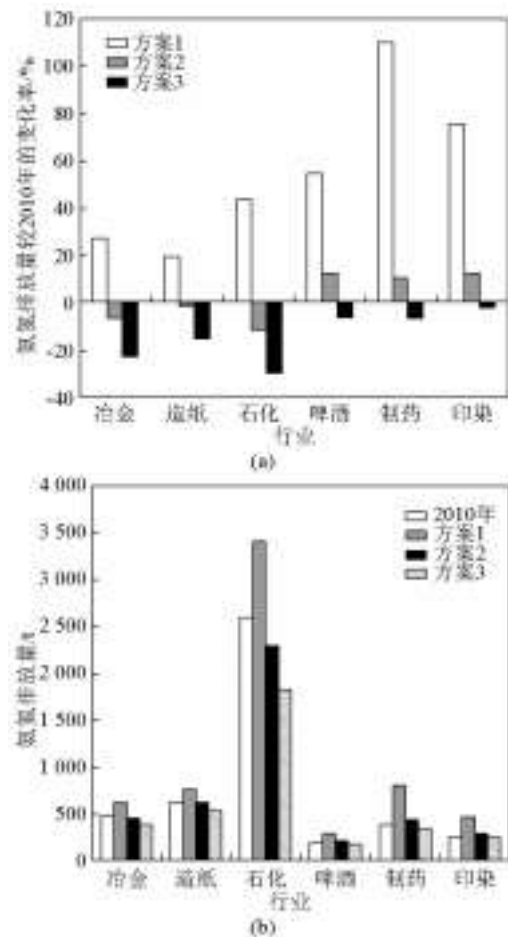


图7 辽河流域重点行业2015年氨氮排放量较2010年变化情况图

Fig.7 Prediction of NH<sub>3</sub>-N emission from main industries in Liaohe River basin in 2015 compared with that actually in 2010



从图7中可以看出,方案2实现了冶金、造纸、石化这3个行业的氨氮减排,而方案3可实现冶金、造纸、石化、啤酒、制药和印染全部6个行业的减排,其较2010年分别减排22.68%、15.13%、29.58%、5.42%、6.00%和2.18%。其中冶金、造纸、石化超过流域规划的整体氨氮减排目标。因此,这3个行业是辽河流域清洁生产氨氮减排潜力最大的行业。

啤酒由于前文所述原因,不作为清洁生产重点行业,印染和制药则应作为流域清洁生产氨氮减排的重点行业。

#### 4.5 辽河流域清洁生产对减排的贡献研究

辽河流域清洁生产主要行业的COD和氨氮减排贡献率对比如表2所示,推进清洁生产对于COD和氨氮的减排贡献率分别在50%和60%之上,明显高于提升末端处置效率的贡献,其中以制药行业最为明显,该行业推进清洁生产对COD和氨氮减排的贡献率分别为80%和84%。对辽河流域清洁生产主要行业污染物排放进行整体方案分析,结果如图8和图9所示。

表2 辽河流域重点行业清洁生产与末端处理的减排贡献率表

Table 2 Contribution rate of cleaner production and treatment in emission-reduction in Liaohe River basin

行业	COD减排贡献% (清洁生产/末端处理)	氨氮减排贡献% (清洁生产/末端处理)
冶金	60/40	67/33
造纸	54/46	63/37
石化	69/31	68/32
啤酒	50/50	70/30
制药	80/20	84/16
印染	57/16	78/22

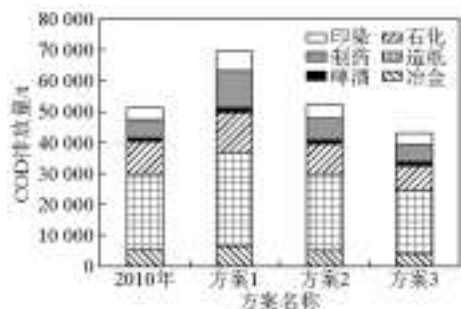


图8 辽河流域不同方案下重点行业COD排放量图  
Fig.8 Comparison of COD emissions from different scenarios by main industries in Liaohe River basin

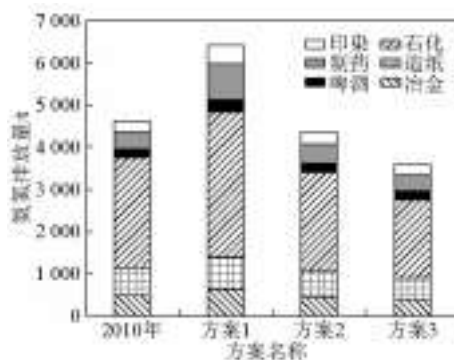


图9 辽河流域不同方案下重点行业氨氮排放量图  
Fig.9 Comparison of NH<sub>3</sub>-N emissions from different scenarios by main industries in Liaohe River basin

按方案1发展,到“十二五”末期,COD排放量将达到69 594 t,较2010年增加36%。采用清洁生产措施(方案2)后,COD排放量降低至52 173 t,较2010年增加2%,可有效降低方案1中COD排放量的25%。采用清洁生产和末端治理措施(方案3)后,COD排放量降低至43 109 t,较2010年减少16%,可有效降低方案1中COD排放量的38%。因此,实施清洁生产和提高末端治理后对应的COD减排绝对贡献率分别为25%和13%,在COD减排方面的相对贡献率为66%:34%。

按方案1发展,到“十二五”末期,氨氮排放量将达到6 430 t,较2010年增加39%。采用清洁生产措施(方案2)后,氨氮排放量降低至4 378 t,较2010年减少5.4%,可有效降低方案1中氨氮排放量的32%;采用清洁生产和末端治理措施(方案3)后,氨氮排放量降低至3 606 t,较2010年减少22%,可有效降低方案1中氨氮排放量的44%。因此,实施清洁生产和提高末端治理对应的氨氮减排绝对贡献率分别为32%和12%,两者在氨氮减排方面的相对贡献率为73%:27%。

#### 4.6 小结:流域重点水污染行业源头减量和过程控制技术路线

基于辽河流域重点污染行业的清洁生产现状和潜力分析,按照分类指导原则,提出各行业推进清洁生产的技术路线。

1)紧抓冶金(压延加工子行业)、造纸(造纸子行业)、石化等清洁生产减排潜力行业,继续实施清洁生产。根据模拟结果中清洁生产减排潜力较大的冶金、造纸、石化等行业,全面实施清洁生产,特别是冶金行业的压延加工子行业、造纸行业的造纸

子行业、石化行业的所有子行业,应从产品工艺技术、设备、管理等方面全面降低污染物产生指标,实现趋势分析中设定的各项清洁生产指标削减目标。

2)针对制药(化学药制品子行业)、印染、造纸(制浆子行业)等清洁生产重点行业,加快实施清洁生产。针对预测模拟中没有实现减排目标的制药、印染、造纸等重点行业,应在行业内积极推进清洁生产,特别是制药行业中的化学药制品子行业、造纸行业中的制浆子行业和印染行业,应加大清洁生产技术的研发和推广力度,加强清洁生产审核,在实现趋势分析中设定的各项清洁生产指标的基础上,进一步降低清洁生产的各项指标,最终实现各项减排目标。

3)经济调控规划环境目标,实现啤酒行业可持续发展。经济调控实现环境目标,通过控制行业经济发展速度,对现有啤酒产业进行全面转型升级,大力提升科技含量,提高附加值,延长产业链,形成产业集群,实现产业集聚化发展。在实现经济增长的同时,集中开展行业清洁生产审核,必要时可提高清洁生产标准中的一级指标要求和行业污染物排放标准要求,减少污染物排放,双管齐下,实现啤酒行业可持续发展。

4)加强制药、造纸、印染行业氨氮处置设施建设,提升氨氮减排能力。目前制药、造纸、印染行业氨氮削减率较低,氨氮减排效果较差。因此应突出技术减排,以技术经济可行为依据,对制药、造纸、印染行业的排放标准、清洁生产标准以及落后产能标准进行流域性更新升级,促使行业提升技术水平,优化发展方式,切实抑制氨氮新增排放量。同时还要狠抓工程减排,形成有效的减排能力,特别是针对列入规划或立项的项目,应在审批上严格要求其增设脱氮除磷设施,对已建项目的污染处置设施进行升级改造,进一步提高氨氮处理能力。

## 5 结语

1)在对清洁生产的基本理论与实践的现状与发展趋势进行分析的基础上,指出流域清洁生产是清洁生产向更高、更深层次上发展的需求,也是流域可持续发展的内在要求,并进一步论述了流域清洁生产的定义、内涵、特征、理论基础和优势。

2)基于系统动力学,构建了流域清洁生产潜力及对减排贡献的定量分析模型——SDM-BCPP模型,该模型包括一大主体模块(流域清洁生产潜力

分析)和两大辅助模块(流域清洁生产诊断识别和流域清洁生产趋势分析)。

3)选择辽河流域进行了案例分析,识别出辽河流域目前实施清洁生产的主要行业为冶金、造纸、石化、啤酒、制药、印染六大行业,其中潜力行业为冶金、造纸和石化,重点行业为制药和印染,调控行业为啤酒;采用清洁生产技术并结合末端治理技术的提升,预计到2015年,COD和氨氮排放量可实现较2010年分别减排16%和22%,其中清洁生产技术和末端治理技术在COD减排和氨氮减排过程中的贡献占比分别为66%:34%和73%:27%。

## 参考文献

- [1] 孙大光, 范伟民. 区域清洁生产政策法规体系框架的构筑[J]. 环境保护科学, 2005, 31(130): 54-55,60.
- [2] 张璐鑫, 于宏兵. 产业园区的区域清洁生产浅议[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7): 90-93.
- [3] 侯华华. 区域清洁生产理论与方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [4] 孟伟, 张楠, 张远, 等. 流域水质目标管理技术研究(I): 控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 1-8.
- [5] 孟伟, 刘征涛, 张楠, 等. 流域水质目标管理技术研究(II): 水环境基准、标准与总量控制[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 1-8.
- [6] 孟伟, 秦延文, 郑丙辉, 等. 流域水质目标管理技术研究(III): 水环境流域监控技术研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 9-16.
- [7] 孟伟, 王海燕, 王业耀. 流域水质目标管理技术研究(IV): 控制单元的水污染物排放限值与削尖技术评估[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 1-9.
- [8] 孟伟, 张远, 王西琴, 等. 流域水质目标管理技术研究(V): 水污染防治的环境经济政策[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 1-9.
- [9] Robert A Frosch, Nicholas E Gallopoulos. Strategies for manufacturing [J]. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.
- [10] 格雷德尔·艾伦比. 产业生态学[M]. 施涵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] 王如松, 周涛, 陈亮. 产业生态学基础[M]. 北京: 新华出版社, 2006.
- [12] 鞠美庭, 盛连喜. 产业生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [13] 奚旦立. 清洁生产与循环经济[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] 张泽勇. 从可持续发展战略角度认识清洁生产技术[J]. 环境保护科学, 2004(3): 41-45.
- [15] 伍京华. 清洁生产管理模式有效实施的经济学分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [16] 霍绍周. 系统论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1988.
- [17] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 3-5.

(下转 102 页)