

工业污染源产排污核算模型及参数量化方法

白璐¹, 乔琦^{1*}, 张玥¹, 李雪迎¹, 刘景洋¹, 许文¹, 孙园园^{1,2}

1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012

2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092

摘要: 工业污染源产排污核算方法及产排污系数是我国工业污染源产排污定量数据获取的重要工具。为进一步提升核算方法的适用性和准确性, 基于工业代谢分析理论, 针对我国工业污染源类型多样、工艺复杂、产排污环节多的特点, 考虑当前工业生产活动中区域分工和专业化生产的现状与趋势, 建立了“分类核算、提取共性、突出个性”的可拆分、可组合的产排污模块化核算模型。针对该模型的主要参数——产污系数、污染治理技术去除率、污染治理设施实际运行率分别提出参数量化方法。利用该模型对我国工业行业产排污核算方法及参数制定进行实践, 结果表明: ①41个工业行业划分为29个流程型行业和12个离散型行业。②41个大类工业行业核算参数包括940个核算环节、1291种主要产品、1575种原料、1521个工艺的31219个废水和废气污染物的产污系数以及101358种污染治理技术去除率。③核算参数的最终核定应经过多级检验和校核。④核算参数受工业生产技术和污染治理技术变动影响, 应及时进行修订或动态更新; 在参数量化方法研究方面需不断深入挖掘产污系数影响因素组合的定量分析技术并扩展其应用, 同时不断完善治理设施实际运行率的表征方式。研究显示, 以工业代谢分析为理论依据建立的产排污模块化核算模型及参数量化方法符合我国工业污染源代谢规律和特征, 已在第二次全国污染源普查、排放源统计调查中全面应用。由于工业生产体系具有动态变化性, 核算模型及参数也应与之同步变化。

关键词: 工业污染源; 产排污系数; 核算参数; 污染治理技术去除率; 污染治理设施实际运行率

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2021)09-2273-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.04.30

Pollutant Generation and Discharge Accounting Model and Parameters Quantification Method in Industrial Sector

BAI Lu¹, QIAO Qi^{1*}, ZHANG Yue¹, LI Xueying¹, LIU Jingyang¹, XU Wen¹, SUN Yuanyuan^{1,2}

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The accounting method and generation and discharge coefficients of industrial pollution sources are important tools for data acquisition of industrial pollution sources in China. In order to further improve the applicability and accuracy of the accounting method, the Pollutant Generation and Discharge Modular Accounting Model (PGDMA Model) was set up based on the analysis of the theory of industrial metabolism. The model, which is of ‘classified accounting, extracting commonness and highlighting individuality’ and with different modules able to split and combine, was established according to the characteristics of various types, complex processes and multiple links of pollutant generation and discharge of industrial pollution sources, and considering the current situation and trend of regional labor division and specialized production in the industrial production activities in China. The quantification methods of the main parameters of the model, such as the pollutant generation coefficient, the removal rate of pollutant end-of-pipe (EOP) treatment technology, and the operation rate of treatment facilities, were put forward. This model was used to study the accounting method and coefficients of pollutant generation and discharge in China’s industrial sector. The results show that: (1) Among the 41 major industries, 29 are process-type industries and 12 are discrete-type industries. (2) There are a total of 940 accounting units, 1,291 main products, 1,575 raw materials and 1,521 processes, with accounting parameters of 31,219 wastewater and waste gas pollutant generation coefficients

收稿日期: 2021-02-03 修订日期: 2021-04-14

作者简介: 白璐(1984-),女,新疆昌吉人,高级工程师,博士,主要从事产业生态学与工业污染防治研究, bailu@craes.org.cn.

* 责任作者, 乔琦(1963-),女,甘肃兰州人,研究员,博士,博导,主要从事产业生态学、清洁生产与循环经济研究, qiaoqi@craes.org.cn

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No.2020YSKY-012); 第二次全国污染源普查工业污染源产排污核算

Supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund of Chinese Research Academy of Environmental Sciences (No.2020YSKY-012); Industrial Pollution Sources Discharge Accounting in the Second National Census of Pollution Sources, China

and 101,358 removal efficiencies of treatment technologies in the 41 industries. (3) The final approval of the accounting parameters shall be subject to multiple levels of inspection and verification. (4) The parameters should be updated in time, as the accounting parameters are affected by the changes of industrial production technology and pollution control technology. It is necessary to further explore the quantitative analysis technology for the combination of influencing factors of pollutant generation coefficient, expand its applications, and improve the characterization methods of the operation rate of the treatment facilities. The research shows that PGDMA Model and parameter quantification method based on industrial metabolism analysis conform to the metabolic rules and characteristics of industrial pollution sources in China. The results have been fully applied in the second national pollution source census and discharge source statistical survey system of China. Because of the dynamic change of industrial production system, the accounting model and parameters should also keep updating.

Keywords: industrial pollution sources; pollutant generation & discharge coefficients; accounting parameters; average removal rate of treatment technology; actual operation rate of terminal treatment facilities

工业污染源产排污量的获取是工业污染防治管理体系的基础性工作,对掌握我国工业污染源的数量、行业和地区分布情况,以及制定相关的环境管理政策有重要意义^[1-5].工业污染源产排污系数法是污染源产排污量获取的主要方法和重要工具.我国的工业污染源产排污系数研究工作起步于20世纪90年代,在污染源清单编制、环境统计及历次污染源普查和调查中发挥了重要作用^[6-10].1996年至今,国内先后开展过三次大规模产排污系数的制修订^[11],产排污核算方法和系数制定方法也随着对工业生产认识程度的深入而逐步改进.

我国工业化发展阶段的变化^[12]决定了不同时期工业生产的工艺技术水平、产品结构及污染治理水平的同步发展,具体表现在以下4个方面:①工业体系完整度高,与国际标准产业分类(ISIC Rev. 4)相比,我国的国民经济行业分类不仅行业全覆盖,在制造业分类方面比ISIC Rev. 4更为详细^[13];②工业生产链条化,区域分工和专业化生产趋势愈加明显,传统长流程工艺逐渐模块化;③技术革新快,以合成氨生产为例,由于原料、工艺路线的改进升级,2017年采用烟煤、加压气化制氨工艺生产合成氨,每吨合成氨石油类产生量比2007年下降了82.3%^[14];④随着生态环境执法及监管力度的不断加强,企业治污能力整体提升,但同一治理技术在同行业不同区域、不同企业间运行状态可能有所不同,同类型排污企业排放量的个体差异明显.

工业代谢是工业生产中将原材料(生物质、燃料、矿物质、金属等)转化为产品,并产生废物的物理化学转换过程的集合^[15-18].开展工业代谢研究,通过识别和追踪转化过程中某一研究对象(物质或能量)的变化(代谢),以定量反映其所在工业体系的运行机制,利用该运行机制进一步调节和优化代谢关系,以达到保护生态环境、实现可持续发展的目的^[19-24].

工业生产和代谢过程异常复杂,从污染物产生到排放涉及输入、转化、治理和输出等几个基本过程.借助物质流分析等研究工具对工业污染物来源及代谢途径的定性定量分析结果显示,产排污规律因工业生产过程的差异而有较大差异^[25-33].排放量核算方法的建立是基于对不同生产过程产排污规律的认知并对其量化的过程,即在对工业生产及污染物的产生、排放路径识别的基础上开展代谢量(产生量及排放量)的定量化研究过程.从工业代谢角度看,污染物的最终排放经历了从产生到去除的过程,排放量取决于产生量与去除量2个变量.产生量一般由污染源的主要活动水平,如产品、工艺、原料、规模等决定.污染物的去除量则主要受治理技术去除率以及污染治理设施运行状态等双因素影响,由此建立去除量核算的“双因素法”.由于企业的生产负荷状态、管理水平、对环保的重视程度等原因导致同一种治理技术在同一行业不同企业内的处理效果、运行状态会有所差异.这种差异应通过对治理设施运行状态的量化以实现对企业实际污染物去除率的动态校正,从而体现企业排放量的个性化差异.

该研究以工业代谢为理论基础,在深入分析我国当前工业生产特征和产排污规律的基础上,提出并构建了符合工业生产和运营实际的产排污模块化核算模型,重点针对核算单元的判定、产污水平影响因素组合识别、核算参数的量化制定,建立了工业污染源产排污核算方法,以期对排污个体在开展产排污量统计时提供一套统一的、标准化的核算工具奠定基础.

1 工业污染源产排污模块化核算模型构建

1.1 产排污模块化核算模型

工业生产和污染治理既是一个有机整体,又是存在上下游物质能量代谢关系的2个相互耦合(关联)的独立过程.研究污染物产排量的核算与产排污系数制定方法时,需根据研究对象(不同行业)的代谢

特征,建立具有高度适应性的核算方法.工业污染源产排污模块化核算模型是一个分类核算模型,其通过提取生产活动的共性以及突出不同生产过程和治理过程的个性,将工业生产和治理过程中的显著性要素与污染物的产生和排放建立关联.

核算模型的建立应遵循以下5个原则:①实用性原则,应满足和服务于产排污量核算的基本需求;②科学性原则,应能够反映出各类行业、不同生产情况污染物的产排污规律;③代表性原则,应能代表行业产污和治理的平均水平;④全面性原则,应覆盖所有工业行业以及各行业产生、排放污染物的所有环节;⑤可操作性原则,核算方式的表达(公式)应简洁明了,便于理解和使用.

通过核算单元的筛选与产污水平影响因素及治理技术的识别,确定某一行业的影响因素组合,在此基础上建立该行业的产排污模块化核算模型(Pollutant Generation and Discharge Modular Accounting Model,简称“PGDMA模型”).核算单元指生产工艺中可独立生产运行且产生排放污染物的生产工序的集合(也称为产污工段),是工业污染源产排污量核算的最基本单元,计算公式:

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{WD_i} + \sum_{j=1}^n P_{FD_j} \quad (1)$$

$$P_{WD_i} = f(x_p, x_m, x_t, x_s, x_a)_{WD_i} \quad (2)$$

$$P_{FD_j} = f(x_p, x_m, x_t, x_s, x_a)_{WD_j} \quad (3)$$

$$P_E = P_G \times k \times \eta \quad (4)$$

$$P_D = P_G - P_E = P_G(1 - k \times \eta) \quad (5)$$

式中: P_G 为污染物产生量,t/kg; P_{WD_i} 为某一行业核算单元*i*的产污量,是该行业核算单元*i*的产品、原料、工艺、规模和其他条件的函数,t/kg; P_{FD_j} 为通用核算

单元*j*(如锅炉等)的产污量,是通用核算单元*j*的产品、原料、工艺、规模和其他条件的函数,kg或t; x_p 为产品; x_m 为原料; x_t 为工艺; x_s 为规模; x_a 为其他条件(如地质条件等); P_E 为污染物去除量,kg或t; k 为污染治理设施实际运行率,%; η 为污染治理技术平均去除率,%; P_D 为污染物排放量,kg或t.

1.2 产排污模块组建方法

1.2.1 核算单元的判定方法

1.2.1.1 基于工业代谢的行业类型划分

我国工业体系门类全、产品种类多,生产工艺类型多样且复杂.依据GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》,工业行业包含41个大类、666个小类行业.以往按照小类行业逐一制定产排污系数的方法虽然能实现行业全覆盖,但由于部分行业产排污规律存在一致性或相似性必然造成核算体系的冗余.在研究建立产排污核算方法时,更宜关注生产活动对产排污的影响而非工艺或产品本身.为提高核算效率、降低系数冗余度,应对工业行业通过进一步的识别和归类,实现“提取共性、分类核算”.

按照生产过程中加工方式的不同,该研究将工业行业依据工业生产及产排污规律的一致性或相似性划分为流程型生产和离散型生产(见图1).其中,流程型生产是通过对原材料采用物理或化学方法以批量或连续的方式进行生产的过程;离散型生产是对多个零件装配组合的加工生产过程,主要发生物料物理性质(形状、组合)的变化.流程型生产与离散型生产的产排污特征对比如表1所示.以物质代谢规律为视角,流程型和离散型行业的分类更适合于工业生产过程与污染物产排污规律之间的相关性分析.

1.2.1.2 核算单元的多重筛选准则

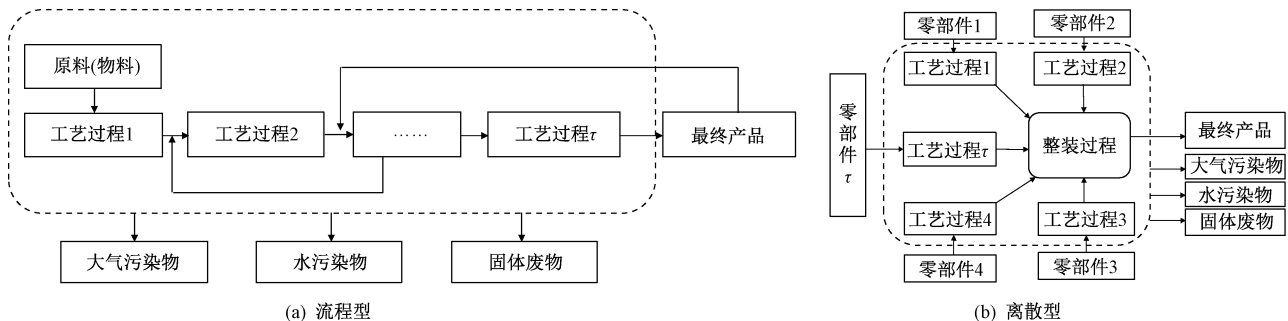


图1 流程型生产与离散型生产的代谢特征示意

Fig.1 Schematic diagram of industrial metabolism characteristics of process production and discrete production

目前国内三版产排污系数按照其制定的基准年,可分为“96版”(即1996年出版的《工业污染物产生和排放系数手册》)系数、“07版”(即2007年第一次

全国污染源普查制定发布和使用的“一污普版”)系数和“17版”(即2017年第二次全国污染源普查制定发布和使用的“二污普版”)系数.将“96版”“07版”

表1 流程型生产与离散型生产的产排污特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of pollutants generation and discharge between process production and discrete production

项目	流程型生产	离散型生产
代谢特征	长流程,生产工序多且以物理化学反应为主	短流程,生产工序少且以物理变化为主
产排污环节	产排污环节因行业、产品、工艺和原料不同而差异较大	存在大量通用、共性的产排污环节(如喷涂、电镀等)
主要工艺过程	提炼、提纯、合成等	改变物料形状和尺寸,包括车、钳、铣、刨、磨、铸造、锻压、焊接、吹塑等过程;提高物料物理性能,包括热处理、电镀、涂装(喷涂)等表面处理过程
污染物	污染物种类相对较多,废水和废气污染物偏多	涉及的污染物种类相对较少,固体废物偏多
代表性行业	化工、有色金属行业	机械加工、电子产品制造行业

“17版”系数进行比较发现,目前我国工业生产活动逐渐体现出区域分工和专业化生产的趋势,细化的、符合企业实际生产情况的核算需求日益凸显^[11]。以往多数行业在系数制定时对影响因素中“工艺”的识别筛选仅考虑典型的全流程工艺,但实际上存在部分

工序由独立生产运行的企业完成的情况^[34-35]。因此,建立符合专业化分工背景下的模块化核算方法,是产排污核算方法优化的重要方向。PGDMA模型可以满足不同核算单元按照实际生产状况“可组合、可拆分”的核算需求。

该研究通过综合评估我国工业生产活动中区域分工和专业化生产的现状与趋势,根据流程型和离散型生产代谢特点,分别建立了多准则核算单元筛选方法。其中,流程型行业核算单元的判定旨在符合产品生产过程与企业运营状态的一致性,离散型核算单元的判定旨在提取共性产污环节,以满足不同产品相似生产过程的核算需求。

流程型生产核算单元判定准则:①可测量准则。核算单元需具备污染物采样和测量的条件。②现实性准则。核算单元须涵盖现实中运营的企业或企业内部独立运行的车间。对于没有污染物产生的工艺过程,无需作为核算单元。理论上,核算单元数 \leq 工艺过程数。③适度性准则。减少冗余度,避免核算单元拆分过细导致参数获取难度增加,保障核算单元的完整性。当不同工艺过程之间具有水循环、能量梯级利用等关联代谢关系时不可拆分。流程型生产过程核算单元判定如图2所示。

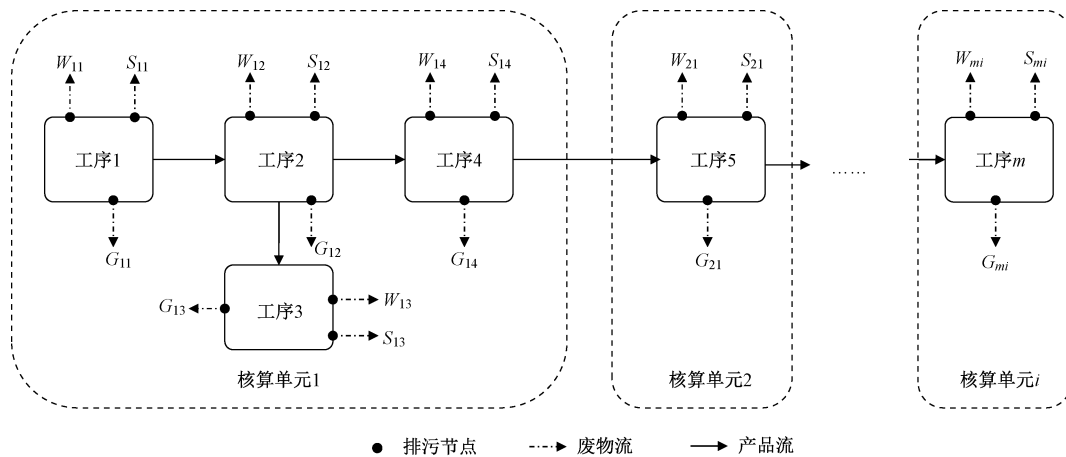


图2 流程型行业核算单元判定示意

Fig.2 Schematic diagram of separation of accounting unit for process industry

离散型生产核算单元提取准则:①目的性准则。基于污染物产生量核算对核算单元进行提取,重点关注产污量或环境影响较大的工艺,如表面处理、涂装、焊接、注塑等。②完整性准则。提取后的核算单元应能覆盖生产该产品所需的所有产生污染物的工艺过程。③通用性准则。所提取的核算单元在同行业不同产品产排污特征及产排污量方面应具有相似性或一

致性,满足通用核算需求。

1.2.2 影响因素组合的识别与确定

影响因素组合指某一核算单元内对污染物产生与排放有显著性影响的因素(如产品、原材料、生产工艺、生产规模、治理技术等)的组合。通过影响因素组合,能反映一个独立核算单元中主要的产污环节、产品、工艺、原料和治理技术等基本信息。同一组合

中不同企业相同核算单元的产污强度接近,排放强度则根据企业治理设施的实际运行状况有所不同.最终确立的某一行业影响因素组合是在对行业生产活动及产排污现状充分了解的基础上,基于统计学理论并综合权衡技术与经济可行性的结果.

1.2.2.1 产污水平影响因素

一般情况下生产过程中污染物产生量是产品、工艺、原料、规模等因素的函数[见式(2)(3)].对于任意2个企业中相同的核算单元,只要其产污影响因素组合相同,就可以认为这2个企业相同核算单元产生的污染物质大致相同,可将它们视为同一核算单元进行分析.

1.2.2.2 基于多元统计分析的产污影响因素组合量化确定

对污染物产生的影响因素识别是工业污染源产排污核算体系确立的核心内容,也是核算参数量化研究中的重点和难点.在“07版”系数制造时除个别行业采用物料衡算法计算产污系数(如火电行业的二氧化硫和颗粒物的产污系数)外,其他行业的影响因素组合识别多以定性判断为主,即由对该行业产排污情况掌握和熟悉的专业技术人员根据经验判断划分组合,再咨询相关行业及环保专家确定.受基础数据等条件限制,“17版”系数仍沿用了“07版”系数的定性判断方式,但对其进行了改进:一方面通过开展“07版”系数影响因素组合的适用性评估,为“17版”系数组合的确定提供借鉴;另一方面,开发了基于多元统计分析的产污系数影响因素组合定量识别技术,并在部分数据积累较好的行业开展了探索性应用.在核定、量化产污系数时,通过回归分析建立污染物产生量与某些关键影响因素的相关性及敏感性分析,确立影响因素组合.基于此,运用改良后的方差分析法(阈值逼近法)和决策树方法建立了工业行业产污水平影响因素组合判定方法,并在制糖行业(行业代码134)及非专业视听设备制造业(行业代码395)开展了应用.

1.3 PGDMA模型核算参数量化方法

根据式(1)可知,相比传统核算方法,PGDMA模型沿用了采用产污系数计算产生量的核算方式,而与治理技术和治理水平变化密切相关的排污系数则改用污染治理技术平均去除率和污染治理设施实际运行率双因素表征.由于系数法的构成较之前发生了变化(不再有排污系数),因此该研究中的核算参数包括产污系数、污染治理技术去除率、污染治理设施实际运行率等.

核算参数的制定既需要遵循不同工业行业污染物产生和排放规律,又要实现各行业系数表达与核算体系的统一,因此建立明确的流程和方法十分必要.核算参数的量化流程包括:①依据行业分类结果(流程型/离散型),在对行业发展现状及产排污现状充分了解和掌握的基础上,基于多重准则方法筛选主要核算单元(产污工段),识别确定产污系数主要影响因素以及主要的治理技术,初步建立核算模型框架.②针对不同行业的生产特征和属性,依据行业内企业数量、产排污现状信息等,运用数理统计方法合理确定不同调查组合的样本量并开展调研实测,获取样本数据.③进行数据处理,分别得到个体产污系数及行业平均产污系数、治理技术平均去除率,研究确定污染治理设施实际运行率的核定公式.④开展核算参数的验证,依据验证结果进一步校核修订,最终确定参数数值.

1.3.1 产污系数量化

产污系数是指在一定的技术经济和管理等条件下生产单位产品(或使用单位原料)所产生的污染物质.产污系数量化是将核算单元内某污染物产生量通过单位产品或原料进行表达的过程.通过对某行业、某影响因素组合条件下不同样本企业核算单元个体产污系数的处理(加权平均或统计中位数),得到该影响因素组合条件下的平均产污系数.个体产污系数(R_{β})和平均产污系数(R_c)之间的关系如图3所示.

1.3.1.1 个体产污系数

通过对某一组合条件下某样本企业核算单元不同来源、不同批次样本数据的处理(加权平均或算数平均),得到该组合条件下样本企业的个体产污系数.

个体产污系数的计算公式:

$$R_{\beta} = \sum_{e=1}^y W_e \times (G_e/M_e) \quad (6)$$

式中: G_e 为某一批次采集(或调查)时间内样本污染物的产生量; M_e 为某一批次样本采集时间内产品的总量(或原料总量),单位一般为长度、质量、体积、面积单位等; W_e 为不同批次样本产污系数的权重,若不同批次样本数据来源不同(实测数、历史实测数、模拟数据),则权重可由不同来源数据的原始样本数目比例、数据差异性和质量保证等确定,各批次权重之和为1; y 为总样本数.

1.3.1.2 平均产污系数

某一影响因素组合条件下,平均产污系数的建议表达式见式(7)~(9).

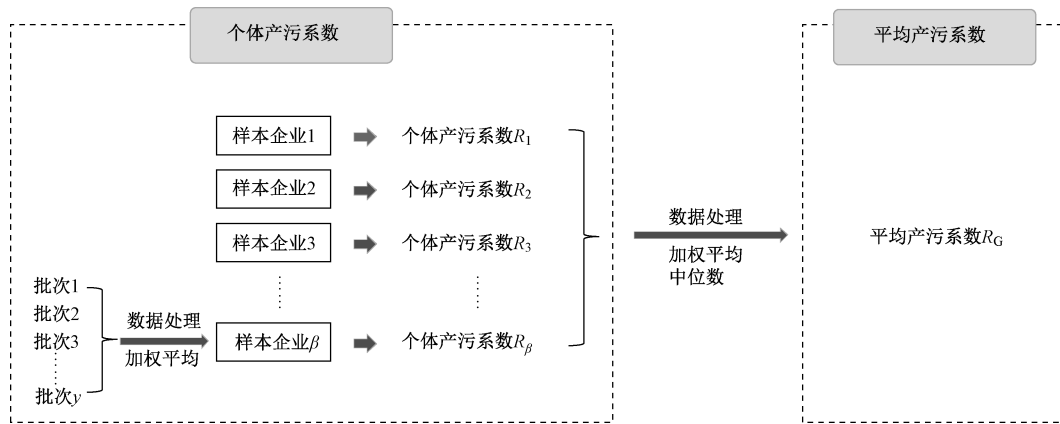


图3 个体产污系数与平均产污系数的关系

Fig.3 Schematic diagram of relationship between individual pollution generation coefficient and average pollution generation coefficient

加权平均法计算公式:

$$R_G = \sum_{p=1}^f W_p \times R_p \quad (7)$$

式中: W_p 为不同样本企业个体产污系数的权重, 一般根据样本企业的代表性确定, 权重之和为 1; f 为总样本数。

中位数法计算公式:

$$R_G = \begin{cases} R_{(\frac{\beta+1}{2})}, & \beta \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2} [R_{(\frac{\beta}{2})} + R_{(\frac{\beta+1}{2})}], & \beta \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (8)$$

函数法计算公式:

$$R_G = f(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad l \geq 1 \quad (9)$$

式中, x_l 为与污染物产生量存在函数关系的相关参数。

1.3.2 治理技术平均去除率量化

在某影响因素组合条件下, 对某一污染治理技术的样本企业内不同批次的污染物去除率数据进行加权平均或算术平均, 得到该污染治理技术的个体污染去除率。个体去除率指单个样本企业某一污染物在治理设施处理前、后的质量差值与处理前质量的比值, 以百分数表示, 计算公式:

$$\eta_\beta = \eta_c \times \frac{Q_s \times C_s - Q_e \times C_e}{Q_s \times C_s} \times 100\% \quad (10)$$

式中: η_β 为个体去除率, %; Q_s 、 Q_e 为治理设施进、出口废水流量或标准状态下气体流量, m^3/d 或 L/min 等; C_s 、 C_e 为治理设施进、出口污染物浓度, mg/m^3 ; η_c 为无组织排放污染物(如无组织排放的颗粒物或挥发性有机物)治理设施对该污染物的收集效率, %。

1.3.3 治理设施实际运行率表征

污染治理设施实际运行率(k)是表征在相同产

污水平条件下, 采用相同污染治理技术和设施的不同企业污染物去除效果不同的参数。通过明确污染治理设施的实际运行率, 有利于提升企业实际污染排放量统计时的准确性。 k 值反映的是污染治理设施运行的状态, 运行越稳定、运行时间越长, 值越高。在 k 取值上, 如果连续稳定运行的理想状态定义为 1, 则非连续稳定运行的状态在 0~1 之间。实际运行率一般并不能直接测量, 而是通过能够反映治理设施运行状态的参数计算得出。例如, 将环保设施运行时长与对应产污工段生产时长进行对比[见式(11)], 或通过对治理设施运行期间的耗电量进行核定[见式(12)]等。

$$k = s_d / s_{sd} \quad (11)$$

$$k = D_l / (G_r \times T_r) \quad (12)$$

式中: s_d 为环保设施运行时长, h/a ; s_{sd} 为对应产污工段生产的时长, h/a ; D_l 为治理设施耗电量, $kW \cdot h$; G_r 为治理设施额定功率, kW ; T_r 为治理设施运行时间, h 。

2 结果与讨论

2.1 产排污模块组建结果

2.1.1 行业类型划分

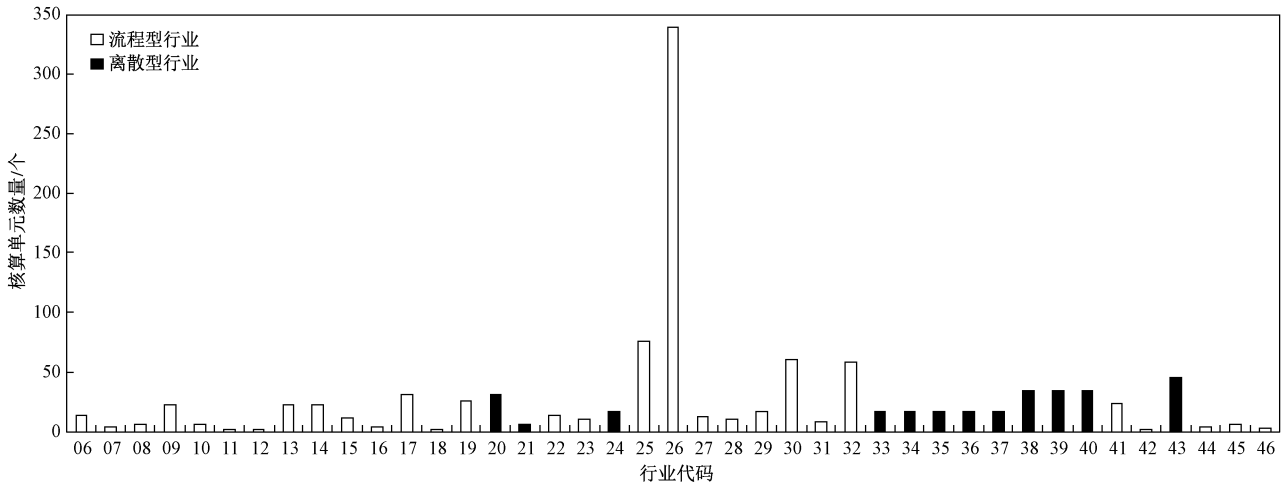
根据离散型及流程型生产的定义及代谢特点, GB/T 4754—2017 的 41 个大类行业中有 29 个属于流程型行业, 12 个属于离散型行业(见图 4)。实际生产中, 流程型行业中也有部分离散型生产过程, 如医药制造业中的药剂分装环节; 离散型行业中也存在流程型工艺, 如表面处理工艺等。在行业分类时以行业的主导代谢类型划分, 即以离散型生产为主的行业划分为离散型行业, 以流程型生产为主的行业划分为流程型行业。

2.1.2 核算单元判定与冗余度分析

根据该研究提出的流程型和离散型行业核算单

元的识别和筛选准则,41个行业产排污核算单元制定结果如图4所示。由图4可见,流程型行业核算单元数量远多于离散型行业。一方面,因为流程型行业产品类型多、工艺流程长。例如,核算单元最多的2个行业代码分别为26(化学原料和化学制品制造)和25(石油加工、炼焦和核燃料加工),前者包含了有机化工产品和无机化工产品生产,企业规模多样、生产

方式多样、原料众多且难以统计,生产工艺因产品不同而变化,而后者生产流程长、下游产品发散。另一方面,按专业化分工生产的现状,传统长流程工艺实现了模块化核算,以水泥行业为例,按照流程型行业拆分准则,根据我国水泥生产现状,全流程水泥工艺可拆分为熟料生产环节、水泥生产环节、粉磨站环节,符合当前水泥行业粉磨站独立运营的现状。



注:06代表煤炭开采与洗选业;07代表石油和天然气开采业;08代表黑色金属矿采选业;09代表有色金属矿采选业;10代表非金属矿采选业;11代表开采专业及辅助性活动;12代表其他采矿业;13代表农副食品加工业;14代表食品制造业;15代表酒、饮料和精制茶制造业;16代表烟草制品业;17代表纺织业;18代表纺织服装、服饰业;19代表皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业;20代表木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业;21代表家具制造业;22代表造纸和纸制品业;23代表印刷和记录媒介复制业;24代表文教、工美、体育和娱乐用品制造业;25代表石油加工、炼焦和核燃料加工业;26代表化学原料和化学制品制造业;27代表医药制造业;28代表化学纤维制造业;29代表橡胶和塑料制品业;30代表非金属矿物制品业;31代表黑色金属冶炼和压延加工业;32代表有色金属冶炼和压延加工业;33代表金属制品业;34代表通用设备制造业;35代表专用设备制造业;36代表汽车制造业;37代表铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业;38代表电气机械和器材制造业;39代表计算机、通信和其他电子设备制造业;40代表仪器仪表制造业;41代表其他制造业;42代表废弃资源综合利用业;43代表金属制品、机械和设备修理业;44代表电力、热力生产和供应业;45代表燃气生产和供应业;46代表水生产和供应业。下同。

图4 工业行业核算单元数量判定结果

Fig.4 The results of the accounting units in various industries

在“17版”系数之前,产排污系数制定一般按照《国民经济行业分类》标准分行业开展。而基于行业代谢特征分类的模块化产排污核算系数体系的建立,不仅增强了系数的适用性,更提升了系数的覆盖度,特别是对于产品规格不一、功能不同且升级换代相对频繁的离散型行业而言,不仅可实现各种产品生产过程的产污量的核算,也便于产污系数的动态更新和调整。以机械加工类行业(行业代码为33~37)为例,根据该行业生产加工的特点和主要产排污特征,共筛选提取了17个产污环节,包括铸造、锻造、粉末冶金、下料、冲压、预处理、机械加工、树脂纤维加工、焊接、粘接、转化膜处理、热处理、装配、涂装、检验检测、热浸锌、表面处理。以离散型行业音响设备制造和影视录放设备制造为例,“17版”系数所提取的6个共性产

污工段覆盖了该行业的全部产污环节,比“07版”系数的核算单元减少了57.14%,大幅减少了产污系数的冗余。

该研究结果在第二次全国污染源普查工业企业产排污量核算中的应用表明,产污环节划分符合行业特点,适用于我国现阶段工业企业实际生产情况。

2.1.3 影响因素组合识别

影响不同行业产污水平的因素不同,需区分对待。表2列举了部分行业产污水平的主要影响因素。对于流程型行业(如采矿业),其产污系数与自然条件关系密切,如煤炭开采行业不同矿区矿井水的产排量差别较大,产污系数核算需将区域作为分类主要因素^[36];石油开采业中不同油田含水率对水污染物的产排量影响较大,产污系数核算时需考虑油田含水率

的差异^[37];制造业以及电力、热力、燃气及水生产和供应业中,一般涉及燃烧过程(如各类锅炉和炉窑)的污染物产生主要受原料种类及数量影响,其次也受

产品、工艺、规模的影响^[38].对于离散型行业,污染物产生一般主要与产品有关,而当产品差异性较大时,影响因素优先考虑原料,其次考虑工艺和规模.

表 2 部分行业产污水平主要影响因素

Table 2 Main factors affecting pollution generation performance in secondary industries

行业类别/主要工艺过程	污染物	产污水平主要影响因素				
		产品	原料	工艺	规模	其他
石油开采业	废水污染物(COD、氨氮、石油类、挥发酚等)	★	★	★	★	★[如地质条件(油田含水率)]
煤炭采选业	废气污染物	★	★★	★	★	
	废水污染物	★	★	★	★	★(如开采区域水文地质条件)
黑色/有色金属矿采选与冶炼业	废气污染物(二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等)	★★	★	★	★	
火电、锅炉等燃料燃烧过程	废气污染物(二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等)	★	★★(如燃料)	★	★	★[如污染治理技术(炉内脱硫/脱硝)]
印刷、家具/喷涂等	VOCs	★	★★(如有机溶剂原辅料)	★	★	
	废水污染物(COD)	★★	★	★	★	
造纸行业	废水污染物氨氮、总氮、总磷	★★	★	★	★	★(如污染治理技术)
	废水(COD、氨氮、重金属)	★★	★	★	★	★(如镀种及镀件面积)
机械、电子行业	废水、废气(不含VOCs)	★★	★	★	★	

注:★★为首要影响因素,在制定产污系数时可优先作为 M_0 代入式(6)计算;★为其他影响因素.

2.2 核算参数量化结果

按上述 PGEMA 模型构建方法及参数量化方法,“17 版”系数研究制定了 41 个大类工业行业(657 个小类行业)的产排污核算方法及参数,共计得到 940 个核算环节、1 291 种主要产品、1 575 种原料、1 521 个工艺的 31 219 个废水和废气污染物的产污系数以及 101 358 种污染治理技术去除率.“17 版”系数与“07 版”系数的行业范围及核算参数结果对比见图 5.“17 版”系数 41 个大类工业行业的产品、原料、工艺及产污系数、污染治理技术数量如图 6 所示.

2.3 讨论

2.3.1 模块化核算模型使用场景

实践表明,运用该模型进行污染物产排污量核算时需注意以下 3 个方面:①模块化核算模型在应用时应注意覆盖核算对象的所有产排污环节.②对于通用公用设施(如锅炉等),可直接引用.而对于产排污特征类似的核算单元,可以进行跨行业类比.③实际生产中水污染物和大气污染物的污染治理过程有所不同(见图 7).

由图 7(a)可见,如企业存在废水经厂内污水处

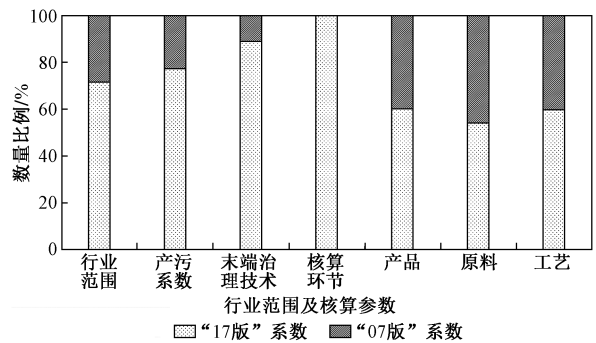


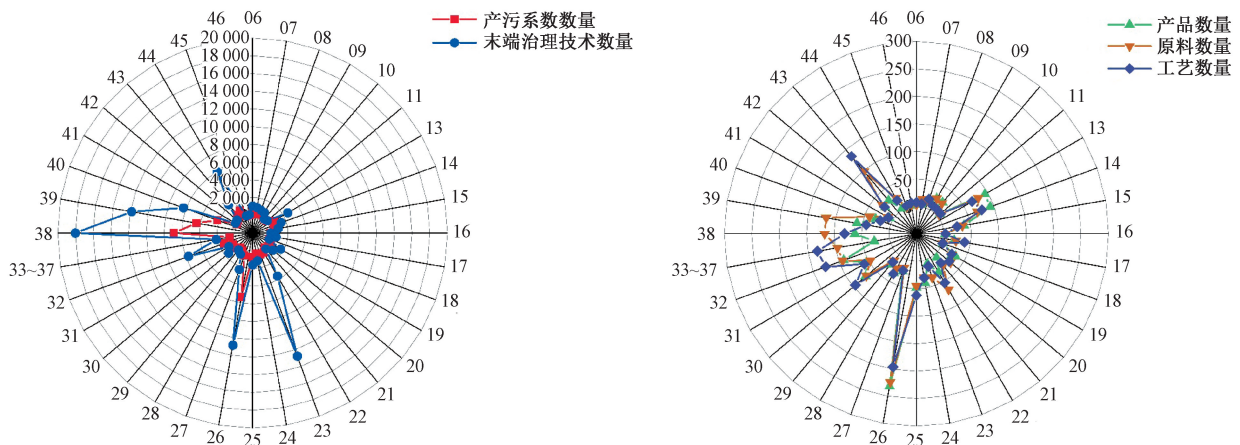
图 5 “17 版”与“07 版”系数核算参数结果对比
Fig.5 Comparison of pollutants generation parameters between ‘17 edition’ and ‘07 edition’

理站处理后回用的情况,在核算该企业排出厂界的水污染物排放量时,需在利用产排污核算基础公式时再扣除废水回用的部分,相应的水污染物排放量计算公式:

$$P_E = P_D \times k \times \eta \times (1 - \vartheta) \quad (13)$$

式中, ϑ 为企业的废水回用率.

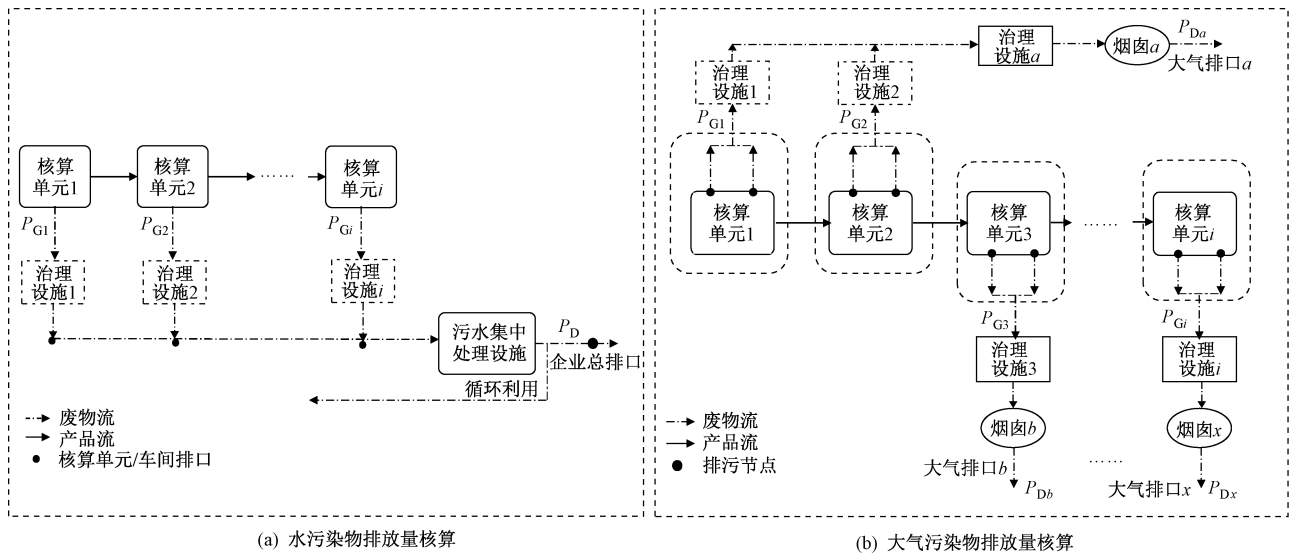
由图 7(b)可见,大气污染物存在多个排放节点(烟囱),若企业内有多核算环节涉及大气污染物



注:图中圆圈外数值为行业代码;圆圈内数值代表参数数量,单位为个.

图6 “17版”系数各行业核算参数结果

Fig.6 Schematic diagram of accounting parameters in ‘17 edition’



(a) 水污染物排放量核算

(b) 大气污染物排放量核算

图7 水及大气污染物排放量核算示意

Fig.7 Schematic diagram of waste water and gas pollutant discharge accounting

的产生,应对多个核算环节的产生量与排放量分别核算后汇总.图7(b)中 P_{Gi} 表示企业内某一烟囱或大气排放点某污染物的产生量, P_{Dx} 为排放量;同一烟囱排口若涉及多个核算单元,则该排口某污染物排放量为对应的所有核算单元污染物经处理后的排放量之和.以图7(b)为例,位于大气排口 a 的污染物排放量(P_{Da})的计算公式:

$$P_{Da} = [P_{G1}(1 - \eta_1 \times k_1) + P_{G2}(1 - \eta_2 \times k_2)] \times (1 - \eta_a \times k_a) \quad (14)$$

式中: η_a 为核算单元 a 污染治理设施的平均治理(去除)率,若该核算单元无污染治理设施,则 $\eta_a = 0$; k_a 为核算单元 a 污染治理设施实际运行率,若该核算单元无污染治理设施,则 $k_a = 0$.

该企业某污染物的总排放量 P_D 计算公式:

$$P_D = P_{Da} + P_{Db} + \dots + P_{Dx} = \sum_{x=a}^z P_{Dx} \quad (15)$$

2.3.2 多元统计分析在产污水平影响因素组合判定中的应用

“07版”系数中制糖行业(行业代码134)产污系数核算时,由于缺少定量判断的方法,难以确定产污水平的变化是由于原料成分的波动还是生产规模不同所致,因此未考虑生产规模对产污量的影响.该研究将产污系数作为因变量,对195个样本的多元回归分析结果表明,制糖行业原料、生产工艺和生产规模均与产污系数具有较强的相关性,其中生产规模的影响最为显著,且与产污系数呈负相关.对比“07版”系数中甘蔗和甜菜制糖过程的COD产污系数影响因素组合(见表3)发现,该研究由于对生产规模依据产污

水平进行了合理分类,甘蔗和甜菜制糖过程 COD 系数组合数量由原来的 2 个增至 5 个,提升了制糖行业产污系数的适用性和代表性。

表 3 甘蔗、甜菜制糖过程 COD 产污系数影响因素组合变化
Table 3 Variation of the combination of influencing factors of pollution generation coefficient for COD from cane and beet sugar production

原料	“07 版”系数		该研究	
	生产规模/(t/d)	组合数/个	生产规模/(t/d)	组合数/个
甘蔗	—	1	≤2 000	3
			2 000~5 000	
			>5 000	
甜菜	—	1	≤3 000	2
			>3 000	
合计		2		5

针对非专业视听设备制造行业,利用离散型生产核算单元提取准则识别确定了 6 个共性核算单元。以注塑核算单元为例,采用决策树分析方法确定了 34 种影响因素组合的 151 个污染物的产污系数。各核算环节影响因素组合数及产污系数个数如图 8 所示。

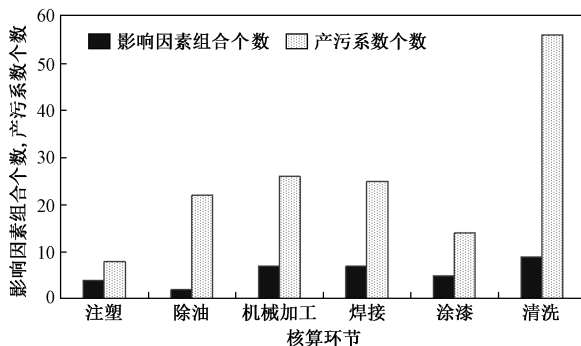


图 8 非专业视听设备制造行业各核算环节影响因素组合数和产污系数个数

Fig.8 Number of combination of influencing factors and pollution generation coefficient of different accounting units from non-professional audio-visual equipment manufacturing industry

2.3.3 数据质量控制

核算参数的制定需要有一定数量具有代表性的样本企业数据,实现从个体产污系数到行业平均产污系数的计算。样本企业的选取采用一般分层抽样与随机抽样相结合的方式。在选取时,不仅要考虑到同一影响因素组合下该企业在产品、工艺、规模、原材料路线、治理技术、投产年限、开工情况等方面的代表性,还应充分考虑该行业生产布局的区域分布差异,

尽可能地覆盖该行业具有明显区域特征的地区。优先选择该行业生产密集地区的代表性企业,如马铃薯淀粉制造行业选择内蒙古自治区等地区,木薯淀粉选择广西壮族自治区等地区,玉米淀粉选择山东省等地区,宠物饲料选择河北省等地区,大豆油选择山东省和东北地区为样本采集地点。此外,还需注意产排污核算体系的主要用户多以缺乏监测数据或无法采用实测法进行排污量核算填报的企业为主,此类企业的代表性也应充分考虑。

用于参数制定的数据一般包括现场调查与实测数据、历史调查与评估数据,以及试验或模型模拟数据等。为进一步规范不同行业数据收集和核算的规范性,“17 版”系数制定过程中采用了统一的样本企业调查表,并开发了“工业污染源产排污核算系数数据动态管理系统”。将企业调查表调查的信息全部导入系统,通过系统设定的逻辑关系和数据校验条件对数据进行审核,从而提升数据质量。该系统还建立了样本企业数据与产污系数的对应关系,实现产污系数可溯源至样本企业。

核算参数的最终核定需经过多级检验和校核。所有用于参数制定的原始数据需满足数据质量要求才可用于计算;对初始得到的核算参数应按照是否符合行业内产排污规律以及物料衡算等依据进行内部自评估及校核;可邀请行业内环保专家对核算参数进行技术把关和评审;通过评审后应将核算参数用于非样本企业的验证,实现核算参数的校核修订,对于核算过程中偏差较大的参数,应通过补充样本数据或修订影响因素组合等方式对参数实现校核,形成最终的核算参数。

3 结论与建议

3.1 结论

a) 工业代谢分析是进行工业生产过程产排污规律识别和量化的重要理论依据及工具。污染物排放量是产生量和去除量的差值,而去除量核算时应考虑治理技术去除率以及污染治理设施运行状态双因素的影响。

b) 我国工业行业虽类型多样、产品工艺种类丰富,但开展产排污核算研究时宜更关注生产活动对产排污的影响而非工艺或产品本身。通过对工业行业进一步的识别和归类,实现“提取共性、分类核算”,可提高核算效率、降低核算参数冗余度。

c) 当前区域分工和专业化生产现状要求产排污核算方法应与之相适应,所建立的核算模型应具有模块化特征——“可组合、可拆分”,即若干核算单元可

组合为长流程工艺,长流程工艺可拆分为若干核算单元。

d) GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》中41个大类工业行业可划分为29个流程型行业和12个离散型行业。基于产排污核算模型及参数量化方法,41个大类工业行业(657个小类行业)共计识别出940个核算单元,针对1291种主要产品、1575种原料、1521个工艺的影响因素组合产出31219个废水、废气污染物的产污系数以及101358种污染治理技术去除率。

3.2 建议

a) 通过该研究建立的PGDMA模型及参数能够较为客观地反映各行业不同类型污染源产生和排放污染物的种类、数量、产排污节点等信息,可满足污染源普查、生态环境统计、排污许可、环境税、污染源源强核算、环境影响评价、环境保护标准制修订、清洁生产评价指标体系制(修)订、大气污染源清单和水污染源清单等一系列环境管理制度的核算需求^[39]。此外,产排污核算模型及其包含的产品、原料、工艺、规模及治理技术等海量信息,可为区域污染减排潜力测算、产业结构调整、环境准入等提供定量依据,应作为产排污核算数据的进一步开发方向。

b) 由于我国工业生产中产品类别及型号规格、原辅材料及成分、产污工艺类型等众多,核算参数无法实现完全覆盖,只能选择相似生产环节的系数或类比采用校正系数等方式进行产排污核算,核算结果可能存在一定偏差。此外,经济和产业结构的持续变动升级、节能减排政策的深入实施,各类工业企业技术更新周期加快,污染治理技术的不断变化,造成核算参数的制定始终滞后于工业生产活动的变化。产排污核算参数作为一种具有动态性和实效性的工具性参数,应及时开展动态更新。

c) 模块化的产排污核算模型构建及参数量化需对各行业不同类型污染源产排污环节和规律进行充分分析和研究,涉及核算单元与样本选取、数据获取、实地监测、数据加工处理、系数表达、误差分析和系数验证等过程。建立完善和规范的核算技术体系,是实现核算参数代表性、可更新性和可扩展性的必要保障。该研究为实现产排污核算模型构建及参数量化的统一奠定了基础,建议以该研究中参数量化方法为依据,编制产排污核算方法及系数制定的标准或技术指南,为后续核算参数的动态更新或各地方制定本地化核算参数提供统一的技术规范。

d) 目前企业的环境管理水平、生产管理水平等

主观因素的影响在核算参数制定中尚未实现定量化考虑;受数据量和数据有效性的影响,产污水平影响因素组合的确定以及产污系数不确定性分析以定性分析为主,在后续研究中应不断加强数据积累和对行业的跟踪观察,同时需不断深入挖掘产污系数影响因素组合的定量分析技术并扩展其应用,逐步实现全行业影响因素组合的定量识别和系数不确定性的定量分析。

e) 治理设施实际运行率(k)一般并不能直接测量,而是通过能够反映治理设施运行状态的参数计算得出。目前 k 值表征公式较为单一且可核准性有限,亟需通过更广泛深入的监测手段和数据,量化核准不同行业各类治理设施的实际运行状态的指示性因子,不断完善治理设施运行率的表征方式。

参考文献(References):

- [1] 王海兰.产排污系数法在环评污染源核算中的广泛应用[J].资源节约与环保,2013(8):63-64.
- [2] 余蕾蕾,李翠莲.环评污染源核算中的产排污系数法应用[J].资源节约与环保,2019(3):22.
- [3] 牟瑛,陈欢,李琨,等.环境初始排污权核算方法比较[J].中国资源综合利用,2017,35(3):48-50.
MU Ying, CHEN Huan, LI Kun, *et al.* Comparison of calculation methods of environmental pollution discharge right [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(3): 48-50.
- [4] ZHANG Jie, NI Shaoqiang, WU Wenjun, *et al.* Evaluating the effectiveness of the pollutant discharge permit program in China: a case study of the Nenjiang River Basin [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109501.
- [5] WANG Kun, TIAN Hezhong, HUA Shenbing, *et al.* A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: temporal trends and spatial variation characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2016, 559: 7-14.
- [6] TIAN Hezhong, WANG Yan, XUE Zhigang, *et al.* Atmospheric emissions estimation of Hg, As, and Se from coal-fired power plants in China, 2007 [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(16): 3078-3081.
- [7] HASANBEIGI A, MORROW W, SATHAYE J, *et al.* A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry [J]. Energy, 2013, 50: 315-325.
- [8] 段宇,郭庭政,孙启宏,等.国内外产排污系数开发现状及其启示[J].环境科学研究,2009,22(5):622-626.
DUAN Ning, GUO Tingzheng, SUN Qihong, *et al.* Development and enlightenment of pollutant generation and discharge coefficients at home and abroad [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(5): 622-626.
- [9] 董广霞,周同,王军霞,等.工业污染源核算方法探讨[J].环境保护,2013,41(12):57-59.
- [10] 赵学涛,陈敏敏,汪志锋,等.第二次全国污染源普查实践与思考[J].环境保护,2020,48(18):12-17.
ZHAO Xuetao, CHEN Minmin, WANG Zhifeng, *et al.* The practice

- and reflection of the second national pollution source census[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18): 12-17.
- [11] 乔琦,白璐,刘丹丹,等.我国工业污染源产排污核算系数法发展历程及研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1783-1794.
- QIAO Qi, BAI Lu, LIU Dandan, *et al.* Development and research progress of pollutant generation and discharge coefficients for industrial pollution sources in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(8): 1783-1794.
- [12] 骆祖春,高波.新中国六十年来工业化发展时段标准的确定—基于世界银行2005年国际比较项目(ICP)结果的研究[J]. *学海*, 2009(6): 58-63.
- [13] 潘强敏.国民经济行业分类标准问题研究[J]. *统计科学与实践*, 2012(6): 16-18.
- [14] 乔琦,白璐.夯实污染物排放量核算科学基础—第二次全国污染源普查工业源产排污核算方法解读[N/OL].北京:中国环境报, 2020-07-06[2021-04-13]. http://epaper.cenews.com.cn/html/2020-07/06/node_4.htm.
- [15] AYRES R U. *Industrial metabolism* [M]. Washington DC: National Academy Press, 1989.
- [16] AYRES R U. *Industrial metabolism and global change* [J]. *International Social Science Journal*, 1989, 121: 363-373.
- [17] AYRES R U. *Industrial metabolism: theory and policy* [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1994.
- [18] AYRES R U, LESLIE A. *A handbook of industrial ecology* [M]. Cheltenham, UK Northampton MA, USA: Edward Elgar Publishing Ltd, 2002.
- [19] SUREN E. *工业生态学* [M].北京:经济日报出版社, 1999.
- [20] 戴铁军.工业代谢分析方法在企业节能减排中的应用[J]. *资源科学*, 2009, 31(4): 703-711.
- DAI Tiejun. Application of industrial metabolism in energy saving and pollution reduction for enterprise[J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 703-711.
- [21] 段宁.物质代谢与循环经济[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(3): 320-323.
- DUAN Ning. Material metabolism and circular economy[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(3): 320-323.
- [22] ANDERBERG S. *Industrial metabolism and the linkages between economics, ethics and the environment* [J]. *Ecological Economics*, 1998, 24(2): 311-320.
- [23] MARTÍN A M, MARCOS M, AGUAYO F. *et al.* Smart industrial metabolism: a literature review and future directions [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 13(6): 1223-1228.
- [24] CAO Li, LI Lin, WU Yi, *et al.* Does industrial convergence promote regional metabolism? evidence from China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273(11): 123010-123020.
- [25] BAI Lu, QIAO Qi, LI Yanping, *et al.* Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 10(104): 502-512.
- [26] XIE Minghui, BAI Weinan, BAI Lu, *et al.* Life cycle assessment of the recycling of Al-PE (a laminated foil made from polyethylene and aluminum foil) composite packaging waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 4430-4434.
- [27] BAI Lu, XIE Minghui, ZHANG Yue, *et al.* Pollution prevention and control measures for the bottom blowing furnace of a lead-smelting process, based on a mathematical model and simulation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159: 432-445.
- [28] OGUCHI M, SAKANAKURA H, TERAZONO A. Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow analysis in waste treatment processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464: 1124-1132.
- [29] MAO J S, DONG J, GRAEDEL T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead I: methodology [J]. *Resource, Conservation and Recycling*, 2008, 52(8/9): 1058-1064.
- [30] ZIEMANN S, WEIL M, SCHEBEK L. Tracing the fate of lithium: the development of a material flow model [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 63(2): 26-34.
- [31] 钟琴道,乔琦,李艳萍,等.粗铅冶炼过程铅元素流分析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1549-1555.
- ZHONG Qindao, QIAO Qi, LI Yanping, *et al.* Lead flow analysis of lead bullion smelting process [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1549-1555.
- [32] 周哲,李有润,沈静珠,等.煤工业的代谢分析及其生态优化[J]. *计算机与应用化学*, 2001, 18(3): 193-198.
- ZHOU Zhe, LI Yourun, SHEN Jingzhu, *et al.* Coal-based industrial metabolism and ecological optimization [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2001, 18(3): 193-198.
- [33] 马慧婕,沈忱思,章耀鹏,等.纺织工业产排污特征与水污染治理技术进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2529-2539.
- MA Huijie, SHEN Chensi, ZHANG Yaopeng, *et al.* Production and pollution discharge characteristics and progress in the water pollution treatment technologies of the textile industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2529-2539.
- [34] 许耕野.浅析工业污染源产排污系数存在的问题[J]. *环境保护与循环经济*, 2012, 32(4): 74-75.
- [35] 王仲旭,周同,程洁,等.工业污染源产排污系数存在问题分析及修订建议[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(2): 109-113.
- WANG Zhongxu, ZHOU Jiong, CHENG Jie, *et al.* Problem analysis and revising suggestion for production and emission coefficients of industrial pollution sources [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(2): 109-113.
- [36] 马启翔,卢立栋,杨建军.陕西省兰炭行业 SO₂、NO_x 产排污系数核算研究[J]. *环境保护科学*, 2014, 40(6): 64-67.
- MA Qixiang, LU Lidong, YANG Jianjun. Study of emission coefficient accounting of SO₂ and NO_x from semi coke industry in Shaanxi Province [J]. *Environmental Protection Science*, 2014, 40(6): 64-67.
- [37] 任叙合,程建军,张海娟,等.海洋石油开发工业污染物产生系数和排放系数研究[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(2): 141-144.
- REN Xuhe, CHENG Jianjun, ZHANG Haijuan, *et al.* Study on the pollutant generation coefficient and discharge coefficient in offshore oil development operation [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(2): 141-144.
- [38] 高惠华.生物质电厂 SO₂ 产排污系数核定的探讨[J]. *发电与空调*, 2017, 38(1): 17-20.
- GAO Huihua. Research on pollutants generation and discharge coefficient of SO₂ from biomass power plant [J]. *Power Generation & Air Condition*, 2017, 38(1): 17-20.
- [39] 薛志钢,杜谨宏,任岩军,等.我国大气污染源排放清单发展历程和对策建议[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1678-1686.
- XUE Zhigang, DU Jinhong, REN Yanjun, *et al.* Development course and suggestion of air pollutant emission inventory in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1678-1686.