建立以改善环境空气质量为目标的大气固定源排污许可量核算方法

高 爽[1,2] 李时蓓[1,2*] 伯 鑫[1,2] 马 岩[1,2] 屈加豹[1,2] 雷团团[1,2]

（1. 生态环境部环境工程评估中心 北京 100012；2. 生态环境部，国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室 北京 100012）

摘 要 当前我国环境管理的核心是改善环境质量，环境质量管理正在从总量控制导向转变为以环境质量改善为导向，尤其对环境质量不达标地区，将排污许可制度服务于环境质量达标和持续改善的目标，让总量考核服从质量考核是下阶段排污许可管理改革的重要方向。本文通过总理基金大气重污染成因与治理攻关项目“一市一策”驻点研究，建立了一套以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算方法，基于创新的多尺度模型融合解析方法，结合城市或区域常年气象分型研究，测算发证行业主要污染物允许排放量。该方法落地沧州市进行了应用研究，以行业发证为时序特征，测算 12 个发证行业主要污染物允许排放量。此研究对以改善环境质量为目标核算许可排放量探索了一条可行的技术方法，可为以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算提供技术支撑。

关键词 环境学 大气固定源排污许可量 创新核算方法 发证行业许可量核算 沧州“一市一策”驻点研究

1 引言

为打好污染防治攻坚战、改善生态环境质量，我国构建了以排污许可制为核心的固定污染源监管制度体系，逐步实现排污许可管理的全覆盖，贯穿固定污染源监管的全周期[1]。排污许可证载明的许可排放量即为企业污染物排放的天花板，一个区域内所有排污单位许可排放量之和就是该区域固定源总量控制指标，总量削减计划即是对许可排放量的削减。从 2017 年发布的《纳入排污许可管理的火电等 17 个行业污染物排放量计算方法（含排污系数、物料衡算方法）（试行）》、《未纳入排污许可管理行业适用的排污系数、物料衡算方法（试行）》，到 2020 年的“关于发布《排污许可证申请与核发技术规范 工业炉窑》等 5 项国家环境保护标准的公告”，无论是技术规范、试行办法还是相关标准中规定的纳入排污许可制度的各行业，其污染物排放量核算方法无外乎实测法、物料衡算法和系数法[2-8]，上述方法都是基于企业排口的排放量制定的，但不是以区域环境质量目标为基础而确定的。

当前我国环境管理的核心是改善环境质量，环境质量管理正在从总量控制导向转变为以环境质量改善为导向，尤其对环境质量不达标地区，要将排污许可制度服务于环境质量达标和持续改善的目标，让总量考核服从质量考核是下阶段排污许可管理改革的重要方向，因此亟需建立一套新的污染物许可量核算方法，基于环境质量改善目标来核算允许排放量。评估中心通过总理基金大气重污染成因与治理攻关项目“一市一策”驻点研究，创新了一套以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算方法，该方法落地沧州市进行了应用研究，以行业发证为时序特征，测算发证行业主要污染物允许排放量。此研究对以改善环境质量为目标核算许可排放量探索了一条可行的技术方法，可为以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算提供技术支撑。

2 环境空气质量改善目标下的污染物许可量核算概述

以 $PM_{2.5}$ 目标控制浓度为约束，基于创新的多尺度模型融合监测数据的溯源方法（以下简称

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

“融合解析方法”），综合区域网格模型、受体模型和空气质量监测数据，获得工业源贡献占比，再采用局地中小尺度模型快速、准确提取各行业的浓度贡献值；通过对城市或区域常年气象特征要素的分类分型研究，获得不同天气条件下的污染物转化比例和迁移扩散系数。基于扩散理论，建立污染物排放强度、不同天气类型迁移扩散系数和目标控制浓度之间的关系，在特定区域排放布局和排放方式基本不变的前提下，测算浓度控制目标下各行业主要污染物一次 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2 和 NOx 的允许排放量。

2.1　融合解析方法

采用区域网格模型解析本地和外来源、受体模型解析行业源，融合环境空气质量监测数据，获取各行业的贡献占比；利用 $PM_{2.5}$ 组分数据，结合典型污染天气类型，分析一次源与二次源的占比；采用局地中小尺度模型对各污染过程所有源进行解析，提取研究对象在所有源的贡献占比，从而快速、准确获得研究对象的浓度贡献值。融合解析方法能够避免局地尺度模型缺少模拟化学反应带来的绝对误差，解决了区域尺度模型不能精细化到源、计算耗时等弊端。通过融合解析方法可以得到城市或区域重点行业主要污染物的贡献浓度。

$$C_{\text{典型污染天气工业源贡献}} = C_{\text{典型污染天气质量监测数据}} \cdot P_{\text{区域模型本地源占比}} \cdot P_{\text{受体模型源解析工业源占比}} \quad (1)$$

$$C_{\text{典型污染天气某行业贡献}} = C_{\text{典型污染天气工业源贡献}} \cdot P_{\text{典型污染天气模拟某行业贡献(一次模拟+典型污染天气二次转化)占比}} \quad (2)$$

2.2　气象条件分类分型研究

根据扩散原理，污染浓度不仅与排放源强成正比关系，同时还与污染源排放布局和排放方式、气象条件、污染物的迁移转化、以及地形地表等条件密切相关，在特定区域排放布局和排放方式基本不变的假设前提下，污染浓度的大小取决于排放强度、气象条件和迁移、转化、沉降等因素[9-10]。通过统计研究区域常年的风速、风向、稳定度、湿度等气象条件，结合同期的空气质量监测数据和 $PM_{2.5}$ 组分浓度在线监测数据，划分 n 种天气类型，计算每种天气类型下的权重比例、常规污染物平均浓度、水溶性离子浓度及其与前体物比值等；采用上述融合解析方法，结合基准年质量监测数据和污染源排放强度，获得 n 种天气类型 m 类污染物的迁移、扩散系数，称之为迁散系数 F（i 类源，j 种天气类型）。

2.3　目标控制浓度下的许可排放量

根据区域网格模型解析结果，分析本地源和外来源对 $PM_{2.5}$ 的贡献比例，根据六因子质量监测数据和 $PM_{2.5}$ 组分数据，分析一次污染物与二次污染物的贡献占比，水溶性离子的占比和二次转化比例等。基于 $PM_{2.5}$ 目标控制浓度，根据上述分析方法，获得 PM_{10}、SO_2 和 NO_2 的控制浓度。

依据气象条件分类分型研究结果，确定天气类型 1～天气类型 7 达控制浓度目标下的各类源迁散系数和二次污染物的转化系数，根据公式 1 可测算全年以及不同天气类型下达到控制浓度目标的允许排放量 $Q_{(\text{i类源,j类天气类型})\text{允许排放量}}$。

$$\sum_{(i=1,m)} Q_{(\text{i类源,j类天气类型})\text{允许排放量}} \leqslant (C_{\text{目标浓度}} - C_{NO2\text{控制浓度}} \times Z_{NO2(\text{j类天气类型})} - C_{SO2\text{控制浓度}} \times Z_{SO2(\text{j类天气类型})}) / F_{(\text{i类源,j类天气类型})} \quad (\text{公式 1})$$

3　发证行业主要污染物许可量核算应用案例

3.1　融合解析方法快速提取各行业贡献浓度

以沧州市为例，根据沧州市 2018 年全年环境空气质量监测数据（来自国家联合攻关中心数据共享平台），$PM_{2.5}$ 年均浓度 59.5μg/m³。基于 2018 年污染源清单，采用区域网格模型得到本地和外来源贡献比例（本地贡献 75%，外地贡献 25%，由中国环境科学研究院提供）；再结合 CMB 受体模式解析结果（工业源贡献 64%，由中国环境科学研究院提供），运用融合解析方法计算得到工业源对 $PM_{2.5}$ 贡献浓度为 24.0μg/m³。采用局地中小尺度模型模拟各行业贡献比例，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

快速提取各行业贡献浓度值，结果见表 3 - 1。

表 3 - 1 沧州市主要行业对 $PM_{2.5}$ 贡献浓度

行业类别	贡献浓度（μg/m³）	贡献比例（%）
工业源	28.6	64
石化工业	2.66	13.67
水泥工业	2.09	10.78
铸造工业	1.58	8.09
橡胶塑料工业	1.4	7.19
电力热力工业	0.95	4.88
建材工业	0.74	3.79
一般制造类	0.64	3.27
医药、农药、化肥工业	0.63	3.27
化工工业	0.17	0.90
印刷造纸工业	0.12	0.64
钢铁工业	0.07	0.39
焦化工业	0.03	0.13

3.2 气象条件分类分型研究

基于沧州市近 3 年全年六因子质量监测数据和 $PM_{2.5}$ 组分在线监测数据（来自国家联合攻关中心数据共享平台），以及气象条件数据（来自沧州市气象局），划分为 7 种天气类型，计算每种天气类型下的占比、常规污染物平均浓度、水溶性离子浓度及其与前体物比值等；根据第一节所述方法，2018 年基准年工业源排放 $PM_{2.5}$ 68.4 吨/日、PM_{10} 114.9 吨/日、SO_2 51.0 吨/日、NO_x 79.2 吨/日。融合环境质量监测数据，计算得到工业源在七种天气类型下四种污染物的迁转系数 F，如表 3 - 2 所示。

表 3 - 2 沧州市七种天气类型工业源主要污染物迁转系数 F（微克/立方米. 日/吨）

迁转沉类型	天气条件	$W_{天气占比}$	$PM_{2.5}$（μg/m³）	PM_{10}（μg/m³）	NO_2（μg/m³）	SO_2（μg/m³）	硝酸盐/NO_2	硫酸盐/SO_2	$F_{PM2.5}$	F_{PM10}	F_{SO2}	F_{NO2}
天气类型 1	主导风：东北风 平均风速：2.5m/s 相对湿度 15 ~ 45%	36.9%	23.69	48.35	23.7	14.77	0.48	0.31	0.17	0.42	0.29	0.30
天气类型 2	主导风：偏南风 平均风速：2.0m/s 相对湿度 35 ~ 65%	12.7%	38.38	69.78	34.01	18.9	0.47	0.42	0.27	0.61	0.37	0.43
天气类型 3	主导风：偏南风 平均风速 < 2m/s 相对湿度 45 ~ 70%	27.8%	54.33	93.67	42.58	22.75	0.51	0.48	0.38	0.82	0.45	0.54

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

续表

迁转沉类型	天气条件	$W_{天气占比}$	$PM_{2.5}$（μg/m³）	PM_{10}（μg/m³）	NO_2（μg/m³）	SO_2（μg/m³）	硝酸盐/NO_2	硫酸盐/SO_2	$F_{PM2.5}$	F_{PM10}	F_{SO2}	F_{NO2}
天气类型4	主导风：偏西南风 静小风持续<24h 相对湿度55~75%	12.6%	92.71	142.63	55.33	29.3	0.58	0.49	0.65	1.24	0.57	0.70
天气类型5	主导风：偏南风 静小风持续<24h 相对湿度60~80%	4.5%	130	191.18	65.82	31.56	0.57	0.59	0.91	1.66	0.62	0.83
天气类型6	静小风持续>24h 相对湿度75~90%	5.0%	189.2	262.78	76.71	29.54	0.63	0.98	1.33	2.29	0.58	0.97
天气类型7	静小风持续≥72h 相对湿度80~100%	0.5%	280.16	373.55	94.22	28.35	0.73	1.46	1.97	3.25	0.56	1.19

3.3　沧州市环境质量控制目标下各行业的许可排放量

《环境质量标准》规定的$PM_{2.5}$达标浓度为35μg/m³，根据区域模型模拟结果，沧州市全年本地源贡献占比约75%；$PM_{2.5}$一次源贡献占比约40%，计算可得$PM_{2.5}$一次源的控制目标应小于10.5μg/m³；根据$PM_{2.5}$组分分析，二次转化生成的硝酸盐、硫酸盐贡献占比约35%，获得硝酸盐、硫酸盐控制浓度应小于8.95μg/m³。

根据划分的天气类型对转化率进行加权平均，得到沧州全年NO_3^-与NO_2的比例约为0.51，SO_4^{2-}与SO_2的比例约为0.45，综合统计近3年的环境质量监测数据，NO_2年均浓度约为SO_2年均浓度的2倍，PM_{10}年均浓度约为$PM_{2.5}$年均浓度的2倍，从而获得不同气象条件下NO_2和SO_2的控制浓度分别为12.2μg/m³、6.1μg/m³，PM_{10}控制浓度为70μg/m³。

以2030年沧州市$PM_{2.5}$达到35μg/m³为目标，PM_{10}、NO_2和SO_2年均控制浓度分别为70μg/m³、12.2μg/m³、6.1μg/m³。在假设$PM_{2.5}$外来传输和本地贡献比例不变的情况下，根据公式1，按所有天气类型的迁转沉系数和天气类型占比进行测算，获得沧州市工业源一次$PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2和SO_2总量控制分别在38.7吨/日、85.2吨/日、24.6吨/日和14.8吨/日以下。重点行业的污染物允许排放量如下表所示。

表3-3　沧州市$PM_{2.5}$达标约束下重点行业主要污染物允许排放量（吨/日）

行业类别	$PM_{2.5}$允许排放量	PM_{10}允许排放量	NOx允许排放量	SO_2允许排放量
石化工业	1.51	5.22	1.64	0.26
水泥工业	4.99	16.31	0.05	0.18
铸造工业	7.21	23.73	0.48	0.36
橡胶塑料工业	0.02	0.07	0.06	0.00
电力热力工业	0.33	1.13	5.13	2.95
建材工业	2.20	9.68	2.91	5.07
一般制造类	0.20	1.00	0.04	0.01
医药、农药、化肥工业	0.59	1.59	3.80	0.77
化工工业	0.39	1.95	0.94	0.35

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

续表

行业类别	$PM_{2.5}$允许排放量	PM_{10}允许排放量	NOx 允许排放量	SO_2 允许排放量
印刷造纸工业	0.04	0.21	0.56	0.14
钢铁工业	3.66	11.68	5.22	3.09
焦化工业	0.26	0.84	1.45	0.37

4 结论与建议

本研究创新了一套以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算方法，对以改善环境质量为目标核算许可排放量探索了一条可行的技术方法，可为以改善空气质量为目标的大气固定污染源排污许可量核算提供技术支撑。通过本研究方法和沧州市的应用案例，形成以下主要结论与建议：

（1）排污许可制度一直以来是总量控制的重要措施之一，但当前我国环境质量管理正在从总量控制导向转变为以环境质量改善为导向，亟需建立一套以环境质量改善为目标的污染物许可量核算方法，将排污许可制度服务于环境质量达标和持续改善的目标。

（2）本方法落地沧州市进行了应用研究，以 2030 年沧州市 $PM_{2.5}$达到 35μg/m^3 为目标，基于沧州市常年观测的气象条件分类分型研究、$PM_{2.5}$来源解析研究，结合沧州市工业源排放特征，以行业发证为时序特征，核算出石化行业、水泥行业、铸造行业、电力热力、钢铁行业等 12 个重点行业的 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2 和 NOx 允许排放量，可以为沧州市大气环境管理提供一定科学支撑。

（3）本研究方法尚存在一定的不确定性，例如 $PM_{2.5}$来源结构的变化、$PM_{2.5}$组分结构的变化、城市或区域排放布局和排放方式的变化等，未来可进一步开展深入研究，提高本研究方法的科学性和应用价值。

（4）本研究建立的行业排污许可量理论核算方法，未来可考虑在京津冀及周边“2 +26”城市、汾渭平原和其他有一定大气污染研究基础、并且已经开展 $PM_{2.5}$来源解析的城市或区域推广、应用，但在排污许可量核算与核发时，还需进一步结合城市目标计划、行业发展规划、打赢蓝天保卫战三年行动方案等政策，对行业允许排放量进行校核，使行业排污许可核算量更符合当地规划发展要求。

参 考 文 献

[1] 张玮，白金．排污许可证中污染物排污量核算方法分析［J］．环境与发展，2014（Z1）：119 -122.

[2] 苗永刚，赵玉强，荆勇，等．排污许可量核算方法与体系研究——以沈阳市为例［J］．环境保护科学，2016（42）：50.

[3] 蒋洪强，周佳，张静．基于污染物排放许可的总量控制制度改革研究［J］．中国环境管理，2017，9（4）：9 -12.

[4] 范萌，迪世靖．废气排放口的规范化设置与实际排放量的核算［J］．环境与发展，2019，31（02）：249 -251.

[5] 赵春丽，邹世英，王家强，等．规范排污许可证申请与核发强化钢铁行业污染防治——《排污许可证申请与核发技术规范钢铁工业》解读［J］．环境影响评价，2018，040（001）：P.26 -29.

[6] 陈必新，吴成志，王晶博，等．CEMS 在美国排污许可制度下的应用及启示［J］．环境影响评价，2019，041（003）：P.22 -25.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

[7] 赵军，吕晓君，吴铁，等．炼焦化学工业实施排污许可制度关键问题研析［J］．环境影响评价，2018（4）：216－219.

[8] 魏玉霞，张明慧，胡林林，等．基于水污染物排放标准的排污许可总量计算方法及应用性探讨［J］．环境工程技术学报，2016，006（006）：629－635.

[9] 郝吉明，许嘉钰，吴剑，等．我国京津冀和西北五省（自治区）大气环境容量研究［J］．中国工程科学，2017，19（4）：13－19.

[10] 杨清健，赵天良，郑小波，等．亚洲季风强弱年蒙自市大气环境容量差异估算［J］．中国环境科学，2019，39（10）：4054－4064.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl