“十三五”江苏省重点出版物出版规划项目

港区大气污染物排放清单编制技术及其应用

封学军　张　艳◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

“十三五”江苏省重点出版物出版规划项目

港区大气污染物排放清单编制技术及其应用

封学军　张　艳◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS
·南京·

图书在版编目(CIP)数据

港区大气污染物排放清单编制技术及其应用 / 封学军，张艳著. —南京 ：河海大学出版社，2019.9

ISBN 978-7-5630-5903-4

Ⅰ. ①港… Ⅱ. ①封… ②张… Ⅲ. ①长江中下游—集装箱运输—港区—大气污染物—排污—研究②长江中下游—岸电—研究 Ⅳ. ①X51②U653.95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 044188 号

书　　名	港区大气污染物排放清单编制技术及其应用
书　　号	ISBN 978-7-5630-5903-4
责任编辑	朱婵玲　杨　曦
特约编辑	陈晓灵　张琳妤
特约校对	蒋乃玢
封面设计	徐娟娟
出版发行	河海大学出版社
地　　址	南京西康路 1 号(邮编：210098)
电　　话	025-83737852(总编室) 025-83722833(营销部)
网　　址	http://www.hhup.com
排　　版	南京布克文化发展有限公司
印　　刷	虎彩印艺股份有限公司
开　　本	787 毫米×960 毫米　1/16
印　　张	14
字　　数	250 千字
版　　次	2019 年 9 月第 1 版
印　　次	2019 年 9 月第 1 次
定　　价	68.00 元

前言

Preface

交通源排放正成为当前我国诸多地区触发雾霾的重要因素，作为交通系统重要组成的船舶与港口除 $PM_{2.5}$ 外，PM_{10}、DPM(柴油颗粒物)、SO_2、NO_x 等在城市分担率中占比显著。交通运输部为贯彻《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》(中发〔2015〕12号)和《国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知》(国发〔2013〕37号)出台《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020年)》，作为我国履行国际公约相关义务和推进船舶与港口污染防治工作的纲领性文件，明确提出以减少污染物排放和处置为核心，以推进长三角、珠三角和环渤海等排放控制区建设为抓手的总体战略，并确定排放控制区硫氧化物、氮氧化物、颗粒物等下降比例的刚性约束目标。文件首次将减排对象由温室气体扩展至主要大气污染物。2016年习近平总书记视察长江时提出：要把修复长江生态环境摆在压倒性位置，共抓大保护、不搞大开发。环境保护部亦于2017年7月17日出台《长江经济带生态环境保护规划》，从严从实抓好长江经济带生态环境保护工作。行业和区域的双重重视让地处黄金水道龙头的长江下游，特别是长江江苏段港口的减排工作面临巨大压力。

相比于设置排放控制区较早的欧洲和北美地区，我国船舶与港口大气污染物排放控制工作尚处于起步阶段，诸多问题还

未建立合理的解决路径，众多基础性工作亟待展开。特别体现在船舶与港口大气污染防治中的核心技术，包括污染物排放监测和治理技术两个方面，前者为基础性技术，包括：①通过现代监测技术低成本获取船舶、港口大气污染物排放基础性数据；②船舶、港口大气污染扩散机理与区域影响；③大气污染物表征的方法体系和本土化排放因子库建设。后者为应用性技术，更多表现为基于社会环境效率(Eco-efficiency)分析的技术应用方案设计与评价，突出体现在政策、鼓励资金的使用效率方面。

本书在分析总结长江下游集装箱港区主要大气污染物类型、来源、特征、危害及其成因的基础上，针对港作机械、靠港船舶、港务工作船、集疏运车辆、铁路疏港机车等排放源，采用“自下而上”方法构建了基于“活动”的港区大气污染物排放清单体系；并基于港区排放清单和岸电应用的环境经济效益对岸电使用的利益相关者展开整体性分析，通过构建岸电项目实施效益的博弈双矩阵模型，探讨不同情景下的均衡策略。

本书中主要成果和方法明晰了长江下游集装箱船舶与港口大气污染物的源汇关系，为实施我国船舶与港口主要污染物排放总量控制计划，切实改善环境质量，制定港口与航运发展规划和相应的环境保护政策等提供科学的决策依据。

感谢江苏省社会科学基金项目(14JD014)、中央高校基本科研业务费项目和江苏省交通运输科技项目(2015Y07)对本书研究过程的支持；感谢“十三五”江苏省重点出版物出版规划项目和河海大学“双一流”学科建设经费对本书出版的支持！感谢河海大学港航物流与绿色发展研究所的同仁和顾健、彭宜蔷等研究生对本书的贡献；感谢南京港龙潭集装箱有限公司提供的大力帮助！

目录

Contents

第 1 章　港区大气污染物来源及成因分析 …… 001

1.1　国内外港区大气污染物的污染现状 …… 003

1.1.1　国内港区大气污染物的污染现状 …… 003

1.1.2　国外港区大气污染物的污染现状 …… 006

1.2　港区主要大气污染物类型及其危害性分析 …… 008

1.2.1　颗粒物(PM) …… 008

1.2.2　柴油颗粒物(DPM) …… 009

1.2.3　氮氧化物(NO_x) …… 010

1.2.4　硫氧化物(SO_x) …… 011

1.2.5　一氧化碳(CO) …… 012

1.2.6　温室气体(以及导致温室效应的物质) …… 012

1.2.7　挥发性有机物(VOCs) …… 013

1.2.8　港区排放与气候变化 …… 015

1.3　港区主要大气污染物排放源分类 …… 015

1.4　小结 …… 018

第 2 章　港区大气污染物排放清单的建立 …… 021

2.1　研究边界与对象 …… 023

2.1.1　研究范围的确定 …… 023

2.1.2　研究对象的确定 …… 023

2.1.3 清单建立的方法与技术路线 …… 023
2.1.4 主要对象的排放因子估算方法 …… 024
2.2 港区船舶排放估算方法 …… 024
2.2.1 船舶类型及其运行工况 …… 024
2.2.2 船舶交通排放评价模型 …… 026
2.2.3 基于引擎功率的排放因子法 …… 028
2.2.4 主机负荷功率计算 …… 029
2.2.5 船舶工作时间 …… 030
2.2.6 主机排放因子 …… 031
2.2.7 主机低负荷排放修正 …… 033
2.2.8 辅机排放因子 …… 036
2.2.9 辅机负荷功率计算 …… 037
2.2.10 燃油修正因子 …… 039
2.2.11 减排措施修正因子 …… 039
2.3 港务船排放估算方法 …… 041
2.3.1 排放源描述 …… 041
2.3.2 排放量估算方法 …… 041
2.3.3 发动机负载因子 …… 042
2.3.4 排放因子、折损率、使用期限 …… 042
2.3.5 港务船温室气体排放因子 …… 044
2.3.6 港务船硫氧化物的排放量 …… 044
2.3.7 燃油修正因子 …… 045
2.4 港作机械排放估算方法 …… 045
2.4.1 排放源描述及数据获取 …… 045
2.4.2 排放量估算方法 …… 047
2.4.3 排放因子 …… 048
2.4.4 负载因子和燃油修正因子 …… 049
2.4.5 港作机械减排技术及其排放控制因子 …… 050
2.4.6 基于燃油消耗量的港口装卸机械排放估算方法 …… 051

2.4.7 物料平衡法 …… 051
2.5 重型集装箱卡车排放估算方法 …… 052
2.5.1 排放源描述及估算方法 …… 052
2.5.2 重型集装箱卡车年型分布 …… 053
2.5.3 排放因子估算方法概述 …… 053
2.5.4 怠速及特定速度排放因子 …… 054
2.6 铁路机车排放估算方法 …… 056
2.6.1 调车机车排放量估算 …… 056
2.6.2 干线运输机车排放量估算 …… 057

第3章 港区大气污染物排放监测方案 …… 059
3.1 港区监测方案总述 …… 061
3.2 港区监测具体实施方案 …… 063
3.2.1 船舶自动识别系统(AIS) …… 063
3.2.2 GPS 监控系统 …… 066
3.2.3 OBD 与 GPRS 无线传输 …… 067
3.2.4 油耗传感器与无线传输模块 …… 068
3.2.5 便携式尾气排放测试系统(PEMS) …… 069

第4章 龙潭集装箱港区大气污染物排放清单构建 …… 075
4.1 龙潭集装箱港区(一期)排放监测调研实施方案 …… 077
4.1.1 龙潭集装箱港区简介 …… 077
4.1.2 龙潭集装箱港区(一期)排放监测总体调研方案 …… 080
4.1.3 港区大气污染物排放清单的编制范围 …… 081
4.2 龙潭集装箱港区靠港船舶大气污染物排放清单 …… 083
4.2.1 调研方案 …… 083
4.2.2 调研情况汇总 …… 086
4.2.3 排放因子确定与参数选择 …… 091
4.2.4 靠港船舶大气污染物排放清单 …… 093

4.3 龙潭集装箱港区港作机械大气污染物排放清单 …… 094
4.3.1 港作机械排放监测调查实施方案 …… 094
4.3.2 典型港作机械排放特征与排放因子确定 …… 097
4.3.3 港作机械活动水平及计算参数获取 …… 110
4.3.4 港作机械大气污染物排放清单 …… 115
4.4 龙潭集装箱港区重型卡车大气污染物排放清单 …… 120
4.4.1 调研实施方案 …… 120
4.4.2 调研主要成果 …… 122
4.4.3 重型卡车排放清单 …… 127
4.5 龙潭港集装箱港区港务船排放清单 …… 131
4.5.1 调研方案与成果 …… 131
4.5.2 港务船排放清单 …… 133
4.6 龙潭集装箱港区2014年大气污染物排放清单 …… 135
4.6.1 龙潭集装箱港区大气污染物排放清单一(基于文献调研的排放因子) …… 135
4.6.2 龙潭港大气污染物排放清单二(基于龙潭港区实测的排放因子) …… 138

第5章 靠港船舶岸电项目实施的博弈分析 …… 141
5.1 船舶主要减排措施 …… 143
5.2 我国岸电发展现状 …… 145
5.3 船舶岸电项目利益相关者整体性分析 …… 147
5.3.1 岸电项目利益相关者的定位确立方法 …… 147
5.3.2 岸电项目利益相关者效益诉求关系 …… 149
5.3.3 岸电项目直接利益相关者诉求分析 …… 151
5.4 岸电项目直接利益相关者博弈分析 …… 153
5.4.1 研究思路和设计 …… 153
5.4.2 利益相关者博弈背景与环境 …… 154
5.4.3 博弈模型的构建 …… 159

第 6 章　基于龙潭集装箱港区排放清单的岸电项目博弈分析 …… 167
6.1　岸电项目社会经济效益分析 …… 169
6.2　博弈矩阵的数据获得和参数设置 …… 170
6.2.1　情景一 政府完全不介入岸电项目 …… 170
6.2.2　情景二 政府介入方式一：国家采取强制措施 …… 178
6.2.3　情景三 政府介入方式二：国家采取有效补贴 …… 180
6.3　结论 …… 183

附录 …… 185
附录一　港务船的零时刻排放因子 …… 187
附录二　港作机械零时刻排放率和折损率 …… 194
附录三　靠港船舶信息调查问卷 …… 205
附录四　港作机械信息调查问卷 …… 206
附录五　重型卡车信息调查问卷 …… 207
附录六　港务船信息调查问卷 …… 208

参考文献 …… 209

第1章

港区大气污染物来源及成因分析

1.1 国内外港区大气污染物的污染现状

1.1.1 国内港区大气污染物的污染现状

由于港口吞吐量增长迅速，各种以柴油机装置作为动力的运输工具和工作机械，包括船舶，港口机械（包括堆高机、起重机、货场用牵引机），集装箱拖车和铁路机车等相应增多，同时港区腹地的交通走廊上出现大量重型卡车，排放出有害的柴油气体，严重影响港区操作人员和附近居民的身体健康。

随着经济的快速发展，大气污染物的排放量日益增加，环境问题变得越来越严重，突出表现为近年来中国中东部大范围同时发生严重雾霾。交通源排放已经成为当前我国诸多地区触发雾霾的重要因素，根据北京市环境保护监测中心提供的数据，北京市 $PM_{2.5}$ 污染的 38.5%源于交通源排放。而作为交通系统重要组成的港区除 $PM_{2.5}$ 外，PM_{10}、DPM（柴油颗粒物）、SO_2、NO_x 等在城市分担率中占比显著，相关文献显示上海港仅船舶排放的大气污染物 PM_{10}、$PM_{2.5}$、NO_x、SO_x、CO_2、CO、HC（碳氢化合物）分别达到 0.46 万 t、0.37 万 t、0.44 万 t、5.73 万 t、3.54 万 t、0.49 万t 和 0.21 万 t，排放温室气体 CO_2 288.55 万 t、N_2O 0.01 万 t、CH_4 0.004 万 t。与全市排放清单总量相比，上海港船舶排放中 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的分担率分别达到 12.0%、9.0%和 5.3%。特别是远洋船主要使用燃料油（也称为渣油或重油）来提供动力、热力和电力，船用燃料油含硫量高（硫含量 3.5%），是 2018 年车用柴油标准的 3 500 倍，船舶燃料油经过发动机的燃烧，其中主要的硫转化成 SO_2，另外一

小部分被氧化为三氧化硫(SO_3),产生硫酸和硫酸盐气溶胶,直接以颗粒物形式排出,质量较差的船舶燃油加上大部分现役船舶均未安装排放后处理设备,导致船舶单位功率的排放远高于机动车。香港 2007 年的船舶大气污染物排放清单中远洋船的排放贡献率最大,其 SO_2 和 NO_x 排放量分别占所有船舶废气排放总量的 79% 和 44%。深圳市远洋船的 SO_2 排放量占全市排放总量第一位,达到 67%,与香港的研究结果基本相符。

远洋船舶进入长江下游或西江下游的内河港区,其排放的大气污染物由于缺乏海向的扩散转移区域,加之内河港口普遍作业设备、工艺落后,特别是移动污染源中内河船舶柴油机 NO_x 排放基本处于无控制状态下,其污染更加严重。以京杭运河江苏段为例,2010 年仅颗粒物排放总量就达到 590.2 t,平均苏南段为 1.52 t/km,苏北段为 0.56 t/km,经济、人口稠密的苏南段航道两侧的颗粒物区域污染更为严重。此外,根据美国和中国香港的相关研究表明,航运业空气污染物中的重金属镍和钒对人体健康有着高度的相关性和巨大的危害性。

中国近年来严重的空气污染问题促使政府公布了新的空气质量标准并大量实施了提升空气质量的措施。部分沿海省市已经开始关注船舶和港口活动的空气污染问题。香港是国内首个执行严格的本地船用低硫油标准(500 ppm,或 0.05%含硫量)的城市,并率先强制要求远洋船靠岸时使用低硫燃料油。继香港之后,深圳市公布了一系列相关措施,推动船舶、货车和港口设备使用清洁能源。其他港口城市和地区,如上海市、青岛市、广东省、江苏省和山东省,均已发布方案推广岸电、电气化港口设备以及电动或天然气动力货车。总体来说,由于国内对船舶和港口的大气污染防治的相关措施和研究尚处于起步阶段,船舶、货运车和港口设备还存在很大的减排空间,推动清洁化的船只、货运车辆和港口设备将能极大地促进国家和沿海的大气污染重点防控区域改善空气质量。

虽然上述规划、计划很令人鼓舞,但这些措施实施起来可能会面临许多挑战。由于缺乏足够的数据,大多数措施在拟定时未充分根据港口特点进行具体分析。多数规划仅泛泛地提出了规划目标,因此,具体的罚则、补贴政策等实施细则只能由省级或市级负责机构与各利益相关方(包括港口和航运业)协商后确定。但如果没有足够的分析作支撑,这些规划将难以得到港口和航运业的有效支持。航运业竞争激烈,如果邻近地区的港口不能共同推行地区性的减排政策,船舶有可能转向

监管力度宽松的港口，这势必导致污染转移，并大大削弱港口已实施的防治措施的减排效果。

为了应对上述挑战和研究的不足，港口或港口区域需进行更多的研究，以建立港口大气污染物排放清单，评估一个港口或一个地区采取不同的污染控制措施所需的成本和可能的效益。例如，岸电或 LNG 船舶等措施的成本和效益可能会因港口的具体情况而存在很大差异，这种分析将有助于港口制定最优的减排方案以达到最佳控制效果。随后，可以在防治措施成本效益分析的基础上制订“港口清洁空气行动计划”，以指导如何削减船舶和港口的废气排放。政府也应评估相关的减排政策对港口竞争力的影响，并制定应对方案，这将能够为船舶和港口空气污染防治政策争取更多的支持。最终，实施区域性的、甚至全国性的废气减排方案，例如设立排放控制区（ECA），将能够有效地防止船舶转移到环保要求较宽松的港口，并确保拟定的减排方案能够实现最佳减排效果和健康效益。

上海和香港是国内最早意识到船舶和港口空气污染问题的两个港口城市。我国的第一份船舶大气污染物排放清单是上海市环境监测中心于 2003 年为上海港编制的，随后于 2011 年进行了修订。香港特区政府于 2007 年委托研究机构编制了一份全面的船舶大气污染物排放清单。根据清单研究结果，思汇政策研究所、香港科技大学和香港大学共同开展了一项研究，评估了珠三角地区船舶废气排放的健康影响和减排措施的效果。但上述研究对港作机械和集疏运车辆的排放研究较少涉猎或不够深入。

作为国际海事组织（IMO）的成员国之一，中国签署了《防止船舶污染国际公约》（MARPOL），应执行其对国际船舶的环保要求，包括该公约的附件 Ⅵ。附件 Ⅵ 是专门针对船舶空气污染防治的，该法规允许远洋船燃烧的船用燃料油含硫量高达 35 000 ppm。我国船舶的相关规范尚不完善，与之形成对比的是，道路车辆和非道路移动机械发动机（如农用拖拉机及建筑设备）使用的柴油含硫量已实施严格限值，即控制在 350 ppm 以内。在珠江三角洲和长江三角洲地区的主要城市，机动车用柴油和汽油的含硫量控制在 50 ppm 以下；北京、上海和香港的车用燃油含硫量标准更为严格，为 10 ppm，与美国、欧盟及日本的水平大致相同。

就 NO_x 排放而言，航运业的废气排放法规一向比车辆和非道路移动机械的排放标准宽松。船用发动机在高温高压条件下运行，并且一般未采用有效的排放控

制措施，因此，船舶单位燃料 NO_x 的排放量远高于机动车。

柴油发动机烟气中的柴油颗粒物已被世界卫生组织（WHO）的癌症研究所认定为致癌物质。柴油颗粒物毒性较强，体积非常小，包含了大约 40 种有毒污染物，其中 15 种被确认为致癌物质。颗粒物中的有毒物质多环芳烃（PAH）还可随着颗粒物进行远距离输送（最远可达 10 000 km）。此外，远洋船（尤其是运油船）还会排放挥发性有机化合物（VOCs）和重金属等污染物。

1.1.2 国外港区大气污染物的污染现状

洛杉矶地区（圣彼得罗湾）是美国加州经济最发达、人口最密集的大都会地区之一，其所在的南海岸盆地的地形和气候条件使得空气污染物更容易聚集。由洛杉矶港、长滩港、南海岸空气质量管理区、加州空气资源委员会和美国环境保护局共同制定的《圣彼得罗湾港口清洁空气行动计划》指出：港口的运输工具和工作机械均不断排出有害污染物，以柴油微粒物质、氮氧化物和硫氧化物三大空气污染物为主，是造成空气污染的主要来源。洛杉矶港以 2001 年为基准年，长滩港以 2002 年为基准年，在三大主要空气污染物中，远洋船舶都是主要污染物来源，其次为重型卡车。上述清洁空气计划的实施取得了良好的实际效果，洛杉矶港和长滩港创造的能快速改善空气品质的绿色港口政策也已被 IMO 和主要航运国家认可。洛杉矶港、长滩港及各码头经营公司分别按年度计划执行了各项控制措施，在码头管理、卡车运输、铁路运输等领域的业务操作中减少空气污染，以符合清洁空气的计划指标。该计划中通过测算建立港口污染物排放清单，掌握港口污染现状，并以此为基础对降低健康风险提出了明确的要求：到 2020 年，在位于港口排放源和港区内的社区，降低 85% 由于港口 DPM 排放引起的居民癌症风险。同时设定了 2014 年、2023 年需达到的 DPM、NO_x 和 SO_x 的减排量。2010 年伊始，长滩市市长宣布，从新年的第一天起禁止 8 000 多辆 1993 年以前制造的旧集装箱卡车进出港口，并由新一代的卡车来取代；另约有 1 550 辆 1994—2003 年制造的卡车已安装柴油废气过滤器。所有进出港口的卡车都将接受无线电频率的识别（RFID），以确保每天几百辆卡车都是经过注册并加装电子验证仪器、符合减污标准的新一代卡车。所以洛杉矶港、长滩港港区大气污染物防治效果显著，相比于国内，污染状况严格控制在环境保护标准范围内，排放清单制定也相对已经很成熟，监测与控制技术也随

之顺利展开。

欧洲及亚洲一些国家的政府意识到航运的空气污染对健康和环境的影响，并采取了相关措施来防治船舶和港口的空气污染，如推出自愿性计划以鼓励使用低硫燃料和清洁技术。对于远洋船，则由 IMO 对其制定 SO_x、PM 和 NO_x 的排放标准。IMO 还在全球设定了四个排放控制区(ECA)。其中，在欧洲北海和波罗的海的 ECA 范围内的船舶必须满足比在非 ECA 海域航行时更严格的 SO_x 排放限值(同时间接控制 PM 排放)；在北美洲和加勒比海 ECA 中航行的船舶则必须同时执行比在非 ECA 海域航行时更严格的 SO_x 和 NO_x 排放标准；在北美和欧洲的 ECA 范围内航行和停靠的船舶，其使用的燃油含硫量不可超过 10 000 ppm。该标准在 2015 年将收紧至 1 000 ppm。该限值远低于船用燃料油含硫量的世界平均值(26 000 ppm)和全球船用燃料油含硫量的最大限值(35 000 ppm)。自 2016 年起，所有新建的远洋船在北美洲和加勒比海 ECA(海岸线以外 200 海里内的海域)航行时，其 NO_x 排放必须比 2015 年的远洋船低 75%。欧盟的内河船和在美国航行的美籍非远洋船都必须执行比非道路发动机的燃油含硫量和 NO_x 排放标准更严格的限值。新加坡也推出了自愿转用清洁能源的激励政策：如果远洋船在进入新加坡港水域后自愿转用清洁能源，则可以获得减免港口费用的优惠。

多项研究预计 ECA 政策具有较高的经济性。据估计，欧洲的北海和波罗的海 ECA 执行低硫燃料的标准后，其健康和环境效益将是达标所需费用的 4 倍。而北美洲 ECA 执行严格的 NO_x、SO_x 和 PM 排放标准，其所带来的效益高于达标所需费用的 10 倍。

上述法规和激励政策已推动了航运业的替代燃料和先进的船舶废气排放控制技术的发展与应用。随着 IMO 将于 2020 年实施更为严格的排放标准，尽管以含硫量低的船用燃料油替代高硫燃料油仍是满足燃油含硫量要求的最常用方法(根据相关调查，约 68%的受访船公司选择此方案)，但一些船公司也开始测试并应用末端尾气净化装置来降低尾气中的硫氧化物(SO_x)(约占受访船公司的 21%)。由于欧美多国实施了激励政策、北美执行了严格的 NO_x 排放标准，先进的 NO_x 排放控制技术(如选择性催化还原技术 SCR 和废气再循环装置 EGR)也已在一些船只上应用。在美国、欧盟，以液化天然气(LNG)代替船用燃料油的技术正逐渐受到重视。LNG 船舶的 NO_x、SO_x 和 PM 排放量比使用低硫燃料的船舶更低，而且 LNG