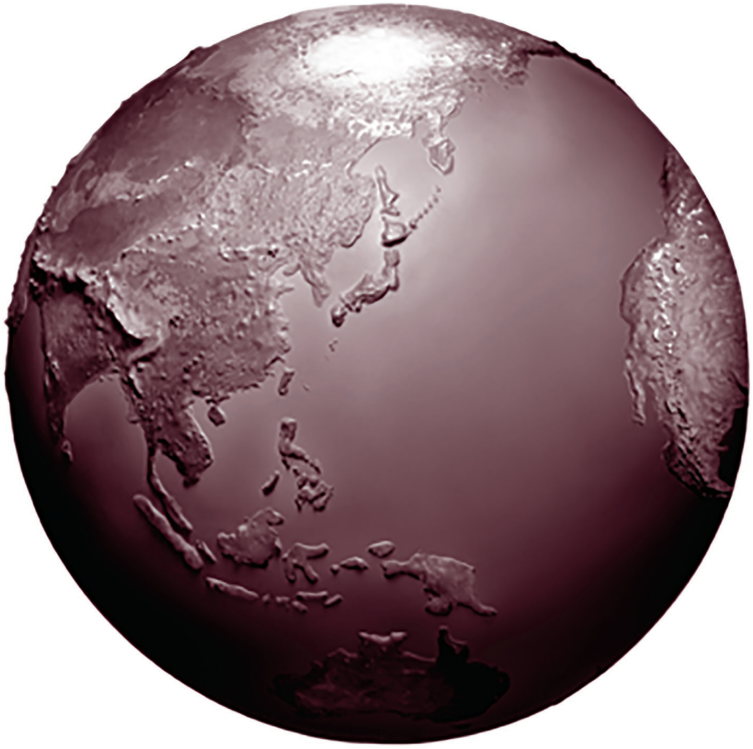
HEI

专题报告 22

2019年12月



中国长三角区域和上海地区的船舶运输对空气污染物排放、空气质量和健康的影响

张艳，冯俊岚，刘聪，赵俊日，马蔚纯，黄成，安静宇，沈寅，伏晴艳，王书肖，丁点，葛王琦，冯淑慧，Kethural Manokaran，Allison P. Patton，Katherine D. Walker，阚海东

执行摘要

健康影响研究所

关于HEI

美国健康影响研究所（HEI）是1980 年特许成立的非营利性组织，作为一家独立研究机构，旨在为空气污染对健康的影响提供高质量、公正且具有针对性的科学研究。为完成此项使命，该机构

- 明确健康影响研究的最高优先领域；
- 竞争性地资助和监督科研项目；
- 提供 HEI 支持研究和相关研究的深入独立审查；
- 整合 HEI 与其他机构的研究成果以获得更广泛的评估结果；
- 与公共和私人决策者交流HEI的研究和分析结果。

HEI通常从美国环境保护署和全球汽车行业获得平衡资金支持。通常情况下，美国及世界各地的其他公共和私人机构同样支持重大项目或研究计划。HEI在北美、欧洲、亚洲和拉丁美洲资助了340多个研究项目，其研究结果为一氧化碳、空气毒物、氮氧化物、柴油机尾气、臭氧、颗粒物和其他污染物的相关决策提供了依据。这些结果已经出现在HEI发表的260多份综合性报告中，以及1000多篇同行评议文献。

HEI 独立董事会成员包括致力于促进公私伙伴关系的科学和政策领导人，此种关系是该机构的核心。本报告的最终定稿由独立的外部同行评议员审阅，这些评议员由HEI根据其专业知识挑选出来的。

所有项目成果均通过HEI的网站（*www.healtheffects.org*）、纸质报告、简报和其他出版物、年度会议以及演示文稿向立法机构和公共机构进行广泛告知。

执行摘要

中国长三角区域和上海地区的船舶运输对空气污染物排放、空气质量和健康的影响

张艳[1]，冯俊岚[1]，刘聪[1]，赵俊日[1]，马蔚纯[1]，黄成[2]，安静宇[2]，沈寅[3]，伏晴艳[3]，王书肖[4]，丁点[4]，葛王琦[5]，冯淑慧[6]，Kethural Manokaran[7]，Allison P. Patton[7]，Katherine D. Walker[7]，and 阚海东[1]

[1]复旦大学，上海，中国；[2]上海环境科学研究院，中国；[3]上海市环境监测中心，中国；[4]清华大学，北京，中国；[5]上海市城乡建设和交通发展研究所，中国；[6]自然资源保护协会，香港，中国；[7]健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州，美国

引言和背景

空气污染已成为中国面临的一大挑战。尽管最近取得了一些进展，但许多污染源因地理位置而异仍不同程度上地持续制造空气污染。在特定区域，有一些污染源相比于其他更为重要；之前的几项研究已经确定了工业、发电、交通、农业生物质燃烧和住宅各部门的重大贡献(Ding等人，2019年；GBD MAPS工作组，2016年)。尽管为了改善空气质量，中国在2013年启动了首个空气污染防治行动计划，导致2017年$PM_{2.5}$水平降低了25%或更多，中国$PM_{2.5}$的年均浓度仍约为53 μg/m^3，远远高于世界卫生组织的健康空气质量标准（健康影响研究所，2019年）。这对公共健康的潜在影响是巨大的。2015年，来自各种来源的空气污染造成中国约110万人死亡(Cohen等人，2017年)。

尽管这类国家研究通常没有将船舶航运业纳入分析，但也有一些其他的研究探讨了航运业对全球的影响，以及最近对中国的具体影响。据估计，全球范围内，船舶排放的空气污染造成的过早死亡约为1.83万至14.79万人，其中主要源头是由国际航线上的大型船舶造成的$PM_{2.5}$(Corbett等人，2007年；Partanen等人，2013年；Winebrake等人，2009年)。Liu及其同事(2016年)估计，2013年船舶运输导致东亚地区有5560至2.55万人过早死亡，其中中国大陆约有1.8万人。最近一项全球分析估计，全球13.7万例心血管疾病和肺癌死亡与船舶排放有关，其中80%病例发生在亚洲，而这些早亡的发生可以通过更严格的控制来避免，特别是通过减少船用燃料的含硫量，至2020年从约2.7%(质量/质量)下降到小于0.5% (Sofiev等人，2018年)。

该文件总结了专题报告22。该文件的最终内容未由私人机构(包括支持健康影响研究所的机构)进行审查，没有经过缔约方私人机构的审查；因此，该文件不能体现这些机构的意见或政策，也可由此推断该文件无需获得其批准。

与该执行摘要有关的信函可寄至：张艳博士，环境科学与工程系，复旦大学，上海，200438，中国；e-mail: *yan_zhang@fudan.edu.cn*; or Allison Patton, Health Effects Institute, 75 Federal Street, Suite 1400, Boston, MA 02110, U.S.A.; e-mail: *apatton@healtheffects.org*.

* 缩写和其他术语列表请参见执行摘要末尾。

此项研究的相关数据

- 本研究对长三角区域(9-km分辨率)和上海市(1-km分辨率)的航运和相关活动对人群的空气质量和健康的影响进行了全面和详细的空间分析。
- 本研究考察了基准年（2015年，中国国内排放控制区政策[DECAs]*实施前）和三种未来排放控制情景（2030年）下的排放和健康影响。
- 对基线和未来的分析都表明了控制船舶排放和人口密集区附近的相关船舶交通活动对空气质量和人类健康的重要性，尤其是沿海或进入上海内陆航道的国际船舶。
- 经估算，2015年，在长三角区域，$PM_{2.5}$暴露导致约3600人因中风、慢性阻塞性肺病、缺血性心脏病和肺癌而过早死亡，约27万人入院。其中过早死亡人数的三分之一来自上海。
- 对当前政策情景的分析表明，完全遵守中国现行的DECA政策对健康有明显的益处；到2030年，与2015年相比，过早死亡人数将减少一半。实施更严格的和有抱负的政策情景可以大大减少2015年的死亡率负担(分别减少62%和77%)。要求使用含硫量为0.1%的船用燃料，并将其排放控制范围扩大到100海里（NM）以内，将是船舶排放控制最有效的措施。

该项目的总体目标是对上海市以及长三角区域船舶运输及其相关活动，目前和未来潜在的空气质量和健康影响进行综合评估，其评估的空间尺度分辨率是目前为止较精细的(图ES-1)。我们以2015年为基准年，评估了中国实施DECAs之前的航运影响，以及实施最新DECA和更理想的船舶和绿色港口政策对未来(2030年)的影响。

科学方法

图ES-2中的流程图概述了为评估本研究中船舶和航运相关的来源对空气污染物排放、环境空气质量水平、人口暴露和健康负担的影响而采取的步骤和必要的相关数据输入。主要步骤如下:

- 以2015年为基准年，制定长三角区域和上海地区航运以及与航运相关来源的排放清单，并在其他控制情景下预计2030年的排放清单。非航运来源的排放量来自现有的国家和区域排放清单。
- 利用天气研究与预报模式(WRF 3.3版)和通用多尺度空气质量模式(CMAQ 4.6版)搭建模拟系统(WRF-CMAQ)，模拟总行业排放量和船舶特定排放量对长三角区域和上海地区环境污染物和人口加权的$PM_{2.5}$浓度的影响。分别对2015年和2030年在如下所述的三种替代排放控制政策下进行了模拟。
- 使用由美国环境保护署(U.S. EPA，2015年)开发的开源软件——环境效益图像展示与分析系统通用版(BenMAP-CE 1.4版)，根据某一年的超额死亡人数和住院人数为定义来估计健康负担。我们与中国科学家合作，确定最合适的研究，以描述中国暴露在$PM_{2.5}$环境中的风险，并获得上海和长三角区域的适当死亡率和住院率。

备选控制政策的评估

我们在三种备选政策情景下(表ES-1)研究了2030年控制长三角区域船舶排放的潜在空气质量和健康影响。“现行”政策的目的是研究全面实施中国第二次国内排放控制政策(DECA 2.0)的优势，该政策于2018年7月首次提出。在这种情况下，船舶对0.5%硫燃料的需求与国际海事组织(IMO)设定的2020年全球硫燃料含量限值相同。然而，为了评估中国政策的优势，我们假设超过海岸12海里的船舶使用的硫燃料含量将与2015年相同。第二种“更严格”的政策假设燃料硫含量较低，对氮氧化物(NO_x)的控制较现行政策更为严格，但仍然适用于距海岸仅12海里的船舶。第三种“理想”政策情景将延伸到离岸100海里的船舶；这一政策设想比较理想，因为执行需要得到IMO的同意。由于即将实行的低硫燃料和电气化要求，未来货物运输和港口机械的排放预计将减少，尽管我们未来的政策分析中没有包括这一点。

主要发现

基准年(2015年)

我们评估了船舶排放总量的相对贡献及其对长三角地区离岸不同距离的$PM_{2.5}$平均浓度的影响，强调了近海和靠近人口中心的航运活动的重要性。我们发现，根据污染物的不同，船舶排放的污染物约有48%至75%是在离岸12海里范围内；超过90%在离岸96海里内。在核心城市，12海里范围内的船舶排放量占估计的人类$PM_{2.5}$暴露量的53%至83%，在本次分析中以人口加权$PM_{2.5}$浓度表示。

长三角区域个别核心城市以航运为来源的年人口加权$PM_{2.5}$浓度范围从0.5 μg/m³至2.5 μg/m³ (平均0.93 μg/m³)(图ES-3)，占所有污染源人口加权$PM_{2.5}$浓度的1%到6%。长三角区域航运来源的人口加权$PM_{2.5}$占比最重的四个城市均为沿海城市。其中，上海船舶相关的平均人口加权$PM_{2.5}$浓度(2.5 μg/m³)最高。

对上海港区(域4)内船舶及相关排放详细分析发现，内陆水域船舶导致的平均年人口加权$PM_{2.5}$浓度最高(0.48 μg/m³)，其次是沿海船舶(0.18 μg/m³)、卡车和港口机械(0.15 μg/m³)，但随空间不同有所变化(图ES-4)。内陆水域船舶导致的人口加权$PM_{2.5}$浓度在上海地区是最高的，这是由于人口密集以及靠近长江与黄浦江。

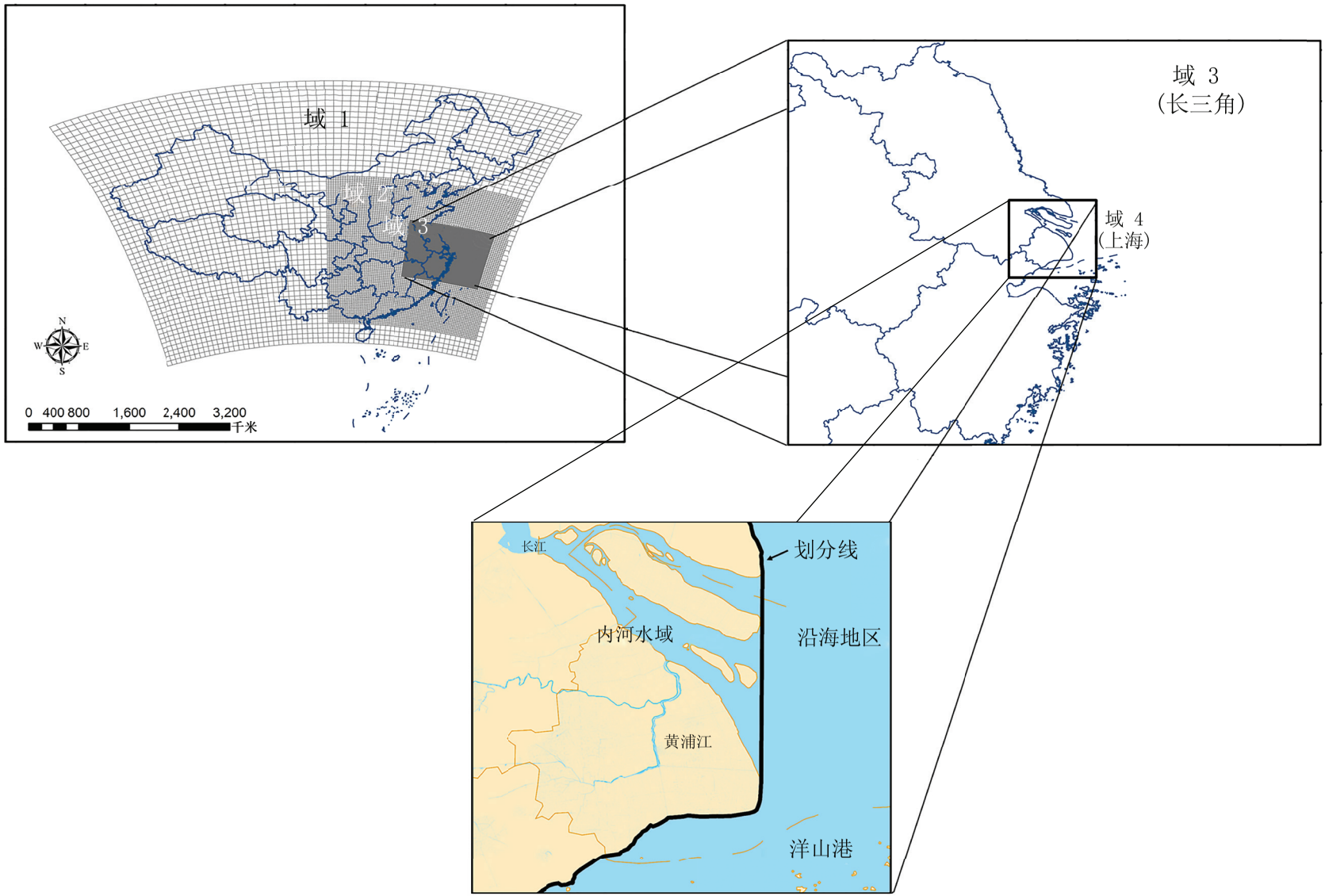
我们的研究发现，在长三角区域和上海地区航运排放对造成长期$PM_{2.5}$(空气动力学直径 ≤ 2.5 μm 的颗粒物)暴露导致的疾病负担具有一定贡献。我们估计，2015年长三角区域约有3600人因长期暴露于船舶排放的空气污染而死于中风、慢性阻塞性肺病、缺血性心脏病和肺癌(图ES-5)。考虑到整个长三角区域模拟区域内航运排放的影响，长期暴露在船舶造成的$PM_{2.5}$中导致上海约1100人过早死亡。如图所示，尽管基础数据和方法存在差异，但结果与其他地区和港口的结果基本一致，并且与之成比例。

短期、每天暴露于与航运相关的$PM_{2.5}$中也会增加健康负担。在长三角区域，这些暴露导致了约1000例额外死亡人数，因各种原因额外入院人数超过27万例。在上海港口区域内，我们估计约有73例额外死亡人数和16000例额外住院人数是由短期暴露于所有航运来源的$PM_{2.5}$造成的。影响最大的是内陆水域船舶，其次分别为沿海船舶、集装箱货运卡车和港口内机械。

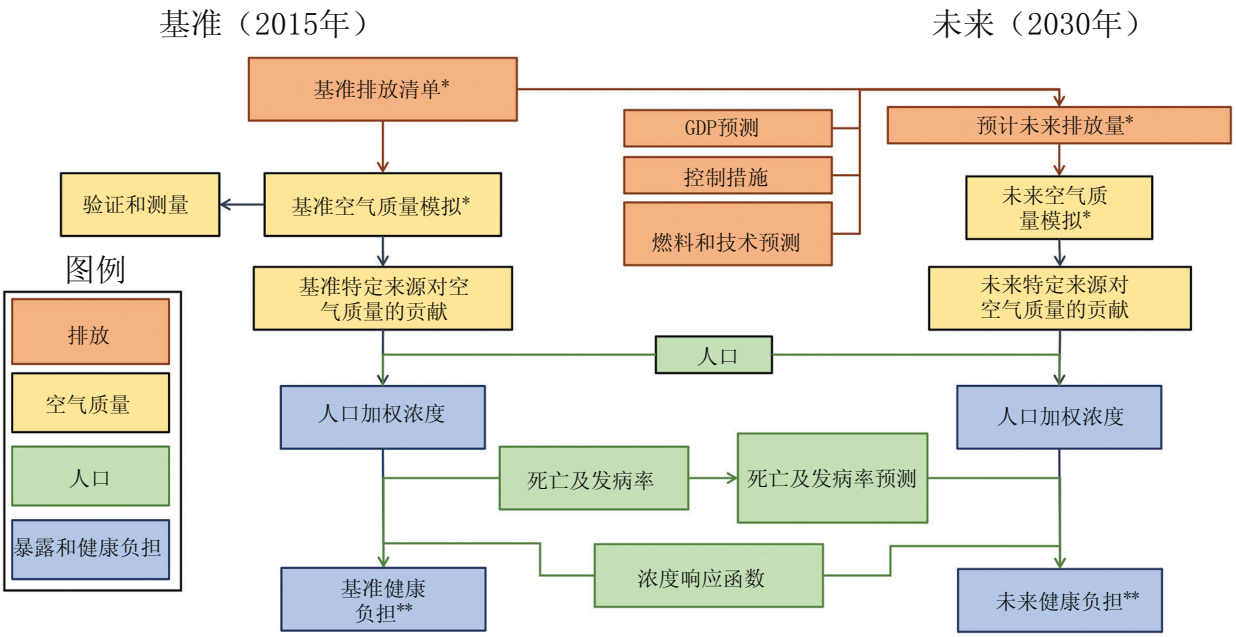
未来政策情景的分析

我们的分析预测，现有的各种类的中国空气质量政策可能大幅减少长三角区域人类$PM_{2.5}$ 暴露量，预计从2015年的48 μg/m³下降到2030年的 32 μg/m³。其中只有一小部分的变化是由于航运排放的减少。预计航运导致的人口加权年平均$PM_{2.5}$在当前的情景下是0.36 μg/m³，在较严格情景下是0.26 μg/m³，以及在理想的情景下是0.16 μg/m³(分别占所有来源$PM_{2.5}$的1.1%、0.8%和0.5%)。

尽管在暴露方面有这些微小的变化，但我们估计，到2030年，这些政策都将有助于显著减少因航运和相关排放而导致的过早死亡人数(图ES-6)，这反映出遭受潜在暴露仍有大量人口。目前的政策预计将减少中风、慢性阻塞性肺病、缺血性心脏病和肺癌造成的健康负担，与2015年$PM_{2.5}$导致的估计死亡人数相比，减少约一半(约1800人)。更严格和理想的政策预计将进一步减少死亡率负担，分别减少到1400例和830例死亡人数。与离岸较远的船舶相比，离岸较近的船舶造成的$PM_{2.5}$浓度更高，因此对空气质量和健康的大部分边际效益是通过离岸较近的船舶获得的。然而，在100海里DECA范围内使用0.1%硫燃料的理想情景，相比于维持在12海里DECA范围内，在减少$PM_{2.5}$污染和相关的健康影响方面会更有效。



图ES-1. 上海市嵌套式研究区地图及内河水域划分。主要分析的空间分辨率为长三角区域（YRD）9公里（域3）和上海1公里（域4）。内河水域是指长江入海口的黑线以上部分；内河船舶是指进入该海域的内河船舶、沿海船舶和远洋船舶。



* 有无航运来源

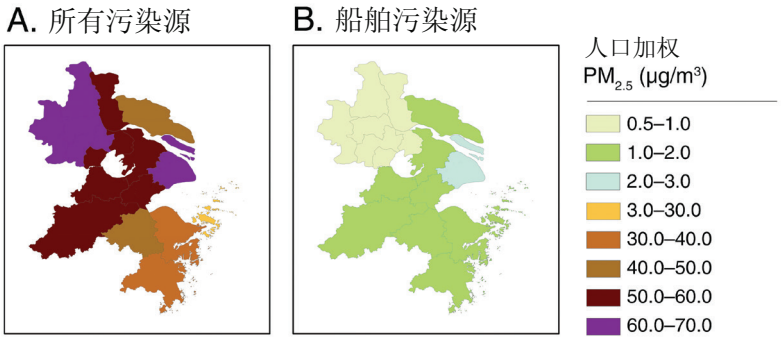
** 包括死亡率、发病率和残疾调整后的生命年

图ES-2. 评估排放对空气质量及健康影响的程序流程图。

表 ES-1. 未来的政策情景

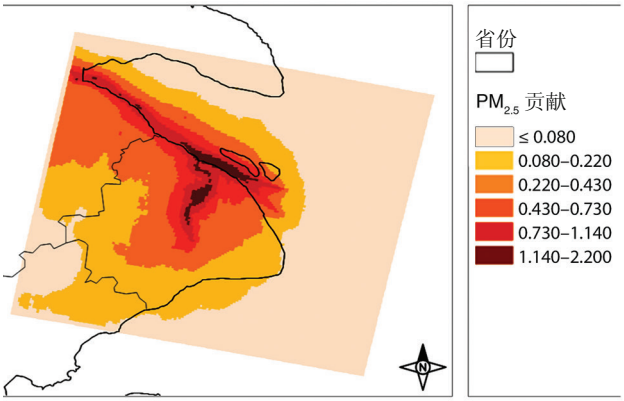
情景	控制区域	硫控制	NO_x 控制
基准年(2015年)	12 NM	所有船舶在进入DECA前都要更换含硫量0.5%燃料	2000年以前建造的船只不受管制 I级 2000年1月1日或以后建造的船舶 II级 2011年1月1日或以后建造的船舶
当前政策情景，2030年	12 NM	泊位使用含硫量0.1%燃料 巡航时使用含硫量0.5%的燃料	中国II型内河船舶 II级 外国船舶
更严格政策情景，2030年	12 NM	含硫量0.1%燃料	III级 所有船舶引擎
理想政策情景，2030年	100 NM	含硫量0.1%燃料	III级 所有船舶引擎

NM = 海里

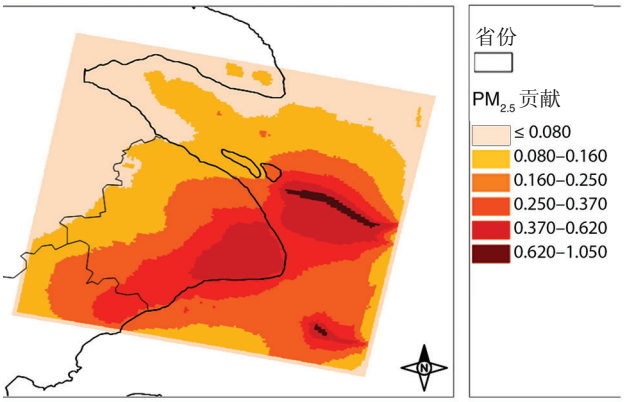


图ES-3. 长三角区域核心城市年平均人口加权$PM_{2.5}$浓度（μg/m³)来自（A）所有的空气污染和（B）船舶。

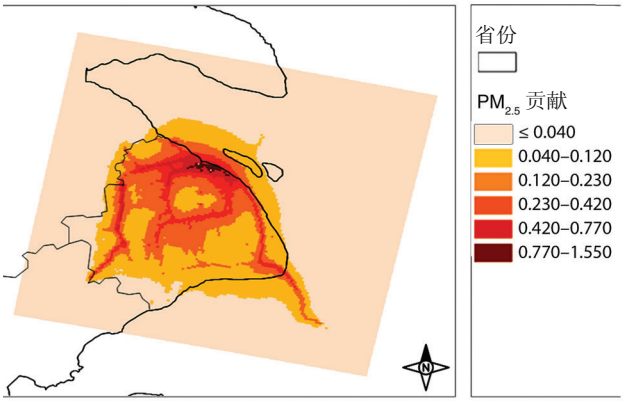
A. 内河航运



B. 沿海航运



C. 柴油货运卡车和港口机械



图ES-4. (A)内河航运、(B)沿海航运和 (C)柴油货运卡车和港口机械对2015年上海年均人口加权$PM_{2.5}$的贡献。

结论与建议

该研究提供了一个全面和详细的空间分析，分析了在实施DECA之前的基准年（2015年）和三种未来情景条件下，上海及长三角区域航运和相关活动对空气质量和人群健康的影响，这三种情景被设计用于确认2030年可替代排放控制政策的有效性。它证实了之前的研究成果，并为控制未来船舶排放和改善中国空气质量提供了额外的科学证据。

基础和未来的分析都显示了控制靠近人口密集区的船舶运输和相关活动排放的重要性。基础分析表明，长三角区域船舶排放的二氧化硫（SO_2）和$PM_{2.5}$排放量分别有61%和48%发生在离岸12海里范围内(中国目前DECA的界定)。然而，这些船舶排放的大气污染物90%以上发生在96海里以内。由于长程传输和一次排放转化为$PM_{2.5}$的情况，船舶排放对空气质量和健康的影响从沿海城市向内陆延伸。

我们对2015年基准年情景的分析表明，在海岸12海里范围内全面实施当前的DECA要求对空气质量和健康有益。而最大的收益预期来自更理想的情景，与IMO协议的要求类似，要求最严格的燃料硫限制范围达到100海里。对内河船舶(即驶入上海内陆水域航道的船舶)对空气质量和健康负担的相对影响进一步详细评估，强化了控制排放的重要性，尤其是排放发生在靠近上海这样的高密度人口中心的地方。

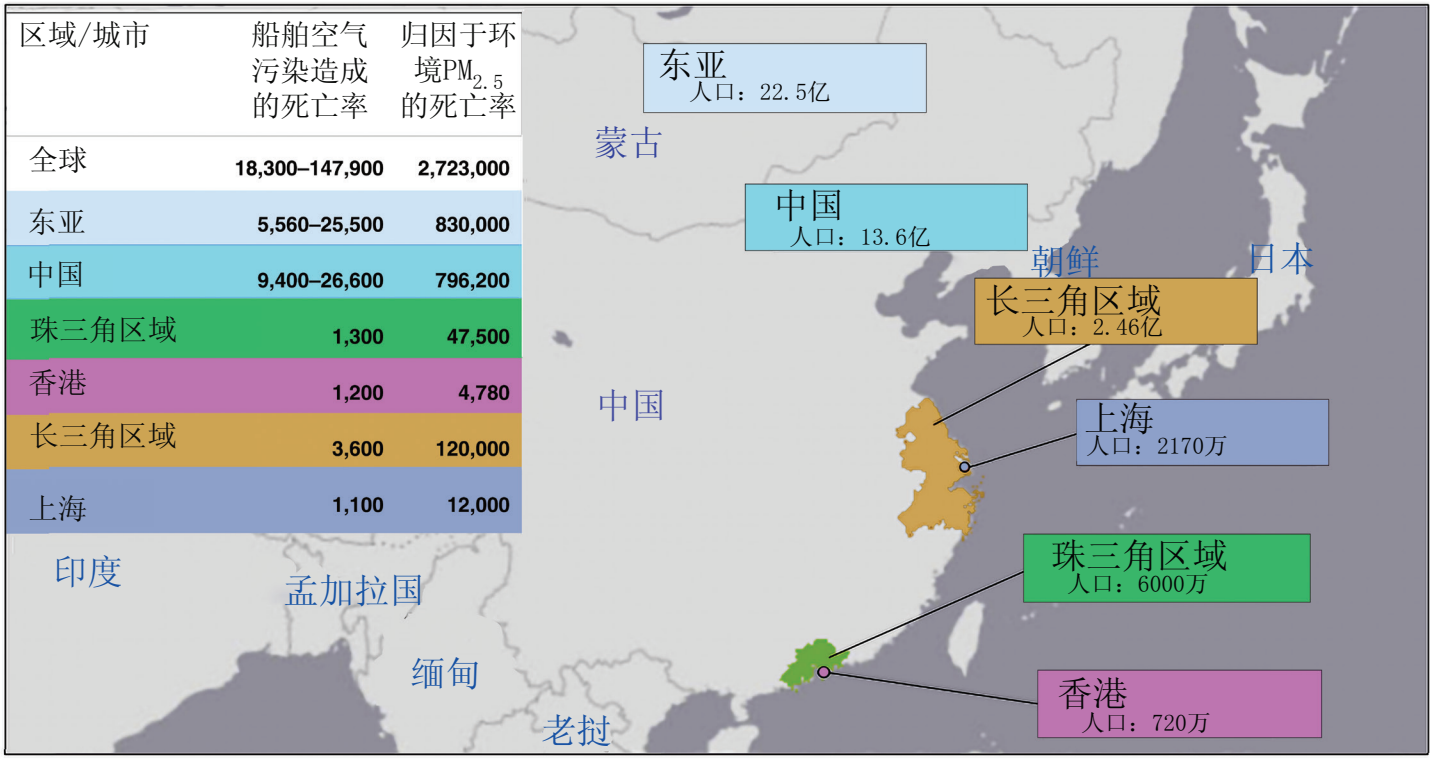
我们对货运卡车和港口内活动对空气质量的影响的分析具有空间局限性，可能低估了对长三角区域的影响。需要更多的数据来更全面地确定和描述这些来源的影响。

由于我们的分析假设100%符合现有和拟议的法规，空气质量和健康效益可能被夸大了。因此，合规性监测和执行是任何现行和未来政策的关键组成部分。

空气质量的明显改善将增强管理部门对实施和执行强有力法规的信心。例如，可通过在受船舶活动影响区域附近设置空气质量监测站评估空气质量的变化(如Mason等人，2019年；Zhang等人，2019年)。由于与其他主要$PM_{2.5}$污染源相比，船舶对$PM_{2.5}$污染在绝对值和相对值上占比都很小，因此，最好确保对更可靠的船舶排放指标的空气污染成分进行持续监测（例如钒和镍），以观测和评估相关法规的影响。我们建议在船舶活动密集的城市及区域开展这类系统研究，以评估这些规定随着时间的推移在减少空气污染方面的有效性。

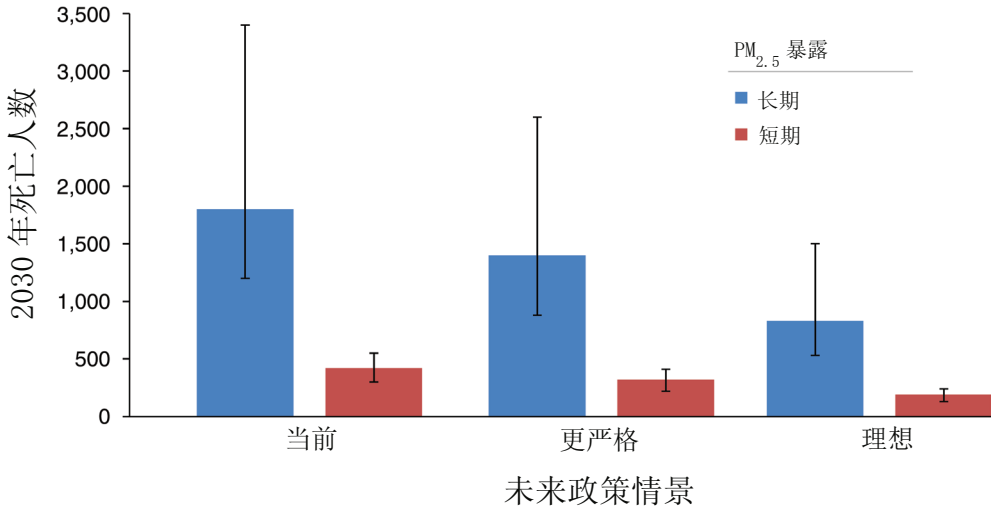
鸣谢

在此感谢我们的外部评审员，Neal Fann（美国环境保护署）和Noelle Selin博士（麻省理工学院），感谢他们在这项研究的发展过程中进行了有益的讨论和指导。我们非常感谢绿色港口项目的合作伙伴，特别是冒晓立（国际清洁运输委员会），一路上为我们提供了宝贵的技术和政策建议，以及辛焰（中国能源基金会），确保我们能够有效地合作。我们还要感谢Lee Ann Adelsheim提供的研究和编辑协助；管理外部审查流程的Eleanne van Vliet；Mary Brennan负责编辑本报告；以及Hope Green、Fred Howe、Hilary Selby Polk和Ruth Shaw为本期特别报道所做的贡献。



区域/城市	船舶空气污染造成的死亡率	归因于环境$PM_{2.5}$的死亡率
全球	18,300–147,900	2,723,000
东亚	5,560–25,500	830,000
中国	9,400–26,600	796,200
珠三角区域	1,300	47,500
香港	1,200	4,780
长三角区域	3,600	120,000
上海	1,100	12,000

图ES-5. 文献中船舶和所有来源的空气污染造成人口年死亡率的估计值(2005至2012年)，以及本研究的结果。有关数据源和细节，请参阅完整报告中的图和数据。



图ES-6. 2030年长三角区域在未来控制船舶排放的其他政策情景下，因长期和短期暴露于与航运相关的$PM_{2.5}$而导致的过早死亡人数。

参考文献

Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, et al. 2017. 环境空气污染引起的全球疾病负担的估计和未来25年趋势：对2015年全球疾病负担研究数据的分析。Lancet 389:1907-1918; doi:10.1016/S0140-6736(17)30505-6.

Corbett JJ, Winebrake JJ, Green EH, Kasibhatla P, Eyring V, Lauer A. 2007. 船舶排放的死亡率：全球评估。Environ Sci Technol 41:8512-8518.

Ding D, Xing J, Wang S, Liu K, Hao J. 2019. 2013-2017年中国排放控制、气象因素、人口增长和基线死亡率变化对环境$PM_{2.5}$和$PM_{2.5}$相关死亡率下降的贡献。Environ Health Perspect 127(6); doi:10.1289/EHP4157.

GBD MAPS Working Group. 2016. 燃煤和其他主要大气污染源所致的中国疾病负担。专题报告20。Special Report 20. Boston, MA:Health Effects Institute.

Health Effects Institute. 2019. 全球空气质量报告2019。Boston, MA:Health Effects Institute.

Liu H, Fu M, Jin X, Shang Y, Shindell D, Faluvegi G, et al. 2016. 东亚地区远洋船舶排放的健康和气候影响。Nature Climate Change 6:1037-1041; doi:10.1038/nclimate3083.

Mason TG, Chan KP, Schooling CM, Sun S, Yang A, Yang Y, et al. 2019. 香港航运排放政策对空气质量的影响：责任研究。Chemosphere 226:616-624; doi:10.1016/j.chemosphere.2019.03.173.

Partanen AI, Laakso A, Schmidt A, Kokkola H, Kuokkanen T, Pietikainen JP, et al. 2013. 气候和空气质量在改变船舶燃料硫含量中的权衡。Atmos Chem Phys 13:12059-12071; doi:10.5194/acp-13-12059-2013.

Sofiev M, Winebrake JJ, Johansson L, Carr EW, Prank M, Soares J, et al. 2018. 船舶使用更清洁燃料在气候平衡方面为公众健康提供的益处。Nat Commun 9:406; doi:10.1038/s41467-017-02774-9.

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2015. 环境效益图像展示与分析系统：社区版 (BenMAP-CE)用户手册和附录。Available: *www.epa.gov/benmap* [accessed August 30, 2018].

Winebrake JJ, Corbett JJ, Green EH, Lauer A, Eyring V. 2009. 减轻海运污染对健康的影响：低硫燃料规定的评估。 Environ Sci Technol 43:4776-4782.

Zhang X, Zhang Y, Liu Y, Zhao J, Zhou Y, Wang X, Yang X, Zhong Zou, Cangang Zhang, Qingyan Fu, Jianming Xu, Wei Gao, Nan Li, Jun Chen, 2019. Changes in SO_2 Level and $PM_{2.5}$ Components in Shanghai Driven by implementing the Ship Emission Control Policy. 排放控制区政策实施前后上海地区SO_2 和$PM_{2.5}$ 组分的变化。Environmental Science and Technology, 2019, 11580-11587

缩写和其他术语

DECA	国内排放控制区(中国)
GBD MAPS	主要空气污染源所致全球疾病负担
IMO	国际海事组织
NM	海里
$PM_{2.5}$	空气动力学直径 ≤ 2.5μm 的颗粒物
U.S. EPA	美国环境保护署
WRF-CMAQ	天气研究与预报和社区多尺度空气质量建模系统
YRD	长三角区域

撰稿人

同行评议员

吴家颖, 中国香港商界环保协会政策研究部负责人

Hugo Denier van der Gon, 荷兰乌得勒支TNO（荷兰国家应用科学院）气候、空气和可持续性方向资深科学家

Yuxuan Wang, 美国德克萨斯州休斯顿大学地球与大气科学系助理教授

黄子惠, 中国香港中文大学赛马会公共卫生及初级保健学校职业和环境卫生司兼职教授

HEI项目工作人员

Katherine Walker, 首席科学家

Allison P. Patton, 在职科学家

Kethural Manokaran, 助理研究员

Lee Ann Adelsheim, 助理研究员

Kathryn Liziewski, 助理研究员

Eleanne van Vliet, 在职科学家（同行评议管理）

Hilary Selby Polk, 总编辑

Mary K. Brennan, 顾问编辑

Hope Green, 编辑项目经理

Fred Howe, 校对员

Ruth E. Shaw, 排版人员

出版记录：该文件于2019年12月发布在 www.healtheffects.org。

执行摘要引用情况：

Zhang Y, Feng J, Liu C, Zhao J, Ma W, Huang C, 等人，2019。执行摘要。中国长三角区域和上海地区的航运对空气污染物排放、空气质量和健康的影响。专题报告22。波士顿，MA：健康影响研究所。

专题报告22引用情况：

Zhang Y, Feng J, Liu C, Zhao J, Ma W, Huang C, 等人，2019。中国长三角区域和上海地区的航运对空气污染物排放、空气质量和健康的影响。专题报告22。波士顿，MA：健康影响研究所。

© 2019 健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州，美国。

该报告完整版详见 www.healtheffects.org 或HEI期刊。

健康影响研究所
75 Federal Street, Suite 1400, Boston, MA 02110, USA
电话：+1-617-488-2300.