中国海洋大气沉降监测与评价工作回顾与展望*

杨正先[1]，张志峰[1]，王菊英[1]，于丽敏[1]，范国全[2]

（1. 国家海洋环境监测中心 大连 116023；2. 大连海洋环境监测中心站 大连 116015）

摘 要：海洋大气污染物沉降是海洋环境监测评价体系的重要内容之一，对于研究污染物迁移和制定相关的控制对策具有重要意义。文章回顾了我国海洋大气监测与评价领域 10 多年的发展情况，结合国际上的先进经验，对存在的问题进行较深入的分析，在此基础上提出了构建现场监测与模型结合的海洋大气监测与评价工作体系建议，包括几个需要重点解决的关键性问题和未来发展方向。

关 键 词：海洋大气；监测；评价；回顾；展望

1 前言

近几十年来，大气污染物沉降对海洋环境的影响得到国内外学者和相关机构的广泛重视。研究发现，大气沉降是海洋环境中污染物的主要来源之一，来自毗邻沿岸污染源和经由长距离传输的源自内陆的大气污染物质通过沉降过程进入海洋。就全球尺度而言，大气污染物输入通常等于或大于河流向海洋的输入，在远离人类活动影响的大洋，大气物质入海占了绝对的比重，某些沿海区域，经由大气输入的若干痕量物质的总量几乎相当于河流的输入量，有的甚至更多[1-2]，大气物质中的含氮、磷化合物及铁等营养物质在某种程度上能促进海洋生产力，而重金属和一些有毒有机物对海洋生态系统和海洋环境也产生了不良的影响[3]。目前，越来越多的证据已经表明中国正面临着严峻的大气污染问题[4]。

国家海洋局自 2002 年正式启动海洋大气监测业务化工作，通过 10 多年的监测体系建设和业务化运行，我国部分重点海域的大气污染水平、干湿沉降情况及变化趋势已经比较清楚[5-6]，但与欧洲西北大西洋海域国家的综合大气监测网络（CAMP）[7]、美国的国家大气沉降计划（NADP）[8]和清洁空气状况与趋势网（CASTNet）[9]、加拿大的空气与降水监测网（CAPMoN）[10]等发达国家和地区的大气污染物沉降监测工作相比仍存在较大差距，主要表现为：海洋大气监测与评价产品类型不多，可视化程度不高，不能满足环境管理者根据大气沉降入海通量及负荷，以及生态环境影响效应确定污染控制对策的需求。随着我国沿海经济的快速发展，海上活动的日益频繁，排放进入大气中的污染物质明显增多，我国近岸海域大气沉降负荷的增加已成为导致海洋环境质量日趋下降的原因之一。我国海洋大气污染物沉降监测及评价工作体系需要根据社会经济的发展和管理的要求，以及模型评价技术发展及其对基础监测数据的要求进行优化升级。

2 开展海洋大气沉降监测的目的和意义

受大气环流西风带的影响，我国大部分海域海洋大气常年处于陆地的下风向。而中国沿海是经济发达的地区，是众多工业基地、工厂和人口的密集区，人为活动排放的大量污染物直接影响着大气环境。目前沿海地区经济的快速发展，尤其是能源消耗增长和城市交通迅速发展，城市群的拓展和崛起等，使得陆地区域性大气环境问题日益突出。近段时间广受关注的雾霾天气，警示我国大气污染总体在加剧，大气污染已经到了危险的极值。除了环保部重点监控空气质量恶化对人群健康的影响，以及

* **基金项目**：海洋赤潮灾害立体监测技术与应用重点实验室基金项目（200806）.

大气污染的综合防治对策以外，海洋管理部门也非常有必要加强对陆地污染物通过大气沉降入海量及其生态环境影响的监测和评价，对于完善近海污染物收支模型、认识污染物大气沉降在海洋生态环境演化及赤潮等生态灾害中的作用都具有重要意义。

目前，中国是世界上氮肥使用量最多的国家，约占世界年用量的 1/3，同时又是能源消费大国，因此活性氮引发的环境问题尤为突出，已成为除欧洲和北美之外的第三大氮沉降区[11]。并且氮沉降仍呈增加趋势，受到国际社会的广泛关注[12]。刘学军等[13]系统研究了过去 30 年（1980—2010 年）来我国氮沉降动态及其与人为活性氮排放的关系，研究结果在《Nature》杂志刊出引起了广泛关注，该研究表明，目前我国人口相对密集和农业集约化程度更高的中东部地区（尤其是华北平原），其氮素沉降量已高于北美任何地区，与西欧 20 世纪 80 年代氮沉降高峰时的数量相当。除此以外，重金属和有机物污染大气沉降入海也是关注重点，Lammel 等[14]2006 年在青岛观测到的气溶胶中铅、铜、锌的浓度是 20 世纪 90 年代的 2～3 倍，据此计算出的黄海 铜和铅的干沉降通量比北海 90 年代初的值高出近 1 个数量级。Meng 等[15]研究发现海水中铜的浓度在 2001 年以后随着入海径流量的减少，海水中铜的浓度不降反升，推测大气沉降可能已成为渤海中铜的主要来源。

开展大气沉降通量监测与评价工作不仅是海洋环境监测评价体系的重要内容之一，对于研究污染迁移和制定相关的控制对策也具有重要意义。其首要目标是确定某一海域大气输入污染物的量及其在总污染输入负荷中的比重和生态环境效应；其次，通过海洋大气污染来源诊断，进一步提供污染来源方位和主要来源产业的信息，为管理者制定具体的减排措施和制定相应产业规划提供重要参考信息。

3　我国海洋大气监测工作回顾

我国海洋大气监测业务化工作起步较晚，1994 年，国家海洋环境监测中心在大连老虎滩建立了我国第一个海洋大气连续监测站，并开展了海洋大气业务化试点监测工作，在多年的工作基础上，编写了《海洋大气监测技术规程》，并于 2002 年 4 月由国家海洋局发布。在此基础上，国家海洋局组织各海区沿中国海岸线从北到南增设了青岛小麦岛、舟山嵊山和珠海大万山共 3 个海洋大气观测站，每年 2 月、5 月、8 月、10 月采样，每个月采集 10 个干沉降样品。到目前为止，4 个全国性监测站已连续开展 11 年的大气污染物干沉降监测，监测项目包括总悬浮颗粒、铜、铅、镉、锌、硝态氮和铵氮等。监测结果表明，经济发展迅速且城市人口密集的长江三角洲、珠江三角洲的海洋大气环境处于劣化趋势中。而滨海城市周边如大连近岸和青岛近岸海域大气污染情况则相对乐观，总体上保持不变[8]。

2007 年国家海洋环境监测中心在渤海东岸的旅顺董砣建立了第一个系统性的干湿沉降渤海试点业务化监测站，并实现了干湿沉降高频采样（干沉降每周采样，湿沉降逢雨必采）。参考国内外相关标准和文献，编写了《渤海大气污染物沉降监测与评价技术指南》（试行稿）。在国家海洋环境监测中心《关于建立渤海大气沉降监测网，开展渤海大气沉降通量监测》建议的基础上，国家海洋局在北隍城、龙口、东营、塘沽、京唐港、秦皇岛、葫芦岛、鲅鱼圈、旅顺建立渤海大气干湿沉降监测站网，并从 2010 年起，《海洋环境质量公报》对渤海区域的干湿沉降的基本情况进行了评价[9]。其他监测站（青岛小麦岛、舟山嵊山和珠海大万山）也增设了湿沉降监测项目。

除了业务化监测工作以外，国内外研究者从 90 年代起开始关注我国周边海域大气沉降问题，Zhang 等[16]研究表明，大气沉降是大陆溶解无机氮和磷输入到黄海西部地区的主要途径，如果只考虑大气湿沉降和河流输入，其中 58％的溶解无机氮和 75％的溶解无机磷是通过大气湿沉降输入的。Chung 等[17]的研究称黄海区域铵盐的大气输入量超过了河流的输入量，而硝酸盐的大气输入则明显小于河流输入量。张艳[18]研究表明，2006 年整个东部海域的年氮沉降量为 49.8 万 t，大气干沉降约占 20％，其中铵盐贡献最大，占总氮沉降的 60％以上。但通过比较，各研究者采用的监测方法、使用的沉

降速率（一般采用文献推荐值，而非现场测定）及评估结果均存在很大差异。并且，由于海上现场观测数据难以获取，以及海洋大气污染物沉降空间分布模型研究欠缺，我国研究文献中的海洋大气沉降通量评估结果一般都是以某一个站点，如采用黄海的千里岩，东海的嵊山监测数据来代表黄海和东海广大面积的沉降情况，而忽略了大尺度空间污染沉降的空间变化，没有充分考虑污染物质随着时空的变化特征将依赖于陆地污染源排放的位置、气象场输送状况和海洋边界层条件等综合影响，可能会导致评价结果数倍的误差。

此外，我国在 2005—2008 年还开展了“近海海洋综合调查”（“908 专项”），其中也包括海洋大气走航调查监测任务，但是船基调查无法进行长时间定点连续监测采样，并难以开展湿沉降监测，其获得的结果只能代表走航期间航线上大气干沉降的混合水平，具有很大的局限性。为了提供更为科学可靠的监测数据，有必要开展系统科学的业务化监测与评价，包括区域干沉降速率的准确定值，以及可靠的沉降空间分布模式的建立。

4 发达国家和地区的海洋大气监测工作

欧美一些国家对大气沉降通量的研究起步较早。20 世纪 80 年代末 Duce 等[1]开始了大气氮沉降对全球海洋系统重要性的估计，并发现大气可为马尾藻海真光层提供高达 80%～90%的可溶性铁，可为北太平洋提供 16%～76%的可溶性铁。Valigura 等[19]对美国切萨皮克（Chesapeake）湾多年的研究表明，大气输入占该海区氮总输入量的 25%。Enell 等[20]研究表明，欧洲波罗的海氮大气沉降入海量占该海区氮总输入量的 21%。Jickells 等[21]对欧洲北海地区大气沉降研究结果表明，氮的大气输入占该海区氮总输入量的 30%左右。Wulff 等[22]对波的尼亚海的研究表明，来自大气氮输入占该海区总输入量的 54%，磷的大气输入占 28%。Guerzoni 等[23]指出如果仅考虑河流和大气的输入，地中海 51%的氮和 33%的磷是来自大气的沉降。Prospero 等[24]研究表明，北太平洋中部海洋上约 40%～70%的硝酸盐来自于大气的沉降。

在上述研究基础上，经各国政府和相关研究机构的积极主导，对于大气沉降的研究逐渐由研究者的分散观测发展为建立区域网络开展长期定位研究，并逐渐形成区域乃至全球监测网络，研究内容与范畴在不断拓宽，研究技术方法也取得了长足的进展。在过去的 30 年内，世界各国为应对日益加重的大气氮沉降所带来的酸雨、富营养化和城市污染等环境问题，建立了沉降监测网络（National deposition networks），如美国的国家酸沉降计划（National Acid Deposition Program，NADP）、欧洲的监测和评估计划（European Monitoring and Evaluation Program，EMEP）、加拿大空气和降水监测网（Canadian Air and Precipitation Monitoring Network，CAPMoN）、东亚酸沉降监测网（Acid Deposition Monitoring Network in East Asia，EANET）等，对大气污染物的排放和沉降进行了多年的监测。

海洋大气沉降监测与评价最成功的是欧洲西北大西洋海域国家综合大气监测计划（Comprehensive Atmospheric Monitoring Program，CAMP）[7]，该计划自 1987 年开展至今，主要监测区域为经济发达且相对封闭的北海海域和西北大西洋海域，包括 12 个欧洲保护东北大西洋海洋环境的奥斯陆－巴黎公约组织（the Oslo and Paris Commissions ，OSPAR）缔约国共计 49 个岛基、岸基及内陆大气监测站（主要是区域本底站）的长期连续监测数据，各监测站按照欧洲综合大气监测计划的要求监测降水和空气中的重金属、有机物质、营养盐的浓度，所有站点数据统一提交挪威大气研究所（Norwegian Institute for Air Research，NILU），该研究所采用欧洲远程大气污染输送监测和评估合作计划（EMEP）模型，实现对大气干湿沉降输入的区域评估和源汇情景分析，并提交评价报告[25]。欧洲西北大西洋海域国家综合大气监测计划（CAMP）是世界上以海洋大气沉降为关注重点的一个先进的监测评价系统网络，监测结果配合相应的大气沉降模型，基本实现对各自国家大气干湿沉降输入的区域评估和源汇情景分析，可作为我国海洋大气沉降监测系统优

化建设的重要参考。

5　我国海洋大气监测与评价体系的优化

通过多年的业务监测和研究，我国重点海域大气污染基本情况及变化趋势已经比较清楚，并对部分海域进行了粗略的大气沉降通量估算[5-6]，但由于一系列的关键参数（干沉降速率及沉降衰减系数等）尚未准确定值，以及可靠的沉降空间分布和源解析模式尚未建立，区域大气污染物沉降负荷的估算及相关评价结果还存在很大的不确定性，不能满足管理者根据可靠的大气污染物沉降入海通量及负荷确定污染控制对策的需求。

近几十年来，区域污染输送问题得到国内外学者的广泛重视。随着计算机技术的迅速发展，数值模拟成为研究区域性大气环境问题，尤其是污染物长距离输送和迁移转化的重要技术手段，可用于确定污染物迁移及沉降通量空间分布情况[7,26]。区域数值模式在研究城市、区域甚至全球尺度的环境问题上具有独特的优势。它是建立在大量的外场观测和实验室模拟的基础之上，能够对传输、转化过程进行再现和对未来区域大气质量进行预测的有效工具，区域数值模型的发展和改进又促进着外场观测实验的开展。

受客观条件的限制，海洋大气连续监测站点通常分布并不均匀，一般设在海岸线上，监测网格中缺少位于监测海域中间位置的岛基站或浮标站，在绘制等值线图和进行区域通量统计的时候不能采用常规的插值方法或者简单平均的方法，监测结果配合相应大气动力模型，实现对大气干湿沉降输入的区域评估和减排条件下的未来情景分析是我国海洋大气监测工作未来发展方向，工作体系如图 1 所示。

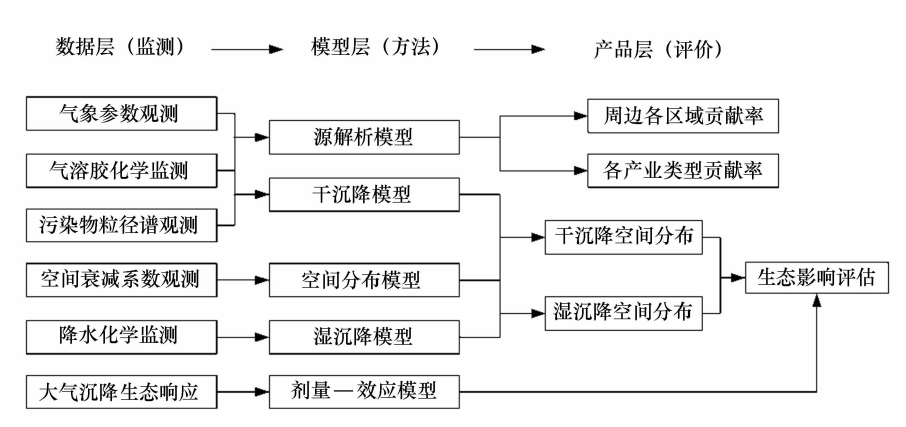

图 1　海洋大气沉降监测与评价工作体系

6　建议

准确评估大气污染物沉降入海通量及主要来源，对于确定我国近海海洋环境中的关键污染要素的来源和源强分布，完善海洋环境污染控制模型，并在此基础上为沿海经济发展规划，产业结构调整，海洋环境保护政策制定提供重要信息，具有十分重要的意义。需要根据社会经济的发展和管理要求，以及评价技术体系对基础数据的要求，对我国海洋大气监测评价进行整体升级。重点包括以下内容。

6.1　海洋大气污染物沉降监测站网优化升级

区域背景值监测站点的选择是开展海洋大气监测与评价工作的基础。如果监测站点不合规范要求，不具有区域代表性，评价结果的可靠性就无从谈起。具体而言，海洋大气监测站应符合点位代表性、空间垂直条件、空间水平条件、场地畅通条件等规范要求，并在这一前提下尽可能从后勤保障条件等方面进行优化。监测站的生活区应远离监测区域，生活区应使用电等清洁能源，尽可能不用天然气、煤等矿物能源，以免监测人员的生活活动对大气背景

值监测结果造成影响。根据海洋大气监测站选址标准和技术要求，初步建议在全国共建设 10 个区域本地站，依托大鹿岛、千里岩、车牛山、南麂岛、东山、涠洲岛、博鳌 7 个海洋站现有的条件，增加海洋大气沉降监测业务，与圆岛、嵊山、大万山 3 个站点共同构成布局较为合理的我国近岸海域区域本底大气沉降监测系统。

6.2 监测评价质量控制体系

质量保证和控制管理体系应贯穿整个海洋大气监测和评价工作体系，是实现质量控制目标的保证。建立完善的质量保证和控制管理体系可以使监测工作制度化、规范化，并保证其完整性及可操作性，从而保证监测结果的代表性、准确性、有效性。应充分借鉴国外成熟的大气沉降监测网络的先进经验，结合我国实际情况与未来监测系统发展趋势，构建海洋大气沉降监测与评价质控体系，主要包括质量控制措施、质量保证程序以及对监测和评价过程中不确定度的评估方法等。

6.3 建立评价模型，完善评价产品体系

建议充分借鉴欧洲 CAMP 等国际海洋大气沉降监测网的成功经验，结合我国国情，逐步推进现场监测结果与大气动力模型相结合的海洋大气沉降监测评价系统，开展我国监测大气湿沉降和干沉降的定量评估，实现对大气干湿沉降输入的区域评估和源汇情景分析，并选择一些敏感生态系统开展大气氮沉降生态响应与反馈的长期定位试验，为我国控制大气污染对海洋生态系统的影响提供有力支撑。

参考文献

[1] DUCE R A，LISS P S，MERRILL J T，et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. Global Biogeochem Cycles，1991(5)：193－259.

[2] 高原，DUCE R A. 沿海海:气界面的化学物质交换[J]. 地球科学进展，1997，12(6)：553－563.

[3] 高会旺，张英娟，张凯. 大气污染物向海洋的输入及其生态环境效应[J]. 地球科学进展，2002，17(3)：326－330.

[4] GALLOWAY J N，DENTENER F J，MARMER E，et al. The environmental reach of Asia[J]. Annual Review of Environment and Resources，2009，33：461－481.

[5] 国家海洋局. 2009 年中国海洋环境质量公报[R]. 2009.

[6] 国家海洋局. 2010 年中国海洋环境质量公报[R]. 2010.

[7] BARTNICKI J，FAGERLI H. Atmospheric nitrogen in the OSPAR convention area in the period 1990－2001[R]. 2004. EMEP/MSC－W. Technical Report 4/2004.

[8] SPARKS J，WALKER J，GUENTHER A，et al. Dry nitrogen deposition estimates over a forest experiencing free air CO_2 enrichment[J]. Global Change Biology，2008，14(4)：768－781.

[9] CLARKE J F，EDGERTON E S，MARTIN B E. Dry deposition calculations for the Clean Air Status and Trends Network[J]. Atmos Environ，1997，31：3667－3678.

[10] ZHANG L M，BROOK J R，VET R，et al. Estimation of contributions of NO_2 and PAN to total atmospheric deposition of oxidized nitrogen across Eastern Canada[J]. Atmos. Environ，2005，39：7030－7043.

[11] GALLOWAY J N，DENTENER F J，CAPONE D Q，et al，Nitrogen cycles：past，present and future [J]. Biogeochemistry，2004，70：153－226.

[12] 方华，莫江明. 活性氮增加:一个威胁环境的问题[J]. 生态环境，2006，15(1)：164－168.

[13] XUEJUN L，YING Z，WENXUAN H，et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature，2013，494：459－462.

[14] LAMMEL G，GHIM Y S，BROEKAERT J A C，et al. Heavy metals in air of an eastern China coastal urban area and the Yellow Sea[J]. Fresenius Environmental Bulletin，2006，15(12A)：1539－1548.

[15] MENG W，QIN Y W，ZHENG B H，et al. Heavy metal pollution in Tianjin Bohai Bay，China[J]. Journal of Environmental Sciences，2008，20(7)：814－819.

[16] ZHANG J，CHEN S Z，YU Z G. Factors in fluencing changes in rain water composition from urban versus remote regions of the Yellow Sea[J]. J Geophys Res，1999，104：1631－1644.

[17] CHUNG C S，HONG G H，KIM S H，et al.

Shore based observation on wet deposition of inorganic nutrients in the Korean Yellow Sea coast [J]. The Yellow Sea, 1998,4:30－39.

[18] 张艳．陆源大气含氮物质的传输与海域沉降研究[D]. 上海:复旦大学,2007.

[19] VALIGURA R A, WINSTON T L, RICHARD S A, et al . Atmospheric nutrient input to coastal areas[A]//In: NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis [R] . NOAA Coastal Ocean Office. Silver Sping , Md. U. S. A. 1996.

[20] ENELL M, FEJES J. Nitrogen Load to the Baltic Sea: present situation, acceptable future load and suggested source reduction [J]. Water, Air and Soil Pollution,1993, 85:877－882.

[21] JICKELLS T. Atmospheric inputs of some chemical species to the North Sea[J]. German Journal of Hydrography, 1997, 49:111－118.

[22] WULFF F, PERTTILA M, RAHM L. Observation, calculation of the balance for nutrients and prediction in the gulf of Bothnia [J]. AMBIO, 1996, 8:28－34.

[23] GUERZONI S, CHESTER R, DULAC F, et al. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of Mediterranean Sea[J]. Progressin Oceanography,1999,44:147－190.

[24] PROSPERO J M, SAVOIE D L. Effect of continental sources on nitrate concentrations over the Pacific Ocean [J]. Nature,1989,339 (29) :687－689.

[25] OSAPR, Assessment of trends in atmospheric concentration and deposition of hazardous pollutants to the OSPAR maritime area[R]. OSAPR Commission 2005.

[26] ERISMAN J W, BLEEKER A, VAN JAARSVELD J A. Evaluation of ammoniae mission abatement on the basis of measurements and model calculations[J]. Environmental Pollution,1998, 102(suppl. 1):269－274.