美国臭氧区域控制政策演进

万薇，亚洲清洁空气中心[1]

要点总结：

美国臭氧污染控制的早期策略是最大程度减少 VOCs 排放，重点针对控制机动车排放，这一做法取得了一定效果。但另一方面也忽略了光化学污染的复杂性和长距离传输特点，区域臭氧污染问题并没有得到解决，美国东北各州诸多城市长期未能达标。

1990 年《清洁空气法》修订标志着区域臭氧污染控制策略的开始施行，科学研究与政策执行效果都证明区域臭氧污染控制的合理策略是减少高架源的 NOx 排放，特别是上风向排放源的控制。

为了保障区域控制策略的科学制定和有效实施，美国在东北各州通过立法成立跨州的区域臭氧管理机构“臭氧传输委员会”，资助科研项目摸清区域臭氧传输影响机制，在臭氧污染高发季节严格控制排放总量，同时允许管控范围内的污染源进行排污许可交易便于其灵活达到控制目标。其后，这一成功模式通过政策更新与演进逐步覆盖了整个美国东部地区，极大程度改善了该区域的空气质量。

1.受区域传输影响，东部各州臭氧达标难

因为洛杉矶烟雾事件，美国在上世纪 50 年代已经认清近地面臭氧浓度过高是由氮氧化物（NOx）、挥发性有机污染物（VOCs）过度排放引起的光化学污染问题。因而，美国一直很重视臭氧污染治理，并在初期把大城市作为管理的核心，并且，治理措施主要是 VOCs 减排，特别是严格管理机动车排放（机动车是 VOCs 及 NOx 重点排放源），这一控制思路在西海岸的洛杉矶城市群取得了一定效果。

但直到上世纪 90 年代，尽管美国已经在 VOCs 的减排方面做出了极大努力，仍有许多区域无法臭氧达标，特别是东部各州的城市大范围超标。其中一个重要原因是臭氧的区域

[1] **亚洲清洁空气中心**（Clean Air Asia，简称“CAA”)是一家国际非营利性机构。2001 年由亚洲开发银行、世界银行和美国国际开发署共同发起建立，是亚洲领先的空气质量管理网络。机构宗旨是通过把知识转化为政策和行动，减少来自交通、能源与其他行业的大气污染与温室气体排放，改善空气质量，打造宜居城市。

传输，一个州排放的前体物（特别是固定高架源排放的 NOx）能输送到其他州，臭氧浓度峰值所在地会距离影响大的排放源很远。早在 1977 年，就有研究（Wolff 等, 1977）发现中西部的污染传输导致了东北州的臭氧严重超标。又如，1998 年美国环保局的一项评估结果显示，宾夕法尼亚州的臭氧超标 65%是由区域传输造成，而新泽西、纽约、康涅狄格州和马萨诸塞州的臭氧不达标问题受周边影响高达 85-88%[2]。所以大城市为核心，控制 VOCs 排放为主的管理思路在东北各州不能行之有效。

从本地污染控制的角度来说，应当优先控制 VOCs 还是 NOx 并没有一个简单的答案。因为不同地区的臭氧生产机制各异，即使同一个地区的不同时间点也不一样，取决于当时的气象条件、排放特征等因素， 但基本的研究共识认为 VOCs 控制（和/或辅以 NOx 控制）对于缓解城市区域的局地臭氧污染很有帮助，但是区域臭氧污染控制的最佳策略是减少高架源的 NOx 排放（NARSTO, 2000）。

科学家基于低层大气中的臭氧传输与复合污染研究，建议美国环保署施行更广范围的区域化臭氧管理策略，并将重点放在 NOx 控制上。因此，在 1990 年《清洁空气法案》大修过程中，国会希望通过新的措施来解决区域不达标问题。这标志着区域臭氧污染控制策略的开始施行（区域臭氧控制政策列表见附 1）。

2.划定臭氧传输区域，建立区域管理机构

1990 年修订的《清洁空气法案》第 184 条提出划定臭氧传输区域（Ozone Transport Region, OTR），并授权在臭氧污染严重的东北部 11 个州和华盛顿特区建立了管理机构—臭氧传输协会（Ozone Transport Commission， OTC），它由各州代表以及 EPA 成员组成，协调制定区域 NOx、VOCs 减排策略并督促实施。

从 1991 年召开第一次会议并把马里兰州环境委员选为主席开始，美国东北各州正式实施区域臭氧控制策略。OCT 的议事成员为各州的环境委员，此外， EPA 也作为一个没有投票权的成员方参加，形成了一个联邦政府与各州共同议事的机制。OTC 的职责主要有三个方面：

- 风险评估和模型研究—资助科学研究，保持对环境污染或可选控制措施可能存在的健康风险和科学不确定性最新研究成果的了解（重要研究项目详见附 2）；

2 见联邦法规文件 63 Fed. Reg. 57356, 57404 (1998 年 10 月 27 日）。

- 移动源的管理—例如 1991 年各州独立进行的燃油改革以及 1994 年实施的低排放车辆计划（更多机动车政策详见附 3）；
- 固定源的管理—1992 年，OTC 明确指出为了达到臭氧标准，需要进行必要的区域电厂和大工业点源控制（因固定源 NOx 排放为区域臭氧控制策略重点，该项内容为本文介绍重点）。

1994 年，OTR 范围内除了弗吉尼亚之外的所有州都就控制策略达成了共识并签订谅解备忘录，要求控制 250 mmBTU/小时（百万英制热单位）以上工业排放源及 15 MW 以上的电厂,并设置区域排放控制总量，给各州分配排污许可量，并允许排放源之间进行交易，在 5-9 月臭氧高浓度季节期间所有排放源都需要持有 NOx 排污许可证才能生产并排放。这个排污许可交易制度称为 OTC NOx 预算计划（NOx Budget Program, NBP）。

中央政府的参与以及法律强制在区域机构建立中发挥了至关重要的作用。此前，长期不能达标的东北各州（包括纽约、马萨诸塞、新泽西、缅因、新罕布什尔、佛蒙特、罗德岛、康涅狄格）的空气污染管理者就已经尝试由下至上进行协商，建立了东北各州空气管理协调机构（ Northeast States for Coordinated Air Use Management，NESCAUM）。但是这一努力并没有改变各州的行动策略，环境政策的制定仍然是建立在本州利益基础上，而非区域性策略。OTC 的建立从根本性改变了这一局面，形成了以州为主导，联邦政府和各州共同议事和协调的区域性合作机制。

该机制提供了区域影响美国环保局（EPA）决策的途径。清洁大气法案的 184c 条规定， OTC 可向 EPA 提出政策建议， EPA 有义务进行考虑，可以同意或者拒绝，如果拒绝一定要给出合理的解释和达到同样目标的其方案建议。需要注意的是，区域内部意见达成一致方能统一提出建议。总的来说，OTC 各成员州在各个阶段都具备基本共识和一致性，但仍然会在臭氧传输问题上产生争议(其后成立了专门的科学评估小组来解决传输影响问题的认知争端)，或受到私营部门游说的影响（特别是在汽车工业、煤炭行业为重点行业的州），或环境部门的换届选举导致的环境委员党派或人员的变更带来的立场偏差或工作效率损失。

3.电力市场开放，推动区域政策延伸至中西部各州

然而，美国联邦能源管理委员会放开电力市场使得区域臭氧控制策略面临挑战。电力市场开放意味着 OTR 区域州的电力供应不必从本地发电企业购买，可以从发电成本更低的

中西部州购买[3]，OTR 电厂可能因面临严格的 NOx 控制要求失去市场竞争力，另一方面中西部各州也会因此排放更多污染物影响到处于下风向的、原本就不能达标的东部各州。

为了应对这一难题，在 OTC 之外， EPA 和各州的环境委员会于 1995 年组建了臭氧传输评估组（ Ozone Transport Assessment Group ， OTAG），由 EPA 与东部 37 州共同组成。该工作组的最初目的是评估臭氧传输问题并制定美国东部地区的臭氧污染削减对策，OTAG 经过研究认为中西部的 NOx 减排将有助于东部各州臭氧达标。 1996 年 8 月，7 个东北部州都向 EPA 呈文，要求 EPA 介入控制上风向州的 NOx 排放。

EPA 在 OTAG 的工作基础上于 1997 年发布了法规（62 Fed. Reg. 60319），并于 1998 年发布了补充法规（ 63 Fed. Reg. 25902）来回应东北各州的请求 ，要求上风向各州修改他们的州实施计划（State Implementation Plan, SIP）[4]，该计划通常被称为 NOx SIP Call。而对于未按时提交 SIP 的州，EPA 会介入令其实施联邦执行计划（Federal Implementation Plan ， FIP）[5]。该计划实施范围包括美国东部 22 个州和哥伦比亚地区，因为这些州和地区本身臭氧不达标，或者对其他不达标州的臭氧污染有显著贡献。

NOx SIP Call 计划要求管控范围各州/地区自 2003 年起削减 NOx 排放，基于预测情景（截至 2007 年）为所有的 NOx 排放源设置总量控制上限。该计划和 OTC 区域 NOx 控制政策类似：实施时间是每年的 5 月至 9 月；为每个州设定排放总量上限，但对于每个州应如何达到控制目标没有规定，各州有选择达标对策的空间；允许污染源之间进行排污许可交易[6]。这可以帮助各州在更高的费用有效水平上达到控制目标。NOx SIP Call 相比 OTC 的范围更广，涵盖了更大地域(见图 1)，有助于实现更大范围内的臭氧达标。

---

[3] 基于《清洁空气法案》182 条，臭氧非达标州需要应用合理可用控制技术(Reasonably Available Control Technology ，RACT)，而许多中西部州为达标州，则不需要应用 RACT。

[4]《清洁空气法案》要求不能达到特定污染物的空气质量标准的州提交州达标计划（ SIP， State Implementation Plan），需要 SIP 中说明污染控制、减排目标，以及为新建/改建设备、项目带来新增排放制定的许可证计划。如果计划不合格或者在达标期限不能达标， EPA 则可以介入甚至制裁各州，包括强制执行联邦计划（ Federal Implementation Plan），冻结大排放项目的建设，中断高速公路建设款项，在该辖区设计更加严格的准入机制。

[5] 清洁空气法案第四章“酸雨”法规 407 条也是针对 NOx 控制，SIP Call 出台后酸雨法规并未修改，与之并行。

[6] OTC 成员州自 2003 年起改实施 NOx SIP Call，但因为 NBP 与 NOx SIP Call 两个政策类似且削减目标差不多，政策衔接顺畅。

图 1：NOx SIP Call 分步骤实施区域
来源：EPA，2004

4.控制策略显效，臭氧浓度显著下降

1990 后实施的臭氧控制措施众多，包括移动源、工业生产与电力行业，其中针对电力行业的两大主要控制策略即为区域性政策 OTC NOx 控制与 NOx SIP Call（见表 1）。

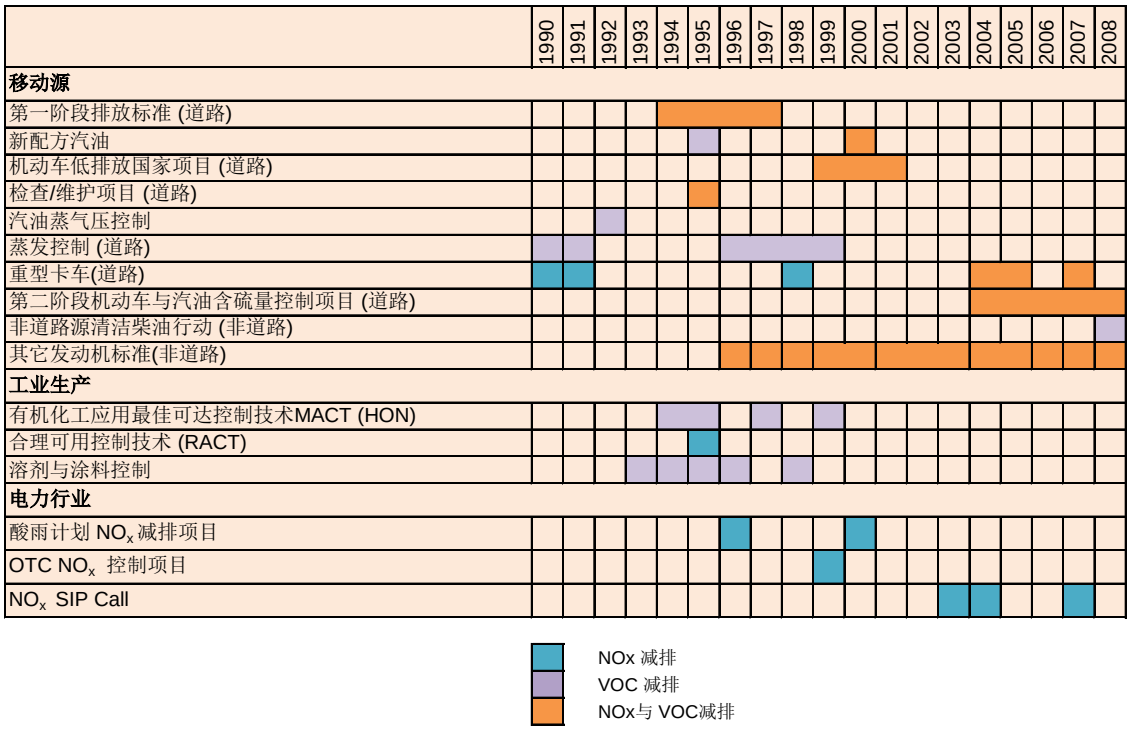

表 1：美国臭氧控制措施汇总
来源：EPA，2004

这些措施整体取得了很好的效果，特别是在90年代中期后排放下降趋势显著，自1997年到2004年，氮氧化物排放减少了25%，VOCs排放减少了21%（如图2）。

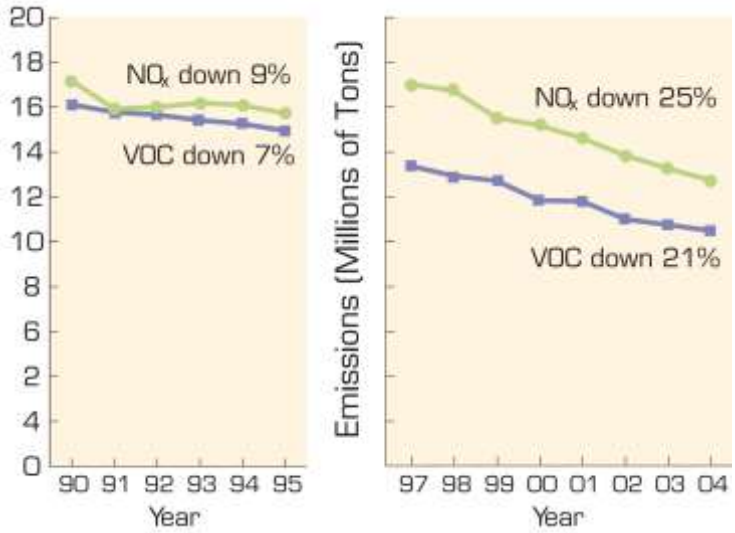

图 2：NOx 与 VOCs 排放趋势
来源：EPA，2004

相应的在NOx SIP Call覆盖区域，电力行业排放量下降显著，也带来了更大幅度的臭氧浓度降低（见图3，颜色越深则下降幅度越大）。

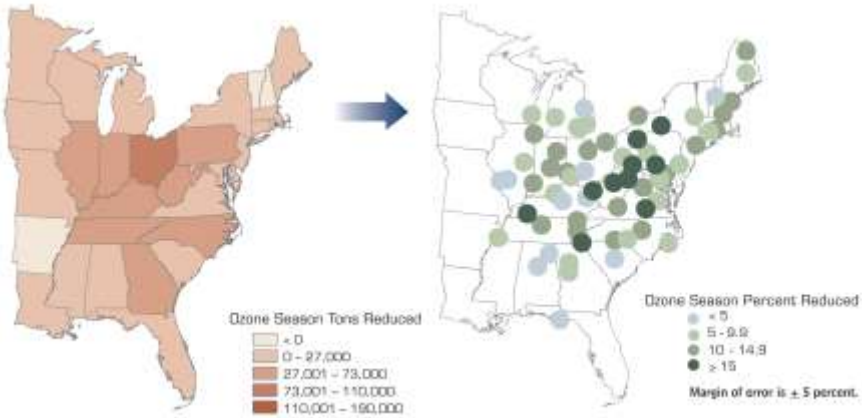

图 3：臭氧季(5-9 月)电力行业氮氧化物减排与臭氧浓度变化
(注:氮氧化物减排量单位为百万吨；臭氧浓度变化已做排除气象因素的调整)
来源：EPA，2004

5.仍难达全面到新标准，臭氧控制政策持续升级

1997 年 7 月 18 日，EPA 修订了《国家环境空气质量标准》(62 Fed. Reg. 38856)，将臭氧标准从 1 小时浓度标准 1.20 ppm 变为 8 小时浓度标准 0.8ppm[7]。新标准在 2000 年生

[7] 8 小时标准的计算基于每年第四高值的三年平均（The eight-hour standard is measured using the fourth-highest measurement for each year averaged over three years）。

效，当时就有很多地区都达不到新标准，到了 2004 年，东北各州达标情况仍然不乐观（见下图 4，褐色区域为非达标区）。

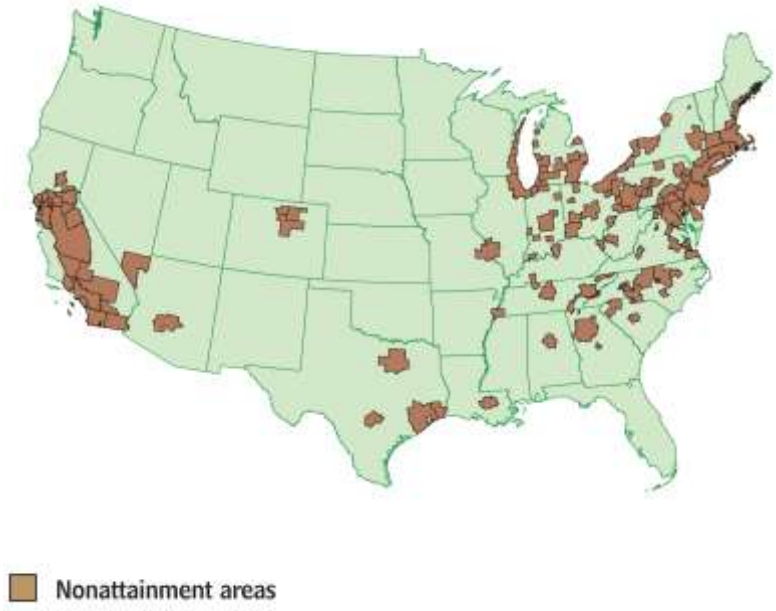

图 4：臭氧非达标区域
来源：EPA，2004

为了实现臭氧进一步达标 （计划从 108 个臭氧非达标区减少至 16 个臭氧非达标区），EPA 在 2005 年 10 月发布了《清洁空气州际法规》(Clean Air Interstate Rule，CAIR)，旨在对 25 个东部州与华盛顿特区的电力行业 NOx 排放(也包括 SO2)进行大幅度总量削减—到 2015 年，CAIR 与 NOx SIP Call 的措施叠加带来电力行业 50%的 NOx 排放量（相比基准年 2003，见图 5）。

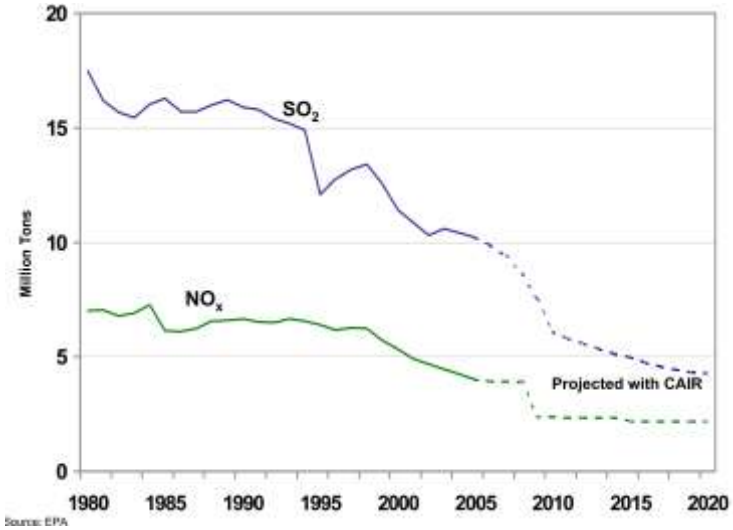

图 5：CAIR 措施的减排趋势估算（百万吨）

来源：EPA 网站[8]

2012 年，EPA 预测到臭氧将不能全面达标，并且上风向各州的排放对东部各州的影响仍然存在(见图 6，蓝色箭头为臭氧上下风向影响关系； 红色和绿色为 PM2.5 上下风向影响关系，其中红色为年均浓度、绿色为日均浓度)。

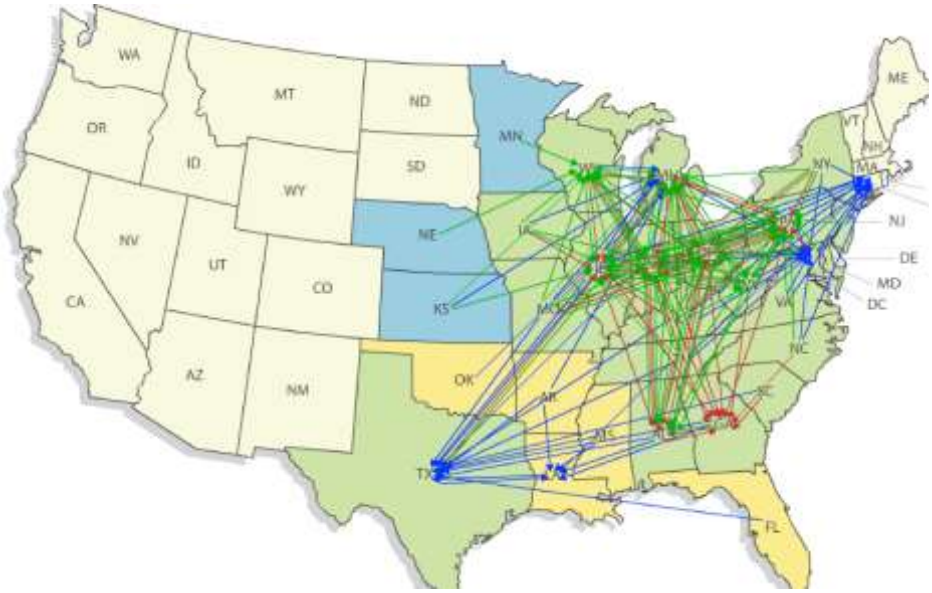

图 6：上下风向影响关系

来源:EPA 网站[9]

2015 年，EPA 又用《跨州空气污染法规》(Cross-State Air Pollution Rule ， CSAPR)替代了 CAIR。新法规仍然针对电厂（因为该区域电厂减排的费用有效性更高），覆盖了美国东部 27 州，旨在尽快帮助下风向各州实现空气质量达标，包括臭氧。

附 1: 美国臭氧区域控制政策时间表

- 1989 年末，美国国家研究委员会开始研究评估臭氧污染问题，1991 年发布报告指出 NOx 排放是造成臭氧不达标的关键原因。
- 1990 年 11 月，《清洁空气法修正案》授权划定臭氧传输区域，并要求未达标区域污染源应用合理可得控制技术（RACT）。并建立臭氧传输委员会(OTC) 协调东北部和大西洋沿岸中部各州的控制计划。
- 1994 年，OTC 各州就 NOx 控制签订了谅解备忘录。
- 1995 年，成立臭氧传输评估组(OTAG)，包括 37 个东部州成员，旨在识别臭氧区域传输影响，并形成区域控制策略。
- 1997 年，OTAG 基于研究指出控制电厂 NOx 排放是解决臭氧污染传输问题的最佳路径。
- 1997 年 7 月，国家环境空气质量标准修订，臭氧从 1 小时浓度标准 1.20 ppm 变为 8 小时浓度标准 0.8ppm。
- 1997 年，东北各州向 EPA 呈文，建议控制电厂与大型工业燃烧源的 NOx 排放控制范

[8] 图片 5 来源：http://archive.epa.gov/airmarkets/programs/cair/web/pdf/cair_emissions_costs.pdf

[9] 图片 6 来源：https://www3.epa.gov/crossstaterule/

围。

- 1997 年 10 月，EPA 提出区域 NOx 控制法规。
- 1998 年 9 月，EPA 发布 SIP Call 。
- 1999 年 5 月，合理可得控制技术应用的第二阶段计划开始，施行总量控制与排污权交易制度。
- 2005 年 10 月，EPA 发布《清洁空气州际法规》(CAIR)，旨在将 25 个东部州与华盛顿特区的电力行业 NOx 排放控制到 2003 年的一半。
- 2015 年，EPA 用《跨州空气污染法规》(CSAPR)替代了 CAIR。新法规仍然针对电厂，并将范围增至美国东部 27 州。

附 2: 美国臭氧污染传输研究重要项目列表

- 东北部氧化剂与颗粒物研究 (Northeast Oxidant and Particle Study, NE-OPS),1998-2002；
- 美国北部对流层臭氧研究战略（North American Research Strategy for Tropospheric Ozone，NARSTO),2000；
- 新英格兰空气质量研究（New England Air Quality Study)， 2002-2004；
- 区域大气观测、模拟与预测项目（Regional Atmospheric Measurement, Modeling, and Prediction Program ，RAMMPP)，2003。

附 3: OTC 移动源控制主要措施文件列表

- 1991 年 7 月 16 日，加强机动车检测与维护（I/M）决议案。
- 1991 年 10 月 29 日，臭氧传输区推行新配方汽油。
- 1992 年 3 月 10 日，加快指导机动车检测与维护决议案。
- 1993 年 1 月 8 日，支持加强 I/M 项目的机动车排放控制维持技术相关决议案。
- 1993 年 1 月 8 日，支持制定非道路源臭氧前体物排放控制法规的决议案。
- 1994 年 9 月 27 日，向 EPA 提交 OTC 低排放机动车项目建议。
- 1995 年 6 月 13 日，支持 EPA 控制柴油发动机排放措施。
- 1995 年 2 月 28 日，支持联邦清洁汽车提案与实施额外的机动车排放控制项目。
- 1998 年 5 月 22 日，呼吁 EPA 在 OTC 低排放机动车项目后建立标准，继续实施低排放项目。
- 1999 年 6 月 16 日，关于 EPA 机动车排放与燃油含硫量标准的决议。
- 1999 年 6 月 16 日，柴油卡车与汽车跨州执法检查合作决议。
- 2000 年 6 月 1 日，关于支持 EPA 柴油发动机与燃油法规的决议。
- 2004 年 7 月 9 日，关于机场与航空排放的决议案。
- 2009 年 6 月 10 日，关于 EPA 更新机动车售后催化转化器的申明。
- 2010 年 11 月 10 日，实施第三阶段燃油与排放标准的申请。
- 2014 年 1 月 31 日，关于保留排放控制区 NOx 标准的回应。

参考资料

MACTEC Federal Programs, Inc., Identification and Evaluation of Candidate Control Measures Final Technical Support Document, 2007.

NARSTO, An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution – A North American Perspective, 2000.

NRC (National Research Council). Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution. National Academy Press. Washington, DC, pp. 105-106, 1991.

OTC, Overview of Major OTC Mobile Emission Reduction Effort, 2014.

OTC, Pollution Control Strategies in the Northeast and Mid-Atlantic States to Clean Up Ground Level Ozone: Progress to Date and a Look towards the Future, 1998.

OTC, Recommended Five-Year Priorities for the Ozone Transport Commission, 2002.

Pennsylvania Department of Environmental Protection, A Short History of Ozone Transport Issues. N.D.

Robert J. Yarbrough, Ozone Non-attainment and the Problem of Long-range Transport, N.D.

USEPA, Evaluating Ozone Control Programs in the Eastern United States：Focus on the NOx Budget Trading Program, 2004.

USEPA, The Cross-State Air Pollution Rule: Reducing the Interstate Transport of Fine Particulate Matter and Ozone, 2011.

Wolff, G.T., P.J. Lioy, R.E. Meyers, R.T. Cederwall, G.D. Wight, R.E. Pasceri, and R.S. Taylor. "Anatomy of Two Ozone Transport Episodes in the Washington, D.C., to Boston, Mass., Corridor." Environ. Sci. Technol. 11, 506-510, 1977.