



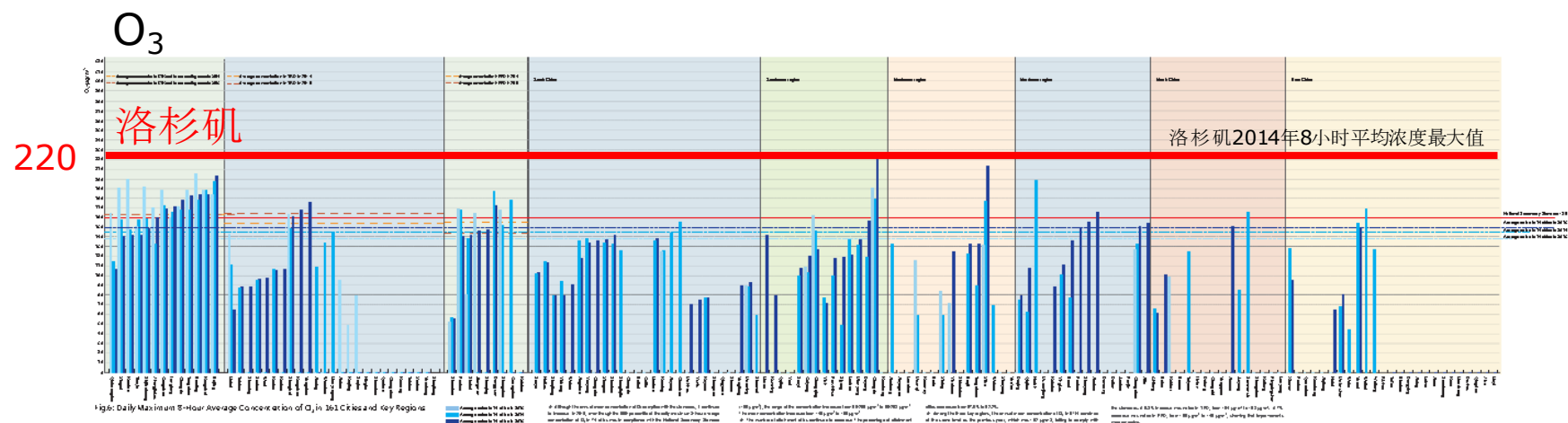
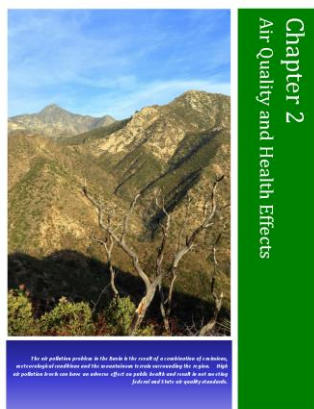
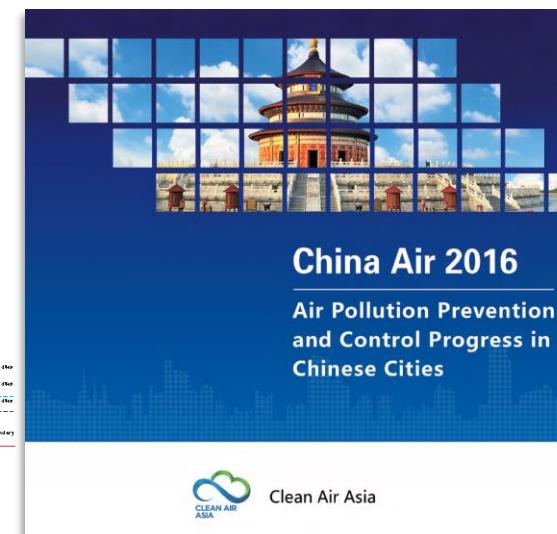
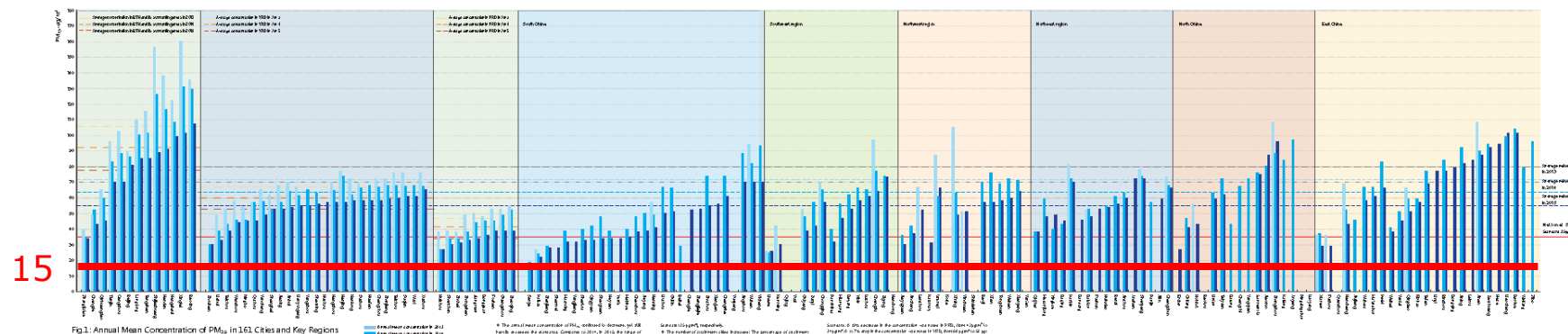
基于科学制定空气质量规划：洛杉矶经验

Greg Yarwood, Ralph Morris, 侯敏

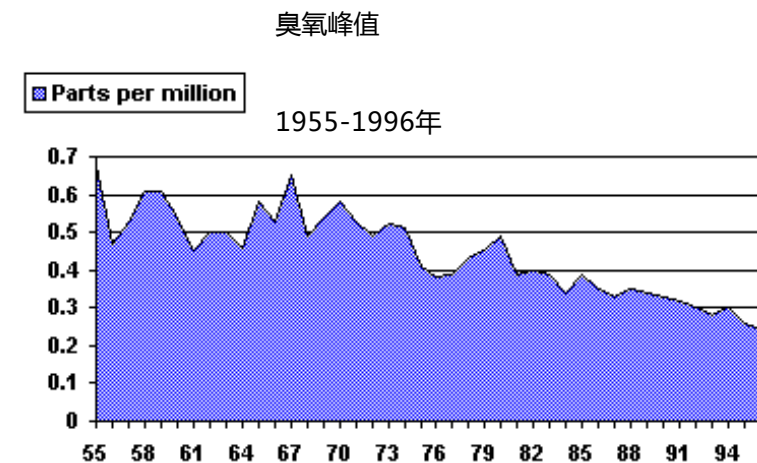
感谢有机会与各位探讨以下问题...

- 了解洛杉矶烟雾问题
- 近年洛杉矶空气质量与排放趋势
- 空气质量管理规划2016草案-第1部分
- 了解VOC与NO_x如何影响O₃水平
- O₃反应曲面
- 洛杉矶盆地NO_x最大排放负荷
- 空气质量管理规划2016草案-第2部分
- 总结

PM_{2.5}年均浓度



洛杉矶氧化剂/臭氧浓度在1950s-1970s达到500 ppb



1950年12月

Haagen-Smit 对洛杉矶臭氧问题给出了科学的、有用的解释

- VOC
- NO_x
- 日照

Haagen-Smit 也讨论了二次有机气溶胶颗粒物 (PM) 的形成

- 早期PM的控制主要集中在一次排放
- PM_{2.5} 监测与控制在1990s末期才开始

Dr. A. J. Haagen-Smit

THE AIR POLLUTION PROBLEM IN LOS ANGELES
by A. J. Haagen-Smit

<http://calteches.library.caltech.edu/1144/1/air.pdf>

核心信息

- 基于科学知识制定政策
- 对未来要有远见

认知与策略时间轴

	1950s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s
认知	氧化剂, O ₃ 大气化学	VOC 策略	现代大气化学 3-D O ₃ 模式	O ₃ 与 PM _{2.5} 联合控制 NOx 策略	PM/O ₃ 模式 PM/O ₃ 策略	NOx 与 VOC 微调策略
控制策略	露天焚烧 汽车引擎	汽车排放(催化 剂)	机动车与燃油 溶剂 电厂	机动车与燃油 固定源NOx & SOx	全部移动源, e.g., 港口 氨排放	电气化

仅是大的方面 – 细节内容太多没有在本页一一展示

美国与加州标准

年份	污染物	美国标准(NAAQS)		加州标准 (CAAQS)	
		浓度水平	评价时间	浓度水平	评价时间
1955	氧化剂			0.5 ppm	1-Hour
1959	氧化剂			0.15	1-Hour
1969	氧化剂			0.1	1-Hour
1971	氧化剂	0.08 ppm	1-Hour		
1975	指标从氧化剂变为臭氧			0.10	1-Hour
1979	臭氧	0.12	1-Hour		
1988	臭氧			0.09	1-Hour
1997	臭氧	0.08	8-Hour		
2005	臭氧			0.09	1-Hour
2005	臭氧			0.070	8-Hour
2008	臭氧	0.075	8-Hour		
2015	臭氧	0.070	8-Hour		

For O₃, 1 ppb ≈ 2 µg/m³

NAAQS标准中舍入约定, 0.08 ppm ≡ 0.084 ppb

- 必须达到美国国家标准NAAQS
- 逐步接近加州标准CAAQS
- 1970s中期, 指标从氧化剂变成臭氧
- 2000s中期, 从1小时平均变为8小时平均
- 美国国家标准NAAQS 与加州标准CAAQS 现在相当
- 第4高值的3年滑动平均

洛杉矶空气质量管理思路

- 南海岸空气质量管理局(SCAQMD) 与加州空气资源委员会 (CARB) 牵头南加州空气质量管理策略的制定
- 每3-5年 SCAQMD/CARB 制定一项空气质量管理规划 (AQMP)
 - 证明达到美国国家空气质量标准(NAAQS)
 - 显示加州空气质量标准 (CAAQS)的达标进展
- AQMP是一项多污染物协同控制的策略
 - 臭氧 (O₃) [NO_x 与 VOC 排放]
 - 细颗粒物(PM_{2.5}) [PM_{2.5}, NO_x, SO₂, NH₃ 与 VOC 排放]
 - 粗颗粒物(PM₁₀) [PM₁₀, NO_x, SO₂, NH₃ 与 VOC 排放]
 - 一氧化碳(CO) [CO 排放]

最近的南加州空气质量管理规划

- 最近的南加州空气质量管理规划分别制定于2007, 2012 与 2016 (草案)
- 光化学网格模型(PGMs)用以评估未来年度排放控制策略并证明能达到O₃, PM, CO, SO₂ 与 NO₂标准
- 最近的南加州空气质量管理规划应用了两种光化学网格模型(PGMs) :
 - 空气质量综合模拟系统(Comprehensive Air Quality with extensions,CAMx); 以及
 - 多尺度空气质量模式系统 (Community Multi-scale Air Quality, CMAQ)
- 在过去,空气质量管理规划已经着重于O₃ 与 PM 标准的达标
 - 因为南加州的臭氧问题非常严重, 所以被允许有更长的期限来达到臭氧标准

2016空气质量管理规划草案

- 2016年6月发布
- 解决O₃ 与 PM 达标问题
 - 2019到2031年不同标准的达标时限（见下表）
 - 没有制定2015年新的臭氧标准（期望2037年达到70 ppb）的达标策略
 - 温室气体减排的协同效益
- 将于2017年初最终定稿

Standard	Concentration	Classification	Latest Attainment Year
2008 8-hour Ozone	75 ppb	Extreme	2031
2012 Annual PM2.5	12 µg/m ³	Moderate	2021
		Serious	2025
2006 24-hour PM2.5	35 µg/m ³	Serious	2019
1997 8-hour Ozone	80 ppb	Extreme	2023
1979 1-hour Ozone	120 ppb	Extreme	2022

注：老的臭氧标准（O₃ NAAQS）在达到之前仍然有效



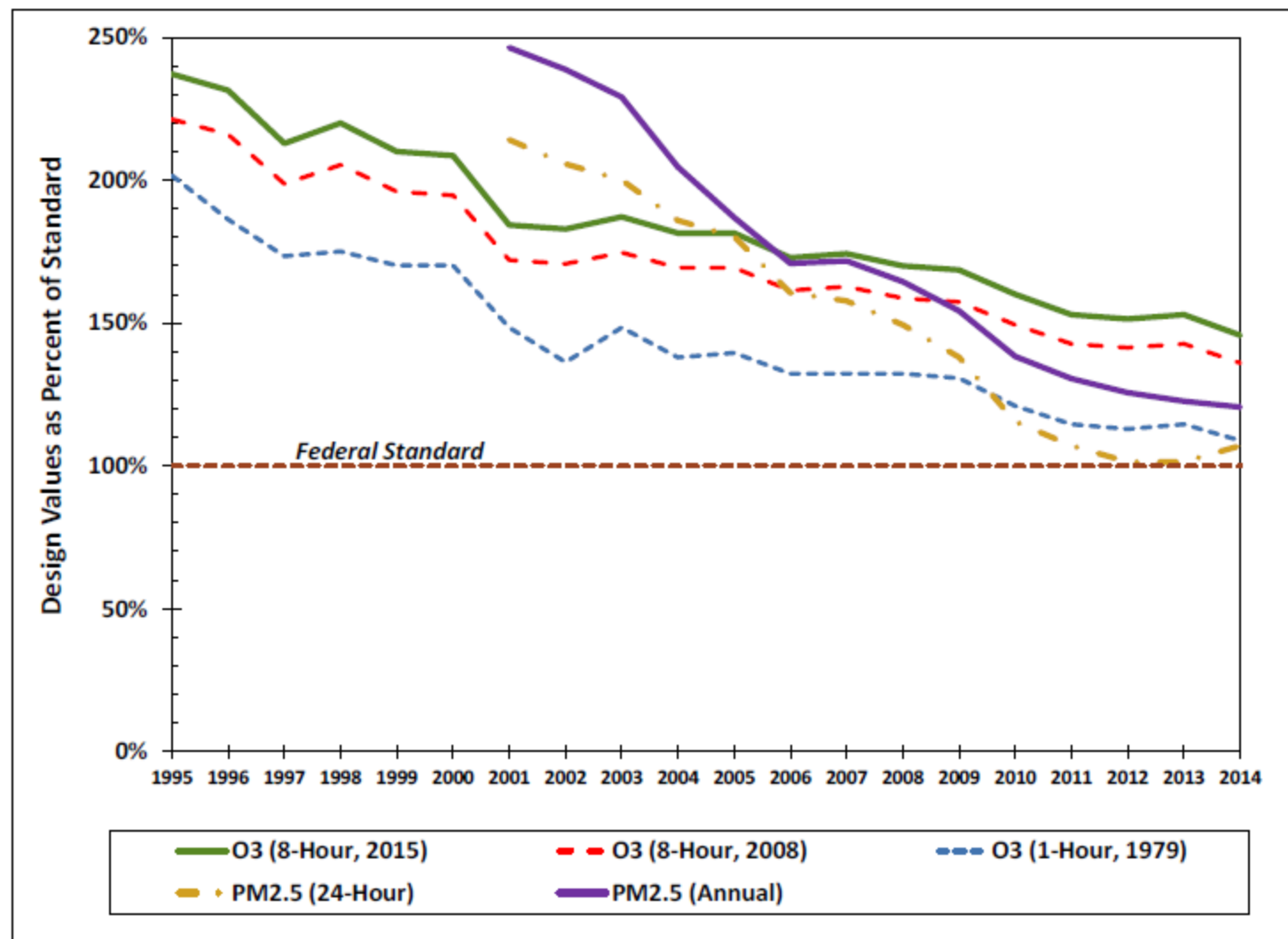
DRAFT 2016 AIR QUALITY MANAGEMENT PLAN



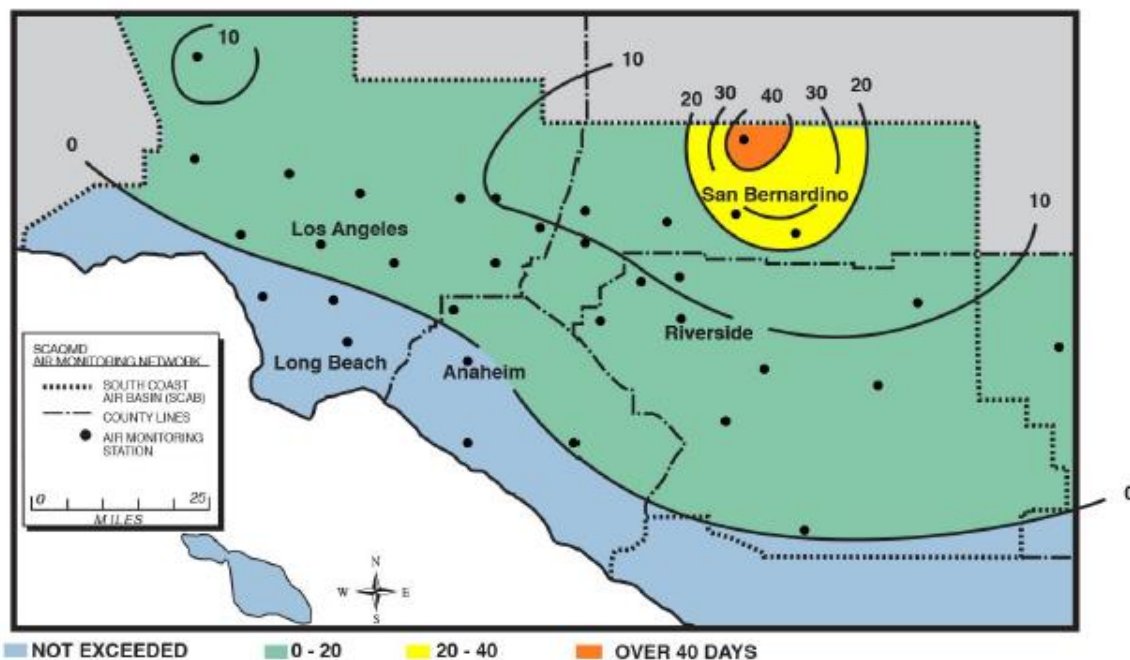
JUNE 2016

2016空气质量管理规划草案: O₃ 与 PM 改善

- 2014年, PM_{2.5} 的年均与24小时平均浓度接近美国国家标准水平
 - 降低臭氧浓度的NO_x控制规划加上针对SO₂ 与 PM_{2.5}控制的额外措施可以实现PM_{2.5}达标
- 达到O₃国家标准需要更多工作
 - 必须证明能够达到国家臭氧相关的各项标准
 - 用以保障在2023年达到8小时臭氧标准的NO_x额外控制措施也可以帮助实现2022年达到1小时臭氧标准

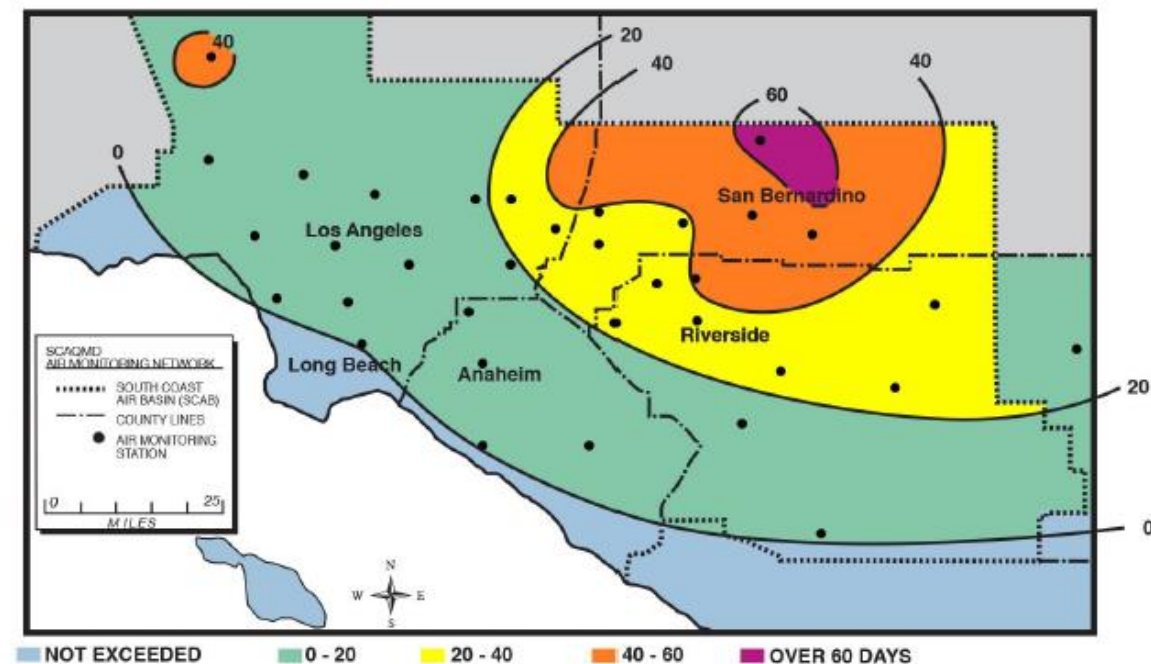


O₃ 超标天数（高于84 ppb 与 75 ppb）



2014年，臭氧超过旧国家标准（84ppb,1997）的天数为40天

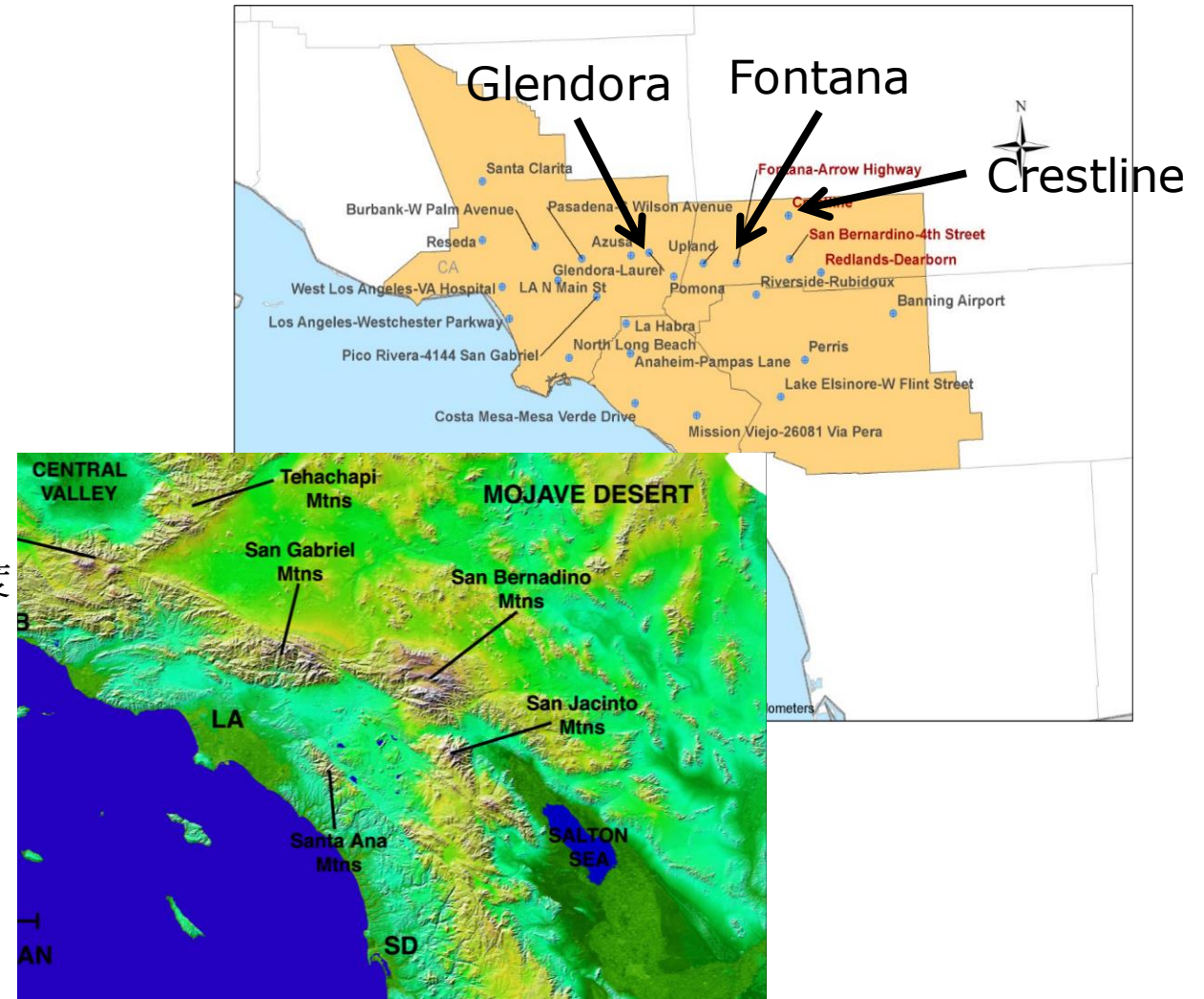
2014年，臭氧超过旧国家标准（75 ppb,2008）的天数为60天



臭氧超过新国家标准（70ppb,2015）的天数更多

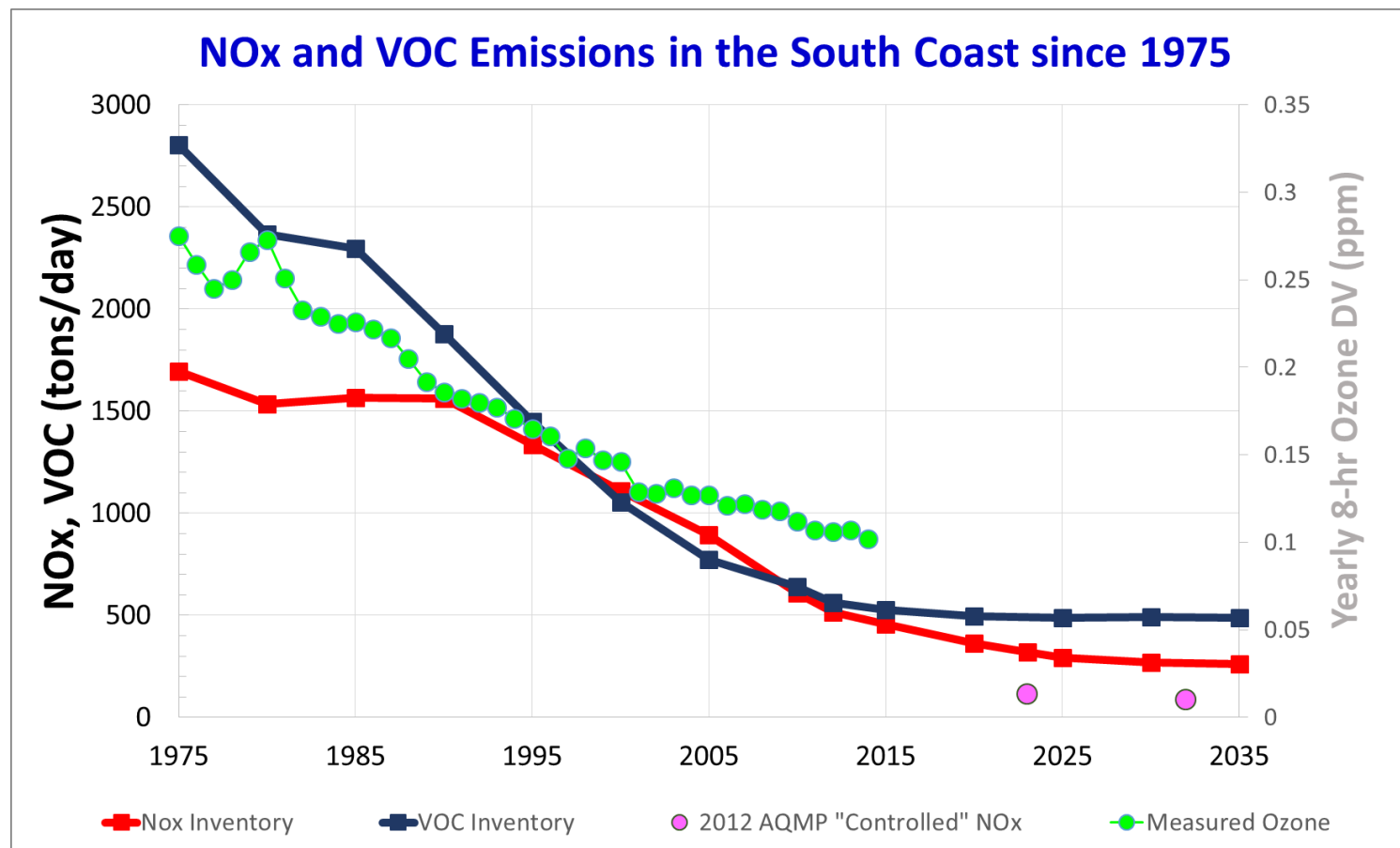
洛杉矶空气流域臭氧问题演变(SoCAB)

- 1970s, 臭氧峰值出现在Glendora靠近主城区
- 1975-2000, 控制重点是VOC, 臭氧峰值转移到了San Bernardino 山区的Crestline 地区
- 2000后, 控制重点变成NO_x, 臭氧峰值区下移到 山脚站点 (e.g., Fontana 与 Redlands)
 - NO_x 控制带来PM_{2.5} 浓度的降低
 - 因为VOC控制的问题, NO_x 控制制约了臭氧浓度降低吗



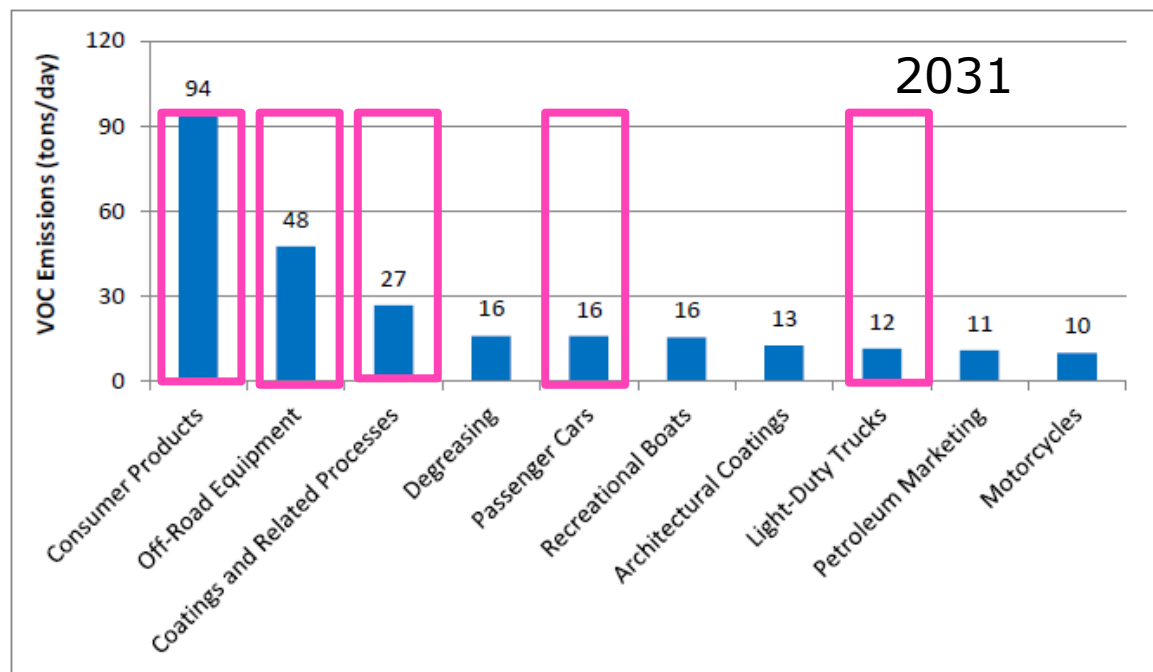
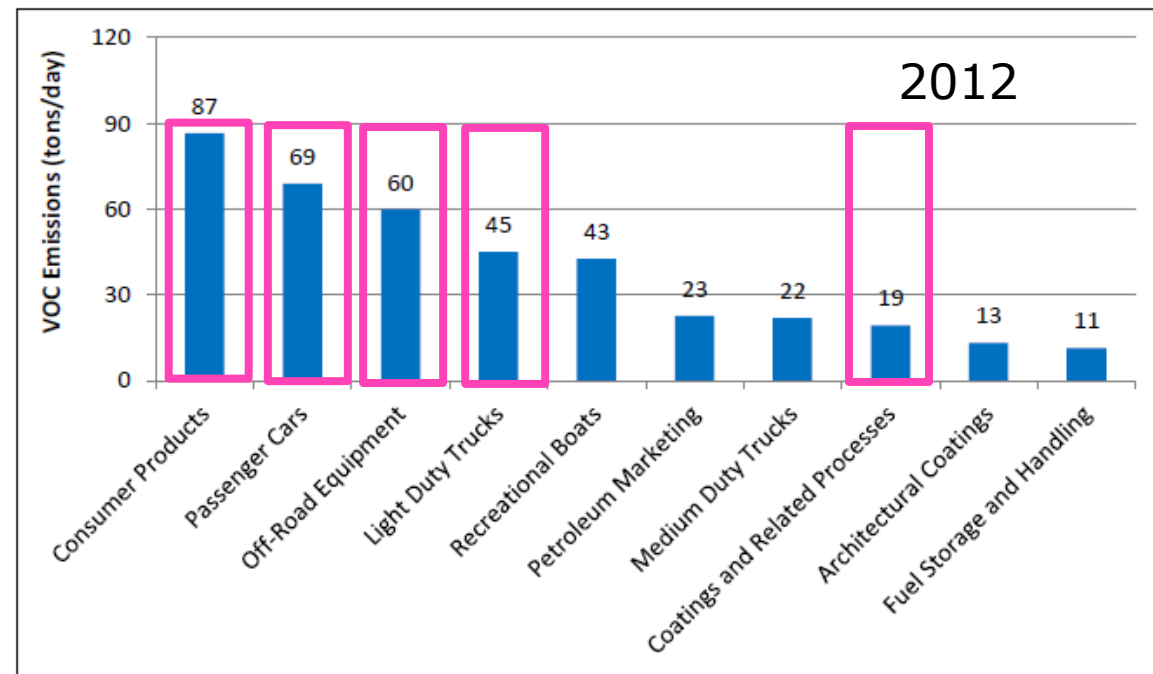
臭氧观测浓度，VOC 与 NOx清单

- 1975-1990年，NOx 平稳同时控制VOCs带来了臭氧浓度显著降低
- ~1990开始控制NOx，到~2000，臭氧浓度下降速率放慢
- ~2005 VOC 减排速度放缓



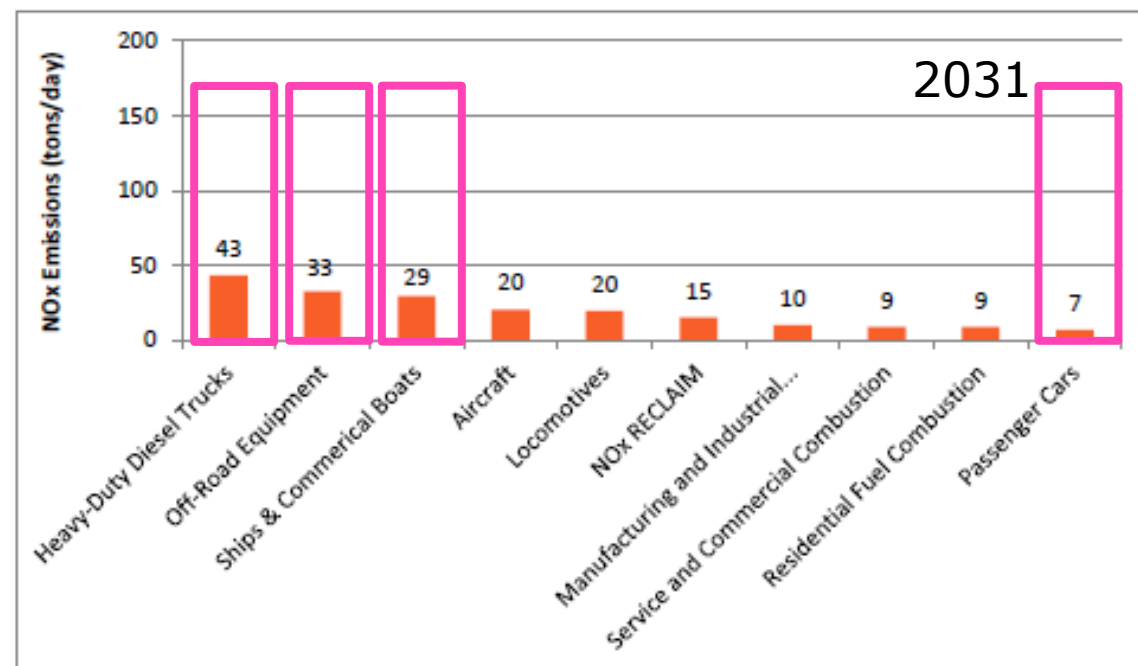
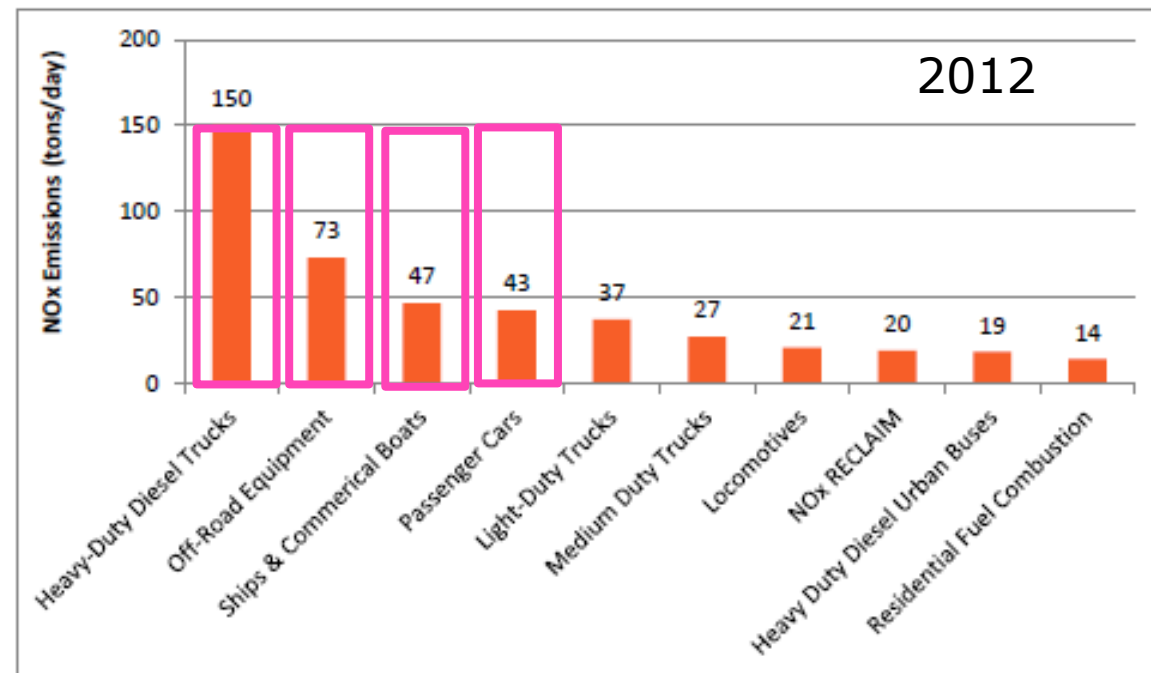
2012 与 2031 VOC排放最高的10个行业/部门

- 2012是当前空气质量管理规划的基准年
- 在没有额外控制措施的情况下，2031年相较基准年变化情况
 - 载客车减少77% （从 69 TPD 降至 16 TPD）
 - 轻型卡车减少73% （从 45 TPD 降至 12 TPD）
 - 非道路机械减少 20% （从60 TPD 降至 48 TPD）
 - 消费品增加 8% （从87 TPD 增至 94 TPD）
 - 涂料增加 42% （从 19 TPD 增至 27 TPD）



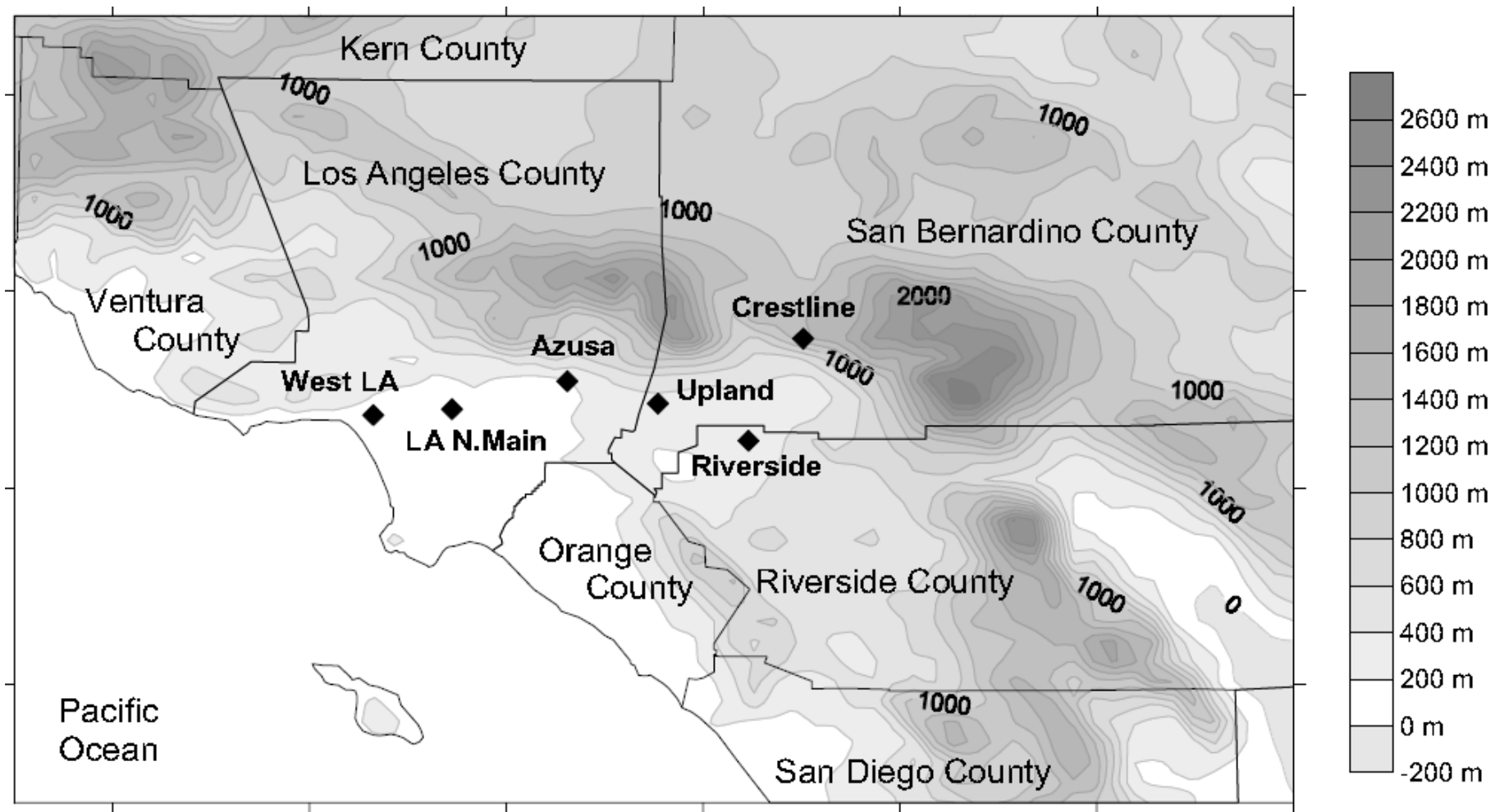
2012 与 2031 NOx排放最高的10个行业/部门

- 在没有额外控制措施的情况下，2031年相较2012基准情况
 - 重型卡车减少71%（从 150 TPD 降至 43 TPD）
 - 非道路机械减少 55%（从73 TPD 降至 33 TPD）
 - 载客车减少 84%（从43 TPD 降至 7 TPD）
 - 船舶减少 38%（从 47 TPD 降至 29 TPD）

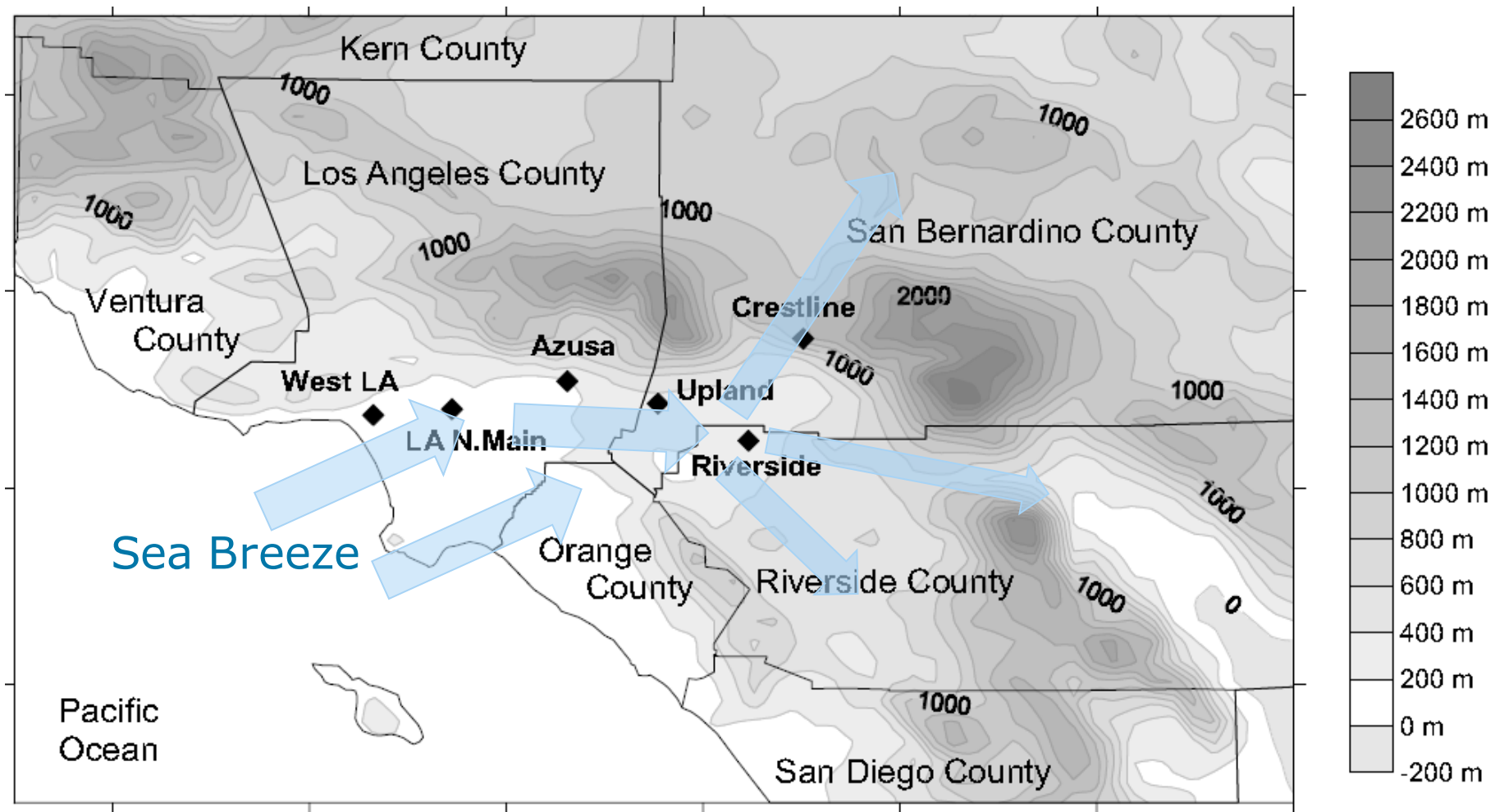


了解VOC 与 NO_x如何影响O₃水平

洛杉矶地形



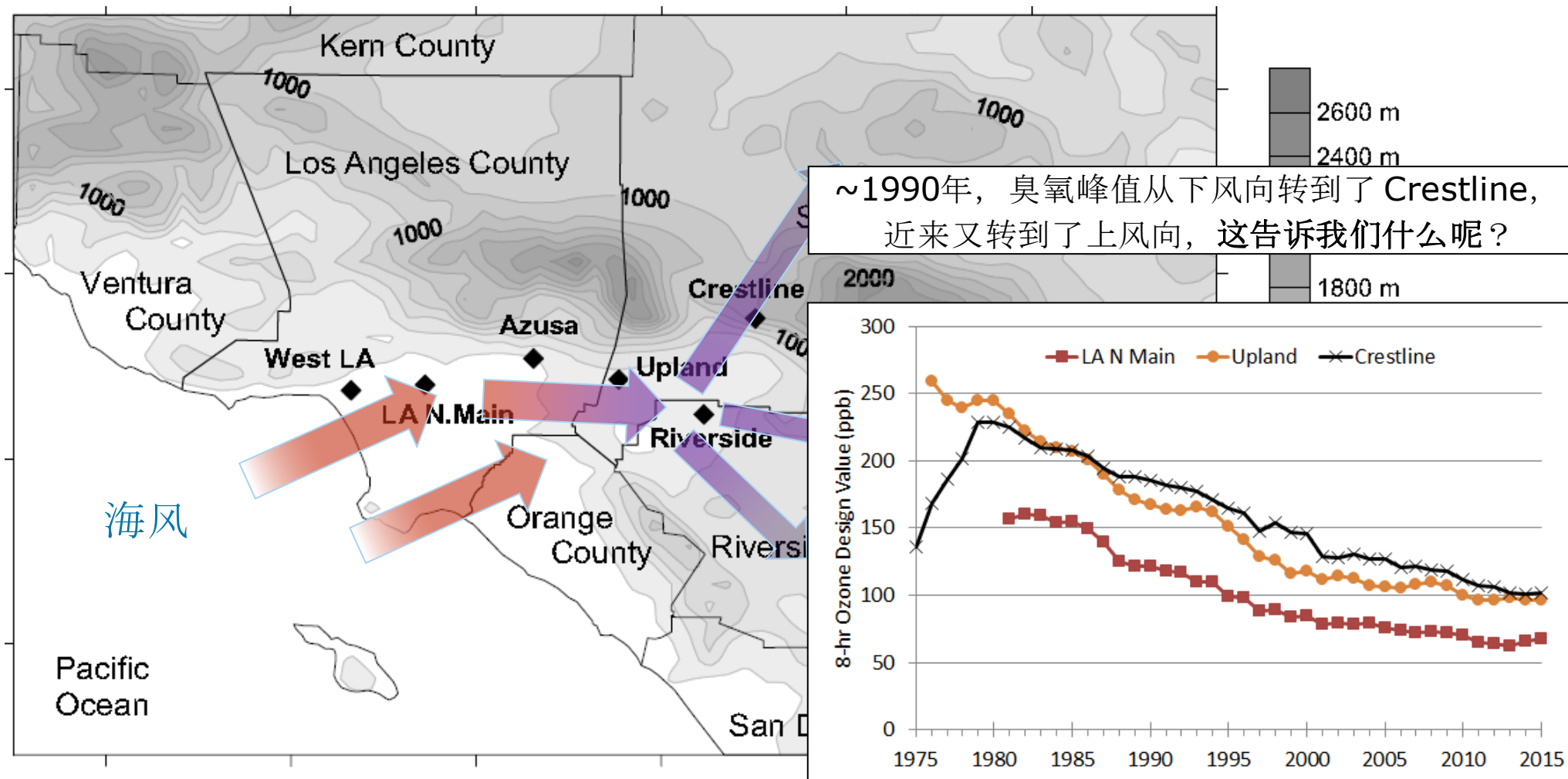
海风吹向内陆、通过山体之间的传输通道



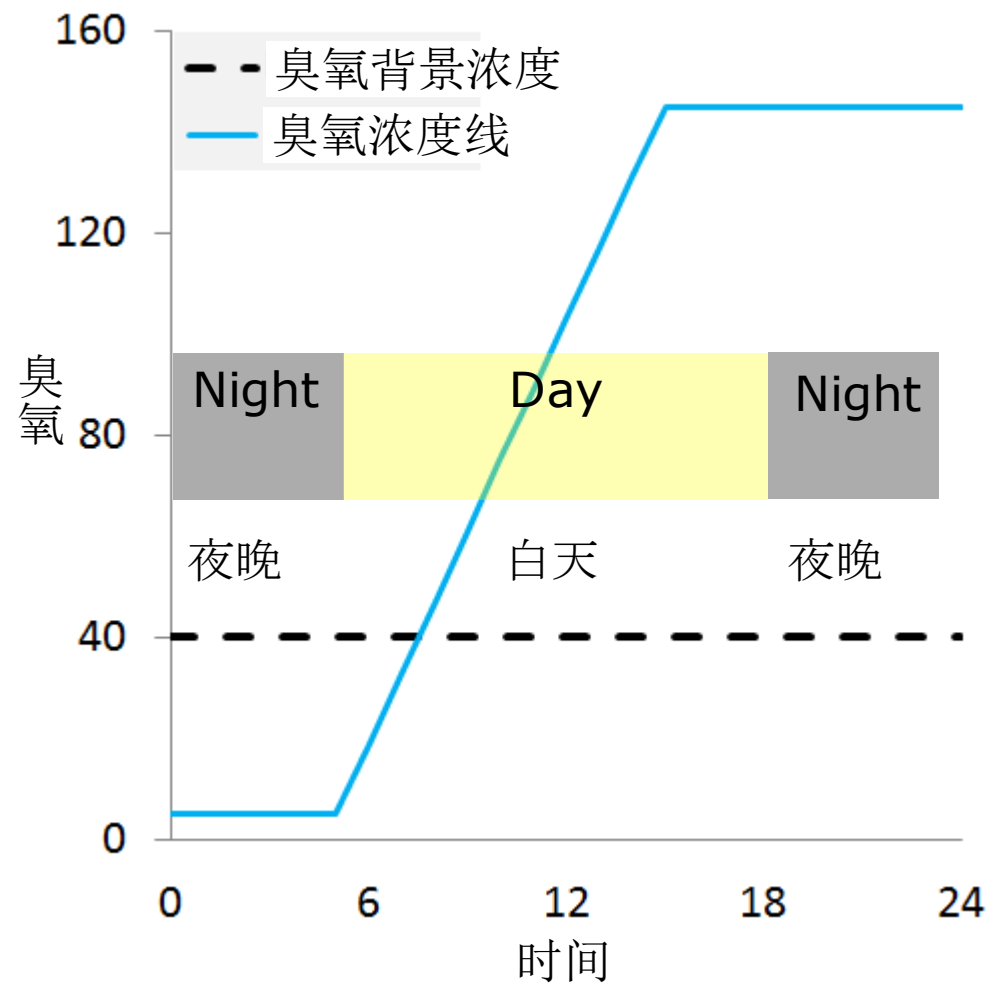
海风携带排放物

排放物生成臭氧

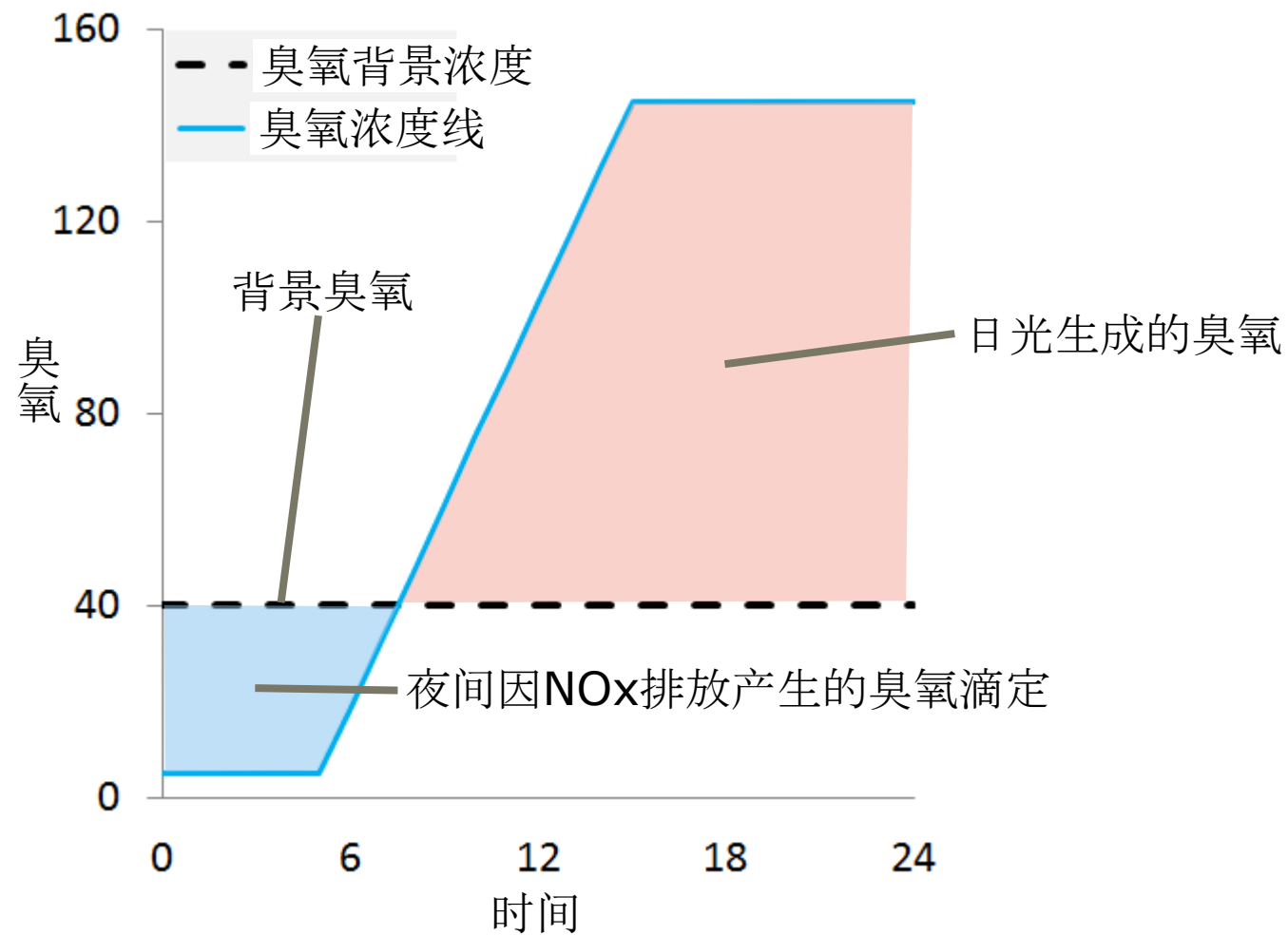
臭氧通过山体间的传输通道



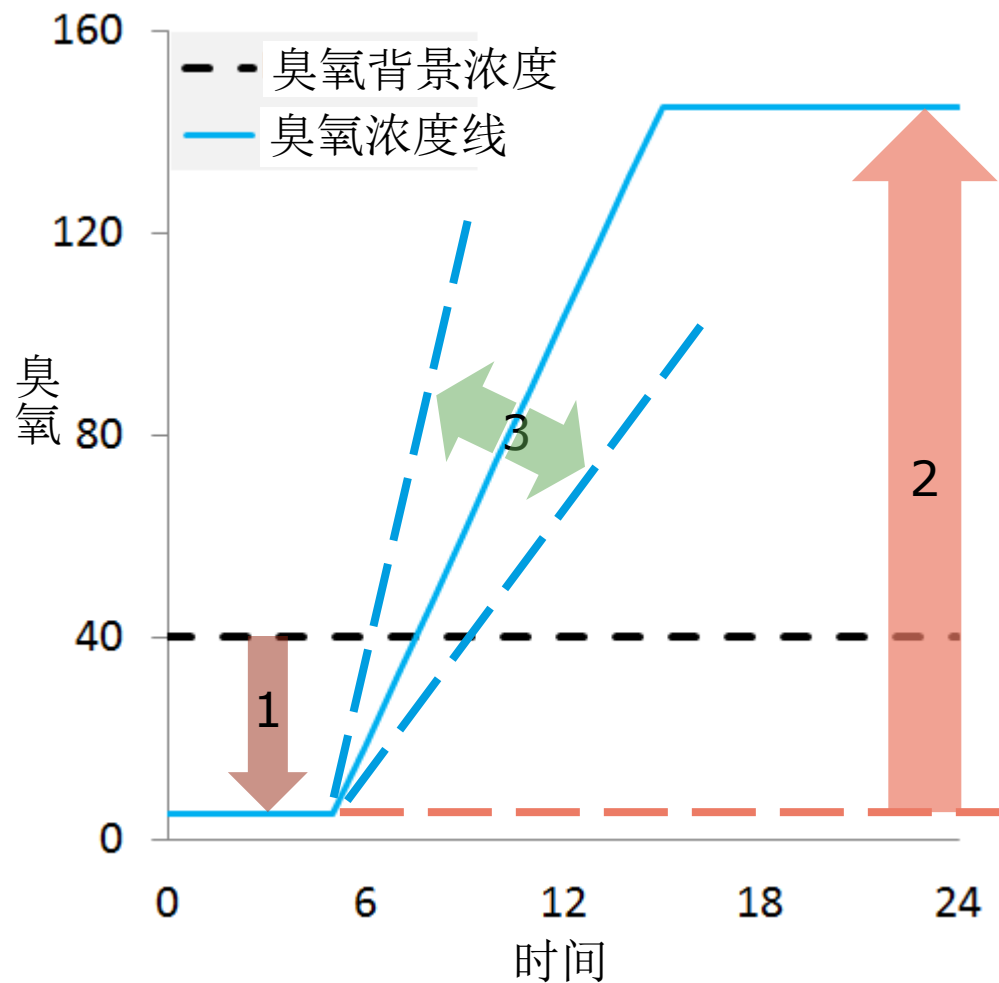
O₃ 生成的简化图



O₃ 滴定与O₃ 生成



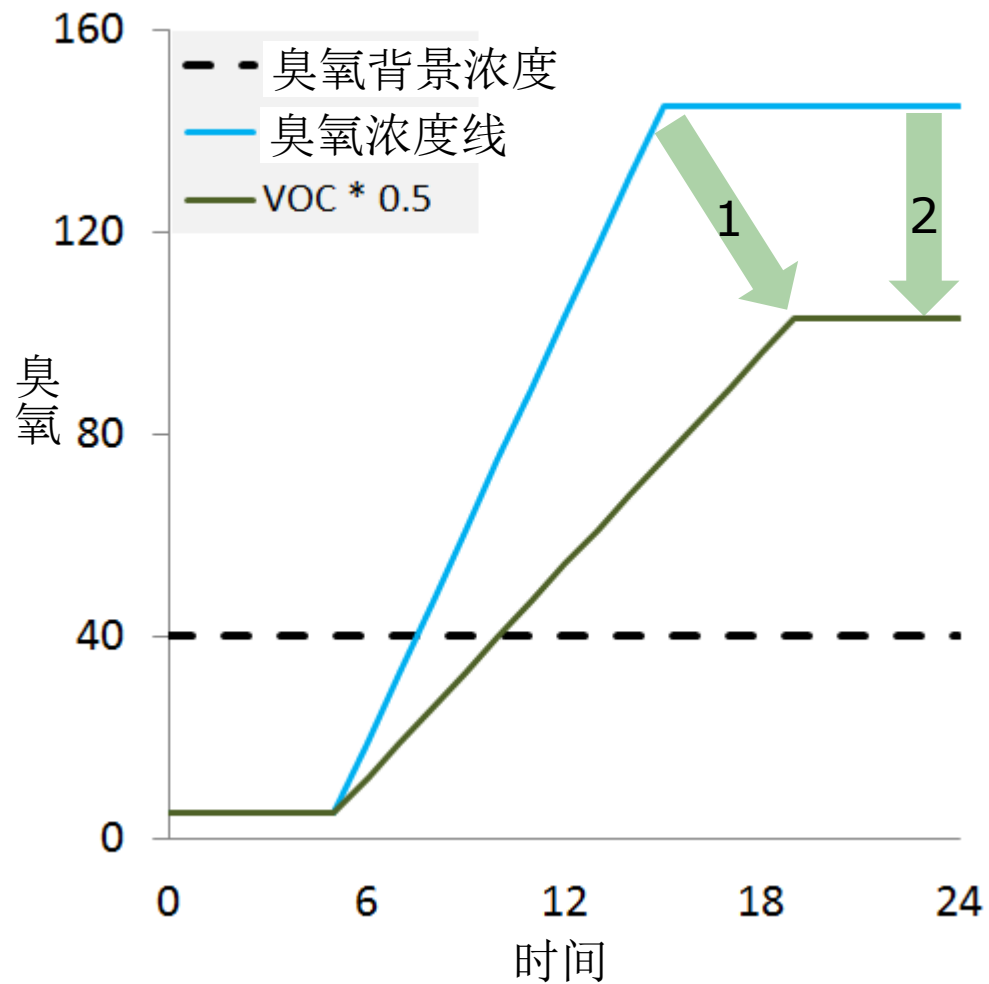
NO_x 与 VOC 排放影响



简化图

1. 臭氧滴定与NO_x 排放成正比
2. 可能生成的O₃ 最高浓度与NO_x 排放成正比
3. O₃ 生成速率(dO_3/dt) 与VOC 排放成正比

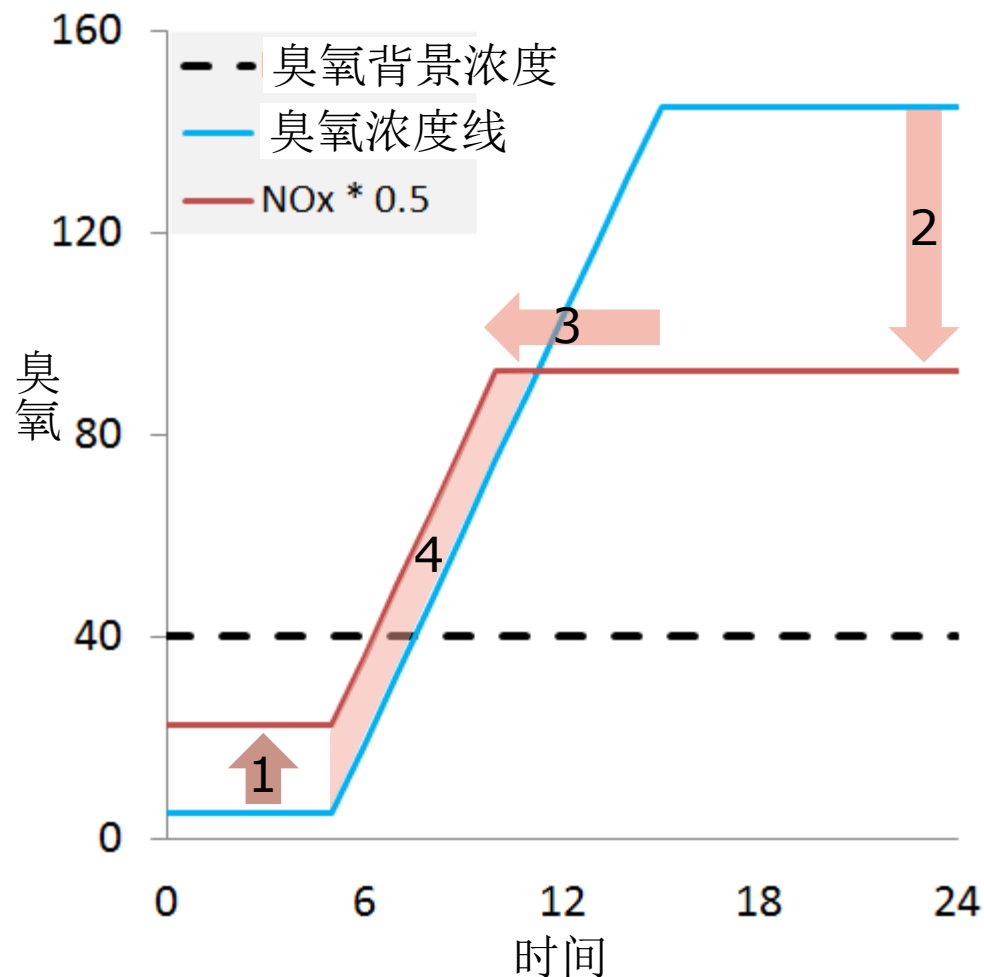
减少VOC 排放



简化图: VOC 减排

1. 臭氧峰值时间后移-到日落时间
2. 臭氧最大值降低了, 因为日落后停止生成臭氧

减少NO_x 排放



简化图: NO_x 减排

1. O₃ 夜间滴定作用减少
2. O₃ 最大值降低了, 因为受到NO_x的限制
3. O₃ 峰值时间提前, 因为一开始浓度更高
4. 上午时间的O₃ 浓度更高

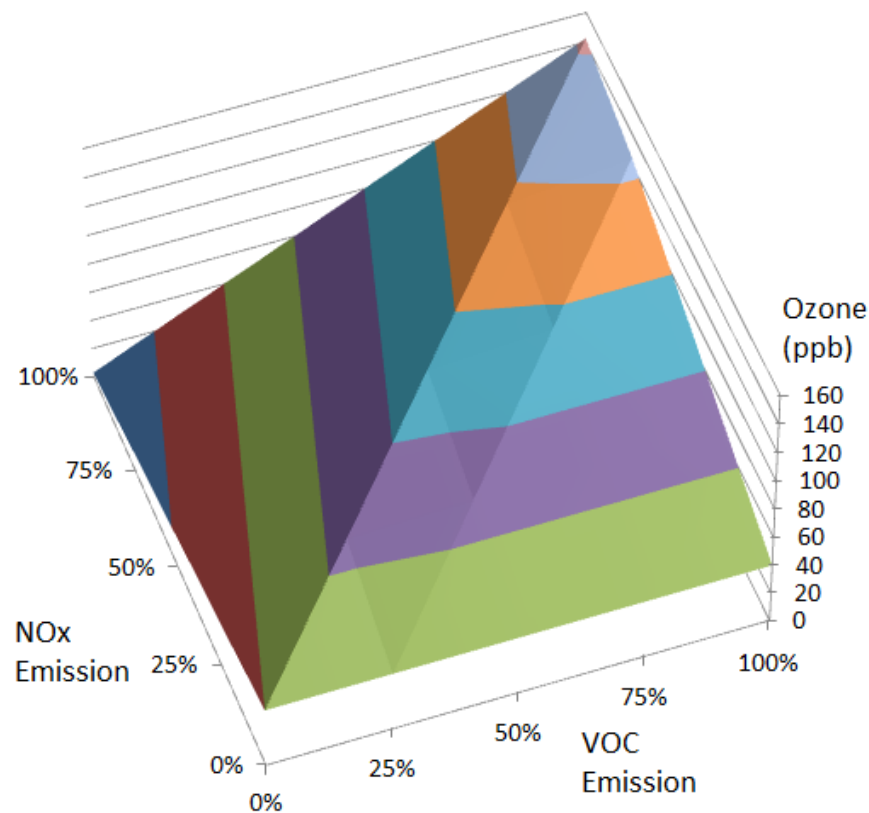
洛杉矶观察到了图中的**1, 2, 3, 4**效应,
成为臭氧的“周末效应”

O₃ 反应曲面

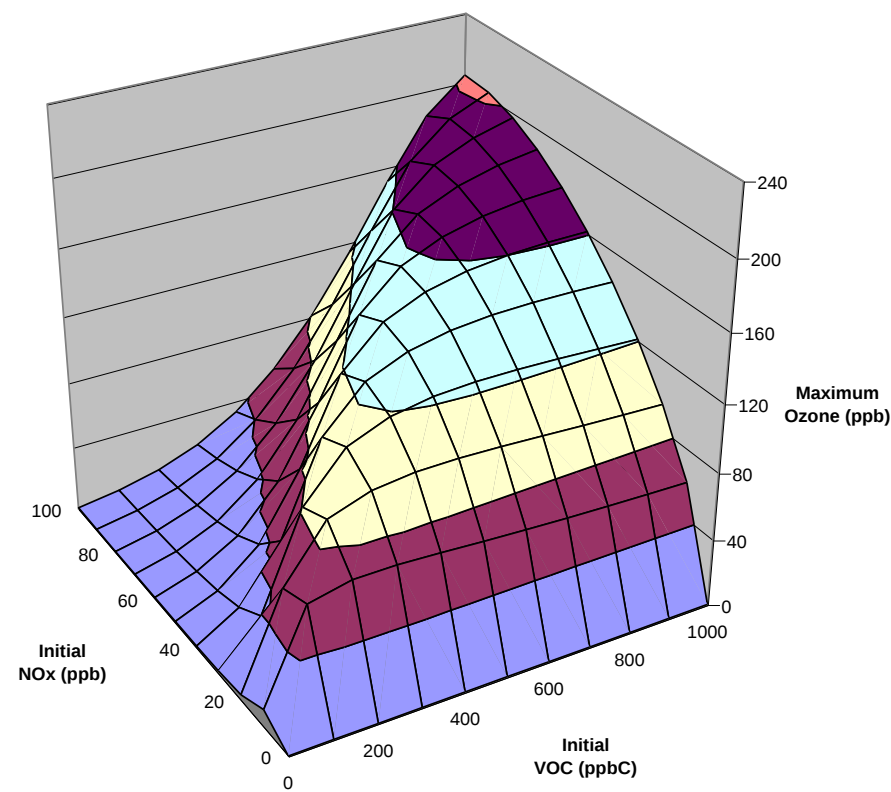
简化图给出了臭氧反应曲面，显示以下重要特征

“简化版”

1. O₃ 最高可达浓度与 NO_x 排放正相关
2. O₃ 生成率 (dO₃/dt) 与 VOC 排放正相关
3. 日照控制



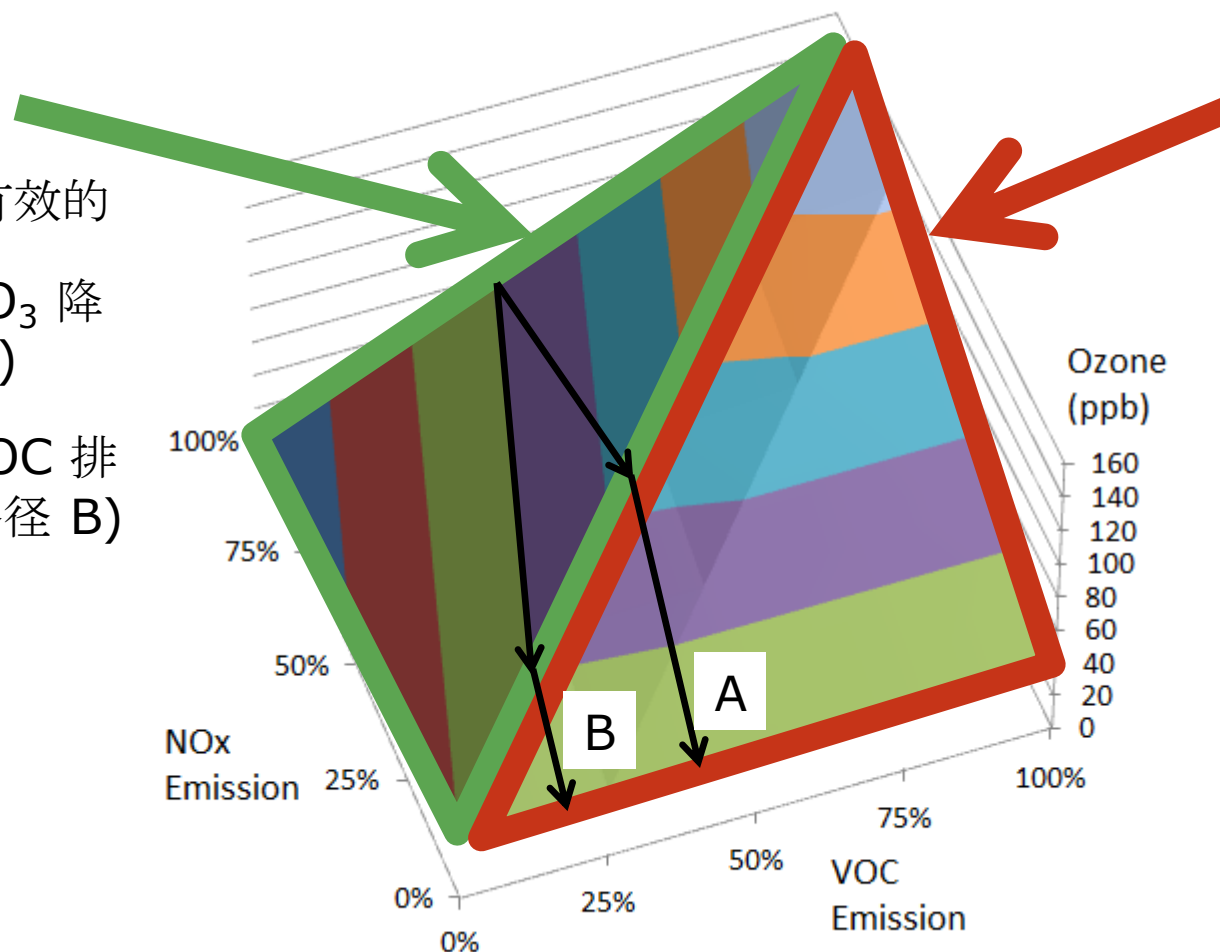
复合光化学(CB4)



VOC 与 NOx-控制下的 O₃ 生成

VOC控制区间

- 减少VOC排放总是有效的
- 减少NOx 可造成在O₃ 降低前先上升 (路径 A)
- 同时减少NOx 与 VOC 排放可避免O₃ 上升(路径 B)



NOx-控制区间

- 减少NOx总是有效的
- 减少 VOC 没有效果

洛杉矶O₃ “周末效应”

- 自1990s中期，观测到周末的O₃浓度要高于工作日浓度
 - 是自NO_x减排开始的时期
- 为了解释“周末效应”提出了很多假设
- 光化学模拟发现有一种假设与观察到的情况一致
 - 周末重型卡车上路减少带来更低的NO_x 排放水平
 - O₃反应曲面的VOC控制区，更低的NO_x伴随更高的O₃

TECHNICAL PAPER

ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. 53:864–875
Copyright 2003 Air & Waste Management Association

Modeling Weekday/Weekend Ozone Differences in the Los Angeles Region for 1997

Greg Yarwood and Till E. Stoeckenius

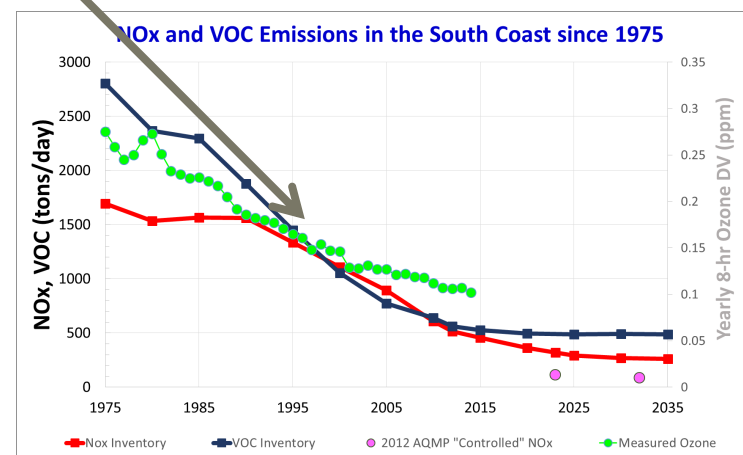
Environ Corp., Novato, California

Jeremy G. Heiken

Air Improvement Resource, Inc., Novi, Michigan

Alan M. Dunker

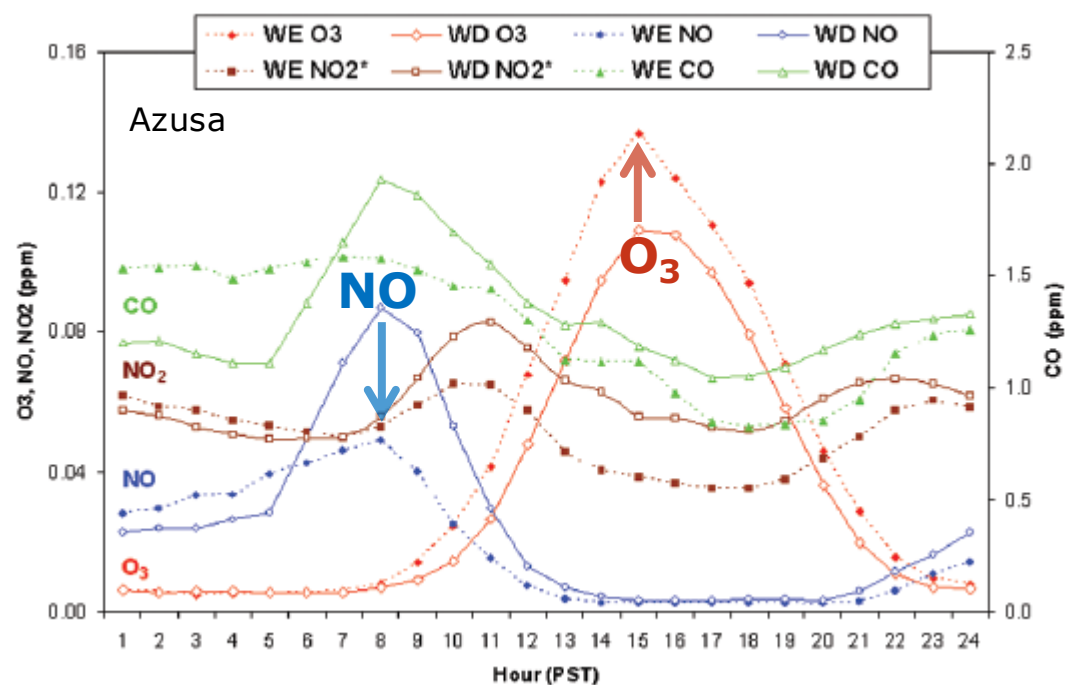
General Motors Research and Development Center, Warren, Michigan



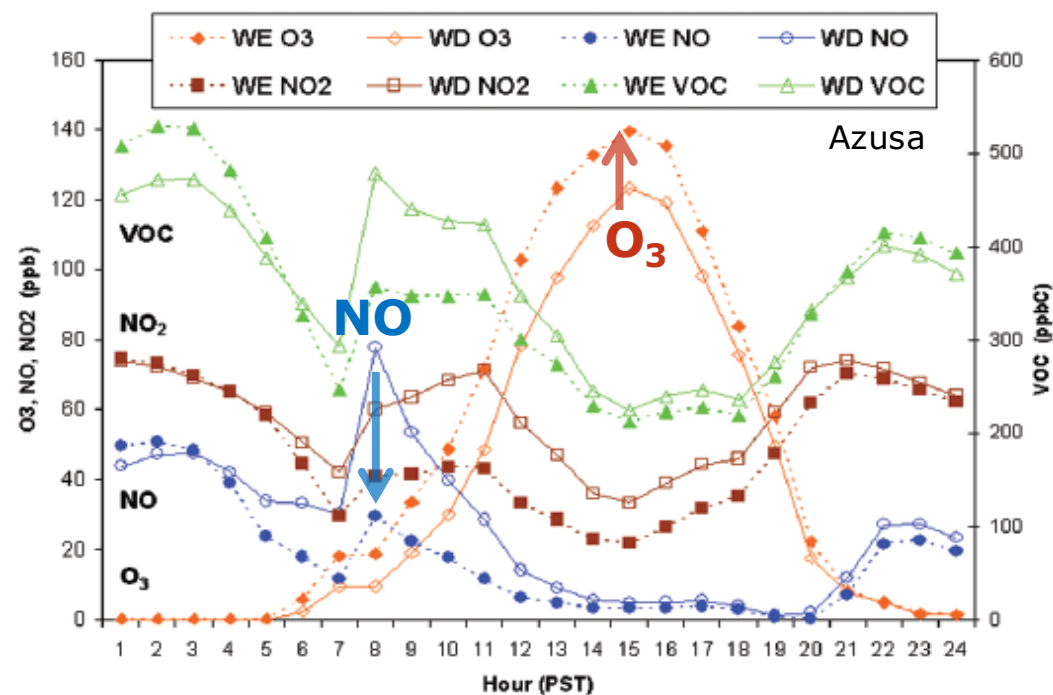
观测与模拟的“周末效应”

- 臭氧浓度对前体物变化的反应，模型与观测一致
- 为模型预测未来排放情景建立了信心

观测值



CAMx 模型模拟值

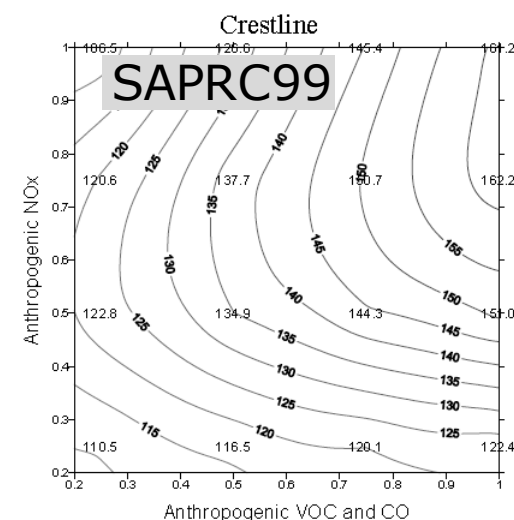
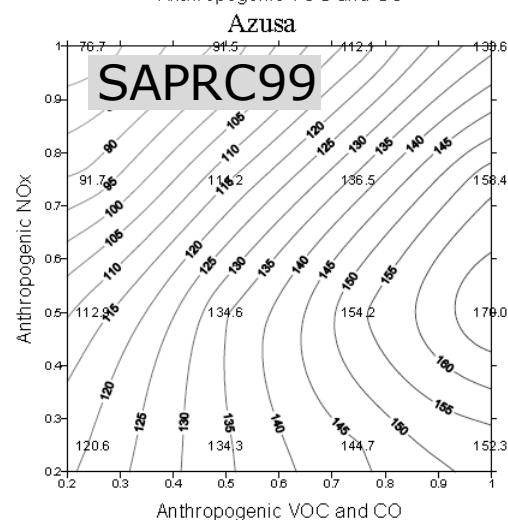
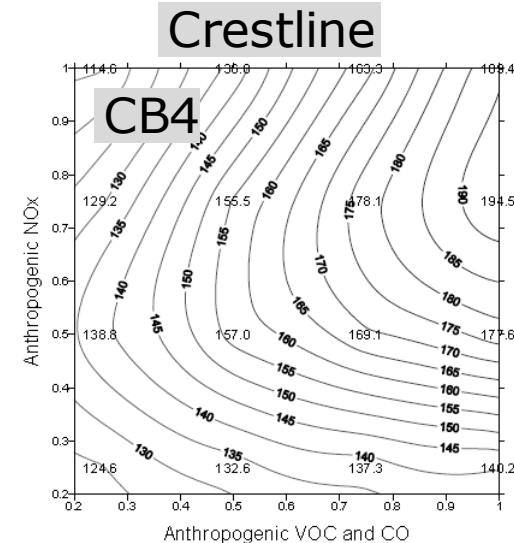
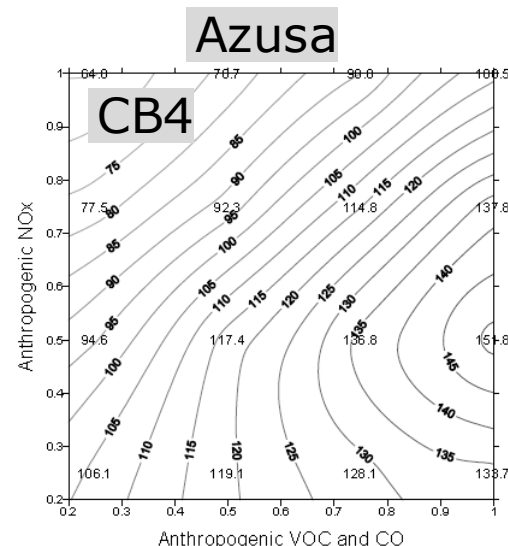


1997年 O₃ 反应曲面

- 减少人为VOC 与 NO_x 排放的模拟矩阵
 - 生物VOC排放不变
- 2种化学机制的CAMx
- Azusa 与 Crestline的VOC控制反应

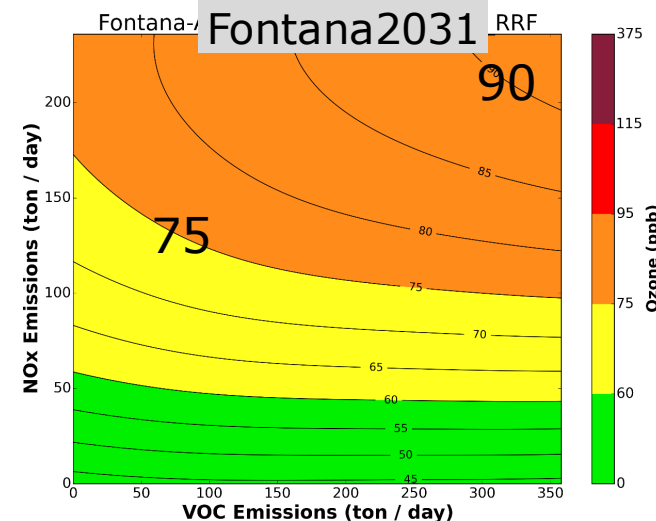
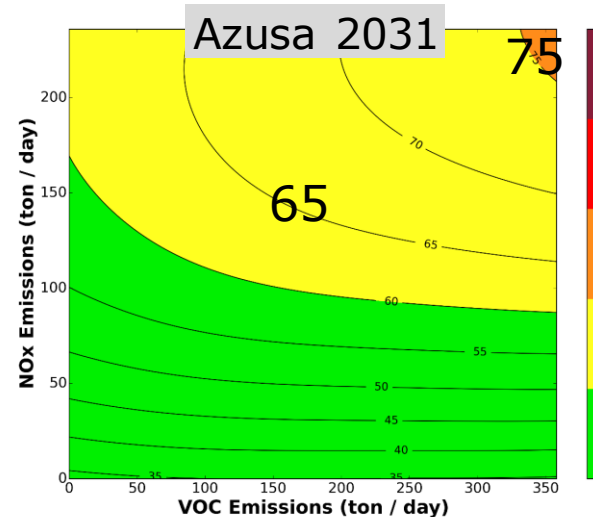
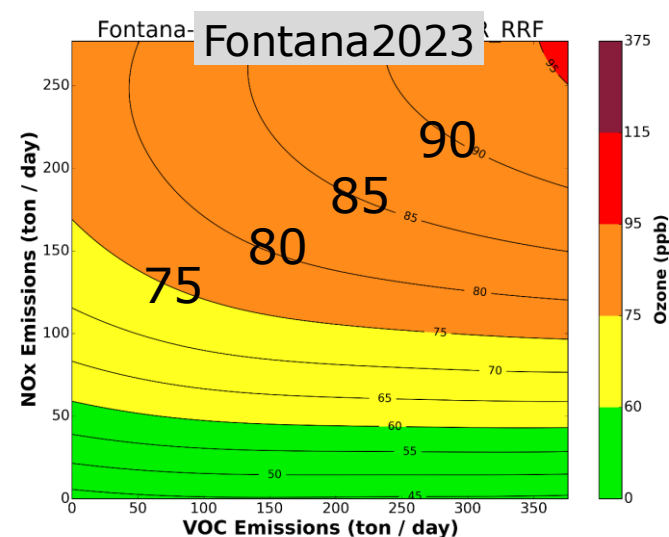
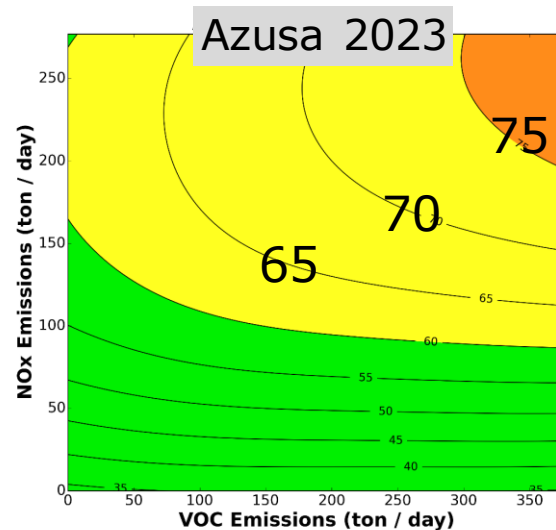
	Reduction in NO _x :						
	100%	80%	60%	40%	20%	0%	
	x	x	x	x	x	Base case	0%
	x	x	x	x	x	x	20%
	x	x	x	x	x	x	40%
	x	x	x	x	x	x	60%
	x	x	x	x	x	x	80%
x							100%

Reduction in VOC:

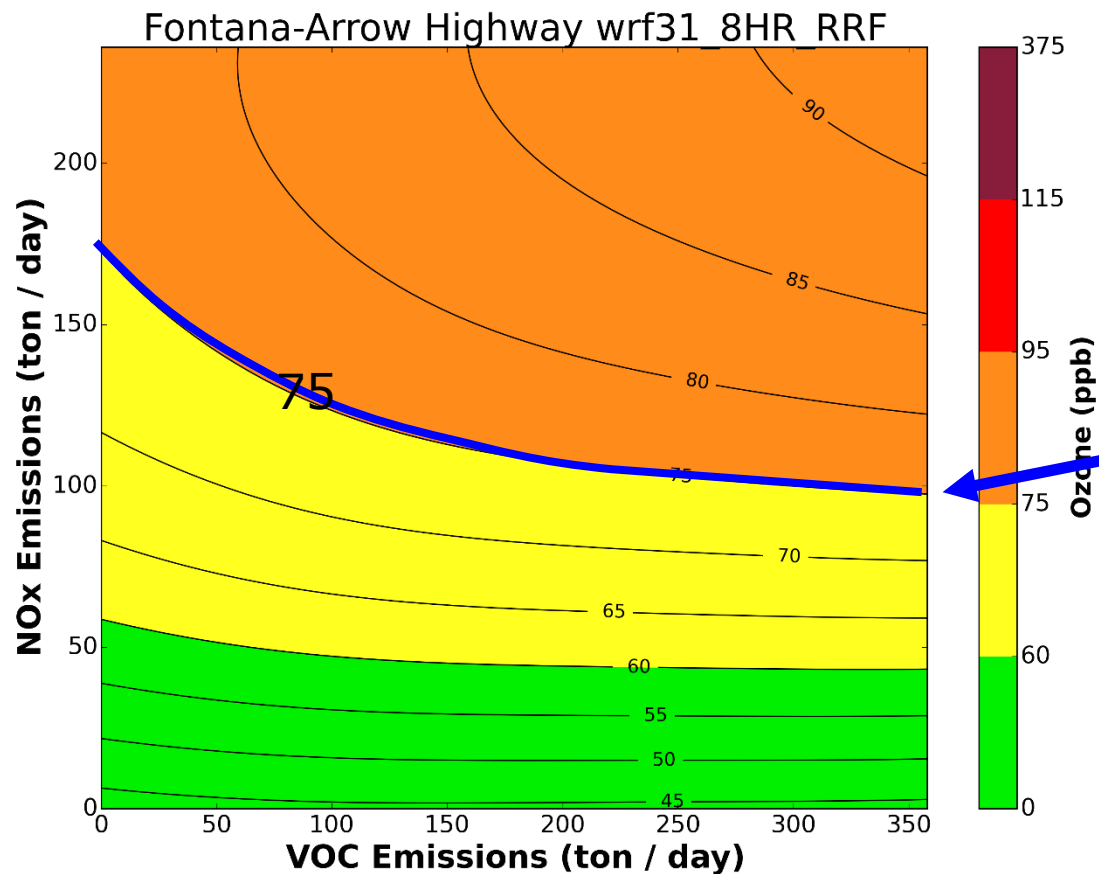


2023 与 2031年O₃反应曲面

- 2016 AQMP 草案模拟
 - Sang-Mi Lee, SCAQMD
 - CMAQ 模型
- 2023 基线排放
 - 379 吨 VOC, 264 吨 NO_x
- 2023 基线排放
 - 363 吨 VOC, 224吨 NO_x
- NO_x 与 VOC 都减少的话, Fontana 的O₃ 浓度最高



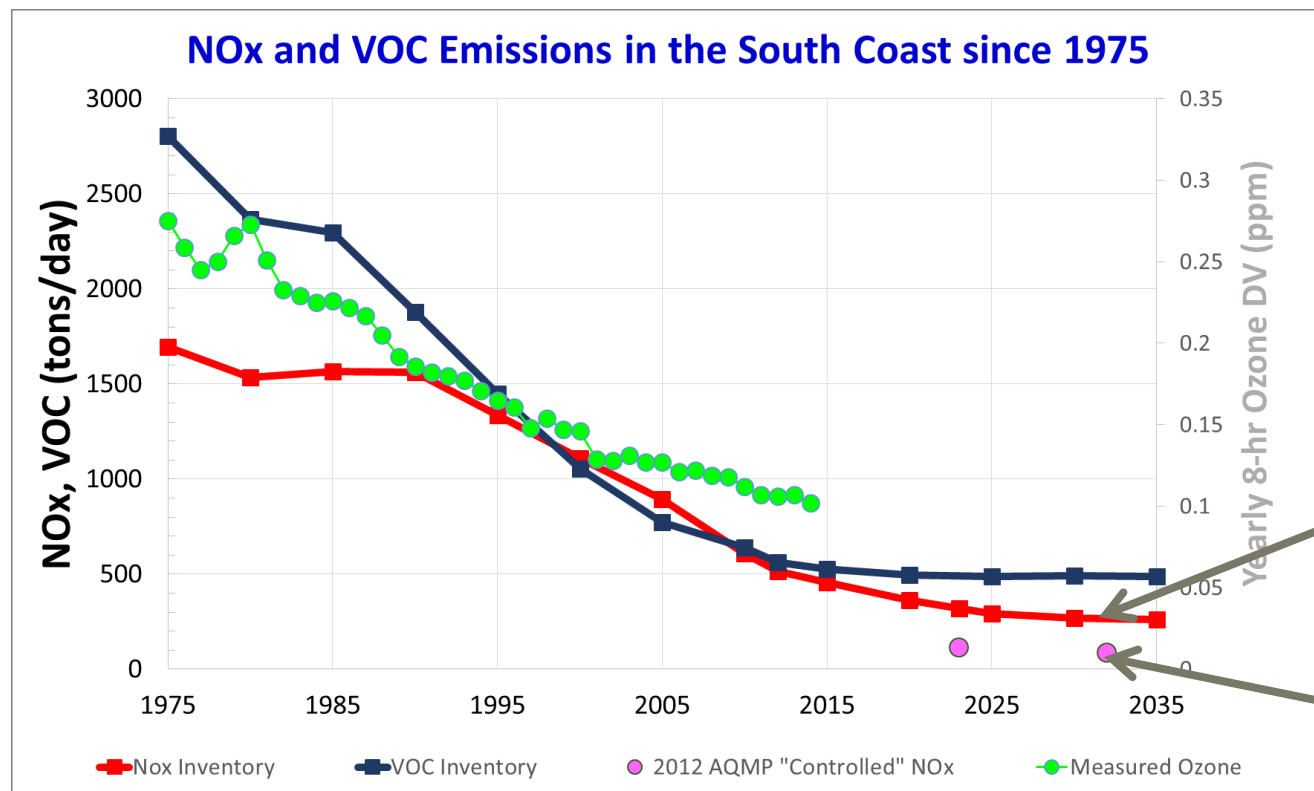
2031年SoCAB的NOx 最大排放负荷



到2031年，要达到美国国家臭氧标准(2008,75ppb)，NOx最大排放负荷为日排放约100吨

没有制定2015年新的臭氧标准（期望2037年达到70 ppb）的达标策略

2016 AQMP草案: 2031年, 将NOx 日排放量降至92 吨



夏季规划清单	NOx (TPD)	VOC (TPD)
2031 基线	224	363
点源&面源	27	12
道路移动源	36	15
非道路移动源	68	46
总减排量	131	73
余下排放量	92	290

2016 AQMP 草案 控制策略示例

<http://www.aqmd.gov/>

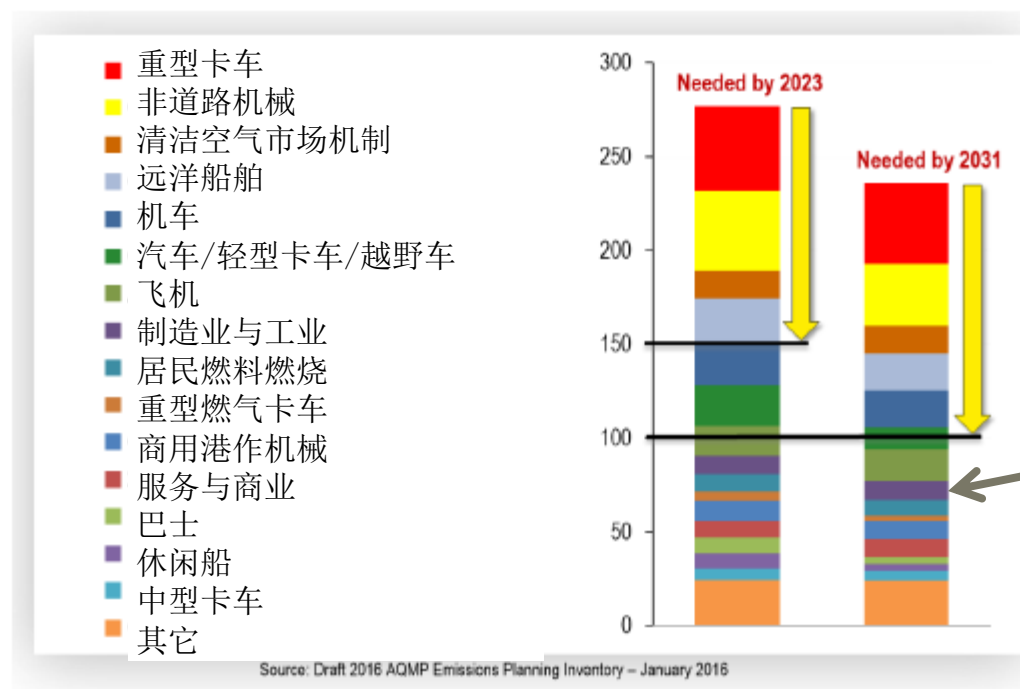
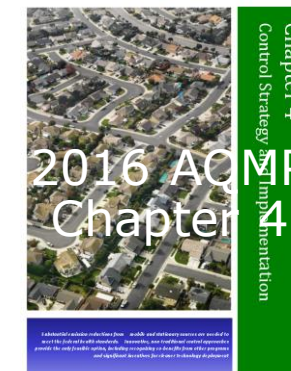


FIGURE 4-2
NEEDED NO_x EMISSION REDUCTIONS TO ACHIEVE
FEDERAL 8-HOUR OZONE AMBIENT AIR QUALITY STANDARDS

基于激励机制的措施：

固定源变成采用零排放或近零排放技术

Number	Title	Adoption	Implementation Period	Implementing Agency	Emission Reductions (tpd) (2023/2031)
Incentive-Based Measures:					
CMB-01	Transition to Zero and Near-Zero Emission Technologies for Stationary Sources [NO _x , VOC]	N/A	Ongoing	SCAQMD	2.5 / 5
Additional Stationary Sources Measures:					
CMB-03	Emission Reductions from Non-Refinery Flares [NO _x , VOC]	2017	2020	SCAQMD	1.4 / 1.5

非炼油火炬排放减少

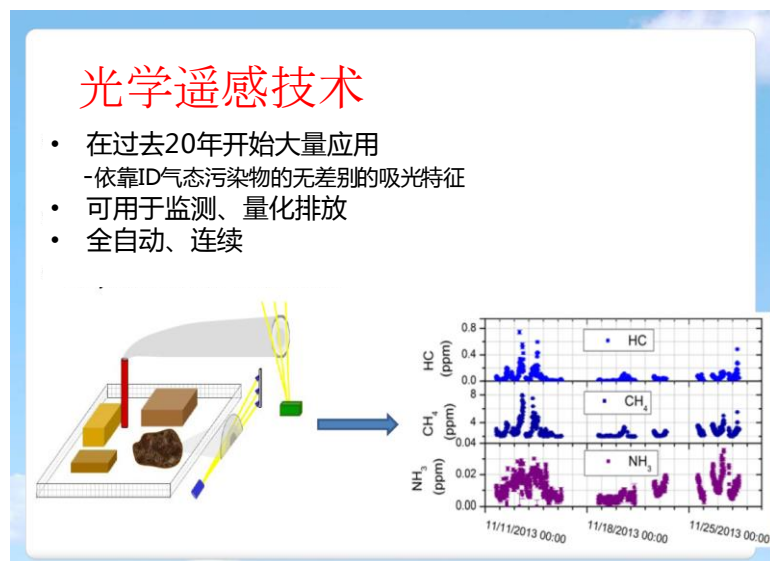
额外的固定源措施：

工业排放通量监测

光学技术可以测量大气中的排放通量 (kg / s)

固定源：排放追踪

e.g., 在中国已经应用的FTIR,
DOAS, DIAL



幻灯片：Laki Tisopulos, SCAQMD, 2014

移动源：排放观测



更多信息: www.fluxsense.se

SOF

NO_2 , SO_2 , VOCs

追踪纪录:

欧洲 ~20 years

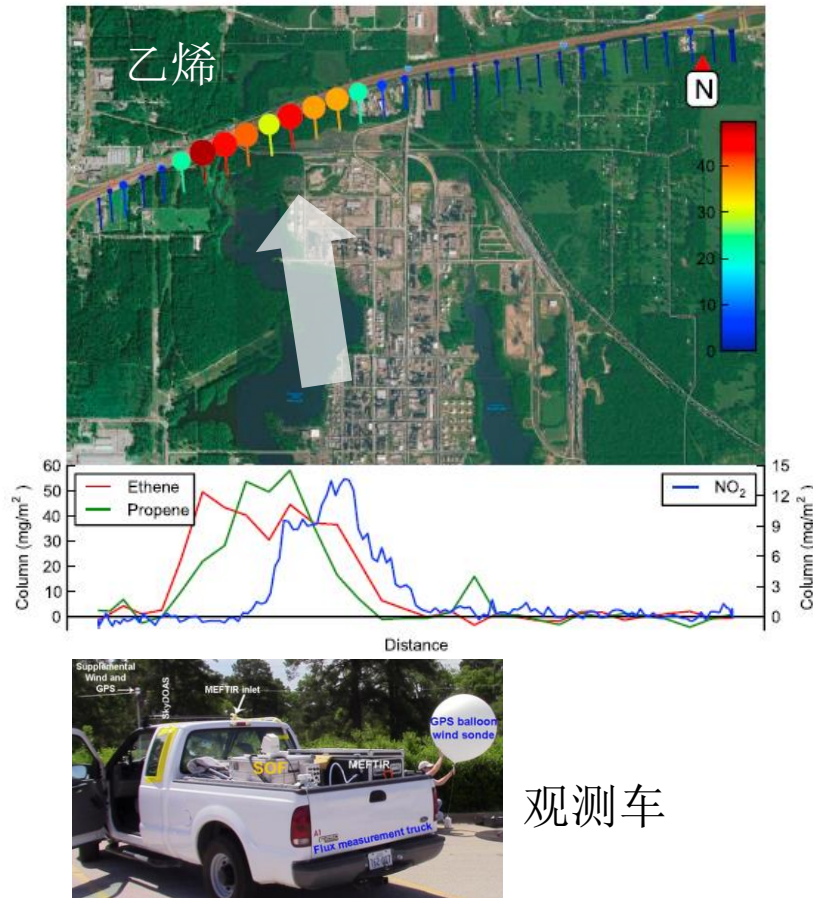
美国 10 years

中国

研究级的技术

SOF 近光化学设备

单次观测(横断面)



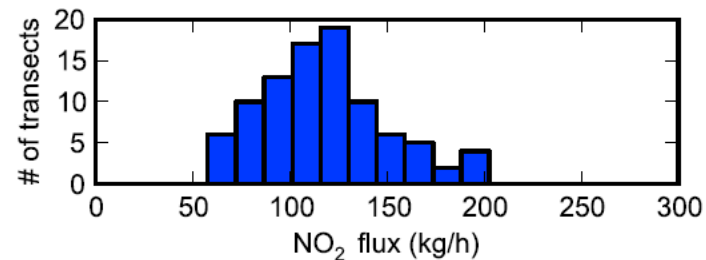
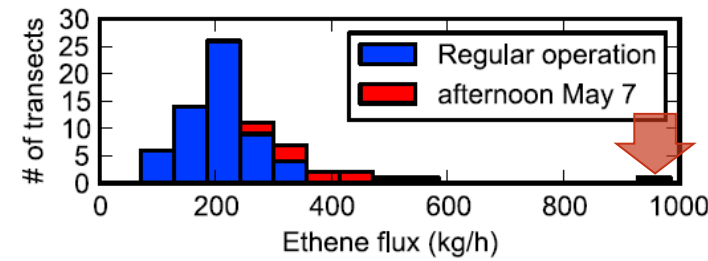
观测车

Emission measurements of alkenes, alkanes, SO₂, and NO₂ from stationary sources in Southeast Texas over a 5 year period using SOF and mobile DOAS

John K. E. Johansson¹, Johan Mellqvist¹, Jerker Samuelsson¹, Brian Offerle¹, Barry Lefer², Bernhard Rappenglück², James Flynn², and Greg Yarwood³

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JD020485/full>

10 天排放通量观测



- 排放通量会变化
- 一天突出乙烯
最大 $\approx 5 \times$ 中值
- NO₂ 更稳定

总结

- 基于科学知识制定政策
- 考虑本地条件
- 对未来有远见
 - 空气质量
 - 城市规划
 - 交通
 - 能源
 - 宜居城市



Greg Yarwood, PhD

安博英环（美国）加州诺瓦托办公室

电话：**1 415 899 0704**

邮件：

gyarwood@ramboll.com

Min Hou, CIH

安博英环（中国）北京办公室

电话：**86 155 1033 7040**

邮件：**mhou@ramboll.com**

相关资料

- 洛杉矶空气质量规划**2016**草案

<http://www.aqmd.gov/home/library/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/Draft2016AQMP>

- 美国环保局空气质量模型**CMAQ**

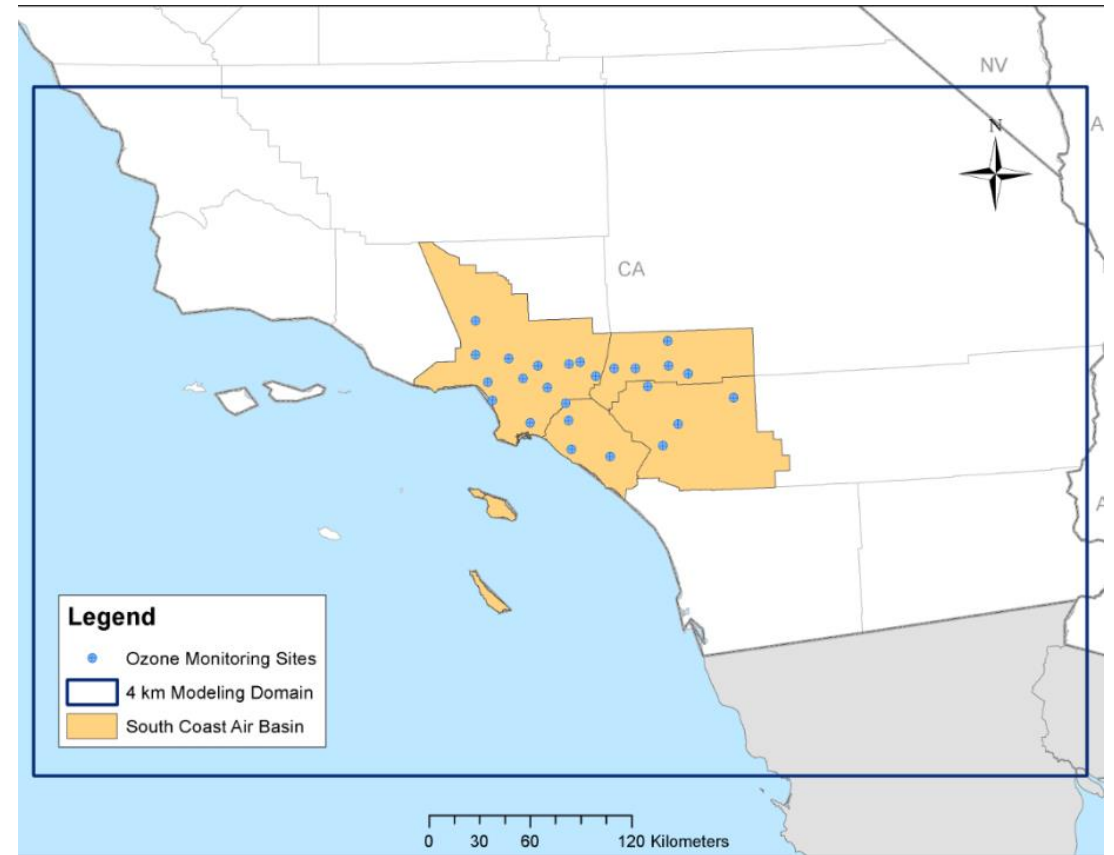
<https://www.epa.gov/air-research/community-multi-scale-air-quality-cmaq-modeling-system-air-quality-management>

- 安环英博开发的空气质量模型**CAMx**

<http://www.camx.com>

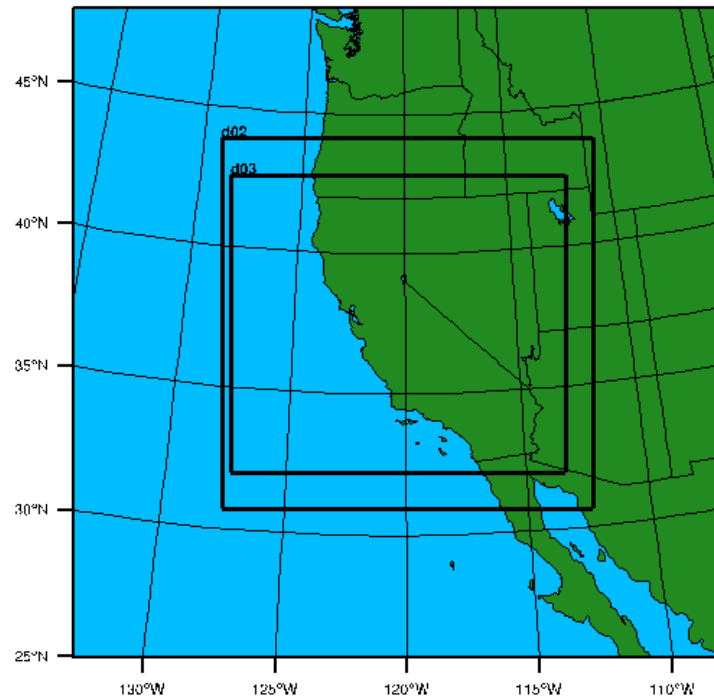
2016 AQMP 草案模拟

- 南加州模拟域
 - 156 x 102 4 km x 4 km 网格分辨率
- WRF v3.6.1 气象模式
- CMAQ v4.7.1 作为初始 PGM
 - CAMx 验证权重
- SAPRC07 化学机制
- 边界条件(BCs) 采用 MOZART全球化学模式(Global Chemistry Model,GCM)
 - 使用加州域的CMAQ 12 km网格缩小到 4 km SoCAB 域



加州 12 km域 和 MOZART 全球模式

CMAQ 2012 使用MOZART BCs 模拟加州 12 km 域 (D03)



MOZART 2012 NCAR输出的全球化学模式

