

# 空气质量管理基础培训课程

## 模块3：空气污染模拟

主办方：CAI-Asia 中心和CAI-Asia中国项目

资助方：亚洲开发银行和能源基金会

北京, “市长之家”宾馆 2007年10月31日-11月2日



### 空气污染模拟

- 3.1 空气污染气象学与大气扩散基本原理
- 3.2 高斯模型及其应用
- 3.3 城市及区域大气污染模型发展
- 3.4 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用
- 3.5 案例与讨论：北京/上海
- 3.6 测试题（30分钟）



### 3.1 污染气象学与大气扩散

大气扩散

源 → 受体

酸雨越境转移 (日本、南朝鲜.....)

大气科学 {

- 大气物理、化学.....
- 大气气象学..... { 气象条件对污物的稀释、扩散作用
- 污染气象学..... { 污染物对气象的影响

3-2

### 空气污染气象学与大气扩散基本原理

- 大气圈垂直结构

3-3

## 空气污染气象学与大气扩散基本原理

### • 大气圈垂直结构

#### ➤ 对流层 (~10km左右)

- 集中了大气质量的3/4和全部的水蒸气，主要天气现象都发生在这一层
- 温度随高度的增加而降低，每升高100m平均降温0.65°C
- 强烈对流作用
- 温度和湿度的水平分布不均

大气边界层—对流层下层1~2km，地面阻滞和摩擦作用明显  
近地层—地面上50~100m，热量和动量的常通量层  
自由大气—大气边界层以上，地面摩擦可以忽略



3-4

## 空气污染气象学与大气扩散基本原理

### • 大气圈垂直结构

#### ➤ 平流层 (对流层顶~50~55km)

- 同温层—对流层顶35~40km，气温-55°C左右
- 同温层以上，气温随高度增加而增加
- 集中了大部分臭氧
- 没有对流运动，污染物停留时间很长

#### ➤ 中间层 (平流层顶~85km)

- 气温随高度升高而迅速降低
- 对流运动强烈



3-5

## 空气污染气象学与大气扩散基本原理

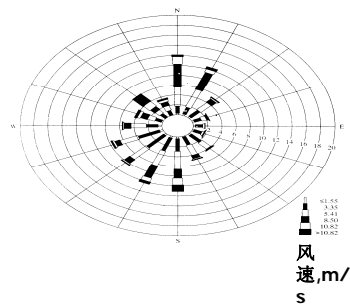
- 大气圈垂直结构
  - 暖层（中间层顶~800km）
    - 气温随高度升高而增高
    - 气体分子高度电离—电离层
  - 散逸层（暖层以上）
    - 气温很高，空气稀薄
    - 空气粒子可以摆脱地球引力而散逸
- 大气压力总是随高度的升高而降低
- 均质大气层—80~85km以下，成分基本不变



3-6

## 空气污染气象学与大气扩散基本原理

- 主要气象要素
  - 气温
  - 气压
  - 气湿
  - 风向和风速
    - 风玫瑰图
  - 云
    - 大气中水汽的凝结现象叫做云（使气温随高度变化小）
    - 云量:天空被云遮蔽的成数（我国10分，国外8分）
    - 云高:云底距地面底高度
  - 能见度
    - 正常视力的人，在天空背景下能看清的水平距离
    - 级别（0~9级，相应距离为50~50000米）



3-7

### 空气污染气象学与大气扩散基本原理

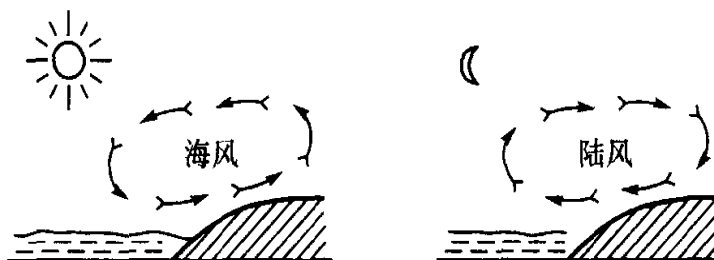
- 大气的运动和风

- 直接作用力
  - 重力
  - 水平气压梯度力（垂直上与重力基本平衡）
- 间接作用力
  - 地转偏向力（相对运动：方向改变）
  - 惯性离心力（大气曲线运动：很小）
  - 摩擦力（近地1~2km内明显）



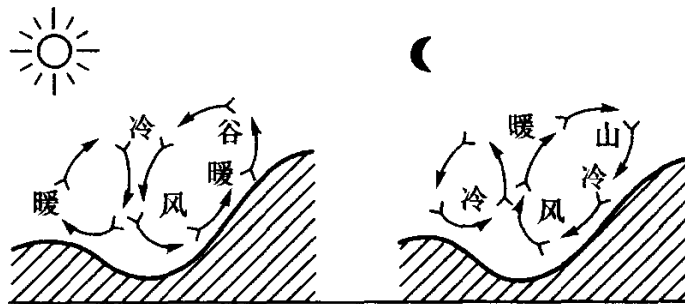
### 空气污染气象学与大气扩散基本原理

- 地方性风场
  - 海陆风



### 空气污染气象学与大气扩散基本原理

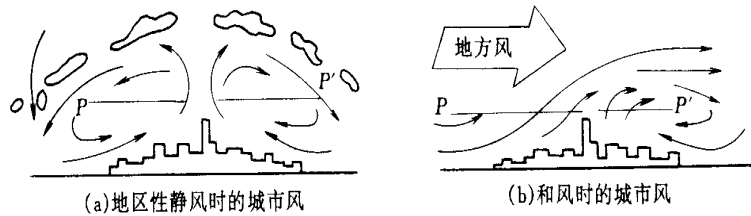
- 地方性风场
  - 山谷风



3-10

### 空气污染气象学与大气扩散基本原理

- 地方性风场
  - 城市热岛环流



3-11

### 3.2 高斯模型及其应用

- 高斯模式的有关假定

- 坐标系

右手坐标,  $y$ 为横风向,  $z$ 为垂直向

- 四点假设

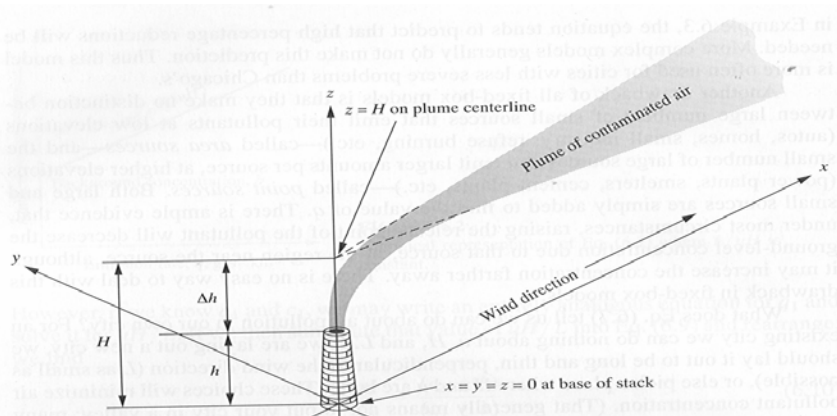
- a. 污染物浓度在 $y$ 、 $z$ 风向上分布为**正态分布**
    - b. **全部高度风速均匀稳定**
    - c. 源强是连续均匀稳定的
    - d. 扩散中污染物是**守恒的**（**不考虑转化**）



3-12

### 高斯扩散模式

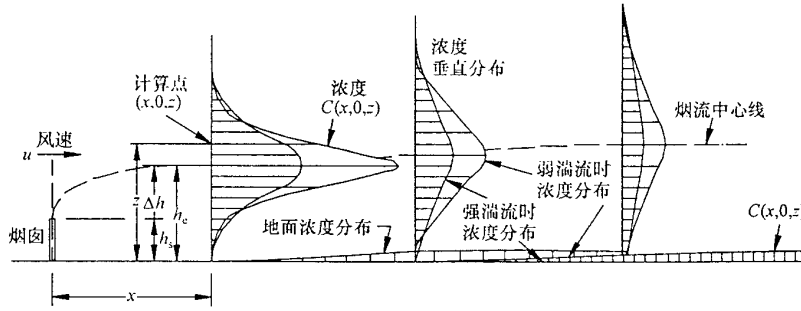
- 高斯扩散模式的坐标系



3-13

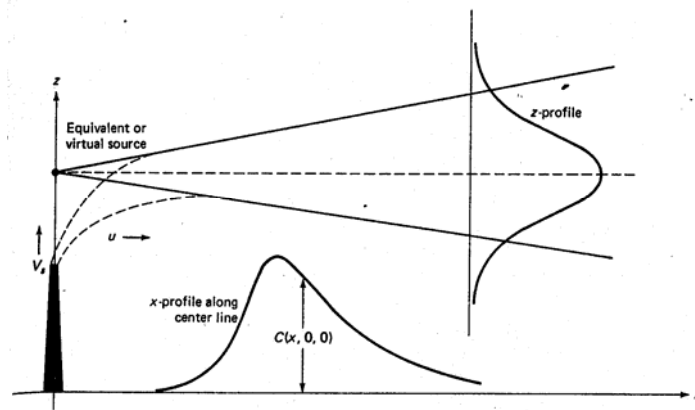
### 高斯烟流的形态

$$c(x, y, z) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$



3-14

### 高斯烟流的浓度分布



高斯烟流中心线上的浓度分布



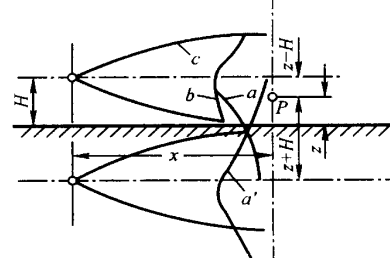
3-15



## 高架连续点源扩散模式

## • 镜像全反射----&gt;像源法

- 实源:

- 像源:  $c(x, y, z, H - z)$   
 $c(x, y, z, H + z)$ 

## ■ 实源的贡献

$$c(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

## ■ 像源的贡献

$$c(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

## ■ 实际浓度

$$c(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$



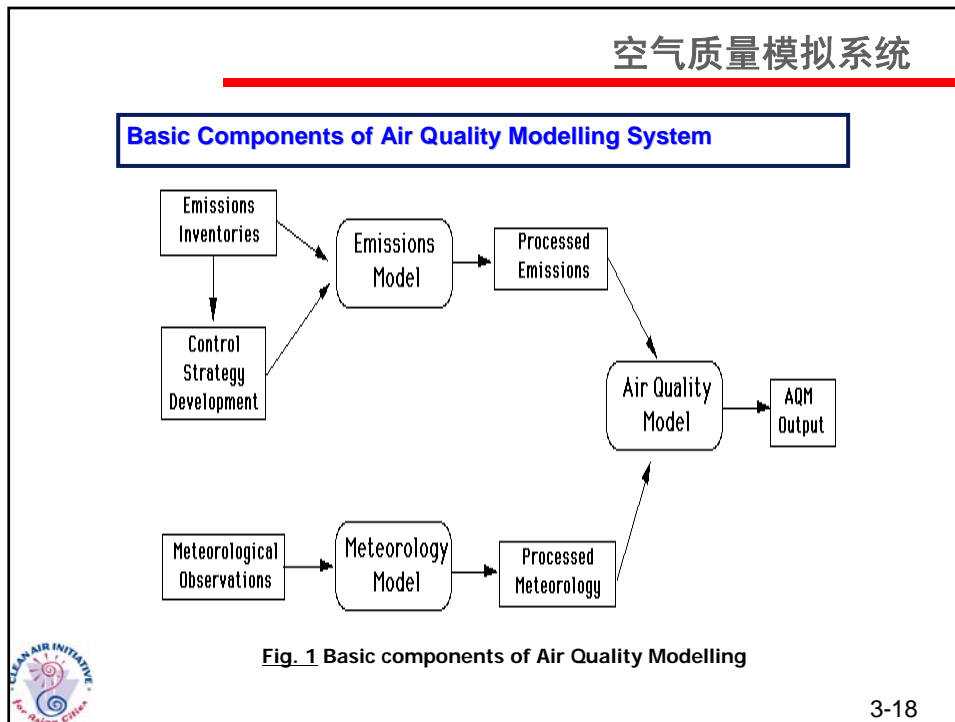
3-16

## CALPUFF 模型

- **Gaussian puff model** uses the Gaussian equation in three-dimensional and Lagrangian viewpoints. An example of Gaussian puff model which is used as a non-steady-state air quality model is **CALPUFF**. **The model was developed originally by Sigma Research Corporation under funding of California Air Resource Board (CARB) and now is available for downloading at website <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>**
- The specifications for the CALPUFF modeling system included:
  - (1) Capability to treat time-varying point and area sources
  - (2) Suitability for modeling domains from **tens of meters to hundreds of kilometers** from a source
  - (3) Predictions for **averaging times ranging from one-hour to one year**
  - (4) Applicability to inert pollutants and those subject to **linear removal and chemical conversion mechanisms**
  - (5) Applicability for **rough or complex terrain situations**.
- The modeling system (Scire et al., 1990a, 1990b) developed to meet these objectives consisted of three components: (1) a meteorological modeling package with both diagnostic and prognostic wind field generators, (2) a Gaussian puff dispersion model with chemical removal, wet and dry deposition, complex terrain algorithms, **building downwash**, plume fumigation, and other effects, and (3) postprocessing programs for the output fields of meteorological data, concentrations and deposition fluxes.
- In April 2003, the **U.S. EPA** has proposed the CALPUFF modeling system as a **Guideline ("Appendix A")** model for regulatory applications involving **long range transport** and on a **case-by-case basis** for near-field applications where **non-steady-state effects** (situations where factors such as spatial variability in the meteorological fields, calm winds, fumigation, recirculation or stagnation, and terrain or coastal effects) may be important. (Fig. 7)



3-17



### 3.3 城市及区域大气污染模型发展

- 常用城市空气质量模式
  - 箱模式
    - 单箱模式 多箱模式——如目前用于我国城市空气污染指数预报的CAPPS模式
  - 城市多源模式
    - 如EPA推荐的ISC模式（Industrial Source Complex Model）
  - 光化学模式
    - 如EPA推荐的UAM-V（Urban Airshed Model）模式
  - 线源模式
    - 如CALINE模式，用于计算公路的污染物排放

### 城市及区域大气污染模型发展

- 第一代模式
  - 高斯扩散模式 **Gaussian Dispersion Model**
  - 光化学箱式模式 **Photochemical Box Model**

$$c(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

**ISC3, CALPUFF, AERMOD**  
(for primary pollutants)

**OZIP/EKMA**  
(for ozone)

3-20

### 城市及区域大气污染模型发展

- 箱式模

3-21

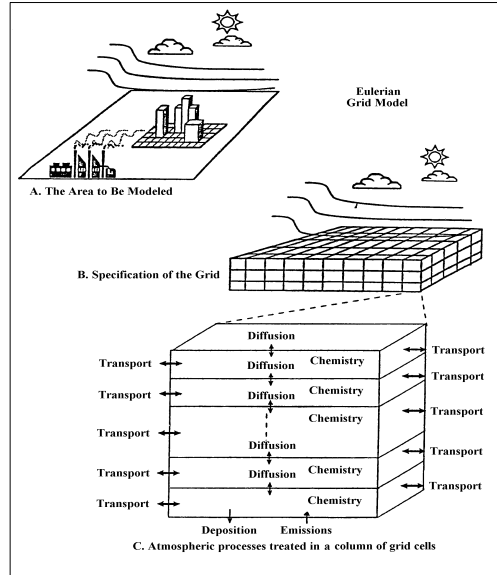
城市及区域大气污染模型发展

- 第二代模式

**Eulerian Grid Models :**

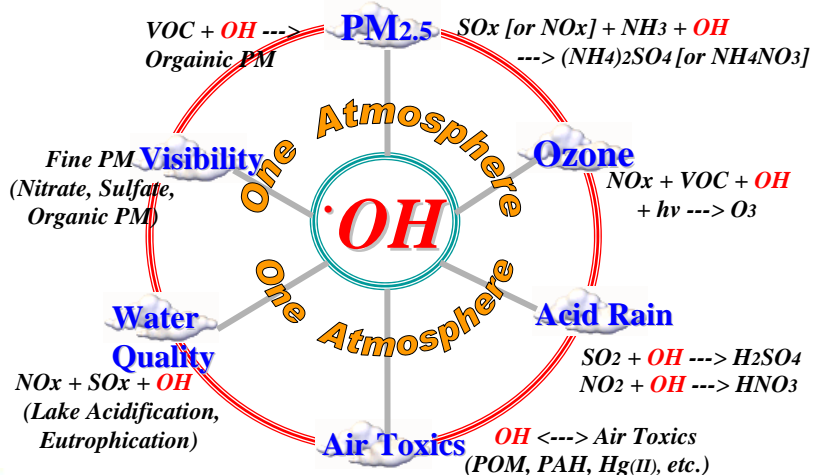
**UAM, RADM, REMSAD, ROM**

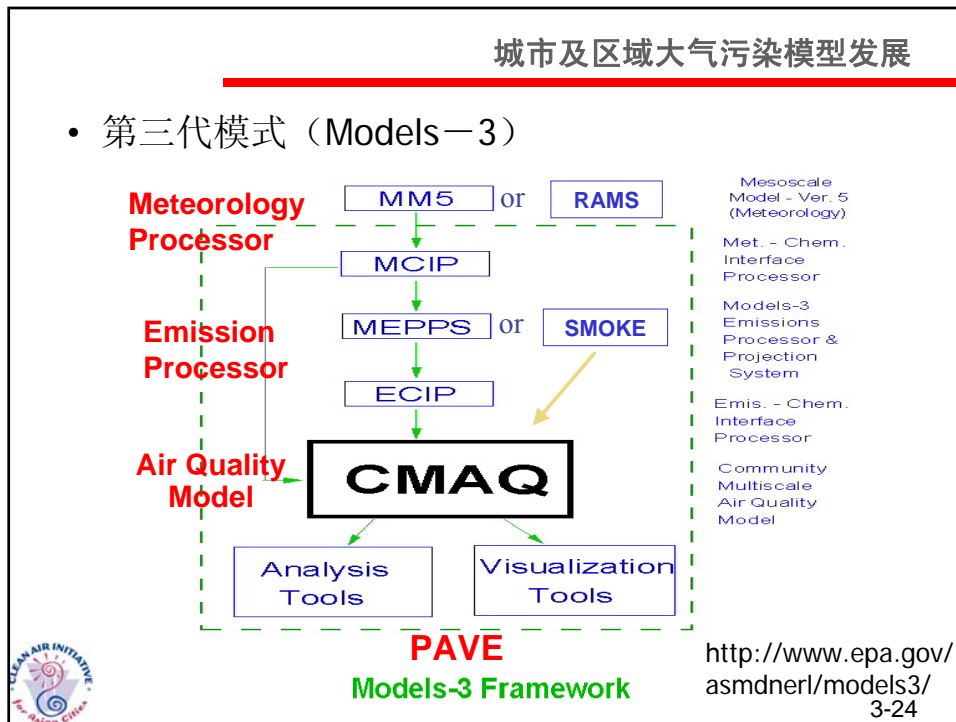
<http://www.epa.gov/asmdnerl/modeling.htm>



城市及区域大气污染模型发展

- 第三代模式 (Models-3) -One Atmosphere的概念





### 城市及区域大气污染模型发展

- 山区扩散模式
  - 山区流场由于受到复杂地形的热力和动力因子影响，流场均匀和定常的假定难以成立
  - 对风向稳定、研究尺度不大、地形较为开阔及起伏不大的地区，浓度基本上遵循正态分布规律，只是扩散参数比平原地区大很多
- ◆ 封闭山谷中的扩散模式
 

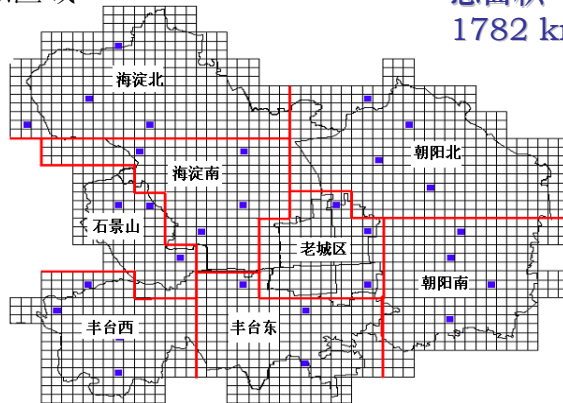
距离污染源一段距离处，横向均匀分布

$$\rho(x, z, H) = \frac{2q}{\sqrt{2\pi uW\sigma_z}} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$
- ◆ NOAA和EPA模式
  - NOAA—以高斯模式为基础，对有效源高进行修正
  - EPA—与NOAA相似，只是对所有稳定度级别都进行了地形高度修正
- ◆ ERT模式
  - 高斯模式，只对有效源高进行修正

### 3.4 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 第一代模型：ISC短期模型 以北京为例
- 空气质量现状模拟：
  - 模拟一次污染物浓度分布
  - 模拟区域

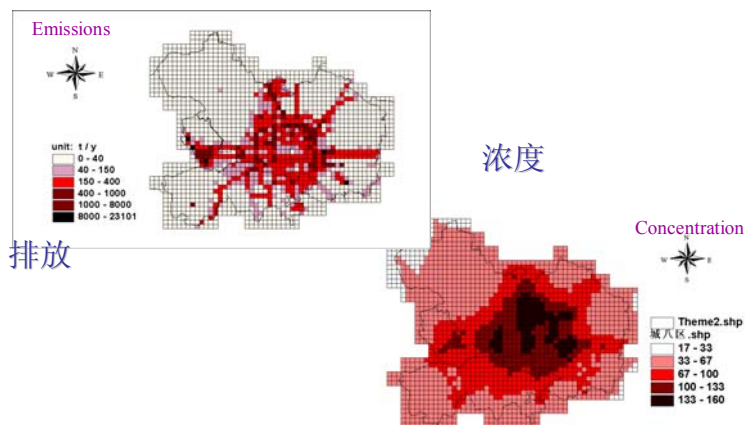
城八区  
总面积  
1782 km<sup>2</sup>



3-26

### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

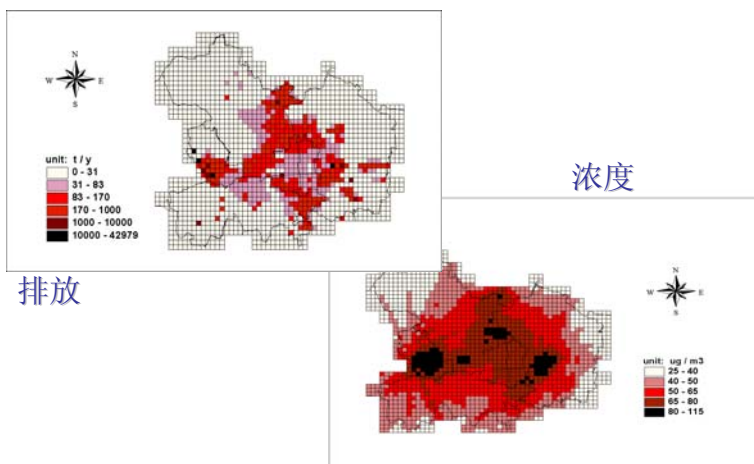
- 1999年NOx排放和浓度空间分布



3-27

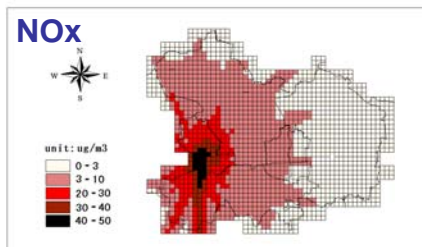
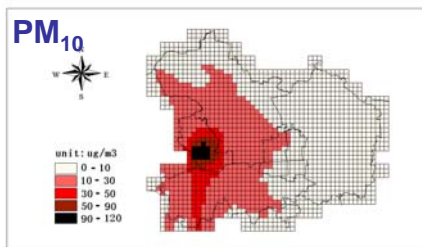
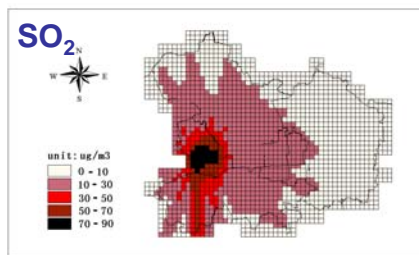
复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 1999年SO<sub>2</sub>排放和浓度空间分布



复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

首钢1999年SO<sub>2</sub>、  
PM<sub>10</sub>和NO<sub>x</sub>的影响浓度分布图

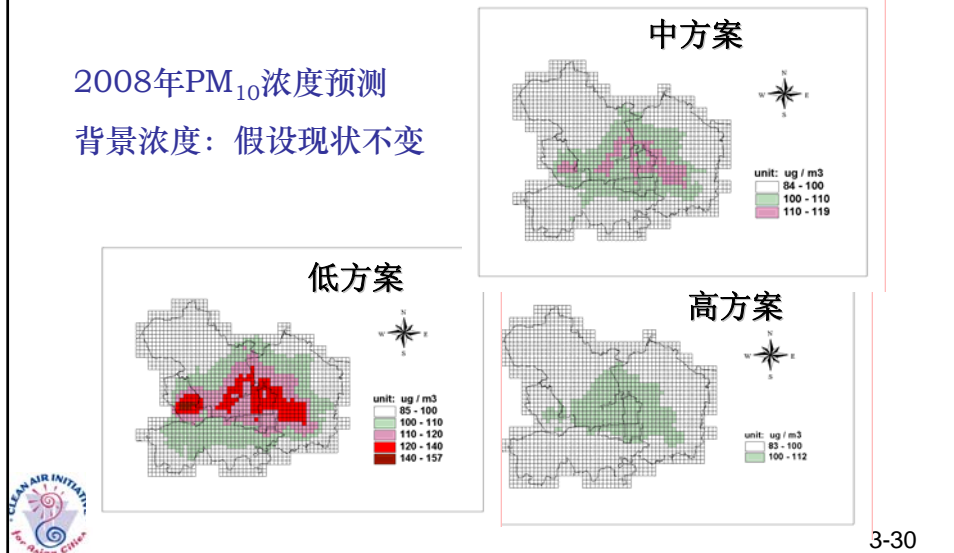


### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 污染控制规划情景模拟：北京2008年为例

2008年PM<sub>10</sub>浓度预测

背景浓度：假设现状不变



3-30

### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 第三代模型 Model 3
  - 20 世纪90 年代起，美国国家环保局（USEPA）开始开发系统Model-3。
  - 模型不再区分单一污染问题，而是将整个大气作为研究对象在各个空间尺度上详尽模拟所有大气物理和化学过程。
  - 由排放源模式、中尺度气象模型和通用多尺度空气质量模型（CMAQ）三部分组成。
  - 模型力图增强模式通用性，采用完全模块化的结构，使得研究者可基于空间尺度、研究对象、研究目的等不同需求，选择不同模块组合进行模拟。



3-31



### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

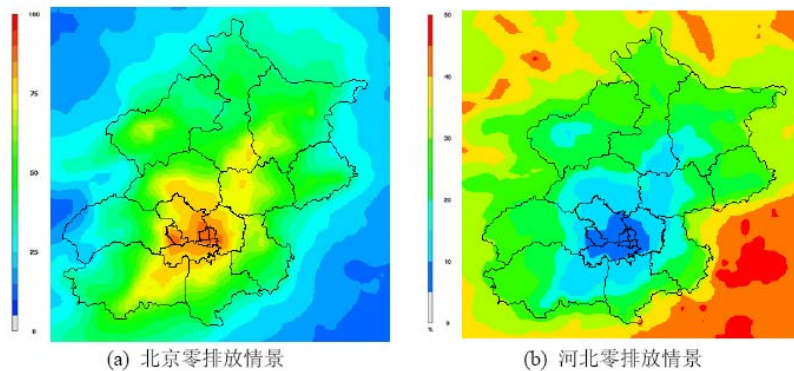
- 与以往的空气质量模型相比，Models-3/CMAQ 的先进之处在于：
  - 大气中各种污染物和污染问题通过化学反应紧密相关，Models-3 同时模拟多种污染物和污染问题，包括光化学反应、气溶胶、酸沉降和能见度等，并有望在将来进行跨媒介（土壤、地表水）的模拟。
  - 具有灵活的模块化结构。模型可选用不同的排放源模式和气象模型，方便使用者根据需要，对模块进行组合、修改和置换；另一方面，模型为主要的物理过程模块都提供了多种参数化选择方案。
  - 具有很强的开放性。模型一直在不断更新和发展中，反映了近年来大气科学和计算机技术的最新研究进展。



3-32

### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 运用Model3模拟外来源对北京区域PM2.5浓度的影响



不同情景下北京市大气中PM2.5浓度削减比例，2001年1月 (%)

外来源对北京市大气中的PM2.5 具有显著贡献，这提示决策者应当在区域尺度实施综合的大气污染控制对策。

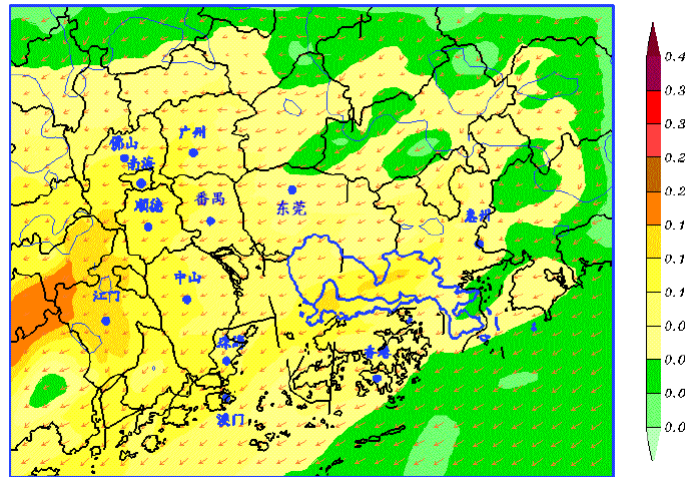


3-33

### 复杂的大气污染模拟在控制政策中的运用

- 空气质量预报

Surface PM10 (mg/m3)  
Beijing time 08Z18DEC2004



3-34

### 3.5 案例分析与讨论: 北京/上海

- 分组讨论（分成两组，由程玲琳、李爽分别协助），关键问题：
  - 1) 目前的政策制定中对模型有哪些功能需求？
  - 2) 如何应用大气模型来支持当前的大气环境容量管理工作？
  - 3) 如果要应用这些模型，你们在技术、资金上存在哪些困难？
  - 4) 不同城市的气象条件对空气质量有哪些影响，如何与管理政策结合？



3-35

### 3.6 测试

---

- 请大家每人书写回答一份测试题
- 可以同组讨论（按城市分组）
- 可以提问
- 时间：30分钟

