

# 全球PM2.5扩散模拟：拉格朗日粒子模型 vs 高斯烟羽模型

## 1. 全球大气污染物排放数据源

- **EDGAR**：欧盟JRC开发的全球排放数据库（Emissions Database for Global Atmospheric Research）提供了历史至今的各类大气污染物排放数据，包括细颗粒物PM10、PM2.5及碳组分（BC、OC）等，空间分辨率高达0.1°<sup>1</sup><sup>2</sup>。EDGAR提供按国家、部门的年际和格点化排放图，可免费下载使用。
- **CAMS排放清单**：欧盟哥白尼大气监测服务（Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS）发布了全球格点化的人为与自然排放清单，包括化石燃料、交通、工业和生物源、海洋、土壤等排放<sup>3</sup>。该数据集以NetCDF格式提供全球0.1°（人为）至0.5°（自然）分辨率格点数据，时间分辨率可达月度<sup>4</sup><sup>5</sup>。
- **生物质燃烧排放**：全球火源排放数据库（GFED）和NOAA的快速火焰排放数据集（QFED）提供生物质燃烧（森林火灾、农作物焚烧等）的排放估计<sup>6</sup>。例如GFED4.1s和QFED2.5等数据库已被用于全球火源PM2.5浓度模拟研究<sup>6</sup>。这些数据可用于补充人为排放之外的自然PM2.5源。
- **地面观测与同化产品**：开放空气质量平台OpenAQ聚合了全球数百个监测站点的实时PM2.5观测数据<sup>7</sup>。尽管不是排放数据，但可作为模型模拟的验证参考。NASA等机构的全球同化/再分析产品（如GEOS-CF、MERRA-2、CAMS再分析EAC4等）提供了全球PM2.5浓度场<sup>8</sup>，可用于边界条件和初始场。
- **气象再分析数据**：全球污染扩散模拟还需气象场驱动。自由可获取的再分析数据集如ECMWF的ERA5提供逐小时全球风场、温度等气象要素<sup>9</sup>；美国NCEP/NCAR再分析、GFS分析资料等也可用于拉格朗日粒子模型的风场输入。

## 2. 模型可行性评估及可用工具

- **高斯烟羽模型**适用于稳定均匀流场下的连续点源短距离（典型数公里量级）扩散，核心假设在于下风向浓度分布服从高斯分布<sup>10</sup>。标准的稳态烟羽公式（如EPA AERMOD、ISC模型等）只能在相对匀质条件下使用，并且距离风源不远时有效<sup>10</sup>。在全球尺度（复杂气象、地形多变）下，单纯高斯模型难以准确模拟大范围传输。
- **拉格朗日粒子模型**能追踪污染物随大气风场长距离传输的过程，通过追踪大量虚拟颗粒粒子并叠加湍流扩散效果来模拟非稳态扩散。典型模型如FLEXPART<sup>11</sup>、HYSPLIT<sup>12</sup>等已被证明可用于从局地到全球尺度的运输过程。其中，FLEXPART作为开源的拉格朗日模型，可处理从几十米到全球尺度的扩散问题<sup>11</sup>；HYSPLIT是NOAA提供的混合拉格朗日/欧拉模式，也支持全球范围的轨迹和扩散模拟<sup>12</sup>。
- **资源与工具推荐**：对于全球尺度模拟，可考虑使用成熟的大气化学传输模型和粒子模式。开源模型如FLEXPART（Fortran/Python）和HYSPLIT（Fortran，可使用GUI或命令行）均可免费使用。若需更复杂化学作用，可采用GEOS-Chem、WRF-Chem等全球/区域化学输运模式。对于MATLAB用户，可借助MATLAB内置或第三方工具箱（如Mapping Toolbox进行地理绘图，File Exchange上的gaussianPlume函数等）自行实现简化模型。驱动风场数据可使用ECMWF ERA5或NCEP再分析资料。在实现上，可通过MATLAB调用外部模型（如利用系统命令运行HYSPLIT），也可直接在MATLAB中编程实现简化的拉格朗日随机行走或高斯分布算法。

## 3. MATLAB中模拟指导

- **拉格朗日粒子模型**：首先读取或构造风场数据（如经纬度网格上的风速 $u, v$ ），以及设定污染源点坐标和排放强度。然后在MATLAB中生成大量表示污染物的虚拟粒子，每个粒子随着时间步长 $dt$ 按平均风

场平移，并添加湍流扩散的随机位移（可用正态分布随机数实现）。可简化为二维平面处理（忽略地球曲率），或在经纬度坐标下小步长移动，并对粒子越界进行处理。这样可以模拟污染物在24小时内的输送和扩散轨迹。

- **高斯烟羽模型**：在MATLAB中指定点源排放强度、稳定度等级和恒定风速条件，可直接使用高斯烟羽解析解计算浓度场。根据经典公式，地面高度（或一定高度）处下风向距离 $x$ 、横向距离 $y$ 的浓度由 $C(x,y)=\frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ 给出（ $H$ 为有效烟羽高度， $\sigma_y, \sigma_z$ 为扩散参数）。可选取简化的 $\sigma$ 经验关系或常数值，在全局网格点上计算浓度分布，适合演示和对比。值得注意的是高斯模型仅在假定流场匀质、静稳时可靠，全球应用需划分小区或叠加局部计算。

## 4. 模型示例与结果展示

### 模型初始化与污染源设置

```
% 定义污染源参数
sourceLon = [100, 120]; % 污染源经度（可设置多个源）
sourceLat = [30, 10]; % 污染源纬度
Q = [1.0, 0.5]; % 每个源的排放速率 (kg/s)
% 定义模拟时间和步长
T_end = 24*3600; dt = 600; % 模拟24小时，以秒为单位，步长10分钟
```

### 拉格朗日粒子扩散模拟（示例）

```
% 粒子数目与初始化位置（所有粒子初始均位于源点处）
numP = 10000;
% 将粒子分配到不同源（均匀分配示例）
particles = zeros(numP,2);
for i=1:length(sourceLon)
    idx = (1 + (i-1)*numP/length(sourceLon)) : (i*numP/length(sourceLon));
    particles(idx,:) = repmat([sourceLon(i), sourceLat(i)], numP/length(sourceLon), 1);
end
% 简化假设：使用常量风场（可改为读取ERA5等数据）
u = 5; v = 0; % 水平风速 (m/s)
K = 10; % 粒子水平扩散系数 (m^2/s)
for t = 0:dt:T_end
    % 粒子随机行走：平均位移 + 湍流扩散
    particles(:,1) = particles(:,1) + u*dt/1000 + sqrt(2*K*dt)*randn(numP,1)/1000;
    particles(:,2) = particles(:,2) + v*dt/1000 + sqrt(2*K*dt)*randn(numP,1)/1000;
end
% 粒子模拟结束，particles(:,1)为经度，(:,2)为纬度
```

以上代码示例使用简化的恒定风场和扩散系数，粒子位置单位以千米为例。实际应用中，可替换风速  $u, v$  为读入的网格风场，并根据高度层或地形进行改进；也可使用更精细的随机过程模拟垂直扩散和沉降等效应。

### 高斯烟羽模型模拟（示例）

```

% 设置单个点源参数
Q0 = 1.0; % 排放强度 (kg/s)
u0 = 5.0; % 风速 (m/s)
H = 50; % 烟羽有效释放高度 (m)
% 计算扩散参数 (简化常数或经验公式)
sig_y = 500; sig_z = 200;
% 构建网格 (单位m)
[x,y] = meshgrid(0:1000:50000, -20000:1000:20000);
% 计算浓度分布 (假设z=0地面浓度)
C = (Q0./(2*pi*u0*sig_y*sig_z)) ...
    .* exp(-y.^2/(2*sig_y^2)) .* (exp(-(H).^2/(2*sig_z^2))+exp(-(H).^2/(2*sig_z^2)));
% C是网格点浓度 (kg/m^3), 可转为μg/m^3等

```

上述代码在二维网格上计算了高斯烟羽模型的地面浓度分布。可以绘制\$C\$的二维图像或轮廓，观察随距离减弱的规律。多源情形下，可对每个源分别计算浓度并叠加。

## 模拟结果可视化

```

% 示例：绘制拉格朗日粒子终点分布 (散点图)
figure; worldmap('World');
load coastlines
plotm(coastlat, coastlon, 'k'); % 绘制海岸线
scatterm(particles(:,2), particles(:,1), 2, 'filled'); % 粒子位置 (lat, lon)
title('拉格朗日粒子模拟污染物分布');
% 示例：绘制高斯模型浓度场
figure; surf(x/1000, y/1000, C, 'EdgeColor','none');
xlabel('下风向距离 (km)'); ylabel('横向距离 (km)'); zlabel('浓度');
title('高斯烟羽地面浓度分布');
colorbar; view(2); % 俯视图

```

可用 `worldmap`、`plotm` 等函数在地图上标出粒子位置或等浓度线；也可使用 `mesh`、`surf` 等绘制浓度场平面图。MATLAB支持将这些图像输出为动画（利用 `getframe` 和 `VideoWriter`）展示污染物随时间传播过程。

## 模拟数据输出

```

% 假设我们要输出拉格朗日粒子最终位置的表格
T = table(particles(:,1), particles(:,2), 'VariableNames', {'Longitude', 'Latitude'});
writetable(T, 'particle_endpoints.csv');
% 输出高斯模型浓度场为CSV
[idx_i, idx_j] = meshgrid(1:size(C,1), 1:size(C,2));
lon_vals = x(:); lat_vals = y(:);
conc_vals = C(:);
T2 = table(lon_vals, lat_vals, conc_vals, 'VariableNames', {'X_m', 'Y_m', 'Concentration'});
writetable(T2, 'gaussian_concentration.csv');

```

上例使用 `writetable` 将模拟结果保存为CSV格式表格：粒子模拟保存经纬度坐标，高斯模型保存网格坐标和浓度值。可根据需要输出不同字段的CSV文件，方便后续分析和可视化。

**参考文献：** 全球排放数据库如EDGAR（含PM2.5排放）<sup>1</sup> <sup>2</sup>、CAMS排放清单<sup>3</sup>、GFED火源排放数据等<sup>6</sup> 提供了模拟所需的排放输入；OpenAQ提供全球PM2.5监测数据<sup>7</sup>；Lagrangian模型（如FLEXPART<sup>11</sup>、HYSPLIT<sup>12</sup>）和高斯模型在应用范围和假设上各有特点，需酌情选择。<sup>10</sup> <sup>12</sup> <sup>11</sup> <sup>3</sup> <sup>8</sup>

---

<sup>1</sup> EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research

[https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset\\_ap50](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ap50)

<sup>2</sup> EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research

[https://edgar.jrc.ec.europa.eu/emissions\\_data\\_and\\_maps](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/emissions_data_and_maps)

<sup>3</sup> <sup>4</sup> <sup>5</sup> CAMS global emission inventories

<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-emission-inventories?tab=overview>

<sup>6</sup> ESSDD - Global high-resolution fire-sourced PM2.5 concentrations for 2000–2023

<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-414/>

<sup>7</sup> OpenAQ

<https://openaq.org/>

<sup>8</sup> NASA SVS | Particulate Matter (PM) 2.5

<https://svs.gsfc.nasa.gov/5151/>

<sup>9</sup> ECMWF Reanalysis v5 | ECMWF

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

<sup>10</sup> Microsoft Word - cover3

<https://apsi.tech/material/modeling/IntroductiontoGaussianPlumeModels.pdf>

<sup>11</sup> GMD - The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4

<https://gmd.copernicus.org/articles/12/4955/2019/>

<sup>12</sup> HYSPLIT – Air Resources Laboratory

<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>