

附件 4



中华人民共和国国家环境保护标准

HJ□□□-202□

卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测

技术指南

Technical guideline for fine particulate matter monitoring

based on satellite remote sensing

（征求意见稿）

202□-□□-□□ 发布

202□-□□-□□ 实施

生态环境部 发布

目 次

| | |
|--|----|
| 前 言..... | ii |
| 1 适用范围..... | 1 |
| 2 规范性文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 总则 | 1 |
| 5 监测方法..... | 3 |
| 6 结果验证..... | 5 |
| 7 质量控制..... | 5 |
| 附录 A （资料性附录） $PM_{2.5}$ 浓度地理加权回归计算方法 | 6 |

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》，规范和指导细颗粒物卫星遥感监测工作，防治大气环境污染，改善环境空气质量，制定本标准。

本标准规定了细颗粒物卫星遥感监测的方法、结果验证、质量控制等内容。

本标准的附录 A 为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部生态环境监测司、法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：生态环境部卫星环境应用中心、江苏省扬州环境监测中心。

本标准环境保护部 201□年□□月□□日批准。

本标准自 201□年□□月□□日起实施。

本标准由生态环境部解释。

卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南

1 适用范围

本标准规定了细颗粒物卫星遥感监测的方法、结果验证、质量控制等内容。
本标准适用于卫星遥感细颗粒物监测及其区域分布规律分析工作。

2 规范性文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。
GB/T 31159-2014 大气气溶胶观测术语
HJ 653 环境空气颗粒物（PM₁₀和PM_{2.5}）连续自动监测系统技术要求及检测方法

3 术语和定义

3.1

气溶胶光学厚度 aerosol optical depth (AOD)

指从地面到大气层顶垂直路径中气溶胶消光系数的总和，量纲为 1，引自 GB/T 31159-2014。

3.2

象元 PM_{2.5} 浓度 pixel concentration of fine particulate matter

指 1 个卫星观测象元范围内的近地面大气细颗粒物平均质量浓度，计量单位为微克/立方米（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。

3.3

边界层高度 height of the planetary boundary layer (HPBL)

指行星边界层的厚度，表示污染物在垂直方向可以被热力湍流稀释的范围，是用于大气数值模式和大气环境评价的重要物理参数之一。

4 总则

4.1 监测原理

根据 PM_{2.5} 浓度与气溶胶光学厚度、吸湿增长因子、密度、半径、消光效率因子及大气边界层高度等因素的转化关系计算象元 PM_{2.5} 质量浓度，并形成区域 PM_{2.5} 浓度。象元 PM_{2.5} 浓度计算公式如下：

$$M(PM_{2.5}) = \frac{4\bar{r}}{3\bar{Q}} \cdot \frac{AOD}{HPBL \cdot f(RH)} \quad (1)$$

式中:

$M(PM_{2.5})$ ——象元 $PM_{2.5}$ 浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

\bar{r} —— $PM_{2.5}$ 平均密度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

\bar{r} —— $PM_{2.5}$ 有效半径, m;

\bar{Q} —— $PM_{2.5}$ 归一化消光效率因子;

AOD ——气溶胶光学厚度;

$HPBL$ ——边界层高度, m;

RH ——环境空气相对湿度;

$f(RH)$ ——气溶胶消光吸湿增长因子, 经验吸湿增长因子公式为 $fRH = (1 - RH / 100)^{-g}$ 。

将公式 (1) 两边同时取自然对数计算, 推广为 $PM_{2.5}$ 的多元线性回归关系式:

$$\ln(M(PM_{2.5})) = \bar{b}_0 + \bar{b}_1 \ln(AOD) + \bar{b}_2 \ln(HPBL) + \bar{b}_3 \ln(1 - RH / 100) \quad (2)$$

式中:

\bar{b}_0 、 \bar{b}_1 、 \bar{b}_2 、 \bar{b}_3 ——方程回归系数;

公式 (2) 为 $PM_{2.5}$ 浓度计算的多元线性回归模型对数形式, 是一种全局空间回归模型, 关键参数 \bar{b}_0 、 \bar{b}_1 、 \bar{b}_2 、 \bar{b}_3 代表研究区域内的平均值, 考虑到回归系数随空间位置的变化性, 公式 (2) 进一步扩展为卫星遥感监测 $PM_{2.5}$ 浓度的空间变参数回归模型:

$$\ln(M(PM_{2.5}(u_i, v_i))) = b_0(u_i, v_i) + b_1(u_i, v_i) \ln(AOD) + b_2(u_i, v_i) \ln(HPBL) + b_3(u_i, v_i) \ln(1 - RH / 100) \quad (3)$$

式中:

b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 ——随不同空间位置变化的方程回归系数;

u_i ——第 i 个训练样本的地理横坐标;

v_i ——第 i 个训练样本的地理纵坐标;

根据公式 (3), 采用地理加权回归方法结合 $PM_{2.5}$ 浓度地面监测样本数据, 即可计算象元 $PM_{2.5}$ 浓度。

4.2 监测数据选择

利用卫星传感器多光谱数据结合气象参数及地面监测数据获取区域 $PM_{2.5}$ 浓度。卫星传感器应具有 $0.47\mu\text{m}$ 附近和 $0.66\mu\text{m}$ 附近的可见光波段、 $0.86\mu\text{m}$ 附近的近红外波段、 $2.1\mu\text{m}$ 附近的中红外波段和 $12\mu\text{m}$ 附近的远红外波段; 气象参数包括边界层高度、相对湿度两个要素; 地面监测数据包括小时 $PM_{2.5}$ 浓度均值及相应监测点位的地理坐标。

4.3 监测内容

区域 $PM_{2.5}$ 浓度。

4.4 监测处理流程

区域PM_{2.5}浓度卫星遥感监测处理的一般流程如图1所示：

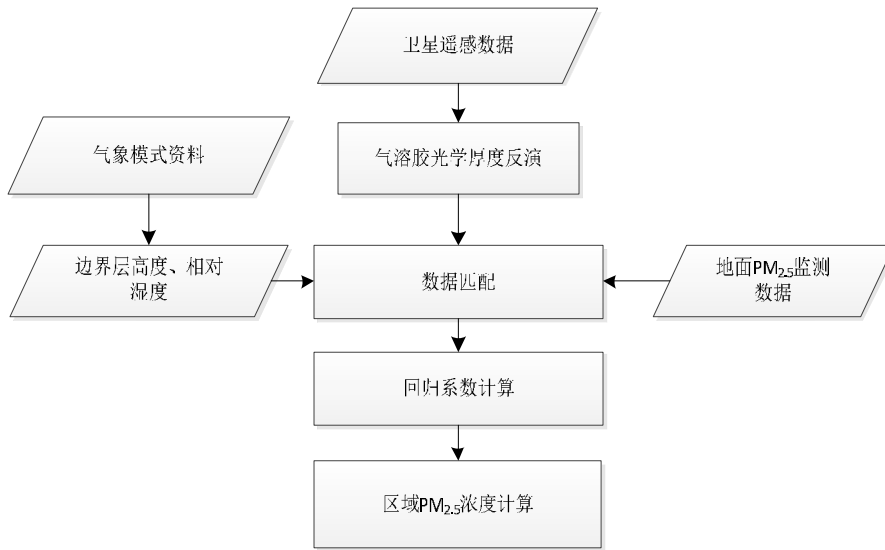


图 1 卫星遥感监测 PM_{2.5} 浓度计算流程图

根据卫星遥感数据源的特点，综合利用暗目标、深蓝算法等反演方法，从卫星遥感光谱数据中获取区域气溶胶光学厚度结果；同时，从气象模式模拟资料中提取出气溶胶垂直订正和湿度订正所需要的边界层高度和相对湿度数据，结合地面监测资料，采用地理加权回归方法逐象元计算PM_{2.5}浓度，获取区域PM_{2.5}浓度分布结果。

5 监测方法

5.1 AOD 遥感反演

利用卫星遥感数据，采用暗目标法和深蓝算法反演获取目标区域无云陆地象元的气溶胶光学厚度（AOD），卫星遥感反演数据处理流程如下：

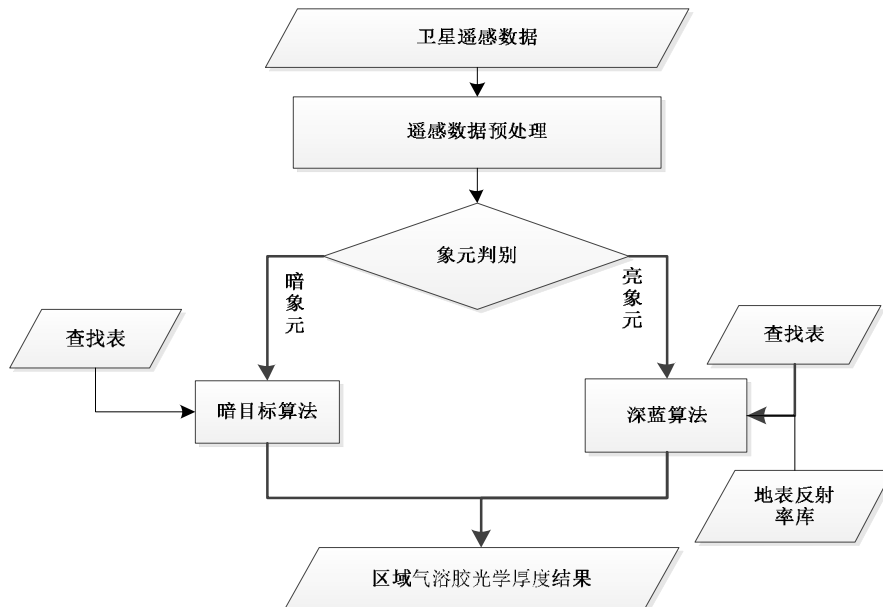


图 2 卫星遥感反演气溶胶光学厚度技术流程图

在卫星遥感反演气溶胶光学厚度之前，先完成两项准备工作：

- a) 利用辐射传输模型结合卫星传感器可见光和近红外波段的光谱响应函数构建查找表；
- b) 利用历史地表反射率数据（如MOD09）合成构建先验地表反射率库，用于亮象元气溶胶光学厚度遥感反演。

开展气溶胶光学厚度遥感反演，主要包括以下五个步骤：

- a) 遥感数据预处理：对卫星遥感数据进行质量检查、辐射定标及几何校正，然后计算可见光、近红外和中红外波段的表观反射率及远红外波段的亮度温度，并进行云、水体象元识别，提取目标区域无云陆地象元；
- b) 象元判别：根据卫星探测的中红外波段（2.1 μm 附近）表观反射率，将无云陆地象元分为暗象元和亮象元两类；
- c) 暗象元气溶胶光学厚度反演：针对暗象元，采用暗目标算法结合查找表进行气溶胶光学厚度反演计算；
- d) 亮象元气溶胶光学厚度反演：针对亮象元，采用深蓝算法结合地表反射率库及查找表进行AOD反演计算；
- e) 将暗象元气溶胶光学厚度和亮象元气溶胶光学厚度合并输出为全区域气溶胶光学厚度结果。

5.2 气象资料提取

从天气预报模式（如全球天气预报模式（GFS）和中尺度天气预报模式（WRF）等）模拟的资料中提取出区域大气边界层高度和相对湿度，并按气溶胶光学厚度的空间分辨率采用双线性插值方法进行重采样。

5.3 数据匹配

利用地面监测站点的PM_{2.5}浓度数据与区域气溶胶光学厚度、气象资料进行时间和空间上的卫星-模式-地面多源数据匹配，形成输入数据集。以地面PM_{2.5}浓度监测站点的地理坐标为中心位置，根据卫星监测时间，考虑大气气溶胶移动速度（一般微风情况下，气溶胶移动速度约为3~5m/s）和卫星遥感象元邻近效应，选取中心位置周边15公里范围和监测时间前后各半小时区间内的气溶胶光学厚度、边界层高度和相对湿度有效结果，计算平均值。最后形成PM_{2.5}浓度、气溶胶光学厚度、边界层高度和相对湿度输入数据集。

5.4 区域 PM_{2.5} 回归系数获取

根据监测原理形成PM_{2.5}浓度矩阵计算公式如下：

$$Y = Xb \quad (4)$$

式中：

- Y —— 因变量矩阵，构建形式见附录A；
- X —— 自变量矩阵，构建形式见附录A；
- b —— 回归系数矩阵，构建形式见附录A。

回归系数矩阵 \mathbf{b} 根据地理加权方法（原理见附录A）求解。设定高斯函数作为权重计算方法，采用交叉验证方法获取最优带宽，并计算获取回归系数矩阵 \mathbf{b} 。

区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度回归系数采用克里金插值方法（采用插值处理软件默认参数）获取。根据回归系数矩阵 \mathbf{b} 的每一列按照对应的地理坐标信息依据气溶胶光学厚度的空间分辨率进行空间插值，即可得到区域连续的回归系数。

5.5 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度计算

根据目标区域中每个象元对应的气溶胶光学厚度、边界层高度、相对湿度以及回归系数，结合公式（4）逐象元计算Y值，并计算象元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。计算公式如下：

$$M(\text{PM}_{2.5}) = \exp(Y) \quad (5)$$

式中：

$M(\text{PM}_{2.5})$ ——象元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；

Y ——象元回归因变量。

最后，将所有计算象元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度按照卫星遥感数据的投影方式和地理坐标系统存储，形成区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度结果。

6 结果验证

采取十折交叉验证 (ten-fold cross validation) 方法验证卫星遥感获取的区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测结果。根据本指南5.3节形成的输入数据集，将其按等比例随机分成10个数据子集，分10次轮流选取其中1个数据子集作为测试比对数据、其他9个子集作为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度反演训练样本数据，依据本指南的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度反演模型采用训练样本数据计算回归系数，然后根据该回归系数采用测试比对数据计算象元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测结果，将预测值和地面监测值进行线性相关分析，并计算决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和相对精度 (relative accuracy)，用于评估 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测结果在实际应用中的准确性。

7 质量控制

7.1 卫星数据质量

在进行遥感数据预处理前，要保证卫星遥感原始数据的质量，避免有噪声条带的数据参与后续处理，导致结果产生误差。

7.2 输入参数精度

为提高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度遥感监测结果的准确性，一方面要保证输入参数气溶胶光学厚度、边界层高度和相对湿度的相对精度均达80%以上；另一方面保证地面监测资料足够且分布相对较均匀，一般1万平方公里有至少3个地面监测点位的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测资料。

附录 A

(资料性附录)

PM_{2.5} 浓度地理加权回归计算方法

根据监测原理形成 PM_{2.5} 浓度矩阵计算公式如下：

$$Y = Xb \quad (\text{A.1})$$

其中，因变量矩阵 Y 、自变量矩阵 X 和回归系数矩阵 β 根据匹配后的数据构建，构建形式如下：

$$Y = \begin{pmatrix} \ln(M(PM_{2.5}(u_1, v_1))) \\ \ln(M(PM_{2.5}(u_2, v_2))) \\ \vdots \\ \ln(M(PM_{2.5}(u_n, v_n))) \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$X = \begin{pmatrix} \ln(AOD(u_1, v_1)) & \ln(HPBL(u_1, v_1)) & \ln(1 - RH(u_1, v_1)/100) \\ \ln(AOD(u_2, v_2)) & \ln(HPBL(u_2, v_2)) & \ln(1 - RH(u_2, v_2)/100) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln(AOD(u_n, v_n)) & \ln(HPBL(u_n, v_n)) & \ln(1 - RH(u_n, v_n)/100) \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$b = \begin{pmatrix} b_0(u_1, v_1) & b_1(u_1, v_1) & b_2(u_1, v_1) & b_3(u_1, v_1) \\ b_0(u_2, v_2) & b_1(u_2, v_2) & b_2(u_2, v_2) & b_3(u_2, v_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_0(u_n, v_n) & b_1(u_n, v_n) & b_2(u_n, v_n) & b_3(u_n, v_n) \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

公式 (A.2)、(A.3) 和 (A.4) 中：

$\ln(M(PM_{2.5}(u_i, v_i)))$ ——第 i 个训练样本的 PM_{2.5} 浓度自然对数；

$\ln(AOD(u_i, v_i))$ ——第 i 个训练样本的气溶胶光学厚度自然对数；

$\ln(HPBL(u_i, v_i))$ ——第 i 个训练样本的边界层高度自然对数；

$\ln(1 - RH(u_i, v_i)/100)$ ——第 i 个训练样本的相对湿度线性变化后的自然对数；

$b_0(u_i, v_i)$ 、 $b_1(u_i, v_i)$ 、 $b_2(u_i, v_i)$ 、 $b_3(u_i, v_i)$ ——第 i 个训练样本的回归系数；

u_i ——第 i 个训练样本的地理横坐标；

v_i ——第 i 个训练样本的地理纵坐标。

回归系数矩阵 β 的第 i 列构成第 i 个训练样本 (u_i, v_i) 处的一维系数向量，计算方式如下：

$$b(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (\text{A.5})$$

公式 (A.5) 中 W 为权重函数对角矩阵：

$$W(u_i, v_i) = \begin{pmatrix} W_{i1} & 0 & L & 0 \\ 0 & W_{i2} & L & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & L & W_{in} \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

公式 (A.6) 中 W_{ij} 计算方式如下：

$$W_{ij} = \exp(-[\frac{d_{ij}}{b}]^2) \quad (\text{A.7})$$

公式 (A.7) 中:

d_{ij} ——第 i 个训练样本坐标和第 j 个训练样本坐标的距离, 计算方式 $d_{ij} = \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2}$;

b ——带宽。

其中带宽 (b) 是描述权重与距离之间函数关系的非负衰减参数, 采用交叉验证 (cross-validation) 的方法获取最优带宽值, 即先根据监测点之间的距离范围, 以象元大小为步长设定等间隔带宽值系列, 依次以第 i 个训练样本点作为回归点, 根据回归点周围站点的数据组进行地理加权回归计算, 计算所有回归点的因变量实际值与回归计算值之间差值的平方和作为交叉验证值 CV, 其计算公式如下:

$$CV(\hat{b}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - y_{i_i}(\hat{b})]^2 \quad (\text{A.8})$$

公式 (A.8) 中:

$y_{i_i}(\hat{b})$ ——在回归参数估计时不包括回归点本身;

y_i ——第 i 个训练样本的因变量值。

根据公式 (A.1) ~ (A.5) 计算不同带宽 \hat{b} 相应的 CV 值, 并找到最小的 CV 值所对应的带宽 b , 此即最优带宽。