

附件 5

《卫星遥感细颗粒物 (PM_{2.5}) 监测技术指南
(征求意见稿)》编制说明

《卫星遥感细颗粒物 (PM_{2.5}) 监测技术指南》编制组

二〇一九年十一月

项目名称：卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南

项目统一编号：2017-27

项目承担单位：生态环境部卫星环境应用中心、江苏省扬州环境监测
中心

编制组主要成员：厉青、王中挺、陈辉、毛慧琴、马鹏飞、张玉环、
张丽娟、陈志芳、陈宇洁

标准所技术管理负责人：赵国华

质管处项目负责人：孙娟

目 次

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 1 | 项目背景 | 1 |
| 1.1 | 任务来源 | 1 |
| 1.2 | 工作过程 | 1 |
| 2 | 标准制订的必要性分析..... | 2 |
| 2.1 | 环境形势的变化对标准提出新的要求..... | 2 |
| 2.2 | 相关环保标准和环保工作的需要..... | 2 |
| 3 | 标准编制的依据与原则..... | 3 |
| 3.1 | 标准编制的依据..... | 3 |
| 3.2 | 标准编制的原则..... | 3 |
| 4 | 标准主要技术内容..... | 3 |
| 4.1 | 标准适用范围..... | 3 |
| 4.2 | 标准结构框架..... | 3 |
| 4.3 | 术语和定义 | 4 |
| 4.4 | 监测原理 | 4 |
| 4.5 | 监测数据源的选择..... | 9 |
| 4.6 | 监测方法的确定..... | 10 |
| 4.7 | 监测结果验证方法的选择..... | 23 |
| 4.8 | 质量控制 | 24 |
| 5 | 对实施本标准的建议..... | 24 |
| 6 | 参考文献 | 25 |

《卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南》

编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

我国细颗粒物污染形势较为严峻，已经成为国家环境监测的重点指标。为有效地对细颗粒物浓度时空分布进行监测，根据原环境保护部《关于开展 2017 年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办函〔2017〕413 号），将《细颗粒物遥感监测及其应用技术指南》列入国家标准制修订项目计划，项目统一编号为 2017-27，项目承担单位为原环境保护部卫星环境应用中心。

1.2 工作过程

2017 年 2 月，任务下达后，原环境保护部卫星环境应用中心迅速成立了标准编制组，制定了相关工作计划，明确了项目成员的分工。

2017 年 2 月-2018 年 6 月，根据工作计划进度安排，标准编制组认真进行了资料收集和前期调研工作。内容包括：收集整理有关细颗粒物卫星遥感相关技术规范的国内外文献；调研细颗粒物卫星遥感的现有数据源、监测方法和验证方法等；此外，编制组还积极开展了细颗粒物卫星遥感监测方法的深入研究及实验工作。在前期大量工作的基础上，编制组确定了本标准编制的原则、技术路线和要求，完成了《细颗粒物遥感监测及其应用技术指南》的开题报告和标准文本初稿。

2018 年 7 月，生态环境部环境标准研究所在北京组织召开了本标准的开题论证会。论证委员会由中国环境科学研究院、北京师范大学、中国环境监测总站、北京市环境保护监测中心、中国科学院遥感与数字地球研究所、江苏省环境监测中心的有关专家组成。论证委员会听取了标准主编单位关于标准开题论证报告的主要技术内容、编制技术路线和标准初稿内容介绍，经质询和讨论，认为该标准的编制单位提供的材料齐全、内容完整；标准编制单位对国内外方法标准及文献进行了充分调研；标准定位基本准确，技术路线合理可行。论证委员会一致通过本标准的开题，并提出如下修改意见和建议：删除区域 PM_{2.5} 专题制图及统计分析、监测产品制作部分及附录 A；进一步简化原理说明，规范文字；将标准名称改为“细颗粒物（PM_{2.5}）遥感监测技术指南”。后根据监测司审议有关卫星遥感标准规范命名规则，将本指南命名为“卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南”。

2019 年 9 月 3 日，生态环境部环境标准研究所在北京组织召开了本标准征求意见稿的技术审查会。会议邀请行业专家、行业领导和监测专家组成审查委员会，审查委员会听取了标准编制单位关于标准征求意见稿的主要技术内容、编制工作过程的汇报。经过质询、讨论，认为该标准的编制单位提供的材料齐全、内容完整；标准征求意见稿规定了卫星遥感细颗粒物监测的技术方法、结果验证、质量控制等内容，标准内容制定依据充分，具有实际可操作

性。审查委员会一致通过本标准征求意见稿及编制说明的审查，并提出如下修改意见：进一步明确标准适用范围；适当补充监测原理，进一步梳理监测处理流程和监测方法逻辑关系；进一步按照 HJ565 要求对标准文本进行编辑修改。

根据审查委员会提出的修改意见，编制单位进行了相关资料的收集，形成了标准文本征求意见稿和征求意见稿编制说明初稿。之后，编制组将标准文本、编制说明初稿发给生态环境部标准研究所进行审查，根据反馈意见又对标准文本和编制说明进行了进一步的修改，最终形成了标准文本征求意见稿和征求意见稿编制说明。

2 标准制订的必要性分析

2.1 环境形势的变化对标准提出新的要求

细颗粒物（fine particulate matter）指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 微米的颗粒物，又称 $PM_{2.5}$ （以下均记为“ $PM_{2.5}$ ”）。它能较长时间悬浮于空气中，其在空气中含量浓度越高，就代表空气污染越严重。近年来我国大气 $PM_{2.5}$ 污染十分严重，年平均浓度超过发达国家 3~5 倍，大气低能见度事件频率、持续时间及覆盖范围在逐年增加，如 2013 年 1 月笼罩在我国中东部地区大范围、持续的严重污染过程，灰霾影响面积达 270 多万平方公里；2015 年 11 月 2 日至 2016 年 1 月 4 日，京津冀及周边地区持续受灰霾影响，共发生了 5 次严重污染过程，最大影响面积 66 万 km^2 ，其中重霾面积 56 万 km^2 ，分别占京津冀及周边地区总面积的 94% 和 80%。

我国政府高度重视大气环境污染的综合防治，为了加强大气污染防治力度，改善我国环境空气质量，2013 年 9 月国务院出台了《大气污染防治行动计划》，并提出了具体的指标：到 2017 年，京津冀、长三角、珠三角等区域 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 25%、20%、15% 左右，其中北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度控制在 60 mg/m^3 左右；2014 年 7 月原环境保护部、发展改革委、工业和信息化部、财政部、住房和城乡建设部和能源局联合印发《大气污染防治行动计划实施情况考核办法（试行）实施细则》，明确将 $PM_{2.5}$ 作为年度考核指标。由此可见，监测和定量评估 $PM_{2.5}$ 时空分布是我国环境保护中长期科技发展的重要战略需求。

当前，开展 $PM_{2.5}$ 监测工作已经成为环境监管的重要内容之一，新的环境监管形势要求 $PM_{2.5}$ 的监测要更加全面和科学，但当前的监测方法还主要依赖于主要集中在城市地区的地面站点的监测，因此，迫切需求拓展新的技术手段来获取全面、准确的 $PM_{2.5}$ 区域分布信息。由于卫星遥感技术具有宏观、动态、科学等优势，可以用来很好地解决这一问题。通过获取的区域 $PM_{2.5}$ 浓度、等级及各等级分布面积等信息可更全面科学地掌握 $PM_{2.5}$ 区域动态变化信息，为制定大气污染防治政策提供有力的技术支撑。目前我国还无专门针对 $PM_{2.5}$ 卫星遥感监测应用相关的技术规范，因此急需制定 $PM_{2.5}$ 卫星遥感监测方面的技术指南。

2.2 相关环保标准和环保工作的需要

随着 $PM_{2.5}$ 卫星遥感监测应用技术的不断提高，会不断产生新的监测方法及产品。为了有效、正确地利用卫星遥感技术进行 $PM_{2.5}$ 监测，对全国各级环境保护管理人员、科研人员、监测人员提供相应的技术指导，迫切需要制定 $PM_{2.5}$ 卫星遥感监测技术指南。该指南通过对

PM_{2.5} 遥感监测方法、结果验证和质量控制等方面进行统一规定，确保监测产品更具科学性与权威性，从而为保质保量地完成 PM_{2.5} 遥感监测工作，为开展卫星遥感细颗粒物监测及其区域分布规律分析工作提供技术参考。因此，为满足 PM_{2.5} 卫星遥感监测应用技术建设与管理需要，编制符合我国国情、科学实用的《卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南》十分必要。

3 标准编制的依据与原则

3.1 标准编制的依据

GB/T 31159-2014 大气气溶胶观测术语

HJ 653-2013 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

3.2 标准编制的原则

(1) 适用性、可操作性原则

本标准的内容应具有普遍适用性，方法应具有可操作性，能够为环境监测及管理等相关管理部门进行卫星细颗粒物（PM_{2.5}）监测提供技术参考。

(2) 科学性、先进性原则

本标准在编制过程中应积极借鉴和利用国内外相关研究成果，运用可靠的原理、成熟先进的技术和科学的方法，保证制定的指南具有科学性和先进性。

(3) 经济技术可行性原则

标准中采用的技术方法应经济可行，确保按照该标准开展细颗粒物（PM_{2.5}）卫星遥感监测时，涉及到的卫星遥感数据源比较容易获取、方法比较容易实现，监测成本较低，经济可行。

4 标准主要技术内容

4.1 标准适用范围

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。

4.2 标准结构框架

表 1 《卫星遥感细颗粒物（PM_{2.5}）监测技术指南》标准架构

| 标准内容 | 详细内容 |
|-----------|--|
| 1 适用范围 | 概述了本标准的编制内容和适用范围。 |
| 2 规范性引用文件 | 介绍了本标准中引用的相关标准文件。 |
| 3 术语和定义 | 规定了 3 个术语，包括气溶胶光学厚度、PM _{2.5} 浓度和边界层高度等。 |

| | |
|--------------|---|
| 4 总则 | 规定了监测原理、监测数据选择和监测处理流程。 |
| 5 监测方法 | 规定了 AOD 遥感反演、气象资料提取、数据匹配、区域 PM _{2.5} 回归系数获取和区域 PM _{2.5} 浓度计算方法等。 |
| 6 监测结果验证 | 规定了采取十折交叉验证 (ten-fold cross validation) 方法对卫星遥感 PM _{2.5} 浓度与地面监测结果进行相关分析和误差评估作为结果验证手段。 |
| 7 质量控制 | 规定了卫星数据质量、输入参数精度控制内容。 |
| 附录 A (资料性附录) | 介绍了 PM _{2.5} 浓度地理加权回归计算方法。 |

4.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

4.3.1 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。

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

象元 PM_{2.5} 浓度指 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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

该定义由编制组给出。

4.3.3 边界层高度 Height of the planetary boundary layer, HPBL

边界层高度是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。

该定义由编制组给出。

4.4 监测原理

根据 PM_{2.5} 浓度与气溶胶光学厚度 (AOD)、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，形成区域 PM_{2.5} 浓度空间分布。其中，气溶胶光学厚度是 PM_{2.5} 浓度遥感反演的关键参量之一。

4.4.1 卫星 AOD 遥感反演原理

在大气水平均一的假设条件下，卫星传感器接收到的大气顶部的辐射信号，既是气溶胶光学厚度的函数，又是下垫面地表反射率的函数，卫星表观反射率可以表示为 (Vermote, 1997):

$$r^{TOA}(m_s, m_v, f) = r^0(m_s, m_v, f) + \frac{T(m_s)T(m_v)r_s(m_s, m_v, f)}{[1 - r_s(m_s, m_v, f)S]} \quad (1)$$

式中：

- r^{TOA} ——大气层顶反射率；
- r^0 ——大气程辐射等效反射率；
- r_s ——地表反射率；
- S ——大气下界的半球反射率；
- T ——大气透过率。

除地表反射率外，公式右边的每一项都是气溶胶类型和气溶胶光学厚度的函数。气溶胶卫星遥感反演实际上是利用卫星传感器探测信号进行地气解耦的过程，当地表反射率较小时，卫星观测的辐射值主要是大气的贡献，气溶胶散射作用使卫星接收的辐射值增大，地表反射率确定以后，就可以根据辐射传输方程计算出气溶胶的光学厚度。

4.4.2 从 AOD 实现 PM_{2.5} 浓度遥感反演原理

在 20 世纪 80 年代之前，美国受早期大气光化学烟雾污染事件影响，广大科学家对大气气溶胶的光学特征进行了广泛的观测实验和研究分析，大部分研究结果（White, 1977; waggoner, 1980）表明大气气溶胶的散射系数和质量浓度之间存在较好的线性关系，并且比例系数和环境相对湿度的变化密切相关。

考虑到卫星传感器可以获取大气气溶胶光学特征参数（气溶胶光学厚度 Aerosol Optical Depth, AOD），利用卫星进行大范围的空气质量遥感监测成为了一种可行的技术手段，也成为广大学者研究的热点。NASA 和马里兰大学等学者(Kaufman and Fraser, 1983)为了利用卫星测量的光学厚度参数估算空气污染下的气溶胶属性，引入气溶胶标高的概念，通过理论分析和观测实验构建了气溶胶颗粒质量浓度和卫星遥感 AOD 之间的关系式。

由于受到卫星传感器空间和光谱分辨率的限制，卫星遥感技术在空气质量监测领域发展较为缓慢，直到中分辨率光谱成像仪 MODIS（搭载于 1999 年发射的 Terra 和 2002 年发射的 Aqua 卫星）传感器的成功发射，为卫星遥感技术应用于气溶胶监测提供了大量的数据。美国亚拉巴马大学的学者（wang and Christopher, 2003）在气溶胶颗粒物光学属性的研究基础上构建了卫星测量气溶胶光学厚度和近地面气溶胶颗粒质量浓度之间关系式：

$$t = f(RH)Q_{dext}(0)M_{daer}(0)H_{eff} \quad (2)$$

$$H_{eff} = \frac{\int_0^{TOA} b_{ext}(z) dz}{b_{ext}(0)} \quad (3)$$

式中：

- t ——大气整层气溶胶光学厚度；
- $f(RH)$ ——气溶胶吸湿增长因子；
- RH ——环境空气相对湿度；
- $Q_{dext}(0)$ ——近地面单位质量浓度“干”（RH 小于等于 40%）气溶胶颗粒的消光系数，

$\text{m}^2/\mu\text{g}$;

$M_{\text{der}}(0)$ ——近地面“干”气溶胶颗粒的质量浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

H_{eff} ——等效气溶胶标高， m ;

$b_{\text{ext}}(z)$ ——高度 z 处的气溶胶消光系数， m^{-1} ;

TOA ——大气层顶 (Top of Atmosphere) 高度， m 。

(3) 式为近地面气溶胶颗粒浓度的卫星遥感监测提供了理论依据，后续的近地面颗粒物质量浓度的估算方法也是在此基础上发展起来的。

在上述理论上，为从卫星遥感光谱数据资料上定量获取区域近地面气溶胶颗粒物质量浓度，必须要获取吸湿增长因子、单位质量浓度气溶胶颗粒消光系数和气溶胶标高三个参数。

4.4.2.1 气溶胶颗粒吸湿增长因子

吸湿增长因子主要用来描述气溶胶散射受环境空气湿度影响的变化，一般定义为环境空气状况下的气溶胶消光系数与相对湿度小于等于 40% 状况下的气溶胶消光系数之比 (Kotchenruther, 1999)，即：

$$f(RH) = \frac{b_{\text{ext}}(RH)}{b_{\text{ext}}(RH \leq 40\%)} \quad (4)$$

式中：

$f(RH)$ ——气溶胶吸湿增长因子；

RH ——环境空气相对湿度；

$b_{\text{ext}}(RH)$ ——环境空气湿度情况下的气溶胶消光系数， m^{-1} ；

$b_{\text{ext}}(RH \leq 40\%)$ ——相对湿度小于等于 40% 时“干”气溶胶消光系数， m^{-1} 。

大量的观测实验和研究表明，吸湿增长因子可以近似表示为相对湿度的函数，国内外研究学者(Kasten, 1969; Kotchenruther, 1998; Kotchenruther, 1999; Im J, 2001; LI Ling-jun, 2007; 刘新罡, 2008;)通过不同地区的观测实验和研究分析，提出了不同的吸湿增长因子表达式。其中，一种负指数经验关系应用最为广泛，表达式如下：

$$f(RH) = (1 - RH)^{-g} \quad (5)$$

式中：

$f(RH)$ ——气溶胶颗粒吸湿增长因子；

RH ——环境空气相对湿度；

g ——经验拟合系数，与气溶胶成分有关，一般粗略估计可以取为 1；

相关学者采用该式进行湿度订正取得了较好的效果 (李成才, 2005; Tsai, 2009; wang, 2010; 陶金花, 2012)。

4.4.2.2 单位质量浓度气溶胶颗粒消光系数

根据 Mie 散射理论，“干”气溶胶消光系数与气溶胶颗粒的粒数谱分布和消光特性有关，可表示为下式：

$$b_{dext} = \rho \int_0^x Q_{ext}(m, r, l) n(r) r^2 dr \quad (6)$$

式中:

b_{dext} —— “干” 气溶胶消光系数, m^{-1} ;

Q_{ext} —— 气溶胶颗粒散射效率因子;

m —— 气溶胶颗粒的复折射率;

r —— 气溶胶颗粒半径, μm ;

l —— 辐射波长, μm ;

$n(r)$ —— 气溶胶颗粒数谱分布函数;

x —— 气溶胶颗粒半径积分上限。

而 “干” 气溶胶颗粒物质量浓度 M_{daer} 可表示为:

$$M_{daer} = \frac{4}{3} \rho \bar{r} \int_0^x n(r) r^3 dr \quad (7)$$

式中:

M_{daer} —— 干气溶胶颗粒的质量浓度, $\mu g / m^3$;

\bar{r} —— “干” 气溶胶颗粒物的平均密度, g / cm^3 ;

r —— 气溶胶颗粒半径, μm ;

$n(r)$ —— 气溶胶颗粒数谱分布函数;

为简化表达式, 引入归一化气溶胶散射效率 \bar{Q} 和有效半径 \bar{r} 两个参数(Hansen, 1974):

$$\bar{Q} = \frac{\int_0^x Q_{ext}(m, r, l) n(r) r^2 dr}{\int_0^x n(r) r^2 dr} \quad (8)$$

$$\bar{r} = \frac{\int_0^x n(r) r^3 dr}{\int_0^x n(r) r^2 dr} \quad (9)$$

式中:

\bar{Q} —— 归一化气溶胶颗粒散射效率因子;

Q_{ext} —— 气溶胶颗粒散射效率因子;

m —— 气溶胶颗粒的复折射率 m ;

r —— 气溶胶颗粒半径, μm ;

\bar{r} —— 归一化气溶胶颗粒半径, μm ;

l —— 辐射波长, μm ;

$n(r)$ —— 气溶胶颗粒数谱分布函数;

x ——半径积分上限。

4.4.2.3 气溶胶标高

气溶胶标高表示的是近地面气溶胶消光系数和整层大气气溶胶光学厚度的比例因子，与气溶胶垂直分布密切相关。大量的观测实验和理论研究表明，一般情况下，气溶胶颗粒物密度随高度呈负指数递减关系 (Busen, 1987; 徐希孺, 2005)。于是 AOD 可以表示为

$$t = \int_0^{TOA} b_{ext}(0) \exp(-z / H_{eff}) dz = b_{ext}(0) H_{eff} \quad (10)$$

式中：

t ——大气整层气溶胶光学厚度；

$b_{ext}(0)$ ——近地面处的气溶胶消光系数， m^{-1} ；

H_{eff} ——等效气溶胶标高， m 。

因此，气溶胶标高可以认为是大气中气溶胶浓度随高度保持不变时气溶胶层的等效厚度，它是一个理想条件下的等效高度，难以在近地面消光系数未知的情况下直接测量。部分学者通过地基激光雷达观测实验 (Engel-Cox, 2006) 和气象观测资料计算混合层高度 (mixing height, MH) 和边界层高度 (height of Planetary boundary layer, HPBL) 来近似代替气溶胶标高进行气溶胶垂直订正，取得了较好的效果，订正后的气溶胶消光系数与细颗粒物浓度的相关性明显提升 (wang, 2010)。采用边界层高度近似代替气溶胶标高是基于以下 3 点考虑：(1) 大气边界层充分发展，夜间残留层内污染物基本混入边界层内，且由于边界层顶部逆温层的存在，边界层内的污染物难以扩散到该层之上的自由大气中，因而边界层内集中了大气中绝大部分气溶胶粒子；(2) 通常晴天正午期间，近地面大气对流混合能力较强，使边界层内污染物垂直交换充分，在边界层顶会出现气溶胶浓度的锐减，在相应的激光雷达回波上表现为一个明显的突变，此时的边界层高度接近于气溶胶标高的物理含义；(3) 气溶胶标高的间接测量也表明，气溶胶标高与大气边界层高度具有相似的日变化规律。

从卫星遥感 AOD 直接获取细颗粒物质量浓度，近年来，研究学者综合上述(1)~(10)提出卫星遥感估算细颗粒物质量浓度的表达式如下：

$$M(PM_{2.5}) = \frac{4\bar{r}}{3Q} \cdot \frac{AOD}{HPBL \cdot f(RH)} \quad (11)$$

式中：

$M(PM_{2.5})$ ——象元 $PM_{2.5}$ 浓度；

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

\bar{r} —— $PM_{2.5}$ 的有效半径， m ；

Q —— $PM_{2.5}$ 的归一化消光效率因子；

AOD ——大气整层气溶胶光学厚度；

$HPBL$ ——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 $f_{rh} = (1 - RH / 100)^{-g}$ 。

将 (11) 式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:

$$\ln(M(PM_{2.5})) = \overline{b_0} + \overline{b_1} \ln(AOD) + \overline{b_2} \ln(HPBL) + \overline{b_3} \ln(1 - RH / 100) \quad (12)$$

式中:

$\overline{b_0}$ 、 $\overline{b_1}$ 、 $\overline{b_2}$ 、 $\overline{b_3}$ ——方程回归系数;

(12) 式即为 $PM_{2.5}$ 的多元线性回归模型的对数形式, 是一种全局空间回归模型, 关键参数 $\overline{b_0}$ 、 $\overline{b_1}$ 、 $\overline{b_2}$ 、 $\overline{b_3}$ 代表研究区域内的平均值, 部分学者也采用上式进行了局部区域的 $PM_{2.5}$ 浓度遥感估算, 取得了一定的效果。然而在实际问题中, 这三个参数在不同地理环境情况往往表现不同, 也就是说回归参数会随空间位置而变化, (12) 式进一步扩展为卫星遥感监测 $PM_{2.5}$ 质量浓度的空间变参数回归模型:

$$\ln(M(PM_{2.5}(u_i, v_i))) = b_0(u_i, v_i) + b_1(u_i, v_i) \ln(AOD) + b_2(u_i, v_i) \ln(HPBL) + b_3(u_i, v_i) \ln(1 - RH / 100) \quad (13)$$

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;

为对 (13) 式进行求解, 近年来多数学者采用地理加权回归方法结合地面观测的 $PM_{2.5}$ 浓度计算 AOD、HPBL 和 RH 的区域回归参数即可根据 (13) 式计算区域近地面 $PM_{2.5}$ 浓度。

4.5 监测数据源的选择

根据气溶胶颗粒物的监测原理, 考虑到目前环境管理对气溶胶颗粒物监测分辨率、时效性的需求以及当前卫星遥感发展的现状, 本指南选择搭载有光学及红外多谱段卫星传感器结合气象参数及地面实际测量数据来开展细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测工作。

适用于利用多光谱卫星光学传感器开展细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测工作。卫星传感器应具有蓝波段 (0.47 μm 附近)、红波段 (0.66 μm 附近)、近红外波段 (0.86 μm 附近)、中红外波段 (2.1 μm 附近) 和远红外波段 (12 μm 附近), 主要用于 AOD 遥感反演, 各波段数据用途见表 2。

气象参数应至少包括边界层高度、相对湿度两个要素, 主要用于解析气溶胶垂直分布和吸湿增长特征。

地面监测数据包括 $PM_{2.5}$ 小时浓度均值指标及相应监测点位的地理坐标, 且数据性能可靠, 主要用于 $PM_{2.5}$ 浓度遥感监测模型训练, 计算回归参数。

表 2 $PM_{2.5}$ 浓度监测算法中所需通道的谱段范围及主要用途

| 分类 | 波段 | 主要用途 |
|--------|-------------------------|-----------------|
| 多光谱传感器 | 蓝波段 (0.47 μm 附近) | 求解辐射传输方程并计算 AOD |
| | 红波段 (0.66 μm 附近) | 求解辐射传输方程和云象元检测 |
| | 近红外波段 (0.86 μm 附近) | 云和水体象元检测 |
| | 中红外波段 (2.1 μm 附近) | 获取地表反射率 |

| | | |
|--|----------------------------|-----|
| | 远红外波段（12 μm 附近） | 云检测 |
|--|----------------------------|-----|

4.6 监测方法的确定

本标准的监测方法是在文献调研、方法实验与应用实践的基础上确定的。开展国内外研究与应用状况调研，主要是为了保证细颗粒物（PM_{2.5}）遥感监测指南中采用方法的科学性、有效性，开展方法实验与应用实践，主要是为了保证标准方法结果的可靠性。

4.6.1 国内外 PM_{2.5} 及 AOD 卫星遥感监测算法调研

4.6.1.1 AOD 遥感反演算法

气溶胶光学厚度（AOD）是气溶胶消光系数在垂直方向上的积分，表征无云大气铅直气柱中气溶胶对光的衰减作用。作为气溶胶最基本的光学特性，是确定气溶胶含量时空分布的一个重要参量，也是 PM_{2.5} 浓度卫星遥感监测中最关键的参数之一。国外和国内卫星遥感气溶胶的研究分别始于 20 世纪 70 年代和 80 年代中期，近 40 年来，卫星遥感反演 AOD 算法得以长足的发展，目前已经形成了一个非常丰富的研究体系，发展了暗象元、深蓝、多角度多通道、结构函数法、双星协同、简化气溶胶反演（SARA）及偏振遥感等多种遥感反演算法。

表 3 AOD 遥感反演统计模型分类及特点

| 分类 | 模型 | 优劣势分析 | 国内外代表性研究 |
|---------------|--------------|---|---|
| 光学特性传感器 | 暗象元 | 基础理论和技术流程较为完善，不需要辅助数据，仅适用于低反射率地区且需要已知地表反射率的先验知识。 | Kaufman (1997), JGR |
| | 深蓝 | 基础理论和技术流程较为完善，可以针对更广泛的地表类型，对地表反射率的精度要求较高。 | Hsu(2004), IEEE |
| | 结构函数法 | 适用于城市等亮地表，但该方法忽略了地气之间的多次散射且受天气影响较大。 | Tanre(1988), JGR |
| | 双星协同算法 | 无需事先假定气溶胶类型、地表反射率等参数，可应用于各种地表类型，但辐射传输方程求解较为复杂，且要求两幅影像气溶胶变化很小。 | Xue(2003), IEEE 唐家奎 (2005), 中国科学 |
| 多角度传感器 (MISR) | 多角度算法 | 基础理论和技术流程较为完善，不需要辅助数据，可以针对多种地表类型，适用于特定传感器（如 AATSR、MISR）。 | Martonchik(1998), IEEE |
| 偏振传感器 | 偏振算法 | 利用气溶胶的极化信息反演其光学特性，但该算法参数较多，反演结果较慢，适用于特定传感器（如 POLDER）。 | Deuze(2001), JGR |
| 其他 | 1) 气溶胶简化反演算法 | 可以实行高分辨率卫星遥感反演，但尚未成体系，未投入业务化应用。 | Bilal(2013), RSE Lyapustin (2011), JGR |

| | | |
|--|--------------|--|
| | 2) 多角度大气校正算法 | |
|--|--------------|--|

注：发布期刊名称均采用缩写方式给出，其全称分别为 JGR=Journal of Geophysical Research，RSE= Remote Sensing of Environment，ESP=Environmental Science and Pollution Research.

暗目标和深蓝算法由于具有完善的理论体系和较好的实用性，两种算法可分别针对浓密植被、黑土等暗地表和城市及半干旱等亮地表的反射率特性进行区域上空 AOD 遥感反演，成为目前卫星遥感反演 AOD 的两种主流算法，并且在 MODIS 最新发布 C6 版本气溶胶产品中得以采用，本指南考虑选取这两种算法作为 PM_{2.5} 浓度遥感反演关键参数 AOD 的反演方法。

4.6.1.2 PM_{2.5} 浓度遥感监测方法

近 20 年来，国外学者针对如何利用卫星估算近地面 PM_{2.5} 浓度开展了广泛的研究，并获取了全球以及区域尺度 PM_{2.5} 浓度时空分布，主要分为以下几类模型：

4.6.1.2.1 统计模型

主要包括单变量简单线性模型、多变量线性回归模型、多变量非线性统计模型和多变量空间统计模型等。

1) 单变量简单线性模型

早期如 Wang 和 Christopher 等(2003)、Engel-Cox(2004a)等采用简单线性相关模型分析了不同尺度的 MODIS 的 AOD 产品与 PM_{2.5} 浓度的关系，挖掘了应用 AOD 进行 PM_{2.5} 遥感估算的潜力。

2) 多变量线性回归模型

然而，随着越来越多有关 AOD-PM_{2.5} 关系的深入研究，大部分研究结果表明简单的单变量线性相关模型不足以准确表示 AOD-PM_{2.5} 相关关系，于是相关学者开始考虑引入一些气象因素采用相对较复杂的多变量模型研究 PM_{2.5} 浓度遥感监测方法技术，如 Liu 等(2005)考虑边界层高度、相对湿度、季节和地面监测站点的地理属性（如地表类型、环境情况等）采用经验回归模型从 MISR 的 AOD 产品中估算出美国 2001 年度的 PM_{2.5} 浓度空间分布，发现这些因子的变化对 AOD-PM_{2.5} 相关关系都有显著的影响；另外，Liu 等（2007）加入了气温、风场条件、边界层高度以及季节因子采用广义线性模型（GLM）对 MISR 和 MODIS 的 AOD 产品在美国中部区域反演 PM_{2.5} 浓度的适用性。

3) 多变量非线性统计模型

为进一步提高 AOD-PM_{2.5} 关系的准确表达，相关学者开始尝试发展一些更为复杂的非线性统计模型进行 PM_{2.5} 遥感反演，如 Liu 等(2009)发展了一套两层级广义可加模型(GAM)，利用 GOES 的 AOD 产品结合气象因子和土地利用参数估算美国东北部麻省地区的 PM_{2.5} 浓度，由于 GAM 模型允许统计变量的回归系数为平滑曲线，可以让 PM_{2.5} 浓度遥感反演结果更接近实测值。

4) 多变量空间统计模型

近年来，随着研究的不断深入，相关学者研究发现全局回归模型能较好的反映

AOD-PM_{2.5} 在区域尺度随时间变化关系，但是还不足以反映出 AOD-PM_{2.5} 随空间变化差异特征，这主要是因为气溶胶垂直分布、吸湿增长在不同地区不同时间表现还存在较大差异，因此一些学者采用能同时反映时间和空间变异的统计模型来构建 PM_{2.5} 浓度遥感估算方法。如 Lee 等(2011)考虑了 AOD-PM_{2.5} 关系逐日变化的随机效应，引进线性混合效应模型(LME)采用 MODIS AOD 产品研究估算了美国东北部地区的 PM_{2.5} 日均浓度，取得了较好的效果；Hu 等（2013）采用地理加权回归模型（Geographically Weighted Regression, GWR）引入 AOD、边界层高度、相对湿度、气温、风速和土地利用等参数估算了美国东南部地区的 PM_{2.5} 浓度，并与普通全局回归模型（OLS）进行了对比分析，发现 GWR 模型与 OLS 相比能更有效反映 AOD-PM_{2.5} 关系在空间上的变异特征。

4.6.1.2.2 经验物理机制模型

主要包括经验双订正模型和数值模拟订正模型。

1) 经验双订正模型

经验双订正模型主要考虑气溶胶垂直分布和吸湿增长对卫星遥感 AOD 估算 PM_{2.5} 浓度的影响，根据先验知识假定气溶胶垂直分布（一般为负指数衰减）和吸湿增长特征（一般为非线性曲线），在此基础上引入气溶胶标高和环境湿度等参数按先验知识对 AOD 进行垂直订正和湿度订正，获取近地面“干”气溶胶消光系数，最后通过线性转换获取 PM_{2.5} 质量浓度。如 Wang 等（2010）通过引入边界层高度和相对湿度对北京地区的 MODIS 反演的 1km 分辨率的 AOD 进行垂直订正和湿度订正，最终获取了近地面 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度。

2) 数值模拟订正模型

考虑到气溶胶垂直分布和吸湿增长规律并不是严格符合先验假设情况，一些学者考虑利用大气化学模式采用数值模拟的方法获取气溶胶垂直分布结构和吸湿增长曲线，并采用卫星遥感 AOD 对数值模拟的 AOD 进行订正从而获取 PM_{2.5} 浓度，如 Van Donkelaar 等（2010）根据 MISR 和 MODIS 的 AOD 和 GEOS-Chem 模拟结果采用比例因子订正方法估算了 2001-2006 年全球的 PM_{2.5} 长期平均浓度分布。

4.6.1.2.3 机器学习算法模型

近年来，随着人工智能和机器学习概念的兴起，不少学者开始尝试利用神经网络、支持向量机等方法直接将地面监测的颗粒物质量浓度作为目标变量，将 AOD 以及其他影响因素（如气象因子、土地利用类型）作为相关输入变量，进行颗粒物的反演。如 Yao 等（2014）采用 ANN 和 MODIS 的 AOD 产品估算了我国 2006-2010 年 PM_{2.5} 浓度。

表 4 PM_{2.5} 遥感反演统计模型分类及特点

| 分类 | 模型 | 输入参数 | 优势 | 国内外代表性研究 |
|------|-------------------|------------------------|---|---|
| 统计模型 | 单变量简单线性模型（线性模型） | AOD | 简单，但精度低 | 国外：Wang 和 Christopher 等(2003) 国内：Guo 等（2009） |
| | 多变量线性回归模型（广义线性模型） | AOD、HPBL、RH、季节因子、区域因子等 | 考虑了多种变量对 PM _{2.5} -AOD 线性关系的影响 | 国外：Liu 等（2005） 国内：贾松林等（2014） |

| | | | | |
|--------------|---------------------------|---|---|---|
| | 型 (GLM)) | | | |
| | 多变量非线性统计模型(广义加和模型 (GAM)) | AOD、HPBL、RH、温度、风速、排放、土地利用等参数 | 考虑了多种变量对 PM _{2.5} -AOD 非线性关系的影响 | 国外: Liu 等 (2009) 国内: Zang 等 (2016) |
| | 多变量空间统计模型(地理加权回归模型 (GWR)) | AOD、HPBL、RH、温度、风速、土地利用等参数 | 体现了多种变量对 PM _{2.5} -AOD 非线性空间差异关系 | 国外: Hu 等 (2013) 国内: 马宗伟等 (2014)、陈辉等 (2016) |
| 经验物理 机制模型 | 经验双订正模型 | V-H 订正模型: AOD、AH (一般用 HPBL 替代)、RH | 考虑了气溶胶垂直分布和吸湿增长的物理机制, 有利于推广使用, 但需要先验知识 | 国外: Wang 等 (2010) 国内: 李成才等 (2013)、陶金花等 (2013)、陈辉等 (2014) |
| | 数值模拟订正模型 | 比例因子订正: 卫星 AOD、模拟 AOD 和 PM _{2.5} | 数值模拟物理和化学机制, 但比较依赖大气化学模式, 且空间分辨率和结果精度不高 | 国外: Liu 等 (2004)、van Donkelaar 等 (2006、2010、2014) 国内: 无 |
| 机器学习 模型 | 神经网络(人工神经网络 ANN) | AOD、HPBL、RH、温度、风速、排放、土地利用等参数 | 采用“黑匣子”式反演, 一般能获取较好的精度, 但是物理机制不明确, 不利于推广 | 国外: Yao 等 (2014) 国内: 郭建平等 (2013) |

综合上述研究方法可以看出, PM_{2.5} 遥感反演统计模型中均用到了包括 AOD、HPBL 和 RH 这三个主要参数, 这与 PM_{2.5} 遥感监测原理是密切相关的, AOD 表征了大气整层的气溶胶及颗粒物消光作用, HPBL 表征了气溶胶垂直分布特性, RH 则表征了气溶胶吸湿增长环境条件, 通过 AOD、HPBL 和 RH 三个参数即可实现从整层大气气溶胶中进行垂直订正和湿度订正, 最终获取区域近地面 PM_{2.5} 浓度; 而在不同模型中还考虑了温度、风速等气象因子、季节因子、污染源排放及土地利用等多种参数, 这主要是因为不同研究方法及成果分析的侧重点不一致, 导致所选参数出现差异化。综合考虑到 PM_{2.5} 浓度遥感监测原理和模型方法的实用性、普适性, 本指南选用 AOD、HPBL 和 RH 作为 PM_{2.5} 浓度遥感监测的主要参数。

近年来, 由于地理加权回归方法考虑到回归参数的空间差异及其稳定性和实用性, 在我国各个地区的 PM_{2.5} 遥感估算中得以广泛研究应用, 并通常采用十字交叉验证的方法计算决定系数以评估结果精度。

表 5 基于 GWR 模型的 PM_{2.5} 遥感反演方法在我国应用情况

| 研究时间 | 模型 | 十折交叉 R ² | 研究区域 (分辨率) | 研究学者及发布期刊 |
|-----------|----------|---------------------|-------------|-----------------|
| 2012-2013 | GWR | 0.64 | 中国(50km) | Ma(2014), EST |
| 2012-2013 | GWR | 0.74 | 珠三角地区(10km) | Song(2014), RSE |
| 2014 | GWR | 0.76 | 中国(3km) | You(2016), RS |
| 2014 | Bayesian | 0.78 | 华北(12km) | Lv(2016), EST |
| 2014 | GWR | 0.79 | 中国(10km) | You(2016), ESPR |
| 2013 | GWR | 0.78 | 京津冀(1km) | Zou(2016), IEEE |

| | | | | |
|-----------|---------|------|----------|-----------------|
| 2013-2014 | TSAM | 0.8 | 中国(10km) | Fang(2016), RSE |
| 2015-2016 | BME-GWR | 0.88 | 中东部(3km) | Lu(2018), AE |

注：发布期刊名称均采用缩写方式给出，其全称分别为：AE=Atmospheric Environment，EST=Environment Science Technology，RS=Remote Sensing，RSE= Remote Sensing of Environment，ESP=Environmental Science and Pollution Research

通过综合研究以上国内外主要卫星遥感 $PM_{2.5}$ 监测方法可以看出，地理加权回归方法对参数的空间差异考虑比较全面，并且适用范围较广，是目前国内外应用 AOD 反演 $PM_{2.5}$ 广泛采用的算法，最新的相关算法也是在此基础上进行改进获得(Hu 等(2014), Wu 等(2016), Lu 等 (2018))。

因此，综合考虑 $PM_{2.5}$ 遥感监测原理和技术方法，本指南确定以 AOD、HPBL 和 RH 为 $PM_{2.5}$ 遥感监测主要参数，以地理加权回归方法为 $PM_{2.5}$ 浓度遥感监测方法，制定 $PM_{2.5}$ 浓度卫星遥感监测方法、结果验证、质量控制等内容。

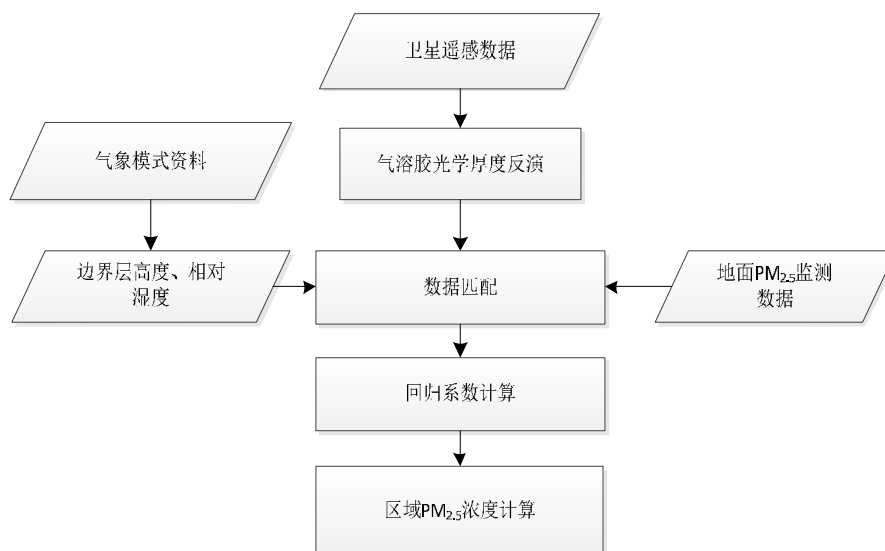


图 1 卫星遥感监测 $PM_{2.5}$ 浓度计算流程图

此外，在地理加权回归监测方法基础上，指南编制组开发了软件系统开展了 5 年的全国及重点区域细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测的实验工作，确定了以准确度高的基于地理加权回归方法的细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测方法体系，具体包括：AOD 遥感反演处理、气象参数提取、数据匹配、区域回归系数计算和区域 $PM_{2.5}$ 浓度计算等五个环节。

4.6.2 AOD 遥感反演

利用卫星遥感数据，采用暗目标法和深蓝算法 (Levy, 2007; Hsu 2013) 反演获取目标区域无云陆地像元的气溶胶光学厚度 (AOD)，AOD 遥感反演数据处理流程如下：

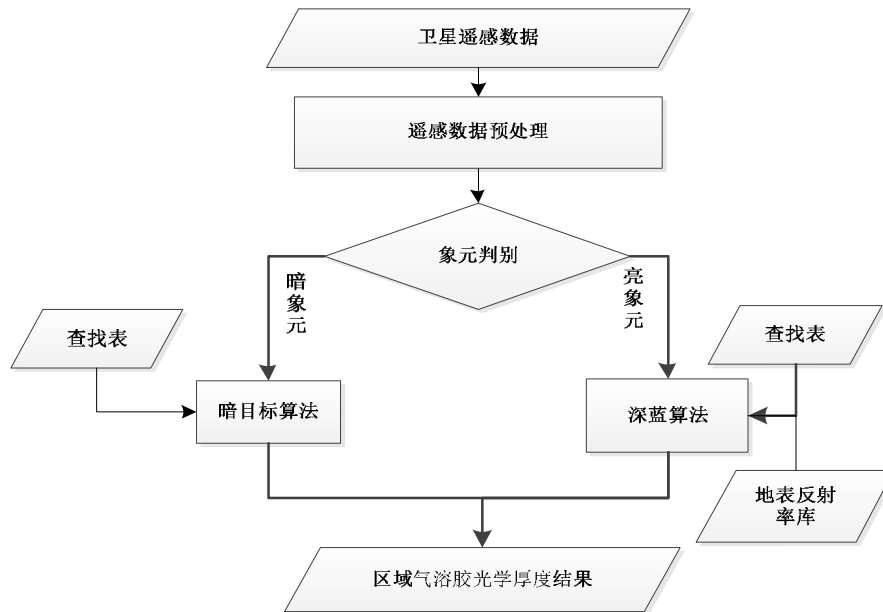


图 2 卫星遥感反演 AOD 技术流程图

4.6.2.1 AOD 遥感反演准备

在卫星遥感反演 AOD 之前，先完成两项准备数据处理。

4.6.2.1.1 构建查找表

查找表的构建使用辐射传输模型（如 6S、RT3、MODTRAN 等）结合卫星传感器的光谱响应函数设定相应的参数进行辐射传输计算得出。具体建立查找表时，设定不同卫星观测几何参数（太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角），不同的大气气溶胶参数（气溶胶光学厚度和气溶胶模式），根据卫星传感器监测波段，并考虑海拔、地表类型等参数。各参数参考设置方法如下：

太阳天顶角：从 0° 到 66° 范围，每个角度相隔 6° ；

观测天顶角：从 0° 到 66° 范围，每个角度相隔 6° ；

相对方位角：从 0° 到 180° 范围，每个角度相隔 12° ；

大气气溶胶模式包括大陆型、非吸收型、中等吸收型、吸收型和沙尘型气溶胶（Levy et al., 2007）；

大气气溶胶光学厚度（在波长 $0.55\mu\text{m}$ 处）设置为 0、0.25、0.5、1.0、1.5 和 1.95；

波段包括蓝波段（ $0.47\mu\text{m}$ 附近）、红波段（ $0.66\mu\text{m}$ 附近）和中红外波段（ $2.12\mu\text{m}$ 附近）；

地表参数包括海拔高度设定参考值为 0 米；

地表覆盖类型设定植被。

根据上述设定参数，利用辐射传输模型模拟计算保存相应输出结果，就可得到不同的大气的路径程辐射等效反射率（ r_0 ）、大气透过率（ $T(m_0) \times T(m_1)$ ）和大气下界的半球反射率（ S ）参数组合而成的多维查找表。

4.6.2.1.2 构建地表反射率库

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。为消除地表反射率的噪声，选择 8 日合成产品进行地表反射率库的构建。通过利用遥感处理软件 ENVI 将 MODIS 的 8 日合成蓝波段（0.47 μm 附近）地表反射率产品进行波段提取、重投影、重采样、图像剪切、镶嵌等处理得到地表反射率库。

4.6.2.2 AOD 遥感反演

在完成准备工作的基础上，即可进行 AOD 遥感反演，主要包括以下五个步骤：

4.6.2.2.1 遥感数据预处理

首先对卫星遥感数据进行质量检查、辐射校正及几何校正，然后计算可见光、近红外波段的表观反射率及热红外波段的亮度温度。

表观反射率计算公式如下：

$$r = \frac{\rho LD^2}{ESUN \cdot \cos q} \quad (14)$$

式中：

r ——表观反射率；

L ——辐射亮度， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ；

D ——日地之间距离，天文单位；

$ESUN$ ——大气层顶的平均太阳光谱辐照度， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ；

q ——太阳天顶角， $^\circ$ 。

亮度温度计算公式如下：

$$T = \frac{hc}{kl} \frac{1}{\ln \frac{\rho hc^2}{\epsilon l^5 L} + 1} \quad (15)$$

式中：

T ——表观亮度温度， K ；

c ——光速， m/s ；

l ——中心波长， μm ；

L ——辐射亮度， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ；

h ——普朗克常数，取 $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ；

k ——玻尔兹曼常数，取 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

然后，根据云、水体象元的光谱特征，进行判别并剔除，提取无云陆地象元。识别并剔除满足下列条件的云像元和水体像元。

云象元的判别条件为：

$$(r_{0.66} + r_{0.86}) > Th1 \cup (T_{12} < Th2) \cup ((r_{0.66} + r_{0.86}) > Th3 \cap T_{12} < Th4) \quad (16)$$

水体象元的判别条件为：

$$(r_{0.86} < Th5) \cap (NDVI < 0) \quad \text{其中, } NDVI = (r_{0.86} - r_{0.66}) / (r_{0.86} + r_{0.66}) \quad (17)$$

式中：

$r_{0.66}$ ——象元在红波段（0.66 μm 附近）的表现反射率；
 $r_{0.86}$ ——象元在近红外波段（0.86 μm 附近）的表现反射率；
 T_{12} ——象元在热红外波段（12 μm 附近）的亮度温度，K；
 $Th1$ ——判别阈值，参考值可取0.9；
 $Th2$ ——判别阈值，参考值可取285K；
 $Th3$ ——判别阈值，参考值可取07；
 $Th4$ ——判别阈值，参考值可取265K；
 $Th5$ ——判别阈值，参考值可取0.15；
 $NDVI$ ——归一化植被指数。

4.6.2.2.2 象元识别

根据卫星探测2.1 μm 附近波段表现反射率，将无云陆地象元分为暗象元和亮象元2类。无云陆地象元识别采用中红外波段（2.1 μm 附近）的表现反射率进行判定，其中暗象元的判别条件为：

$$Th1 < r_{2.1} < Th2 \quad (18)$$

亮象元的判别条件为：

$$r_{2.1} \geq Th2 \quad (19)$$

式中：

$r_{2.1}$ ——象元在中红外波段（2.1 μm 附近）的表现反射率；
 $Th1$ ——判别阈值，参考值可取0.01；
 $Th2$ ——判别阈值，参考值可取 0.4；

4.6.2.2.3 暗象元 AOD 反演

首先，根据暗象元地区中红外（2.1 μm 附近）波段处的反射率和蓝波段（0.47 μm 附近）、红波段（0.66 μm 附近）的反射率之间的关系确定地表反射率：

$$r_{0.66}^s = r_{2.1}^s * a_{0.66/2.1} + b_{0.66/2.1} \quad (20)$$

$$r_{0.47}^s = r_{0.66}^s * a_{0.47/0.66} + b_{0.47/0.66} \quad (21)$$

$r_{0.66}^s$ ——红波段（0.66 μm 附近）的地表反射率；
 $r_{2.1}^s$ ——中红外（2.1 μm 附近）波段的地表反射率；
 $a_{0.66/2.1}$ ——红波段和中红外地表反射率比例系数，参考值可取 0.5；
 $b_{0.66/2.1}$ ——红波段和中红外地表反射率截距，参考值可取 0；
 $r_{0.47}^s$ ——蓝波段（0.47 μm 附近）的地表反射率；
 $a_{0.47/0.66}$ ——红蓝波段地表反射率比例系数，参考值可取 0.49；
 $b_{0.47/0.66}$ ——红蓝波段地表反射率截距，参考值可取 0.005；

考虑到中红外（2.1 μm 附近）波段处的反射率和红波段（0.66 μm 附近）的反射率之间的关系不仅与散射角相关，而且与植被的茂密程度有关（Kaufman et al., 1988; Remer et al., 2001）。如果卫星传感器设置有近红外波段（1.24 μm 附近），可通过计算气溶胶散射角和短波红外波段植被指数 $NDVI_{SWIR}$ (Tucker et al., 1979) 动态获取公式 (20) 中的比例系数 $a_{0.66/2.1}$

和截距 $b_{0.66/2.1}$ (Lorraine et al., 2006)。

气溶胶散射角可以由观测几何参数计算获得：

$$Q = \cos^{-1}(-\cos q_0 \cos q + \sin q_0 \sin q \cos f) \quad (22)$$

式中：

Q ——气溶胶散射角， $^{\circ}$ ；

q_0 ——太阳天顶角， $^{\circ}$ ；

q ——观测天顶角， $^{\circ}$ ；

f ——相对方位角， $^{\circ}$ 。

短波红外波段归一化植被指数 ($NDVI_{SWIR}$)，与通常采用归一化植被指数 ($NDVI$) 表示植被的茂密程度， $NDVI_{SWIR}$ 受到气溶胶散射影响更小。计算公式如下：

$$NDVI_{SWIR} = (r_{1.24}^{TOA} - r_{2.1}^{TOA}) / (r_{1.24}^{TOA} + r_{2.1}^{TOA}) \quad (23)$$

式中：

$NDVI_{SWIR}$ ——归一化短波红外植被指数；

$r_{1.24}^{TOA}$ ——近红外波段 ($1.24\mu\text{m}$ 附近) 的表观反射率；

$r_{2.1}^{TOA}$ ——中红外波段 ($2.1\mu\text{m}$ 附近) 的表观反射率。

在此基础上，红波段和中红外波段反射率比值和截距可以表示为短波红外归一化植被指数和气溶胶散射角的关系：

$$a_{0.66/2.1} = a_{0.66/2.1}^{NDVI_{SWIR}} + 0.002Q - 0.27 \quad (24)$$

$$b_{0.66/2.1} = -0.00025Q + 0.033 \quad (25)$$

$$a_{0.66/2.1}^{NDVI_{SWIR}} = 0.48; NDVI_{SWIR} < 0.25 \quad (26)$$

$$a_{0.66/2.1}^{NDVI_{SWIR}} = 0.48 + 0.2(NDVI_{SWIR} - 0.25); 0.25 \leq NDVI_{SWIR} \leq 0.75 \quad (27)$$

$$a_{0.66/2.1}^{NDVI_{SWIR}} = 0.58; NDVI_{SWIR} > 0.75 \quad (28)$$

式中：

$a_{0.66/2.1}^{NDVI_{SWIR}}$ ——基于短波红外归一化植被指数获取的红波段和中红外地表反射率比值系数；

$NDVI_{SWIR}$ ——归一化短波红外植被指数；

Q ——气溶胶散射角， $^{\circ}$ 。

确定暗象元地表反射率之后，然后根据卫星观测几何 (太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角)，对查找表进行线性插值，得到不同气溶胶光学厚度、不同气溶胶模式、不同波段下的大气的路径辐射等效反射率 (r_0)、大气透过率 ($T(m_0) \times \mathcal{T}(m_0)$) 和大气下界的半球反射率 (S) 等参数，根据公式 (1) 计算对应的模拟表观反射率，与卫星数据观测的对应波段表观反射率进行对比分析。

当查找出的 AOD、 h 对应的蓝波段 ($0.47\mu\text{m}$ 附近)、红波段 ($0.66\mu\text{m}$ 附近)、中红外 ($2.1\mu\text{m}$ 附近) 的模拟表观反射率和卫星观测到的表观反射率符合以下关系时，对应 AOD 值即为反演结果。

$$\begin{aligned} r_{0.47}^S - r_{0.47}^{TOA} &= 0 \\ r_{0.66}^S - r_{0.66}^{TOA} &= \min \\ r_{2.1}^S - r_{2.1}^{TOA} &= 0 \end{aligned}$$

式中：

- $r_{0.47}^{TOA}$ ——卫星监测的蓝波段（0.47 μm 附近）表观反射率；
- $r_{0.66}^{TOA}$ ——卫星监测的红波段（0.66 μm 附近）的表观反射率；
- $r_{2.1}^{TOA}$ ——卫星监测的中红外（2.1 μm 附近）波段的表观反射率；
- $r_{0.47}^S$ ——模拟计算蓝波段（0.47 μm 附近）的表观反射率；
- $r_{0.66}^S$ ——模拟计算红波段（0.66 μm 附近）的表观反射率；
- $r_{2.1}^S$ ——模拟计算中红外（2.1 μm 附近）波段的表观反射率。

4.6.2.2.4 亮象元 AOD 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。根据待反演卫星数据过境时间从地表反射率库中选择相应地表反射率数据，根据待反演亮象元的地理坐标，在地表反射率数据中匹配获取对应的地表反射率。

确定亮象元地表反射率之后，根据卫星观测几何（太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角），对查找表进行线性插值，得到不同气溶胶光学厚度、不同气溶胶模式、不同波段下的大气的路径程辐射等效反射率（ r_0 ）、大气透过率（ $T(\eta) \times \mathcal{T}(\eta)$ ）和大气下界的半球反射率（ S ）等参数，根据公式（1）计算对应的模拟表观反射率，与卫星数据观测点到的对应的各波段表观反射率进行对比分析，得到气溶胶光学厚度。

当查找出的 AOD、 h 对应的 0.47 μm （附近）、0.66 μm （附近）卫星实际观测到的地表反射率符合以下关系时，对应 AOD 值即为反演结果。

$$\begin{aligned} r_{0.47}^S - r_{0.47}^{TOA} &= 0 \\ r_{0.66}^S - r_{0.66}^{TOA} &= \min \end{aligned}$$

式中：

- $r_{0.47}^{TOA}$ ——卫星监测的蓝波段（0.47 μm 附近）表观反射率；
- $r_{0.66}^{TOA}$ ——卫星监测的红波段（0.66 μm 附近）的表观反射率；
- $r_{0.47}^S$ ——模拟计算蓝波段（0.47 μm 附近）的表观反射率；
- $r_{0.66}^S$ ——模拟计算红波段（0.66 μm 附近）的表观反射率。

4.6.2.2.5 区域 AOD 合成输出

将暗象元 AOD 和亮象元 AOD 合并输出为全区域 AOD 结果。

4.6.3 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。

4.6.4 数据匹配

利用地面监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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。

4.6.5 区域回归参数计算

根据监测原理形成 PM_{2.5} 浓度矩阵计算公式如下:

$$Y = Xb \quad (29)$$

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:

$$Y = \begin{pmatrix} \ln(M(PM_{2.5}(u_1, v_1))) \\ \ln(M(PM_{2.5}(u_2, v_2))) \\ \vdots \\ \ln(M(PM_{2.5}(u_n, v_n))) \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$X = \begin{pmatrix} \ln(AOD(u_1, v_1)) & \ln(HPBL(u_1, v_1)) & \ln(1 - RH(u_1, v_1)/100) \\ \ln(AOD(u_2, v_2)) & \ln(HPBL(u_2, v_2)) & \ln(1 - RH(u_2, v_2)/100) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln(AOD(u_n, v_n)) & \ln(HPBL(u_n, v_n)) & \ln(1 - RH(u_n, v_n)/100) \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$b = \begin{pmatrix} b_0(u_1, v_1) & b_0(u_2, v_2) & \dots & b_0(u_n, v_n) \\ b_1(u_1, v_1) & b_1(u_2, v_2) & \dots & b_1(u_n, v_n) \\ b_2(u_1, v_1) & b_2(u_2, v_2) & \dots & b_2(u_n, v_n) \\ b_3(u_1, v_1) & b_3(u_2, v_2) & \dots & b_3(u_n, v_n) \end{pmatrix} \quad (32)$$

式 30-32 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 AOD 自然对数;

$\ln(HPBL(u_i, v_i))$ ——第 i 个训练样本的 HPBL 自然对数;

$\ln(1 - RH(u_i, v_i)/100)$ ——第 i 个训练样本的 RH 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:

$$b(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (33)$$

公式 (33) 中 W 为权重函数对角矩阵:

$$W(u_i, v_i) = \begin{pmatrix} W_{i1} & 0 & L & 0 \\ 0 & W_{i2} & L & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & L & W_{in} \end{pmatrix} \quad (34)$$

公式 (34) 中 W_{ij} 计算方式如下:

$$W_{ij} = \exp(-[\frac{d_{ij}}{b}]^2) \quad (35)$$

公式 (35) 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, $d_{ij} = \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2}$;

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, cv) 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:

$$CV(\hat{b}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - y_{i_i}(\hat{b})]^2 \quad (36)$$

公式 (36) 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 (33) ~ (36) 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。最后, 根据矩阵计算方法获取的回归系数矩阵 \mathbf{b} , 采用克里金插值方法 (一般采用数据处理软件默认参数), 将回归系数矩阵 \mathbf{b} 的每一列一维向量值按照对应的坐标信息依据 AOD 的空间分辨率进行空间插值, 获取区域连续的回归系数。

4.6.6 区域 PM_{2.5} 遥感计算

根据目标区域中每个象元对应的 AOD、HPBL、RH 以及回归系数, 结合公式 (29) 逐象元计算 Y 值, 并进一步计算象元 PM_{2.5} 浓度。计算公式如下:

$$M(PM_{2.5}) = \exp(Y) \quad (37)$$

式中:

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

Y ——象元回归因变量;

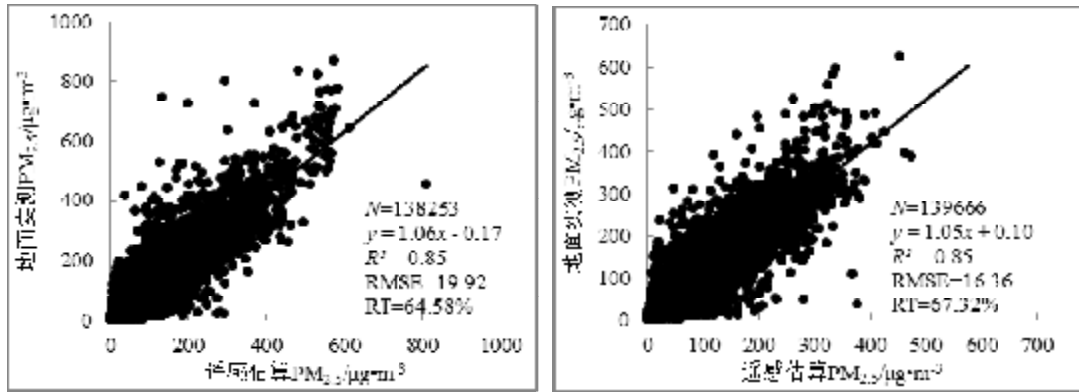
最后, 将所有计算象元 PM_{2.5} 浓度按照卫星遥感数据的投影方式和地理坐标系统存储, 形成区域 PM_{2.5} 浓度空间分布结果。

4.6.7 典型地区 PM_{2.5} 卫星遥感监测实验

以本指南确定的 PM_{2.5} 浓度遥感监测方法和数据处理流程, 利用 MODIS 和 WRF 模拟的气象资料对京津冀及周边地区 2016~2017 年每天的 PM_{2.5} 浓度情况进行遥感监测, 并合成计算日均、月均和年均这 3 种时间尺度 PM_{2.5} 浓度遥感产品。

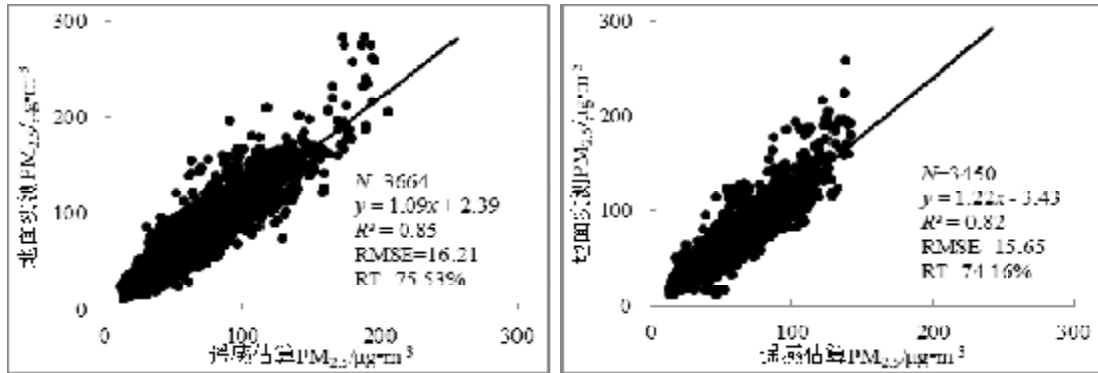
为检验本指南确定的细颗粒物遥感监测方法的可靠性和适用性, 将 2016 年和 2017 年北京 (12 个)、天津 (15 个)、山东 (100 个)、山西 (62 个)、河北 (53 个) 及河南 (75 个) 等地共 317 个地面空气质量自动监测站点 PM_{2.5} 结果按照日均、月均和年均这 3 种时间尺度进行合成计算, 并根据监测站点的地理位置, 从京津冀及周边地区 PM_{2.5} 卫星遥感监测分布结果中分别提取与地面站点时空相匹配的 PM_{2.5} 浓度进行相关分析 (见图 3~5), 并统计相关

参数评估不同时间尺度下 PM_{2.5} 遥感反演结果的可靠性 (表 6)。



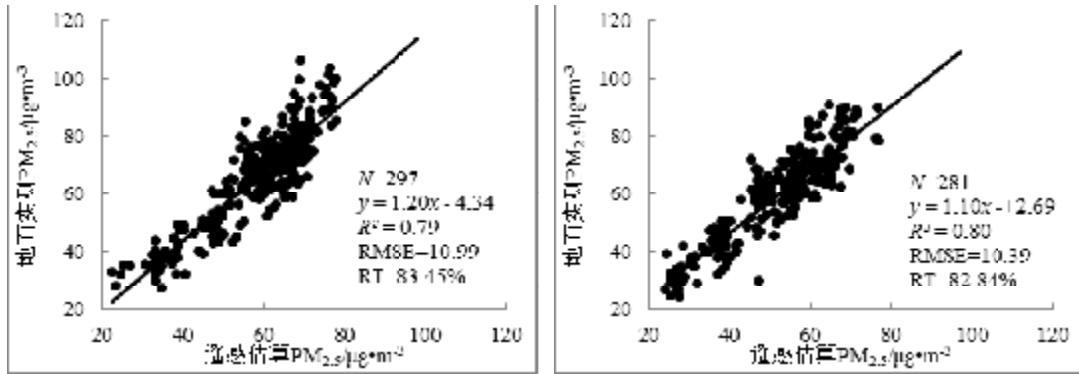
(a) 2016 年和 (b) 2017 年

图 3 2016 年和 2017 年 PM_{2.5} 日均遥感估算与地面监测结果对比情况



(a) 2016 年和 (b) 2017 年

图 4 2016 年和 2017 年 PM_{2.5} 月均遥感估算与地面监测结果对比情况



(a) 2016 年和 (b) 2017 年

图 5 2016 年和 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度遥感估算与地面监测结果对比情况

表 6 2017 年和 2016 年 PM_{2.5} 遥感估算与地面监测相关分析结果

| 时间尺度 | 年份 | 决定系数 (R^2) | 斜率 | 均方根误差 (RMSE) | 相对精度 ¹⁾ / % |
|------|------|-------------------|------|-----------------|---------------------------|
| 日均 | 2016 | 0.85 | 1.05 | 19.92 | 64.58 |
| | 2017 | 0.85 | 1.06 | 16.36 | 67.32 |
| 月均 | 2016 | 0.85 | 1.09 | 16.21 | 75.53 |

| | | | | | |
|----|------|------|------|-------|-------|
| | 2017 | 0.82 | 1.22 | 15.65 | 74.16 |
| 年均 | 2016 | 0.79 | 1.20 | 10.99 | 83.45 |
| | 2017 | 0.80 | 1.10 | 10.39 | 82.84 |

1) 相对精度=1-PM_{2.5}拟合均方根误差/PM_{2.5}平均浓度值

从卫星遥感监测 PM_{2.5} 结果与地面站点监测结果比对情况来看，总体上采用本指南确定的方法所获取的卫星遥感 PM_{2.5} 产品与地面测量结果在日均、月均和年均这 3 种时间尺度上均表现出较高的相关性，二者决定系数基本都在 0.8 以上；卫星遥感结果略低于地面观测结果，二者比例系数在 1.00~1.22 之间；卫星遥感产品精度总体较好，均方根误差在 10~20μg·m⁻³ 之间，相对精度均在 60% 以上。总体上，本指南确定的 PM_{2.5} 遥感监测方法效果较为理想，根据该模型计算的 1km 分辨率 PM_{2.5} 产品精度能表现京津冀及周边地区的 PM_{2.5} 时空变化特征，基本满足对该地区 PM_{2.5} 时空分布特征分析需要。

从不同时间尺度对比情况分析，总体上卫星遥感 PM_{2.5} 日均浓度产品与地面结果相关性最好(决定系数 R² 均为 0.85)，但与地面观测结果误差相对最大(均方根误差大于 11μg/m⁻³)，相对精度最低(低于 70%)；而卫星遥感 PM_{2.5} 年均浓度产品虽然与地面结果相关性略低，但误差最小(均方根误差小于 11μg/m⁻³)，且相对精度最高(达 80% 以上)。这主要是因为时间尺度越小，PM_{2.5} 时空分布特征的不确定性越大，数据噪声对卫星遥感反演结果影响也越大，一般情况下卫星遥感反演结果都存在不同程度的“高值低估、低值高估”的问题，卫星遥感反演结果的偏差并不是全部都单一为正偏差或者负偏差，而是二者兼而有之，因此随着时间尺度的加大，越接近平均值则误差会越小，相对精度则越高。

值得注意的是，2016 年和 2017 年 MODIS 遥感估算与地面观测线性相关分析结果表明，同一时间尺度 PM_{2.5} 遥感与地面观测结果的决定系数、均方根误差、相对精度、比例系数、相对精度等各项统计指标均较为接近，这说明本指南确定的 PM_{2.5} 遥感监测方法较为稳定，具备较好的稳定性、适用性和实用性。

4.7 监测结果验证方法的选择

目前，常用的对比验证方法有随机子抽样验证(Hold-Out Method)、K 折交叉验证(K-fold Cross Validation)、留一法交叉验证(Leave-One-Out Cross Validation)。

随机子抽样验证是将原始输入数据集随机分为两组，其中，一组作为训练集，另一组作为验证集，在利用训练集训练拟合模型参数后，利用验证集验证模型，并统计相关参量评估模型的性能指标。

K 折交叉验证是将原始输入数据集随机均分成 K 组，轮流将每个子集数据分别做一次验证集，其余的 K-1 组子集数据作为训练集，这样会拟合得到 K 个模型，用这 K 个模型最终验证集的评估参数的平均数作为此 K-CV 下模型的性能指标，K 一般大于等于 2，实际操作时一般从 3 开始取，只有在原始数据集合数据量小的时候才会尝试取 2。而 K-CV 的实验共需要建立 k 个 models，并计算 k 次 test sets 的平均识别率。在实作上，k 要够大才能使各回合中的训练样本数够多，一般而言 k=10(作为一个经验参数)较为常用。

留一法交叉验证是将原始输入数据集中(假设有 N 个样本)的每个样本单独作为验证集，其余的样本作为训练集，通过训练得到 N 个模型，用这 N 个模型最终的验证集的相关

统计参量的平均值评估模型的性能指标。

表 7 常用对比验证方法优缺点分析

| 对比验证方法 | 优势 | 缺点 |
|---------|--|---|
| 随机子抽样验证 | 处理简单, 只需随机把原始数据分为两组即可, 计算量相对较小。 | 有部分样本从未做过训练或测试数据, 而有部分样本不止一次选为训练或测试数据。另外训练集样本数太少, 通常不足以代表母体样本的分布, 导致模型的拟合结果验证缺乏代表性。 |
| K 折交叉验证 | 使得每一个样本数据都既被用作训练数据, 也被用作测试数据, 可以有效的避免过学习以及欠学习状态的发生, 最后得到的结果也比较具有说服力。 | K 值的选择相对较为主观。 |
| 留一法交叉验证 | 每一次训练中几乎所有的样本皆用于训练模型, 因此最接近原始样本的分布; | 计算成本高, 当样本量非常大时, 计算耗时较长。并且当样本间差异不显著时, 存在部分训练结果重复率较高, 冗余计算量较大。 |

综合考虑 $PM_{2.5}$ 浓度分布特征和上述 3 种方法的优劣, 本指南选择采取十折交叉验证 (ten-fold cross validation) 方法验证卫星遥感获取的区域 $PM_{2.5}$ 浓度监测结果。

根据本指南形成的输入数据集, 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 $PM_{2.5}$ 浓度反演训练样本数据, 依据本指南的 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 浓度预测结果, 将预测值和 $PM_{2.5}$ 浓度监测结果进行线性相关分析, 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 $PM_{2.5}$ 浓度预测结果在实际应用中的准确性。

4.8 质量控制

为保证细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测结果质量, 在进行 $PM_{2.5}$ 浓度遥感监测的数据预处理前, 要保证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。另外, 为提高 $PM_{2.5}$ 浓度遥感监测结果的准确度, 一方面要保证输入参数 AOD、HPBL 和 RH 的相对精度均达 80% 以上。另一方面, 要根据目标区域情况保证足够的地面观测结果, 1 万平方公里有至少 3 个监测点位的观测资料。

5 对实施本标准的建议

为保证本标准的有效实施, 建议加强以下两方面工作:

——为保证本标准的有效实施, 建议遥感技术监测方法的培训、宣传力度, 保证各有关

监测部门遵循标准的有关规定开展监测工作；

——建议加强细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 遥感监测结果应用、超细颗粒物 (PM_1) 遥感监测等科研工作。随着环境管理要求及技术的不断发展，适时对标准进行修订，不断扩展监测内容，制定针对不同卫星遥感数据源的技术规范，不断推动、深化标准工作。

6 参考文献

- [1] Busen, R., and G. Hanel (1987), Radiation budget of the boundary layer, Part1: Measurement of absorption of solar radiation by atmospheric particles and water vapour, Beitr. Phys. Atmos., 60(2), 229–240.
- [2] 陈辉, 厉青, 张玉环, 周春艳, 王中挺.2016.基于地理加权模型的我国冬季 $PM_{2.5}$ 遥感估算方法研究[J], 环境科学学报, 36 (6) : 2142-2151
- [3] 陈辉, 厉青, 王中挺, 毛慧琴, 周春艳, 张丽娟.2014.利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 $PM_{2.5}$ 方法研究[J].气象与环境学报, 30(5):27-37.
- [4] Donkelaar, A. V., Martin, R. V., Park, R. J., (2006). Estimating ground-level $PM_{2.5}$ using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. Journal of Geophysics Research.2006, 111, D21201, 1-10.
- [5] Deuze J L, Breon F M, Devaux C, et al.Remote sensing of aerosols over land surface from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106(D5):4913-4926
- [6] Engel-Cox J A, Hoff R M, Rogers R, et al. Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. Atmos Environ, 2006, 40: 8056–8067
- [7] Fang, X., Zou, B., Liu, X., Sternberg, T., Zhai, L., 2016. Satellite-based ground $PM_{2.5}$ estimation using timely structure adaptive modeling. Remote Sens.Environ.186, 152–163.
- [8] Hsu N.C., Jeong M.-J., Bettenhausen C..et.al.Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm:The second generation, Journal of geophysical research:Atmosphere.2013, 118(16):9296-9315, doi:10.1002/jgrd.50712.
- [9] Hu X, Waller LA, Al-Hamdan MZ, Crosson WL, Estes MG Jr, Estes SM, Quattrochi DA, Sarnat JA, Liu Y.2013.Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in the southeastern U.S. using geographically weighted regression[J].Environment Research, 121:1-10.
- [10] Im J, Saxena V K, Wenny B N, et al. An assessment of hygroscopic growth factors for aerosols in the surface boundary layer for computing direct radiative forcing. J Geophys Res, 2001, 106: 20213–20224
- [11] 贾松林, 苏林, 陶金花, 王子峰, 陈良富, 尚华哲.2014.卫星遥感监测近地表细颗粒物多元回归方法研究[J].中国环境科学, 34 (3) : 565-573
- [12] Jiansheng Wu, Fei Yao, Weifeng Li, Menglin Si.2016. VIIRS-based remote sensing estimation of ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing–Tianjin–Hebei: A spatiotemporal statistical model[J]. Remote Sensing of Environment 184: 316–328
- [13] Kasten, Fritz. Visibility forecast in the phase of pre-condensation.Tellus, 21, 631-635, 1969
- [14] Kaufman, Y, J, and R.S. Fraser, Light Extinction by Aerosols During Summer Air

- Pollution, *J. Appl. Meteor.*, 22, 1694-1706, 1983.
- [15] Kaufman, and C. Sendra. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 1988, 9: 1357-1381.
- [16] Kotchenruther R A, Hobbs P V, Hegg D A. Humidification factors for atmospheric aerosol off the mid-Atlantic coast of the United States. *J. Geophys Res*, 1999, 1043: 2239-22511
- [17] Kotchenruther R A, Hobbs P V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *J Geophys Res*, 1998, 103: 32081-32089
- [18] Levy R. C., Remer L. A., Mattoo S, et.al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D13):3710-3711.
- [19] Li L J, Wang Y, Zhang Q, et al. Spatial distribution of aerosol pollution based on MODIS data over Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19:955-960
- [20] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 I): 177-186
- [21] 刘新罡. 大气气溶胶吸湿性质观测、模型研究——以北京、珠江三角洲地区为例. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2008. 67-121
- [22] Liu Yang, Christopher J. Paciorek, Petros Koutrakis. 2009. Estimating Regional Spatioal and Temporal Variability of PM_{2.5} Concentrations Using Statellite Data, Meteorology, and Land Use information[J]. *Health Perspect.* 117, 886-892.
- [23] Liu, Y., Sarnat, J. A., Kilaru, V., et al. Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing. *Environmental Science and Technology*. 2005, 39, 3269-3278.
- [24] Liu Y, Park RJ, Jacob DJ, Li Q, Kilaru V, Sarnat JA. 2004a. Mappig annual mean ground - level PM_{2.5} concentrations using Multi-angle Imaging Spectro radiometer aerosol optical thickness over the contiguous Unhied States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109.
- [25] Liu Y, Franklin M, Kahn R, Koutrakis P. 2007a. Using aerosol optical Thickness predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 107:33-44.
- [26] Liu Y, Paciorek CJ, Koutrakis P. 2009. Estimating regional spatial and Temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data; meteorology, and land use information. *Environmental Health Perspectives* 117:886-892.
- [27] Liu Y. 2013. New Directions: Satellite driven PM_{2.5} exposure models to support targeted particle pollution health effects research. *Atmospheric Environment* 68:52-53.
- [28] Lorraine A. Remer, Didier Tanré and Yoram. Kaufman. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: collection 5, Unpublished, 2006.
- [29] Lu Xiao, Yichao Lang, George Christakos. 2018. High-resolution spatiotemporal mapping of PM_{2.5} concentrations at Mainland China using a combined BME-GWR technique[J]. *Atmospheric Environment* 173: 295-305.
- [30] Lv, B., Hu, Y., Chang, H.H., Russell, A.G., Bai, Y., 2016. Improving the accuracy of daily PM_{2.5} distributions derived from the fusion of ground-level measurements with aerosol optical depth observations, a case study in North China. *Environ. Sci. Technol.* 50, 4752-4759.

- [31] Lyapustin, A., Wang, Y., Laszlo, I., Kahn, R., Korkin, S., Remer, L., et al. (2011). Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 116.
- [32] Lyapustin, A., Martonchik, J., Wang, Y. J., Laszlo, I., & Korkin, S. (2011). Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 116.
- [33] Ma Z, Hu X, Huang L, Bi J, Liu Y. 2014. Estimating ground-Level PM_{2.5} in China using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology* 48:7436-7444.
- [34] Ma, Z.W., Hu, X.F., Huang, L., Bi, J., Liu, Y., 2014. Estimating ground-level PM_{2.5} in China using satellite remote sensing. *Environ. Sci. Technol.* 48, 7436–7444.
- [35] Ma, Z.W., Hu, X.F., Sayer, A.M., Levy, R., Zhang, Q., Xue, Y.G., Tong, S.L., Bi, J., Huang, L., Liu, Y., 2016. Satellite-based spatiotemporal trends in PM_{2.5} concentrations: China, 2004-2013. *Environ. Health Perspect.* 124, 184–192.
- [36] 马宗伟. 2015. 基于卫星遥感的我国 PM_{2.5} 时空分布研究[D]. 南京大学
- [37] Martonchik J V, Diner D J, Kahn R A, et al. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36(4): 1212-1227
- [38] Remer L A, Wald A E, Kaufman Y J. Angular and seasonal variation of spectral surface reflectance ratios: Implications for the remote sensing of aerosol over land, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 275-283.
- [39] Song, W., Jia, H., Huang, J., Zhang, Y., 2014. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM_{2.5} estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sens. Environ.* 154, 1–7.
- [40] 陶金花, 张美根, 陈良富, 王子峰, 苏林, 葛萃, 韩宵, 邹铭敏. 2012. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法[J]. *中国科学: 地球科学*, 43 (1) : 143-154.
- [41] Tanre D, Deschamps P Y, Devaux C, et al. Estimation of Saharan aerosol optical Thickness from blurring effects in thematic mapper data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 93(D12): 15W5-15964.
- [42] Tsai T-C, et al. Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical and particulate matter from 2006-2008, *Atmospheric Environment*(2009).
- [43] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [44] van Donkelaar A, Martin RV, Park Rj. 2006. Estimating ground-level PM_{2.5} with aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111:021201
- [45] van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, Kahn R, Levy R, Verduzco C, Villeneuve PJ. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental Health Perspectives* 118:847.
- [46] van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, Boys BL 2014. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental Health Perspectives advance publication*.

- [47] Vermote, Eric, D. Tanre, J. L. Deuze, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum 6S: An overview, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1997, 35: 675-686.
- [48] Waggoner, A.P., and R.E. Weiss, 1980: Comparison of fine particle mass concentration and light scattering extinction in ambient aerosol. Atmos. Environ., 14, 623-626.
- [49] Wang, J., and S.A. Christopher, Inter comparison between Satellite-Derived Aerosol Optical Thickness and PM_{2.5} Mass. *Geophysical Research Letters*, 2003.
- [50] Wang Z F, Chen L F, Tao J H, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. Remote Sens Environ, 2010, 114: 50-63
- [51] White W.H., Roberts P. T.. On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin. Atmospheric Environment, 1977, 11(9):803-812
- [52] 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005. 298-299
- [53] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 刘玉彻. 2012. 大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 28 (3) : 77-82.
- [54] You, W., Zang, Z., Zhang, L., Li, Y., Pan, X., Wang, W., 2016a. National-scale estimates of ground-level PM_{2.5} concentration in China using geographically weighted regression based on 3 km resolution MODIS AOD. Remote Sens. 8.
- [55] You, W., Zang, Z., Zhang, L., Li, Y., Wang, W., 2016b. Estimating national-scale groundlevel PM_{2.5} concentration in China using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. Environ. Sci. Pollut. Res. 23, 8327-8338.
- [56] 张莹, 李正强. 2013. 利用细模态气溶胶光学厚度估计 PM_{2.5}[J]. 遥感学报, 17(4):929-943.
- [57] Zou, B., Pu, Q., Bilal, M., Weng, Q., Zhai, L., Nichol, J.E., 2016. High-resolution satellite mapping of fine particulates based on geographically weighted regression. Ieee Geosci. Remote Sens. Lett. 13, 495-499.