

大气环境卫星污染气体和大气颗粒物 协同观测综述

张莹¹, 李正强¹, 赵少华², 张兴赢³, 林金泰⁴, 秦凯⁵,
刘诚⁶, 张元勋⁷

1. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;
2. 生态环境部 卫星环境应用中心, 北京 100094;
3. 国家卫星气象中心 环境卫星辐射定标与验证重点实验室, 北京 100081;
4. 北京大学 物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;
5. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;
6. 中国科学技术大学 工程科学学院, 合肥 230027;
7. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 空气污染作为一种重要的环境问题, 直接影响人们的日常生活和身体健康。随着污染气体和颗粒物观测技术的逐步成熟, 基于卫星平台的近地层大气污染物监测得到了快速的发展。本文概括性描述了大气环境关注的污染气体和大气颗粒物的主流遥感方法, 对各方法的适用场景及优缺点进行了评述。尽管差分吸收光谱方法对污染气体的监测十分有效, 但最优估计算法可进一步从多光谱信息中提取部分污染气体(例如: 臭氧O₃、一氧化碳CO等)的分层信息, 有助于更细致地刻画污染气体在整层大气中的垂直分布。对于大气颗粒物遥感方法, 采用不同的技术手段进行地气解耦是算法的核心问题, 增加光谱、角度、偏振以及时间序列信息都可有效增加算法的地气解耦能力。基于对污染气体和大气颗粒物反演算法的总结, 从污染气体和颗粒物协同观测的角度对卫星平台及传感器的发展历程进行了梳理, 论述了紫外、红外以及可见光波段的传感器协同观测的优势, 展望了未来静止卫星星座的高时空分辨率大气污染监测能力以及中国卫星的贡献。还探讨了以近地面大气污染物监测卫星探测技术及遥感算法亟待解决的问题以及未来的可能发展方向。

关键词: 卫星, 污染气体, 颗粒物, 大气环境, 遥感, 协同观测

引用格式: 张莹, 李正强, 赵少华, 张兴赢, 林金泰, 秦凯, 刘诚, 张元勋. 2022. 大气环境卫星污染气体和大气颗粒物协同观测综述. 遥感学报, 26(5): 873-896

Zhang Y, Li Z Q, Zhao S H, Zhang X Y, Lin J T, Qin K, Liu C and Zhang Y X. 2022. A review of collaborative remote sensing observation of atmospheric gaseous and particulate pollution with atmospheric environment satellites. National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 873-896 [DOI: 10.11834/jrs.20211392]

1 引言

大气圈层为地球上的生命提供关键的保护, 同时也受到人类活动的污染排放影响。19世纪, 欧洲工业地区不断发生死亡事件, 这使人们将空气污染与人类健康联系在一起, 其中最为典型的是“伦敦雾”和“洛杉矶型”烟雾重大污染事件。在所谓的“London Killer Smog”期间, 短短4天伦

敦死亡人数增加约4000人, 其主要原因是化石燃料燃烧排放的二氧化硫(SO₂)经过光化学氧化, 产生包含硫酸液滴及硫酸盐的气溶胶, 它们与煤烟颗粒混合, 对人体健康产生了严重影响。而“洛杉矶型”烟雾主要是由于汽车尾气和工业排放的氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和挥发性有机化合物(VOCs)发生光化学反应, 产生大量臭氧、羰基化合物和有机气溶胶(Finlayson-Pitts和

收稿日期: 2021-06-08; 预印本: 2021-09-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金(编号: 41925019); 海南省重点研发计划科技合作方向项目(编号: ZDYF2020206)

第一作者简介: 张莹, 研究方向为大气遥感。E-mail: zhang_ying@aircas.ac.cn

通信作者简介: 李正强, 研究方向为环境遥感研究。E-mail: lizq@radi.ac.cn

Pitts, 2000; Haagen-Smit, 1952), 最终导致洛杉矶的农作物受损, 居民的鼻、眼出现严重不适 (Haagen-Smit 和 Fox, 1954; Haagen-Smit, 1952; Finlayson-Pitts 和 Pitts, 2000)。另外, 由于人类活动排放的二氧化硫和氮氧化物, 在大气中被氧化生成硫酸盐和硝酸盐气溶胶, 这些酸性气溶胶伴随着云雨过程沉降到生态系统 (Charlson 和 Rodhe, 1982), 致使森林减少、湖泊酸化, 即所谓的酸雨危害。虽然, 在许多国家的治理下, 酸雨现象已被逐步改善, 但它仍然是一些发展中国家的环境问题之一。无论是烟雾污染还是酸雨事件, 都是由于人为排放的污染气体及大气颗粒物诱发。因此, 污染物的准确测量是评估和减轻人为排放对环境的影响、针对空气污染和其他环境问题实施科学减排策略的关键 (Wang 等, 2021)。

大气污染气体主要包含臭氧、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等, 是大气痕量成分的一部分。大气痕量成分的定量测量可以追溯到 180 多年前, Schönbein (1840) 发现氧气在电火花作用下生成一种有气味的气体, 并命名了大气中臭氧。从那时起, 探测痕量成分浓度的各种分析方法开始发展起来。Cornu (1879) 在测量太阳紫外光谱时发现, 波长小于 300 nm 太阳辐射随波长减小而迅速下降, 并指出该现象是由于大气中存在吸收物质导致的。Hartley (1880) 将太阳光谱测量中强度迅速下降的边缘波长与在实验室中观察到的各种物质的吸收波长进行逐一比较, 发现这一大气中的吸收物质可能是臭氧。然而, 由于该波长的辐射强度很低, 所以很难对接近该边缘波长的辐射进行定量测量。为此, Fabry 和 uisson (1913) 设计了双摄谱仪, 以减少来自相对较长波长的杂散光。1913 年, 他们利用该仪器对太阳光谱的边缘波长进行了精确的测量。根据这些测量结果, 推断大气中臭氧的总量相当于常温常压下 5 mm 厚的一层。在 20 世纪 20 年代中期, Dobson (1931) 发明了一种新型分光计, 并用这台光谱仪首次对大气中的臭氧总量进行了定期测量。Migeotte (1948, 1949) 利用光谱方法进一步发现了地球大气中的甲烷和一氧化碳两种痕量气体。从那时起, 光谱方法在大气成份测量及大气化学和物理过程研究中都发挥了重要作用 (例如: Bates 和 Nicolet (1950) 首次明确识别了夜气辉中羟基自由基 (OH) 的作用、Perner 等 (1976) 首次探测了对流

层的 OH 自由基等)。

尽管地面光谱仪器对大气痕量成分的测量已较好发展, 而大范围痕量气体的测量则更依赖于卫星遥感技术。Farman 等 (1985) 基于 Nimbus-7 上携带的 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 传感器对臭氧分布进行了研究, 他们发现了一个反复在春季出现的南极臭氧洞, 这也是卫星遥感探测大气痕量成分的重要开端。

对大气环境的空间探测而言, 将光谱技术应用到卫星遥感就必须考虑太阳能量散射到探测器的效率以及不同光路的消光作用, 包括污染气体吸收、分子散射及大气气溶胶的消光等。因此, 大气颗粒物不仅是与污染气体伴生的污染物, 而且其光学特性是污染气体卫星遥感中重要辅助参量。针对大气环境监测卫星, 当前的趋势是通过搭载多功能的传感器组合, 实现污染气体和颗粒物的同平台联合探测。这种观测方式能够有效消除“非协同”观测带来的时空不匹配、观测对象不对应等问题, 是大气环境监测卫星的一个重要方向。国内外学者对大气污染气体 (Abad 等, 2019; Clerbaux 等, 2003; 张兴赢 等, 2007) 和大气颗粒物 (Shin 等, 2019; Zhang 等, 2021) 分别进行了较全面的综述。然而针对污染气体和气溶胶协同观测卫星的综合性论述仍较少。

本文梳理了 1978 年—2020 年以来国内外发射的对流层污染气体与大气颗粒物协同观测的 21 个卫星系列 (其中紫外—可见光类型的 13 个, 红外类型的 9 个), 介绍了污染气体及颗粒物的反演方法, 总结和展望了污染气体与颗粒物协同观测的卫星探测技术发展趋势及方向。需要说明的是, 本文旨在探讨影响人们生活的污染物监测, 因此仅涉及天底指向的卫星传感器, 并未关注临边或掩星等遥感中高层大气探测方式的传感器。

2 污染气体和大气颗粒物的卫星遥感方法

2.1 污染气体卫星遥感算法

在众多的光谱技术中, 差分光学吸收光谱 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy, 详见 2.1.1 节) 已被证明是测量各种污染气体的有效方法之一 (Platt 和 Stutz, 2008)。差分吸收技术也是首次在对流层和平流层检测到 OH 自由基等的

有效方法。对污染气体的明确识别使 DOAS 方法成为研究大气化学和物理的独特工具。与 DOAS 不同，波段残差 BRD (Band Residual Difference, 详见 2.1.2 节) 算法也是求解污染气体的常用算法, 例如, 臭氧监测仪 OMI (Ozone Monitoring Instrument) 的二氧化硫气体官方算法就是采用 BRD 算法。该方法利用 4 个独立波段形成 3 个大差分吸收, 以此提高对低浓度污染气体识别能力。同样, 在 BRD 算法基础上, 使用更多独立波段的线性拟合法进一步将吸收波段扩展至 10 个, 通过多波段拟合反演污染气体柱含量。尽管利用以上方法可求得污染气体的柱浓度, 但无法获得垂直廓线信息。也就是说, 当 (有效) 观测信息数量低于垂直层数时, 则需使用最优估计方法。最优估计方法是一种广泛用于遥感数据反演大气特性 (Rodgers, 2000) 的数学方法, 也常被应用于大气气溶胶的反演。

2.1.1 差分吸收光谱方法

DOAS 方法的基本原理是当光穿过一段大气时, 它的强度由于被某种待测污染气体吸收而降低。当然, 其他污染气体的吸收、大气中的分子和气溶胶粒子散射也对光强的消弱产生贡献。同时, 光强也受到仪器设计指标和大气分子碰撞等的影响 (Platt 和 Stutz, 2008)。为了综合考虑影响光强的各种因素, 需建立一个包含各种气体浓度 c_j 、吸收截面 $\sigma_j(\lambda)$ 、瑞利散射 $\varepsilon_R(\lambda)$ 和米散射 $\varepsilon_M(\lambda)$, 以及仪器影响及湍流影响 $A(\lambda)$ 的方程 (图 1)。当入射光强为 $I_0(\lambda)$ 时, 基于扩展朗伯特-比尔定律, 接收到的光强可表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left(-L \cdot \left(\sum_j (\sigma_j(\lambda) \cdot c_j) + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)\right)\right) \cdot A(\lambda) \quad (1)$$

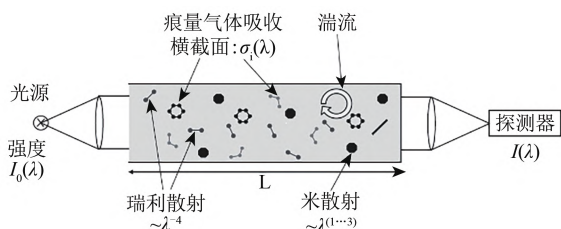


图 1 DOAS 方法原理及影响要素示意图 (Platt 和 Stutz, 2008)

Fig.1 Schematic Diagram of DOAS and Key Factors (Platt and Stutz, 2008)

式中, L 为光程长度, λ 为波长, $A(\lambda)$ 为衰减因子。

要确定某一特定污染气体的浓度, 原则上必须对影响其浓度的所有其他因素进行量化, 然而这在实际大气中很难实现。由于气溶胶消光过程、湍流效应和许多污染气体的总体吸收体现出随光谱缓慢变化特征, 而污染气体表现出窄带吸收结构。因此, DOAS 的基础是在可靠高光谱观测的条件下, 通过在吸收光谱中分离宽带和窄带光谱结构, 以分离这些狭窄的污染气体吸收。因此, 式 (1) 中的吸收截面可分解为

$$\sigma_j(\lambda) = \sigma_{j0}(\lambda) + \sigma'_j(\lambda) \quad (2)$$

式中, σ_{j0} 是随波长变化“缓慢”的部分, σ'_j 是随波长“快速”变化的部分, 是由于吸收带引起的。将式 (2) 带入式 (1) 可得

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left(-L \cdot \left(\sum_j (\sigma'_j(\lambda) \cdot c_j)\right)\right) \cdot \exp\left(-L \cdot \left(\sum_j (\sigma_{j0}(\lambda) \cdot c_j) + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)\right)\right) \cdot A(\lambda) \quad (3)$$

式中, 第 1 个指数结构描述了污染气体吸收与缓慢变化部分的差异, 而第 2 个指数结构描述缓慢变化的吸收部分以及瑞利和米散射。定义 $I'_0(\lambda)$ 为没有差分吸收时的强度:

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left(-L \cdot \left(\sum_j (\sigma_{j0}(\lambda) \cdot c_j) + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)\right)\right) \cdot A(\lambda) \quad (4)$$

因此, 差分吸收光学密度被定义为

$$D' = \ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)} = L \cdot \sum_j (\sigma'_j(\lambda) \cdot c_j) \quad (5)$$

由于污染气体都具有典型的吸收带, 因此这些吸收带可区别它们的种类。由式 (5) 可进一步推得污染气体在平均光路上的浓度:

$$c_j \cdot L = \frac{\ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)}}{\sigma'_j(\lambda)} = \frac{D'}{\sigma'_j(\lambda)} \quad (6)$$

DOAS 可分为主动和被动。被动 DOAS 的主要光源是太阳和月亮, 太阳光源又分为直射和散射光测量。卫星遥感使用的 DOAS 采用的是太阳散射光源, 需要分两步反演污染气体的垂直柱密度 (VCD), 因此也被称作两步反演 (Abad 等,

2019)。第一步是反演污染气体斜柱密度 (SCD)，对探测获得的像元强度表达式取对数并线性化，以最小二乘拟合该多项式，多项式中包含待测污染气体吸收截面、宽带污染气体吸收截面、瑞利和米散射截面、仪器衰减、噪声和 Ring 效应 (Grainger 和 Ring, 1962) 等。拟合获得的多项式系数就是污染气体的浓度与光学路径的乘积，即 SCD。然后利用辐射传输方程计算大气质量因子 (AMF)，将 SCD 转换为遥感反演所需的 VCD。在这个过程中，大气气溶胶对 AMF 的计算有较显著的影响 (尤其在大气气溶胶浓度条件下) (Lin 等, 2014; Lorente 等, 2016)。

2.1.2 波段残差法

尽管 DOAS 算法在污染气体反演上表现出色，但在污染气体柱含量较低的情况下其误差增加 (闫欢欢 等, 2017)。波段残差 (BRD) 算法是在紫外波段 (310—365 nm) 区域内只使用 4 个波段反演大气柱 SO_2 浓度 (Krotkov 等, 2006)。这 4 个波段是集中在 310.8—314.4 nm 的 SO_2 吸收截面的局部极小值和极大值 (图 2)。这种选择使 BRD 技术能够利用相邻波段形成的 3 对大差分吸收，最大限度地提高低含量 SO_2 的反演灵敏度。在 BRD 算法中，首先使用 TOMS 总臭氧反演 (Bhartia 和 Wellmeyer, 2002) 获得总臭氧的初始估计值 (假设 SO_2 为零) 以及波长无关的朗伯有效反射率。然后将臭氧浓度和朗伯有效反射率输入紫外辐射传输模型，得到 3 对波段残差值。迭代不同的 SO_2 浓度作为输入的模拟波段残差与观测对比，可实现 SO_2 柱浓度的反演。尽管 BRD 算法在 SO_2 较低的时候表现良好，但在高浓度吸收气体存在时仍出现低估 (闫欢欢 等, 2017)。

2.1.3 线性拟合法

线性拟合算法是基于光谱拟合技术 (Joiner 和 Bhartia, 1997) 用于从全光谱测量中获取臭氧。Yang 等 (2004) 将它进一步扩展成为仅使用几个离散的紫外波段即可同时反演臭氧、 SO_2 和地表反射率的方法。算法使用的波长参考 OMI 的臭氧算法所使用的波段，包括 6 个 TOMS 的波长和 4 个 BRD 算法使用的波长 (图 3)。一般的，大气顶辐射率应是臭氧和二氧化硫垂直分布的函数。然而，由于在大多数观测条件下，波长大于 310 nm 的廓

线形状效应较弱，而且卫星测量的不确定性不可忽视，这些测量中包含的垂直分布信息通常有限，无法详细地反演污染气体的廓线。因此，通过先验的臭氧和 SO_2 的垂直分布对反演进行约束 (Yang 等, 2007)。这样，大气顶的辐射率就成为了污染气体柱总量的函数。与 BRD 算法类似，该算法也假设地表为朗伯地表近似。利用紫外辐射传输模型，通过调整两种污染气体 (SO_2 和 O_3) 的含量以及地表反射率模拟大气顶辐射率，直到正演模型的模拟值与选定波长的测量值匹配。该方法足以用于 SO_2 和 O_3 的遥感反演，但并不能充分发挥 OMI 传感器测量的全部光谱的潜力 (Yang 等, 2007)。Li 等 (2017) 借鉴线性拟合法的思路，进一步发展了主成分分析 PCA (Principal Component Analysis) 方法。该算法在光谱拟合中直接使用 OMI 观测的辐射特征，减少各种地球物理过程 (如 O_3 吸收) 和测量误差 (如波长位移)，有效减少了线性拟合 (LF) 算法的噪声和伪影。

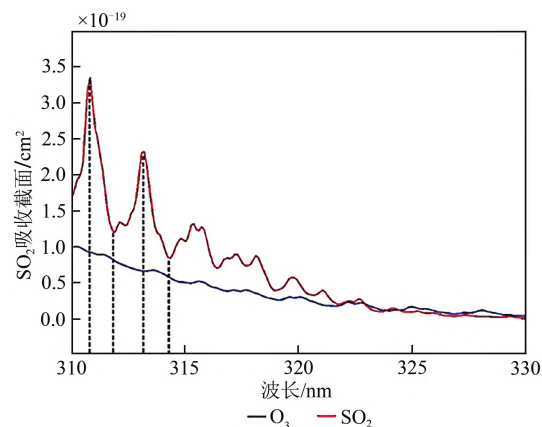


图 2 O_3 和 SO_2 在紫外波段的吸收光谱。黑色虚线指示了 4 个被用于 SO_2 波段残差法反演的波长 (310.8 nm, 311.9 nm, 313.2 nm, 314.4 nm) (Yan 等, 2012)

Fig 2 O_3 and SO_2 absorption spectrum in UV band. The black dashed lines label the four wavelengths (310.8 nm, 311.9 nm, 313.2 nm, 314.4 nm) used in the SO_2 BRD retrieval (Yan et al., 2012)

2.1.4 最优估计法

最优估计 OE (Optimal Estimation) 算法是在具有先验信息 (包括先验误差协方差矩阵) 的前提下，提取参数值及其误差的一种方法，目前主要用于 O_3 垂直廓线及一氧化碳等污染气体反演中。OE 方法首先从多种观测及模拟中获得大气温度廓

线、水汽廓线、地表温度和地表发射率等。这些信息和初步猜测的污染气体吸收截面被用作正向模型的输入 (Strow 等, 2003)。然后利用高斯—牛顿方法更新状态矢量 (Rodgers), 最小化观测辐射与正演模型计算辐射之间的差异。从而, 迭代求得所需的污染气体廓线。优化估计算法实现最小化过程的价值函数被定义为

$$\chi^2 = (\mathbf{y} - F(\mathbf{x}))^T \mathbf{S}_e^{-1} (\mathbf{y} - F(\mathbf{x})) + \gamma (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) \quad (7)$$

式中, \mathbf{y} 为不同波长下观测的反射率向量, $F(\mathbf{x})$ 为正向模型计算获得的反射率, 也称正演模型, \mathbf{x} 是状态矢量, 包含待拟合的参数向量, \mathbf{S}_e 为测量误差协方差矩阵, 假设测量误差不相关时为对角矩阵, \mathbf{x}_a 为先验状态向量, \mathbf{S}_a 为先验误差协方差矩阵。 γ 是正则化系数, 用于调整先验信息与观测信息的权重。这种方法的一个缺点是, 反演的状态向量是基于测量和先验信息, 如果在先验状态向量和先验误差协方差中不能全面考虑所有情况, 与先验有较大差异但与实测反射率一致的状态向量倾向于被拒绝。例如, 在臭氧垂直廓线的反演中, 这种情况可能发生在臭氧空洞情景下。Nowlan 等 (2011) 利用 OE 方法, 基于全球臭氧监测仪 GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) 的观测, 成功反演了 SO_2 的柱浓度并进行了初步验证。

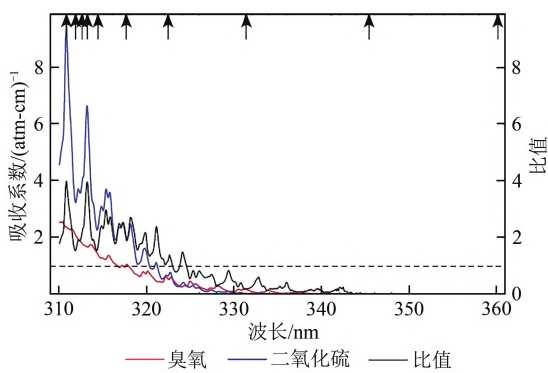


图3 氧气和二氧化硫的吸收系数及它们的比值, 图中箭头指示了算法使用的10个中心波长, 分别是310.80、311.85、312.61、313.20、314.40、317.62、322.42、331.34、345.40和360.15 nm (Yang 等, 2007)

Fig. 3 Absorption coefficients of SO_2 and O_3 and their ratio. The positions indicated by the arrows are the central wavelengths of the algorithm. These 10 central wavelengths are 310.80, 311.85, 312.61, 313.20, 314.40, 317.62, 322.42, 331.34, 345.40 and 360.15 nm (Yang et al., 2007)

除以上方法外, 离散通道反演方法在早期观测中也广泛被使用。它是基于离散通道的观测, 利用辐射传输方程建立查找表, 并用最大似然方法寻找最优廓线。第八版臭氧廓线反演算法 (V8Pro) (Beirle 等, 2018) 就是利用 SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet) 仪器的12个通道的测量数据反演 O_3 垂直廓线信息。此外, 机器学习等先进算法也逐步被应用于污染气体的遥感反演当中。

2.2 大气颗粒物卫星遥感方法

卫星传感器接收的是大气和地表反射的太阳辐射, 可以表达为大气顶 (TOA) 反射率, 它是大气和地表光学参数以及太阳/观测方位角和天顶角的函数:

$$\rho_\lambda^*(\theta_0, \Theta, \phi) = \rho_\lambda^a(\theta_0, \Theta, \phi) + \frac{T_\lambda(\theta_0) T_\lambda(\Theta) \rho_\lambda^s(\theta_0, \Theta, \phi)}{1 - S_\lambda \rho_\lambda^a(\theta_0, \Theta, \phi)} \quad (8)$$

式中, ρ_λ^* 是波长 λ 处的大气顶反射率, ρ_λ^a 是太阳辐射在传输路径上的大气反射率, T_λ 是总透射率, ρ_λ^s 是地表反射率, S_λ 是大气后向散射比, 表征大气对地面反射的太阳辐射进一步反射的比例。 θ_0 、 Θ 和 ϕ 分别是太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。

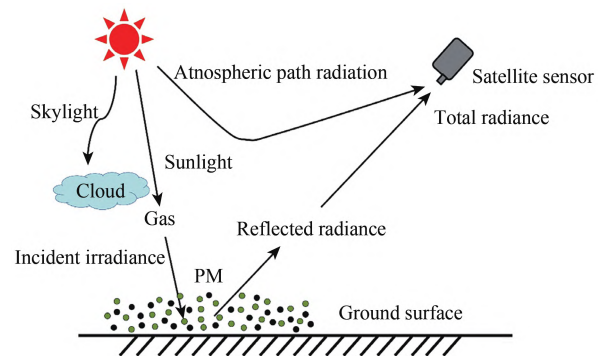


图4 大气辐射传输过程示意图 (Zhang 等, 2021)

Fig. 4 Schematic illustration of atmospheric radiative transfer processes (Zhang et al., 2021)

式 (8) 中, 除地表反射率外, 其他变量均与大气性质相关。大气中的气体分子与颗粒物对太阳辐射产生吸收和散射的作用, 影响进入卫星传感器的辐射。其中, 颗粒物对辐射的影响更为复杂, 可由辐射传输方程计算获得。

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') P(\mu, \mu') d\mu' - \frac{\omega}{4\pi} F_{\odot} P(\mu, -\mu_0) e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} \quad (9)$$

式中, I 为辐亮度, τ 为光学厚度, μ 为天顶角的余弦, μ_0 则为 θ_0 的余弦, ω 为单次散射反照率, P 为散射相函数, F_{\odot} 为太阳辐射通量密度。在一定的气溶胶参数设定下, 求解式 (9) 可获得式 (8) 所需的大气参数, 结合观测像元的地表特性, 即可模拟大气顶反射率。比较卫星观测获得的大气顶反射率, 即可获得待求的气溶胶特性参数。

大气颗粒物的卫星遥感方法已发展多年, 主流的迭代求解算法有查找表算法及优化估计方法等。查找表算法首先利用辐射传输方程建立适用于卫星观测几何及其他气体、气溶胶条件的查找表, 在查找表中查询与观测得到的大气顶反射率差异最小的结果组合。这种方法不仅可很好的满足快速计算的业务化需求, 精度也相对较好。最优估计方法也是一种广泛使用的方法, 其原理与 2.1.4 节相似。由于气溶胶类型复杂多变, 卫星观测分辨率日益提高, 导致最优估计算法迭代辐射传输方程耗费大量时间, 无法满足业务化应用。因此, 在当前的大气气溶胶卫星遥感产品生产, 大多仍沿用查找表算法。

尽管式 (8) 中显示大气参数多于地表参数, 然而实际观测发现, 地表反射率远高于大气反射率。因此, 地气信号的解耦始终是大气气溶胶遥感反演的难点。针对这一困难, 多种具有特色的传感器设计及地气解耦方法被提出, 气溶胶卫星反演算法也多由这一特征进行方法分类。

2.2.1 暗目标方法

气溶胶反演受到地表反射率、云等因素的重要影响。在无云/低云量的情况下, 地表反射率是影响气溶胶反演的主要因素。Kaufman 和 Sendra (1988) 提出, 由于气溶胶的消光随波长增加而减小, 并且在相对较长的波段 (例如 $2.1 \mu\text{m}$) 内, 气溶胶对 TOA 信号的贡献几乎可以忽略不计, 因此在茂密的植被区域内反演地表反射率成为一个好的选择。又由于在植被茂密的地区, 近红外波段和可见波段的表面反射率之间存在良好的线性统计关系。因此, 在近红外波段观察到的表观反

射率可用于估算可见波段的地表反射率, 从而实现地气分离, 这种方法被称为暗目标 DT (Dark Target) 算法。DT 算法通常用于在暗地表 (例如: 茂密的植被和水域) 区域反演 AOD。但是, 对于沙漠、干旱/半干旱地区以及以亮地表为主的城市地区, DT 算法反演的 AOD 准确性相对较差 (Levy 等, 2010)。

2.2.2 深蓝算法

为了准确地反演亮地表上空的 AOD, Hsu 等 (2006, 2004) 基于以下原理开发了深蓝 DB (Deep Blue) 算法。在干旱/半干旱地区、沙漠、城市和其他亮地表上, 红光和近红外波段的反射率通常较高, 而在深蓝波段 (约 $0.41 \mu\text{m}$) 反射率往往要低得多, 邱金桓 (1997) 最早利用该原理开展相关研究, 但采用深蓝波段邻近的紫外波段建立了气溶胶卫星遥感算法。与 DT 算法中根据红外波段表观反射率推算可见波段地表反射率不同, DB 算法依赖于目标区域的先验参考图像 (受气溶胶影响较小的图像) 与被气溶胶污染的图像进行对比以反演 AOD。通常从 TOA 反射率的长期气候观测中获得这一参考背景图像 (Koelemeijer 等, 2003; Herman 和 Celarier, 1997)。与 DT 算法相比, DB 算法可以在亮地表上更准确地估算气溶胶参数 (Hsu 等, 2013)。DB 算法可有效弥补 DT 算法无法准确反演亮地表 AOD 的问题, 提高了 AOD 反演在空间上的连续性。

2.2.3 多角度方法

经验正交函数 EOF (Empirical Orthogonal Function) 是一种数学技术, 可用于分析在高度可变或非均质地表上的空间测量结果。基于此, 一种特定的 EOF 算法被开发, 可用于有多角度观测能力的卫星传感器如 MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) 进行气溶胶反演。EOF 算法假定某一特定小区域内的大气程辐射是恒定的, 对这一小区域内的地表相对变化进行识别。从这一小区域内的不同角度的地表反射率构成的形状特征中提取一组经验正交函数, 将其作为该小区域的平均地表贡献 (Diner 等, 2005; Martonchik 等, 1998)。这种方法不依赖先验地表反射率, 较 DB 算法更有优势。然而, 它要求更多的角度观测和更高的空间分辨率以获得小区域内的地表变化特征。

2.2.4 偏振方法

由于不同下垫面的地表反射率在不同的波段具有显著的差异，因此DT方法将对气溶胶不敏感波段的地表信息传递给其他波段，以实现地气分离。然而，卫星遥感观测到的偏振信号具有对大气敏感、对地表相对来说不敏感的特性，且地表的偏振特性不随波段变化而改变（Diner等，2012；Maignan等，2009；Waquet等，2009，2007；Elias等，2004；Cairns等，2001），这成为偏振观测反演大气气溶胶过程中地气分离的重要优势（Tanré等，2011）。据此，Ge等（2020）设计了SNOSPR（Spectral Neutrality of Surface Polarized Reflectance）算法，成功实现基于POLDER（POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances）卫星观测的AOD_f、Ångström指数和地表偏振反射率反演。由于偏振信号相对较弱，且矢量辐射传输相对于标量更为复杂，因此对计算效率及精度的要求更高。随着中国高分五号（GF-5）多角度偏振相机DPC（Directional Polarization Camera）的发射，偏振遥感反演方法也将进一步得到发展（谢一淞等，2019；Zhang等，2018）。

2.2.5 时序方法

时序方法的思想与多角度方法有共通之处。时序方法的基本假设是在一定时间段内，下垫面地表特征不会发生巨大变化，而大气则是快变的因素。因此，可以使用时间窗口内的图像序列来解耦大气和地表的信息（Hagolle等，2008；Zhang等，2014）。这与多角度方法假设的气溶胶光学特性在空间维度上的缓慢变化，从而允许在一定的空间范围内求解地表反射率的相对变化十分相似。基于MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）的大气校正MAIAC（Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction）算法（Lyapustin等，2018）以及基于POLDER的GRASP（Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties）算法（Dubovik等，2011）都利用了时序方法的地气解耦思想，成功反演大气气溶胶特性，并获得了良好的精度。然而，时序算法通常需整合一段时间（例如：15 d至3个月不等）的数据联合反演，这使该算法面临很大的计算量，反演产品的时间滞后性较长，借助高性能计算改进其时效性是亟待发展的方向。

2.3 云对痕量气体和气溶胶卫星遥感的影响

大气中的云对痕量气体和气溶胶的影响十分显著。尽管在痕量气体和气溶胶卫星反演之前，会将云污染的像元识别并去除，但当分辨率较粗（例如：10 km）时，当云量（例如：<0.2）或者云辐射分数（例如：<50%）低于某个阈值时，该像元便被认为是无云的，这并非真正的无云情况。有研究指出（贺军亮，2020），在海洋上空，MODIS反演的AOD误差总体上随云量的增加而增大，随平均邻近云距离的增加而呈幂函数式衰减。然而，当云判识条件严苛时，有效的气溶胶像元将大量减少，这对于近地面污染的监测十分不利。相反，判别标准放宽则会引入较大的气溶胶反演误差。

云在污染气体的反演中也具有重要作用。云可增加云上的辐射散射，而减少云下的散射，这会导致云上的污染气体敏感性增强，而云下减弱。另外，许多公开的污染气体反演算法中，将气溶胶和云的辐射效应共同当成“有效云”处理，这将对AMF的计算引入误差，影响污染气体柱浓度反演精度（Lorente等，2016）。当前，仅POMINO（Peking University Ozone Monitoring Instrument NO₂）算法（Liu等，2020；Lin等，2015，2014）考虑了云和气溶胶在污染气体反演中的辐射效应以及气溶胶垂直分布的季节性差异。为获得精确的污染气体浓度，反演算法应更细致地考虑气溶胶垂直分布和云的体散射特性。

3 大气污染物协同观测卫星

由于污染气体和颗粒物对大气环境污染同样重要，在许多大气光化学反应中，污染气体与颗粒物同时产生，对人体健康形成巨大威胁。同时，太阳光穿过大气被卫星传感器接收的过程中，大气颗粒物成分、含量和分布的差异直接影响着散射光的空间分布，这对大气污染气体的测定存在重要影响（Liu等，2020）。因此，二者的协同探测是必不可少的。大气中的污染气体探测主要基于紫外/可见光（表1）和红外光谱（表2）两类主流的遥感探测方式。红外探测方法由气象参数（温度、湿度等）的垂直廓线探测方法延伸而来，因此在卫星上形成观测能力相对较早，但红外遥感仍主要用于气象探测。在高光谱紫外/可见光探测技术的支持下，紫外/可见光传感器更早的被应用于污染气体的卫星遥感中。

表1 气溶胶和痕量气体紫外—可见光谱联合观测卫星平台及传感器(1984年—2020年)
Table 1 Satellites and sensors of aerosol and trace gases in UV-Vis bands (1984—2020)

序号	卫星平台	发射日期	结束日期	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数	
1	NOAA-9	1984-12-12	1998-02-13	太阳同步轨道	850	升交点 14:30	Solar Backscatterer	每 10 d 覆盖全球	170 km	可在 252—340 nm 选择 12 个离散的 1 nm 带宽通道, 或从 160—340 nm 连续扫描。	O ₃ 、O ₃ 廓线、HCHO、NO ₂ 、SO ₂	
	NOAA-10	1986-09-17	2001-08-30		810	降交点 07:30	UV/2	每 10 d 覆盖全球				
	NOAA-11	1988-09-24	2004-06-16		843	升交点 14:10						
	NOAA-12	1991-05-14	2007-08-10		804	降交点 05:10		Advanced Very High Resolution Radiometer / 2	红外通道每天 2 次覆盖全球, 可见光通道每天 1 次覆盖全球	星下点 1.1 km	0.55—0.68 μm, 0.725—1.10 μm, 3.55—3.93 μm, 10.3—11.3 μm, 11.5—12.5 μm	云参数、海面温度、海冰覆盖、海面温度、雪覆盖、水汽柱含量、气溶胶火山灰总柱含量
	NOAA-13	1993-08-09	1993-08-21		820	升交点 14:00						
	NOAA-14	1994-12-30	2007-05-23	844	降交点 09:30							
2	ADEOS	1996-08-17	1997-06-30	太阳同步轨道	797	降交点 10:30	TOMS	每天 1 次覆盖全球	星下点 50 km	312.5 nm, 317.5 nm, 331.3 nm, 339.9 nm, 360.0 nm 和 380 nm, 带宽 1 nm	O ₃ 、HCHO、NO ₂ 、SO ₂	
							POLDER-1	每 2 d 1 次覆盖全球	6.5 km	443.5 nm (偏振), 490.9 nm, 563.8 nm, 669.9 nm (偏振), 762.9 nm, 762.7 nm, 863.7 nm (偏振), 907.1 nm, 1019.6 nm	气溶胶、海洋水色、植被、双向反射分布函数(BRDF)	
3	ERS-2	1995-4-21	2011-07-06	太阳同步轨道	785	降交点 10:30	GOME	高分辨率观测每 24 d 覆盖全球, 或低分辨率观测每 3 d 覆盖全球	40 km×40 km 或 40 km×320 km	240—295 nm (0.22 nm), 290—405 nm (0.24 nm), 400—605 nm (0.40 nm), 590—790 nm (0.40 nm), 292—402 nm (110 nm), 402—597 nm (195 nm), 597—790 nm (193 nm)	BrO, CH ₃ Br, ClO, H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和气溶胶光学厚度等	
							ATSR-2	红外每 3 d 覆盖全球, 可见光每 6 d 覆盖全球	1 km	550 nm, 659 nm, 865 nm, 1610 nm, 3.70 μm, 10.85 μm, 12.00 μm	云参数、叶面积指数、归一化植被指数、海面温度、海冰覆盖、气溶胶火山灰柱总量、生态参数、地表短波双向反射率、水汽柱含量、海面温度、雪覆盖	
4	NOAA-16 NOAA-19	2000-9-21 2002-6-24 2005-5-20 2009-2-6	2014-06-09 2013-04-10 — —	太阳同步轨道	849 810 854 870	降交点 09:01 降交点 07:03 降交点 09:15 降交点 06:46	SBUV/2	每 10 d 覆盖全球	170 km	可在 252—340 nm 区间选择 12 个离散的 1 nm 带宽通道, 或从 160—340 nm 连续扫描	O ₃ 、O ₃ 廓线、HCHO、NO ₂ 、SO ₂	
							Advanced Very High Resolution Radiometer / 3	红外通道每天 2 次覆盖全球, 可见光通道每天 1 次覆盖全球	星下点 1.1 km	0.58—0.68 μm, 0.725—1.00 μm, 1.58—1.64 μm, 3.55—3.93 μm, 10.3—11.3 μm, 11.5—12.5 μm	云参数、叶面积指数、归一化植被指数、海面温度、海冰覆盖、气溶胶火山灰柱总量、生态参数、地表短波双向反射率、水汽柱含量、海面温度、雪覆盖	

续表

序号	卫星平台	发射日期	结束日期	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数
5	Envisat	2002-03-01	2012-04-08	太阳同步轨道	774	降交点 10:00	SCIA-MACHY-midar Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (nadir-scanning component)	每3天1次覆盖全球	30 km×60 km	214—334 nm (0.24 nm), 300—412 nm (0.26 nm), 383—628 nm (0.44 nm), 595—812 nm (0.48 nm), 773—1063 nm (0.54 nm), 971—1773 nm (1.48 nm), 1934—2044 nm (0.22 nm), 2259—2386 nm (0.26 nm), 310—2380 nm (67 to 137 nm)	BrO, CH ₃ Br, CH ₄ , ClO, CO, CO ₂ , H ₂ O, HCHO, N ₂ O, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和 气溶胶光学厚度等
							AATSR Advanced Along-Track Scanning Radiometer	红外每3 d覆盖全球,可见光每6 d覆盖全球	1 km	550 nm, 659 nm, 865 nm, 1610 nm, 3.70 μm, 10.85 μm, 12.00 μm	云参数、叶面积指数,归一化植被指数、海面温度、冰覆盖、气溶胶火山灰柱总量、生态参数、地表短波双向反射率、水汽柱含量、海面温度、雪覆盖
6	Aura	2004-07-15	—	太阳同步轨道	705	升交点 13:45	OMI Ozone Monitoring Instrument	每天1次覆盖全球	星下点 13 km×24 km	270—314 nm (0.42 nm), 306 BrO, ClO, H ₂ O, NO, NO ₂ , —380 nm (0.45 nm), 350—500 nm (0.63 nm)	O ₃ , HCHO, SO ₂ 和 气溶胶光学厚度等
7	MetOp-A MetOp-B MetOp-C	2006-10-19 2012-09-17 2018-11-07	— — —	太阳同步轨道	827 827 817	降交点 08:46 降交点 09:30 降交点 09:30	GOME-2 Global Ozone Monitoring Experiment - 2	高分辨率观测每3 d覆盖全球,或低分辨率观测1.5 d覆盖全球	40 km×40 km 低分辨率观测时 40 km×80 km	240—315 nm (0.24—0.29 nm), 311—403 nm (0.26—0.28 nm), 401—600 nm (0.44—0.53 nm), 590—790 nm (0.44—0.53 nm), 312—790 nm (2.8 nm at 312 nm to 40 nm at 790 nm)	BrO, CH ₃ Br, ClO, H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和 气溶胶光学厚度等
8	FY-3A FY-3B FY-3C	2008-05-27 2010-11-04 2013-09-23	2015-01-05 2020-01-01 —	太阳同步轨道	834 836 836	降交点 09:05 升交点 14:45 降交点 09:07	AVHRR/3 Advanced Very High Resolution Radiometer / 3	红外通道每天2次覆盖全球,可见光通道每天1次覆盖全球	1.1 km	0.58—0.68 μm, 0.725—1.00 μm, 1.58—1.64 μm, 3.55—3.93 μm, 10.3—11.3 μm, 11.5—12.5 μm	云参数、叶面积指数,归一化植被指数、海面温度、冰覆盖、气溶胶火山灰柱总量、生态参数、地表短波双向反射率、水汽柱含量、海面温度、雪覆盖等
							Solar Backscatter Ultraviolet Sounder	每7 d覆盖全球	50 km	252.00 nm, 273.62 nm, 283.10 nm, 287.70 nm, 292.29 nm, 297.59 nm, 301.97 nm, 305.87 nm, 312.57 nm, 317.56 nm, 331.26 nm, 339.89 nm, 379.00 nm	O ₃ , O ₃ 廓线, HCHO, NO ₂ , SO ₂ 和 气溶胶光学厚度等
							TOU Total Ozone Unit	每天1次覆盖全球	50 km	308.68 nm, 312.59 nm, 317.61 nm, 322.40 nm, 331.31 nm, 360.11 nm	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO, 气溶胶光学厚度

续表

序号	卫星平台	发射日期	结束日期	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数
							MERSI-1 Medium Resolution Spectral Imager -1	每天1次 全球覆盖	星下点250 m 或1.0 km	412 nm, 443 nm, 470 nm, 490 nm, 520 nm, 550 nm, 565 nm, 650 nm, 650 nm, 685 nm, 765 nm, 865 nm, 865 nm, 905 nm, 940 nm, 980 nm, 1030 nm, 1640 nm, 2130 nm, 11.50 μm	气溶胶光学厚度、生态参 数、云参数、地表反照率、水 汽中含量、叶面积指数、归 一化植被指数、海面温度、 气溶胶有效半径等
							OMPS-nadir Ozone Mapping and Profiler Suite	每天1次 覆盖全球	50 km	250—310 nm, 300—380 nm	BrO, ClO, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和气溶胶光学厚 度等
9	SNPP NOAA-20	2011-10-28 2017-11-18	— —	太阳同步 轨道	833 834	升交点 13:25 升交点 13:25	Visible/Infrared Imager Radiometer Suite VIIRS	红外通道每天 2次覆盖全球,可 见光通道每天 1次覆盖全球	类 AVHRR 的 5个通道和昼 夜通道空间分 辨率为375 m, 其他通道为 750 m	412 nm, 445 nm, 488 nm, 555 nm, 672 nm, 746 nm, 865 nm, 1240 nm, 1378 nm, 1610 nm, 2250 nm, 3.70 μm, 4.05 μm, 8.55 μm, 10.763 μm, 12.013 μm, 0.7 μm, 0.64 μm, 0.865 μm, 1.61 μm, 3.74 μm, 11.45 μm	气溶胶光学厚度、生态参 数、云参数、地表反照率、水 汽中含量、叶面积指数、归 一化植被指数、海面温度、 气溶胶有效半径等
10	DSCOVR	2015-02-11	—	第一拉格朗日点 L1	1.5×10 ⁶	—	Earth Polychromat-ic Imaging Camera	每20 s 观察 地球圆盘	星下点 8 km	317 nm, 325 nm, 340 nm, 388 nm, 443 nm, 552 nm, 680 nm, 688 nm, 764 nm, 779 nm	臭氧柱含量、气溶胶光学厚 度、云参数、地面反照率、短 波云反照率、气溶胶有效半 径等
11	Sentinel-5P	2017-10-13	—	太阳同步 轨道	824	升交点 13:30	TROPOMI	每天1次 覆盖全球	星下点 5.5 km× 3.5 km	270—495 nm (0.55 nm), 710—775 nm (0.55 nm), 2305—2385 nm (0.55 nm)	BrO, CH ₄ , ClO, CO, H ₂ O, HCHO, N ₂ O, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和气溶胶光学厚 度等
12	GF-5	2018-05-09	2020-04-11	太阳同步 轨道	705	升交点 13:30	EMI DPC	每天1次 覆盖全球 每2天1次 覆盖全球	星下点 12 km×13 km 星下点 3.5 km	240—315 nm (0.3 nm), 311—403 nm (0.3 nm), 401—550 nm (0.5 nm), 545—710 nm (0.5 nm) 443 nm, 490 nm (偏振), 565 nm, 670 nm (偏振), 765 nm, 768 nm, 865 nm (偏振), 910 nm	BrO, CH ₃ Br, ClO, H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和气溶胶光学厚度等 气溶胶光学厚度、气溶胶类 型、云参数、地面反照率、光 合有效辐射、大气顶上行短 波辐亮度、叶面积指数、归 一化植被指数等
13	GEO-KOMP-SAT-2B	2020-02-18	—	地球静止 轨道	35786	—	Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer Geostationary Ocean Color Imager: Follow-on	5000 km×000 km 2500 km×500 km	5 km 250 m	300—500 nm (0.6 nm) 380 nm, 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 620 nm, 660 nm, 680 nm, 709 nm, 745 nm, 865 nm, 全色通道	BrO, CH ₃ Br, ClO, H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ 和气溶胶光学厚度 气溶胶光学厚度、云参数、 吸收光合有效辐射百分比、 叶面积指数、归一化植被指 数等

表2 气溶胶和痕量气体红外光谱联合观测卫星平台及传感器(1978—2018)
Table 2 Satellites and sensors of aerosol and trace gases in infrared bands (1978—2018)

序号	卫星平台	发射时间	结束时间	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数
1	TIROS-N	1978-10-13	1981-02-27	太阳同步	850	升交点14:30	HIRS/2	—	星下点 20.4 km	14.95 μm (3 cm^{-1}), 14.71 μm (10 cm^{-1}), 14.49 μm (12 cm^{-1}), 14.22 μm (16 cm^{-1}), 13.97 μm (16 cm^{-1}), 13.64 μm (16 cm^{-1}), 13.35 μm (16 cm^{-1}), 12.47 μm (16 cm^{-1}), 11.11 μm (35 cm^{-1}), 9.71 μm (25 cm^{-1}), 7.33 μm (40 cm^{-1}), 6.52 μm (55 cm^{-1}), 4.57 μm (23 cm^{-1}), 4.52 μm (23 cm^{-1}), 4.47 μm (23 cm^{-1}), 4.45 μm (23 cm^{-1}), 4.13 μm (28 cm^{-1}), 4.00 μm (35 cm^{-1}), 3.76 μm (100 cm^{-1}), 0.69 μm (200 cm^{-1})	臭氧总量、大气温度、水汽柱含量、比湿、海面温度
	NOAA-6	1979-06-27	1987-03-31	轨道	840	降交点07:30	—	—	—	—	—
2	NOAA-7	1981-06-23	1986-06-07	太阳同步 轨道	860	14:30 asc	HIRS/2	—	星下点 20.4 km	14.95 μm (3 cm^{-1}), 14.71 μm (10 cm^{-1}), 14.49 μm (12 cm^{-1}), 14.22 μm (16 cm^{-1}), 13.97 μm (16 cm^{-1}), 13.64 μm (16 cm^{-1}), 13.35 μm (16 cm^{-1}), 12.47 μm (16 cm^{-1}), 11.11 μm (35 cm^{-1}), 9.71 μm (25 cm^{-1}), 7.33 μm (40 cm^{-1}), 6.52 μm (55 cm^{-1}), 4.57 μm (23 cm^{-1}), 4.52 μm (23 cm^{-1}), 4.47 μm (23 cm^{-1}), 4.45 μm (23 cm^{-1}), 4.13 μm (28 cm^{-1}), 4.00 μm (35 cm^{-1}), 3.76 μm (100 cm^{-1}), 0.69 μm (200 cm^{-1})	云参数、海面温度、 海冰覆盖、海面温度、雪覆盖、气溶胶 火山灰总柱含量
	NOAA-8	1983-03-28	1985-12-29		820	07:30 desc					
	NOAA-9	1984-12-12	1998-02-13		850	14:30 asc					
	NOAA-10	1986-09-17	2001-08-30		810	07:30 desc					
	NOAA-11	1988-09-24	2004-06-16		843	14:10 asc					
	NOAA-12	1991-05-14	2007-08-10		804	05:10 desc					
	NOAA-13	1993-08-09	1993-08-21		820	14:00 asc					
	NOAA-14	1994-12-30	2007-05-23		844	09:30 desc					
	NOAA-15	1997-07-16	2011-02-24		835	14:30 desc					
	NOAA-16	1997-07-16	2011-02-24		835	14:30 desc					
3	Terra	1999-12-18	—	太阳同步 轨道	705	降交点10:30	AVHRR/2	—	星下点 1.1 km	0.55—0.68 μm , 0.725—1.10 μm , 3.55—3.93 μm , 10.3—11.3 μm , 11.5—12.5 μm	CO廓线、CO总量、 CH ₄ 总量
	—	—	—	—	—	—	Measurement Of Pollution In The Troposphere	每5天一次 全球覆盖	22 km	4.62 μm , 2.33 μm , 2.26 μm	—

续表

序号	卫星平台	发射时间	结束时间	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数
							Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer	红外通道每天 2次覆盖全球, 可见光通道每 天1次覆盖全球	250 m—1 km	645 nm, 858 nm, 469 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, 2130 nm, 412 nm, 443 nm, 488 nm, 531 nm, 551 nm, 667 nm, 678 nm, 748 nm, 870 nm, 905 nm, 936 nm, 940 nm, 1375 nm, 3.750 μm , 3.959 μm , 4.050 μm , 4.515 μm , 4.515 μm , 6.715 μm , 7.325 μm , 8.550 μm , 9.730 μm , 11.030 μm , 12.020 μm , 13.335 μm , 13.635 μm , 13.935 μm , 14.235 μm	云参数、水汽柱含量、海面温度及水色参数、气溶胶光学厚度、生态参数、地面反射率、地面温度、火点、雪覆盖、土壤湿度、叶面积指数、归一化植被指数等
							Atmospheric Infra-Red Sounder	每天1次 覆盖全球	红外观测空 间分辨率 13.5 km, 可 见—近红外 观测空间分 辨率2.3 km	可见光: 0.41—0.44 μm (30 nm), 0.58—0.68 μm (100 nm), 0.71—0.92 μm (210 nm), 0.49— 0.94 μm 红外: 3.74—4.61 μm (2.0 cm^{-1}), 6.20—8.22 μm (1.0 cm^{-1}), 8.80—15.4 μm (0.5 cm^{-1})	O ₃ 柱总量、大气温度、行星边界层高度、对流层顶高度、水汽柱含量、比湿、对流层顶温度、海面温度、C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₆ 等
4	Aqua	2002-05-04	—	太阳同步 轨道	705	升交点13:30	Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer	红外通道每天 2次覆盖全球, 可见光通道每 天1次覆盖全球	0.25—1 km	645 nm, 858 nm, 469 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, 2130 nm, 412 nm, 443 nm, 488 nm, 531 nm, 551 nm, 667 nm, 678 nm, 748 nm, 870 nm, 905 nm, 936 nm, 940 nm, 1375 nm, 3.750 μm , 3.959 μm , 3.959 μm , 4.050 μm , 4.515 μm , 4.515 μm , 6.715 μm , 7.325 μm , 8.550 μm , 9.730 μm , 11.030 μm , 12.020 μm , 13.335 μm , 13.635 μm , 13.935 μm , 14.235 μm	云参数、水汽柱含量、海面温度及水色参数、气溶胶光学厚度、生态参数、地面反射率、地面温度、火点、雪覆盖、土壤湿度、叶面积指数、归一化植被指数等
							Tropospheric Emission Spectrometer	—	星下点 0.53 km× 5.3 km	11.11—15.38 μm (0.059 cm^{-1}), 8.70—12.20 μm (0.059 cm^{-1}), 5.13—9.09 μm (0.059 cm^{-1}), 3.28—5.26 μm (0.059 cm^{-1})	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CFC-11, CFC-12, CH ₄ , CO, CO ₂ , COS, ClONO ₂ , H ₂ O, HNO ₃ , N ₂ O, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , PAN和 气溶胶等
5	Aura	2004-07-15	—	太阳同步 轨道	705	升交点13:45	Ozone Monitoring Instrument	每天1次 覆盖全球	13 km×24 km	270—314 nm (0.42 nm), 306—380 nm (0.45 nm), 350—500 nm (0.63 nm)	BrO, ClO, H ₂ O, NO, NO ₂ , O ₃ , HCHO, SO ₂ 和 气溶胶光学厚度等

续表

序号	卫星平台	发射时间	结束时间	轨道类型	轨道高度/km	交点地方时	传感器	覆盖周期	分辨率	光谱通道	探测参数
6	MetOp-A	2006-10-19	—	—	—	—	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer	每天2次覆盖全球	24 km	8.26—15.50 μm (0.25 cm^{-1}), 5.00—8.26 μm (0.25 cm^{-1}), 3.62—5.00 μm (0.25 cm^{-1}), 10.3—12.5 μm	臭氧总量、大气温度、行星边界层高度、对流层顶高度、水汽柱含量、比湿、对流层顶温度、海面温度等
	MetOp-B	2012-09-17	—	太阳同步轨道	827	降交点 08:46 降交点 09:30	Advanced Very High Resolution Radiometer/3	红外通道每天2次覆盖全球, 可见光通道每天1次覆盖全球	星下点 1.1 km	0.58—0.68 μm , 0.725—1.00 μm , 1.58—1.64 μm , 3.55—3.93 μm , 10.3—11.3 μm , 11.5—12.5 μm	云参数、叶面积指数、归一化植被指数、海面温度、海冰覆盖、气溶胶火山灰柱总量、生态参数、地表短波双向反射率、水汽柱含量、海面温度、雪覆盖等
	MetOp-C	2018-11-07	—	—	—	—	AVHRR/3	—	—	—	—
7	GOES-16	2016-11-19	—	地球静止轨道	35786	—	Advanced Baseline Imager	每15 min 覆盖3000 km \times 5000 km	0.5—2.0 km	0.47 μm , 0.64 μm , 0.86 μm , 1.38 μm , 1.61 μm , 2.26 μm , 3.90 μm , 6.15 μm , 7.00 μm , 7.40 μm , 8.50 μm , 9.70 μm , 10.3 μm , 11.2 μm , 12.3 μm , 13.3 μm	云参数、水汽柱含量、水汽速度、气溶胶光学厚度、O ₃ 总量、海面温度、叶面积指数、归一化植被指数、海面温度等
	GOES-17	2018-05-01	—	—	35786	—	—	—	—	—	—
8	FY-4A	2016-12-10	—	地球静止轨道	35786	—	Geostationary Interferometric Infrared Sounder	每小时覆盖5000 km \times 5000 km	红外为16 km, 可见光为2 km	14.3—8.85 μm (0.8 cm^{-1}), 6.06—4.44 μm (1.6 cm^{-1}), 0.55—0.75 μm	O ₃ 总量、大气温度、行星边界层高度、对流层顶高度、水汽柱含量、比湿、水汽速度、对流层顶温度、海面温度等
							Advanced Geostationary Radiation Imager	15 min 全圆扫描	0.5—4 km	0.45—0.49 μm , 0.55—0.75 μm , 0.75—0.90 μm , 1.36—1.39 μm , 1.58—1.64 μm , 2.1—2.35 μm , 3.5—4.0 μm , 3.5—4.0 μm , 5.8—6.7 μm , 6.9—7.3 μm , 8.0—9.0 μm , 10.3—11.1 μm , 11.5—12.5 μm , 13.2—13.8 μm	云参数、水汽柱含量、水汽速度、气溶胶光学厚度、海面温度、海面温度、叶面积指数、归一化植被指数、海面降水强度等
9	GF-5	2018-05-09	2020-04-11	太阳同步轨道	705	升交点 13:30	Advanced Hyperspectral Imager	—	30 m	0.4—2.5 μm (5或10 nm)	原则上具有痕量气体反演能力
							Directional Polarization Camera	每两天1次覆盖全球	星下点 3.5 km	443 nm, 490 nm (偏振), 565 nm, 670 nm (偏振), 765 nm, 768 nm, 865 nm (偏振), 910 nm	气溶胶光学厚度、气溶胶类型、云参数、地面反射率、光合有效辐射、大气顶上行短波辐亮度、叶面积指数、归一化植被指数等

3.1 紫外—可见光谱探测卫星

1984年NOAA-9(National Oceanic and Atmospheric Administration-9)气象卫星同时携带紫外光谱探测器SBUV/2和AVHRR/2(Advanced Very High Resolution Radiometer/2)发射升空,SBUV/2的主要任务是探测臭氧及其他污染气体。该传感器可在252—340 nm光谱范围中的12个带宽1 nm的离散通道进行探测,或从160—340 nm进行光谱连续扫描。AVHRR/2作为第二代AVHRR传感器拥有5个宽波段,具备一定的大气颗粒物探测能力,但其主要任务仍是辅助性的云及地表观测等(Klaes, 2018)。这两个传感器被NOAA系列卫星携带升空,获得了自NOAA-9至NOAA-14的连续观测。后续,NOAA系列卫星对AVHRR传感器进行升级,将通道数扩展至6个,使其具备海洋气溶胶探测的初步能力,并将SBUV/2和AVHRR/3连续搭载于NOAA-16至NOAA-19卫星平台,始终持续着对颗粒物、臭氧及其他污染气体的探测。

ERS-2(European Remote-sensing Satellite -2)是欧洲在1995年发射的太阳同步轨道卫星,其主要任务是海洋观测。然而,它搭载的GOME以及沿轨扫描辐射计ATSR-2(Along-Track Scanning Radiometer -2)为陆地观测和大气化学做出了重要贡献(Guyenne和Readings, 1993)。GOME具有由紫外到可见光的7个观测波长区间,每个观测波长区间上的光谱分辨率在0.22—195 nm不等,它观测的主要目标为臭氧、二氧化氮、二氧化硫、水汽、甲醛等多种污染气体,同时它的可见光通道也可对大气颗粒物特性进行反演。沿轨扫描辐射计ATSR-2是具有覆盖可见、近红外及红外波段10个通道的探测器,具有天底方向和前向47°的两个观测角度。相比AVHRR,它具有更高好的气溶胶探测能力,从真正意义上实现了污染气体与颗粒物的协同观测。

与ERS-2发射时间较近的ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)卫星平台,搭载臭氧总量分光光度计(TOMS)及第一代多角度偏振辐射计(POLDER-1),同样实现大气污染气体及颗粒物的协同观测。TOMS与BUV和SBUV/2具有一定的相似性,也存在显著的不同。这是由于在250—380 nm,入射太阳光谱被Hartley和Huggins臭氧吸

收带吸收后,卫星接收到的后向散射辐射在光谱上出现了近5个数量级的差异。BUV和SBUV/2仪器为了在这个光谱范围内观测,使用了双Ebert-Fastie单色器,以实现苛刻的带外抑制。相比之下,TOMS仪器处理在308—380 nm的一个数量级的动态范围,因此只需要一个光栅型单色器实现臭氧总量的测量(Dittman等, 2002)。TOMS在312.5—380 nm有6个离散的光谱通道,每个通道的光谱覆盖范围内光谱分辨率为1 nm(Heath等, 1975)。与其同平台的POLDER-1传感器是偏振探测能力的首个卫星传感器,它具备9个通道,其中443 nm、670 nm和865 nm通道具有偏振观测能力,主要任务是大气颗粒物、海洋水色、植被、地表反射等的观测。然而,由于卫星故障,仅在轨运行了8个月的时间。

Envisat(Environmental Satellite)是欧洲空间局发射的迄今为止最大的综合性环境卫星,是ERS系列卫星的继任者。Envisat搭载了10个科学探测仪器于2002年发射,是最大的民用地球观测任务之一。它搭载的大气层制图扫描成像吸收光谱仪SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography),具备临边和天底两种观察方式的成像光谱仪,临边探测对中层大气中的痕量气体进行分层反演,而天底方向则对于近地层的气态污染物敏感(Bovensmann等, 1999)。该传感器具备9个不同光谱宽度的光谱覆盖范围,紫外和红外通道的光谱分辨率均在0.3 nm以下。同时,它还具备可见光和近红外探测能力,可实现多种大气污染气体及颗粒物的反演。与它搭载于同一平台的先进的沿轨扫描辐射计AATSR(Advanced Along-Track Scanning Radiometer)是继ERS-1和ERS-2上的ATSR-1和ATSR-2之后主要用于测量海洋表面温度的传感器。AATSR可测量0.55、0.66、0.87、1.6、3.7、11和12 μm 通道的反射和发射辐射,星下点的空间分辨率为1 km。

搭载于Aura(Earth Observation System - Aura)卫星的OMI传感器是广泛用于污染气体监测的重要传感器之一。该传感器是继GOME和SCIAMACHY后的新一代污染气体探测传感器。它拥有3个光谱覆盖范围(两个紫外,一个可见光),可有效获取城市空气质量关注的NO₂, O₃, SO₂和颗粒物信息(Levelt等, 2018)。与SCIAMACHY的

空间分辨率(30 km×60 km)相比, OMI的空间分辨率有了较大的提升, 其紫外第二通道和可见光通道星下点分辨率可达13 km×24 km, 且其水平幅宽增加至±1300 km, 可实现每天全球覆盖一次的观测。与3 d才能实现全球覆盖的SCIAMACHY相比, OMI在快速识别更小的污染源及大气环境污染演变趋势研究中具有更大的优势(Boersma等, 2008)。同时, OMI传感器与先前发射的SCIAMACHY形成了良好的上下午观测, 这为污染气体的日变化研究提供了一定的帮助(Lin等, 2010)。

GOME-2是欧洲MetOp-A/B/C(Meteorological operational satellite -A/B/C)系列卫星上的新一代大气污染气体探测仪(Munro等, 2016), 它接续GOME和SCIAMACHY开展的长期大气臭氧监测工作。更先进的GOME-2在光谱覆盖范围上更多的继承了SCIAMACHY, 它较OMI拥有更多的探测通道和更高的光谱分辨率(表1)。为了更大的幅宽和每日的近似全球覆盖, GOME-2牺牲了空间分辨率(40 km×80 km), 但其获取的自2006年至今的长期观测为气候和大气研究做出了重要贡献(Fioletov等, 2013)。MetOp-A/B/C卫星同时搭载了第三代AVHRR传感器。尽管它主要用于辐射及温度等的观测, 但可见光通道的长时期连续观测为全球颗粒物分布的历史回溯研究提供了重要的数据基础, 也为长期的对流层气态污染物和近地面污染颗粒物协同研究提供了的机会。

中国第二代极轨气象卫星风云三号(FY-3)于2008年开始成功发射。TOU(Total Ozone Unit)是搭载其上的中国第一台星载大气臭氧监测仪器, 波长覆盖308.68—360.11 nm, 光谱分辨率为1 nm。2008年末, TOU/FY-3A首次测绘了全球臭氧分布(Zhang等, 2020)。TOU臭氧产品已通过来自世界臭氧和紫外线辐射数据中心的在地数据集和来自OMI/Aura日产品的星上数据集验证, 均方根误差分别为4.3%和3.1%(Wang等, 2012)。FY-3系列上的另一个紫外探测仪器是SBUS。该传感器在轨有3种观测模式, 即地球模式、太阳模式和校准模式。在地球模式下, SBUS在250—340 nm光谱区域内, 以12个离散通道测量大气中的紫外后向散射辐射, 而同一通道的太阳辐照度则采用太阳模式每周测量一次。该传感器可用于获得臭氧垂直廓线观测。FY-3系列卫星还搭载了中分辨率光谱成像仪MERSI-1(Medium Resolution Spectral

Imager-1), 它是一个覆盖可见和红外波段的20通道辐射计(Dong等, 2009), 是中国第一个实现每天全球覆盖的大气颗粒物监测传感器。

OMPS(Ozone Mapping and Profiler Suite)是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)首个长期业务工具(Zhu等, 2016), 2011年搭载于Suomi NPP(Suomi National Polar-orbiting Partnership)卫星平台发射。它由临边观测和天底观测套件组成, 分别观测中高层大气和天底大气柱内的污染气体分布。天底观测的OMPS继承了OMI和TOMS的设计, 由一个望远镜和单独的总柱与天底廓线光谱仪组成。总柱光谱仪使用单一光栅覆盖300—380 nm的光谱区域, 通过Huggins带吸收提供总柱信息以及300—380 nm波段的反射率信息。天底廓线光谱仪覆盖250—310 nm的光谱区域使用双光栅光谱仪配置, 精确测量Hartley带的后向散射辐射(Flynn等, 2014)。同卫星平台上的VIIRS(Visible/Infrared Imager Radiometer Suite)传感器提供了22个可见和红外波段, 覆盖波长从0.41—12.5 μm, 可观测包括颗粒物、云、海洋表面温度、海洋颜色、极地风、植被分数、火点等信息。每天一次的全球覆盖能力为全球颗粒物监测提供了良好的数据来源。同时, VIIRS传感器还具备夜间微光探测能力, 这对夜间大气气溶胶的监测提供了新的途径。由于两传感器的良好性能, 2017年再次被搭载于NOAA-20卫星以获得持续性观测。

深空气候观测站DSCOVR(Deep Space Climate Observatory)驻留在第一拉格朗日点(L1), 使其搭载的地球多色成像相机EPIC(Earth Polychromatic Imaging Camera)得以从一个独特的角度观察地球(Herman等, 2018)。EPIC具有10个光谱通道(317—780 nm), 覆盖紫外和可见光波段。在经过OMPS校正后, 可获得每个UV通道的地球表观反射率。这使得EPIC具备同时反演污染气体(例如: 臭氧总柱含量)和颗粒物特性(例如: 气溶胶光学厚度、吸收气溶胶指)的能力。此外, 利用EPIC从DSCOVR的第一拉格朗日点对地球的扫描式观测, 可以在1—2 h就获取一张地球圆盘臭氧分布图, 星下点空间分辨率可达18 km。

Sentinel-5P(Sentinel-5 precursor)携带的对流层监测仪TROPOMI(Tropospheric Monitoring Instrument)于2017年发射升空, 接替了OMI和SCIAMACHY的观测。它的不同之处在于可以测量

紫外—可见 (270—500 nm)、近红外 (675—775 nm) 和短波红外 (2305—2385 nm) 的 3 个光谱范围 (Veefkind 等, 2012), 这意味着它可以同时对污染气体进行更全面的监测。它的空间分辨率高达 $5.5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km}$, 有潜力实现城市尺度的空气污染监测。此外, TROPOMI 的下午观测与 GOME-2 的上午观测具有较强的协同效应。尽管 GOME-2 具有较低的空间分辨率, 也不具备短波红外光谱观测, 但 TROPOMI 和 GOME-2 的组合可在一定程度观测污染气体的日变化特征。

高分五号卫星 (GF-5) 是目前国家高分重大科技专项中搭载载荷最多、光谱分辨率最高的卫星, 也是中国探测手段最多的光学遥感卫星。2018 年, GF-5 卫星搭载的紫外有效载荷 EMI (Environment Monitoring Instrument) 开始了大气污染气体的监测。EMI 是一种天底指向的广角成像光谱仪, 它有 4 个光谱通道, 光谱范围从 240—710 nm, 光谱分辨率为 0.3 nm 和 0.5 nm。该传感器继承了 OMI 传感器的优点, 可每天获取污染气体的全球分布。EMI 提供的 NO_2 监测产品具有比 OMI 更好的空间分辨率 ($12 \text{ km} \times 13 \text{ km}$), 介于 OMI 和 TROPOMI 之间 (Zhang 等, 2020)。在 GF-5 上的 DPC 是一个多角度偏振传感器, 具有 3 个偏振波段 (490、670 和 865 nm) 和 5 个非偏振波段。与 POLDER 的多角度偏振观测相似, DPC 传感器可对同一目标的 3 个偏振方向以及 9 个不同视角进行观测 (Li 等, 2018), 这大大增加了观测目标的信息量, 对大气颗粒物的微观特性的反演具有较大优势。

2020 年, 韩国发射的 GEO-KOMPSAT-2B (Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2B) 是一个地球静止轨道卫星。与极轨卫星相比, 静止轨道卫星可以更好的对关注区域进行高时间频率的观测。它搭载的 GEMS (Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) 传感器可提供高空分辨率的关键空气质量成分柱总量测量, 主要包括对流层 O_3 、颗粒物及其气态前体物 (Kim 等, 2020)。GEMS 是分步凝视成像光谱仪, 光谱覆盖范围为 300—500 nm。GEMS 观测可覆盖亚洲大部分地区 (-5°N — 45°N , 75°E — 145°E), 在韩国上空, GEMS 传感器观测的污染气体空间分辨率可达 $7 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 。由于其静止卫星平台的观测优势, GEMS 可对污染气体进行逐小时的监测。GOCI-II

是继 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 后又一个地球静止海洋水色成像仪, 具有覆盖紫外、可见及近红外光谱的 13 个通道, 分布在 360—900 nm。该传感器不仅可对海洋水色及大气颗粒物特性进行逐小时监测, 且具有 250 m 的高空间分辨率。GEMS 的发射使亚洲区域率先实现了污染气体及颗粒物的逐小时协同监测, 随后美国航天局将发射覆盖北美区域的 TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) 卫星, 欧洲航天局将发射覆盖欧洲区域 Sentinel-4。它们在全球范围内组成卫星星座, 对全球空气质量进行高时空分辨率监测。

3.2 红外光谱探测卫星

红外光谱探测的主要痕量气体与紫外/可见光探测不同, 主要包括含碳的痕量气体 (例如: CO 、 CO_2 、 CH_4), 臭氧及水汽等。作为污染气体, 本文主要关注的是红外波段对 CO 和臭氧的探测。红外较之紫外探测的另一有益之处在于, 依赖红外波段的探测可不需要太阳作为光源, 这使夜间探测成为可能。但是, 短波红外探测不具备这一优势。

早在 1978 年发射的 TIROS-N (Television and Infra-Red Observation Satellite -N) 卫星上便搭载了红外探测器 HIRS/2 (High-resolution Infra-Red Sounder /2), 对大气柱内的臭氧总量进行探测。该传感器具有 19 个红外通道和 1 个可见光通道, 主要观测大气温度、湿度以及臭氧总量。同时, 该卫星携带了第一代 AVHRR 传感器, 它拥有可见、近红外和红外光谱范围内的 4 个有效通道, 在一定程度上具有大气颗粒物特性识别的可能。随后, HIRS/2 探测器被搭载在 NOAA 系列气象卫星 (NOAA-6—NOAA-14) 上, 形成了自 1979 年—2007 年的连续观测。NOAA 系列卫星每天上、下午两次的全球连续观测对臭氧柱总量探测提供了良好的数据集。但其主要任务仍以气象探测为主, 臭氧仅是利用 $9.7 \mu\text{m}$ 附近的红外通道进行总量测量。AVHRR/2 在前一版本的基础上增加了 11.5 — $12.5 \mu\text{m}$ 通道, 不过这对颗粒物的探测帮助较小。由于红外传感器在气象参数测量中的良好表现, 及紫外/可见光光谱差分吸收算法对污染气体识别的优越性能, 使得红外在专门针对大气污染气体监测方面落后于紫外传感器。

Terra 卫星搭载的 MOPITT (Measurement Of Pollution In The Troposphere) 传感器利用红外波段对流层污染气体 CO 和温室气体 CH₄ 总量, 以及 CO 廓线进行探测 (Gille 等, 1999)。该传感器具有 3 个波段 (8 个通道), 分别是甲烷总量探测的 2.26 μm, CO 总量探测的 2.33 μm 以及 CO 垂直廓线探测的 4.62 μm。尽管传感器选择的 3 个波段对目标气体有很高的敏感性, 但仍会受到其他气体谱线的干扰, 特别是水汽。为了减少这种干扰的影响, MOPITT 使用了相关光谱测量法。该方法使探测器获取的平均信号可对地表和干扰气体做出响应, 而差异信号则对大气中的目标气体做出响应, 由此增加探测的敏感性。Terra 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 是一个良好的大气颗粒物探测器, 它具有 36 个光谱观测通道, 覆盖从可见到红外光谱, 星下点分辨率可达 250 m, 其观测可实现每天 1—2 次的全球覆盖, 其产品包含颗粒物特性、云覆盖及云参数、地表参数、海洋和陆地上空的气象信息等。随着 Aqua 的发射, MODIS/Aqua 与 MODIS/Terra 形成了每日上、下午的协同观测, 这更丰富了自 2002 年以来的大气颗粒物特性观测, 为污染气体与颗粒物协同监测提供了良好的空间平台。与 Terra 不同, Aqua 搭载的扫描高光谱光栅光谱仪 AIRS (Atmospheric Infra-Red Sounder) 具有可见—红外高光谱探测能力, 具有 2378 个红外光谱波段, 覆盖范围为 3.7—15.4 μm, 光谱分辨率最高为 0.5 cm⁻¹。AIRS 的红外空间分辨率为 13.5 km, 可见—近红外波段的空间分辨率为 2.3 km, 可提供每天两次全球覆盖观测。

搭载于 MetOp-A/B/C 系列卫星上的扫描高光谱迈克尔逊干涉仪 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) (Clerbaux 等, 2007) 是一种更先进的红外高光谱探测器。它的红外光谱覆盖 3.62—15.5 μm, 光谱分辨率高于 AIRS, 水平分辨率在星下点为 12 km, 幅宽可达 2130 km。这样的光谱分辨率和空间覆盖使其可提供每天两次的全球覆盖的高精度探测数据。虽然, IASI 的主要探测目的与其他红外传感器一样, 仍是为气象研究及服务提供高精度和高时空分辨率的温湿度廓线观测, 但它探测的臭氧、一氧化碳、甲烷和其他气态化合物在大气环境及气候变化研究中有重要贡献。它与同平台的紫外—可见通道探测器

GOME-2 和 AVHRR/3 联合观测, 实现了近地层污染气体及大气颗粒物的协同探测。

在搭载 OMI 的 Aura 卫星平台上, 同时搭载了一种高分辨率红外成像傅里叶变换光谱仪 TES (Tropospheric Emission Spectrometer), 它的主要目标是实现痕量气体的全球三维监测。该传感器光谱覆盖范围为 3.2—15.4 μm, 它具有极高的光谱分辨率 (约 0.059 cm⁻¹), 这使得它能够在有限的线宽范围内分辨地球低层大气中几乎所有的具有吸收性的气体物种。TES 全球测量标准产品包括臭氧、水汽、一氧化碳、甲烷等的垂直廓线。该传感器具有临边和天底观测两种模式, 在天底观测模式下, TES 是由 16 个探测器阵列组成, 空间分辨率为 0.53 km×0.53 km, 星下点的瞬时视场角移动 10 步, 覆盖视场 5.3 km×8.5 km。由于该探测器仅可进行窄带观测, 大约每天 (近 26 h) 可获得 16 轨观测数据, 每个周期可获得 233 轨 (16 d) 观测。因此, 在全时观测情况下, 需要 16 d 观测以获得一次全球覆盖。

高级基线成像仪 ABI (Advanced Baseline Imager) 是静止轨道卫星 GOES-16/17 (Geostationary Operational Environmental Satellite-16/17) 搭载的用于观测天气、海洋和环境的主要仪器。ABI 用 16 个不同的光谱波段, 包括 2 个可见波段, 4 个近红外波段和 10 个红外波段。ABI 可每 15 min 对西半球圆盘实现一次观测, 对于美国大陆可实现每 5 min 一次观测, 水平分辨率不低于 2 km。ABI 可进行颗粒物及火山灰等的追踪探测, 与 HIRS/2 相似, 它利用 9.7 μm 通道探测臭氧总量。尽管该传感器只能获得针对污染物的有限信息, 但其高时空分辨率可为污染过程的观测研究提供重要的科学参考。

鉴于静止轨道卫星高时空分辨率的独特优势, 我国在风云四号静止气象卫星 FY-4A 上搭载了红外高光谱垂直探测仪 GIIRS (Geostationary Interferometric Infrared Sounder), 这是国际上第一台在静止轨道上以红外高光谱干涉分光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器 (罗双等, 2019)。GIIRS 通过迈克尔逊干涉分光方式观测 4.44—6.06 μm 和 8.85—14.29 μm 的红外辐射, 及 0.55—0.75 μm 的可见光通道辐射。红外波段的星下点分辨率为 16 km, 可见光通道为 2 km。GIIRS 具有获得 O₃、SO₂、NO₂ 和过氧乙酰硝酸酯 (PAN) 的逐小时空间演变能力, 这对大气环境污染监测

具有重要意义。多通道扫描成像辐射计 AGRI (Advanced Geostationary Radiation Imager) 也是 FY-4A 的主要载荷之一。AGRI 有 14 个通道, 分布在可见—红外光谱区域, 在观测云、水汽、植被、地表的基础上, 它还具备了观测大气颗粒物特性的能力。与 ABI 类似, AGRI 可实现 15 min 内对中国所在半球观测成像。AGRI 与 GIRS 配合, 形成从静止轨道卫星平台的逐小时污染气体和颗粒物时空演变协同监测能力。与韩国发射的紫外探测器 GEMS 与 GOCI-II 组合相互补充, 率先在亚洲区域形成高时空分辨率的大气环境 (污染气体和颗粒物) 协同监测能力。

除 FY-4A 外, 中国 GF-5 卫星也搭载了可见短波红外高光谱相机 AHSI (Advanced Hyperspectral Imager)。它的空间分辨率为 30 m, 幅宽 60 km, 光谱覆盖 0.4—2.5 μm 范围, 光谱分辨率为 5 nm 或 10 nm (刘银年等, 2020)。AHSI 覆盖的光谱范围使其原则上具备污染气体的探测能力。GF-5 卫星平台还搭载了大气环境红外甚高分辨率探测仪 AIUS (Atmospheric Infrared Ultra-spectral spectrometer)。该探测器执行掩星探测, 光谱覆盖在 2.4—13.3 μm 范围内, 光谱分辨率为 0.03 cm^{-1} , 它可测量平流层和对流层的臭氧及 CO 等污染气体, 但仅限于高纬地区。AHSI、AIUS 与一同搭载在 GF-5 卫星上的 EMI 和 DPC 传感器实现协同观测, 有望对大气污染气体和颗粒物进行更全面的监测。然而, 由于 GF-5 卫星已停止工作, 该任务将由后续卫星 (例如: GF-5 (02)) 接替完成。

4 结 语

本文介绍了可协同监测对流层污染气体与大气颗粒物的卫星遥感技术及主流算法的发展进程。污染气体的监测主要分紫外/可见光和红外光谱遥感技术两个方面。红外遥感技术由气象监测需求驱动, 卫星遥感监测气象参数 (温度、水汽等) 主要服务于气象业务及科学研究。在此过程中, 臭氧、水汽等痕量气体相继被监测。直到 Terra 搭载 MOPITT 发射升空, 红外光谱遥感技术专门针对痕量气体 (CO 和 CH_4) 的监测能力才初步形成。尽管紫外光谱卫星遥感技术发展晚于红外遥感技术, 但由于紫外分光计以及差分吸收技术的飞速发展, 紫外光谱遥感技术很快发展为污染气体空间监测的核心能力。自 1984 年 NOAA-9 携带

SBUV/2 和 AVHRR/2 发射升空, 污染气体与颗粒物的协同探测便拉开帷幕。随后, 欧洲、美国、韩国和中国都相继发射了携带先进传感器的卫星, 由最初的极轨卫星到静止轨道卫星。未来, 将由中国 FY-4A、韩国 GEO-KOMPSAT-2B、欧洲 Sentinel-4 和美国 TEMPO 的静止轨道卫星形成全球高分辨率逐小时监测能力的静止卫星星座, 实现多时空尺度的污染气体和颗粒物的协同监测。此外, 第一拉格朗日点卫星 DSCOVR 的发射象征着新观测方式的开启, 它可提供污染气体与颗粒物的地球圆盘扫描监测。

由于紫外与红外光谱对污染气体的探测能力各具优势, NOAA 系列气象卫星、欧洲 MetOp 卫星及中国 FY 系列卫星平台都同时搭载了这两种探测器。与这些平台的颗粒物探测器一起, 形成了协同监测污染气体与大气颗粒物特性的能力。TROPOMI 作为新一代大气环境监测传感器, 它同时拥有紫外、可见和红外波段的探测能力, 真正实现了同平台观测。但由于 TROPOMI 仍无法获得多角度偏振信息, 因此对颗粒物特性的刻画尚不充分。

在卫星遥感探测对流层污染气体的过程中, 大气颗粒物作为影响辐射传输的重要因素, 已经被许多卫星平台同时监测。颗粒物传感器也从早期的仅 1—2 个可见光通道, 发展为多观测 (多波段、多角度、偏振) 手段共同提供信息, 以便获得更好的颗粒物监测能力。在后续的传感器发展中, 像紫外光谱探测为主的 OMI 或红外光谱探测为主的 ABI 传感器都设计了可见光通道, 这使得它们在探测污染气体的同时, 具备了探测气溶胶特性的初步能力。但相比于专门为气溶胶特性探测而设计的传感器, 例如: POLDER, 仍存在一定差距。搭载紫外、红外及多角度偏振探测器的 GF-5 卫星的发射, 标志着大气污染物的卫星遥感监测从仅可同时探测污染气体和颗粒物, 向更细致刻画污染物特性细节的协同观测的跨越。即将发射的高分系列以及大气环境系列卫星 (例如: GF-5 (02)、DQ-1) 将接替 GF-5 卫星对污染气体和大气颗粒物特性实施精细化协同观测。然而, 极轨卫星的共性问题是对近地面污染物观测的时间分辨率较低, 因此, 未来中国大气环境卫星遥感监测应向着具备紫外、可见及红外高光谱观测及偏振特性探测能力的地球静止轨道卫星发展。

污染气体和大气颗粒物协同观测的发展趋势是针对近地面层污染的探测。近地面层是人类生产生活的主要空间,也是人为排放产生的高度,这决定了该层的空气质量对人体健康具有深远影响。然而,卫星遥感获得的是整层大气的状况,尽管污染气体已经可分离为平流层和对流层两个层次,但与近地面层的浓度仍存在差异。对于大气颗粒物而言,近地面颗粒物的部分特征(例如:气溶胶光学厚度、细粒子比等)已经可被多种卫星遥感算法识别,但除星载激光雷达(CALIOP)外,被动遥感仍很难识别颗粒物的垂直分布,导致垂直方向的散射辐射分布难以判断。卫星被动遥感污染气体主要依赖散射光源,这为污染气体的反演也带来了误差,尤其在雾霾污染情况下,很可能对污染气体产生错误的估计。因此,污染气体与颗粒物的协同观测和协同反演都是未来重要的发展方向。

从反演算法的发展来看,差分吸收对污染气体的探测具有显著的优势,而最优估计方法是准确反演大气内的污染气体和颗粒物的关键算法。在未来的卫星平台,在全光谱(紫外—可见—红外波段)、多角度和偏振观测可同时获得的情景下,利用最优估计等方法协同反演大气污染气体和颗粒物将有望实现。这将最大限度满足大气环境研究的高时空分辨率、全球覆盖及3维观测需求,还可更好的对气候变化预测形成有力的观测支撑。

参考文献(References)

- Abad G G, Souri A H, Bak J, Chance K, Flynn L E, Krotkov N A, Lamsal L, Li C, Liu X, Miller C C, Nowlan C R, Suleiman R and Wang H Q. 2019. Five decades observing Earth's atmospheric trace gases using ultraviolet and visible backscatter solar radiation from space. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 238: 106478 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.04.030]
- Bates D R and Nicolet M. 1950. The photochemistry of atmospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 55(3): 301-327 [DOI: 10.1029/JZ055i003p00301]
- Beirle S, Lampel J, Wang Y, Mies K, Dörner S, Grossi M, Loyola D, Dehn A, Danielczok A, Schröder M and Wagner T. 2018. The ESA GOME-evolution "Climate" water vapor product: a homogenized time series of H₂O columns from GOME, SCIAMACHY, and GOME-2. *Earth System Science Data*, 10(1): 449-468 [DOI: 10.5194/essd-10-449-2018]
- Bhartia P K and Wellemeyer C W. 2002. TOMS-V8 total O₃ algorithm//Bhartia P K, ed. OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume II: OMI Ozone Products. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center: 15-32
- Boersma K F, Jacob D J, Eskes H J, Pinder R W, Wang J and Van der A R J. 2008. Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO₂ columns: observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D16): D16S26 [DOI: 10.1029/2007JD008816]
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, Frerick J, Noël S, Rozanov V V, Chance K V and Goede A P H. 1999. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 127-150 [DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2]
- Cairns B, Travis L, Mishchenko M I and Chowdhary J. 2001. 3.7 Aerosol retrievals over land surfaces (The advantages of polarization). At 81st American Meteorological Society Annual Meeting, Albuquerque, NM.
- Charlson R J and Rodhe H. 1982. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature*, 295(5851): 683-685 [DOI: 10.1038/295683a0]
- Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, George M, Coheur P F, Hurtmans D, Wespes C, Herbin H, Blumstein D, Tourniers B and Phulpin T. 2007. The IASI/MetOp¹ mission: first observations and highlights of its potential contribution to GMES². *Space Research Today*, 168: 19-24 [DOI: 10.1016/S0045-8732(07)80046-5]
- Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, Mégie G and Coheur P F. 2003. Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(5): 1495-1508 [DOI: 10.5194/acp-3-1495-2003]
- Cornu A M. 1879. II. Sur la limite ultraviolette du spectre solaire. *Proceedings of the Royal Society of London*, 29(196/199): 47-55 [DOI: 10.1098/rspl.1879.0011]
- Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, Pinty B, Gobron N, Nelson D L and Holben B N. 2005. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land. *Remote Sensing of Environment*, 94(2): 155-171 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.009]
- Diner D J, Xu F, Martonchik J V, Rheingans B E, Geier S, Jovanovic V M, Davis A, Chipman R A and McClain S C. 2012. Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle SpectroPolarimetric imager. *Atmosphere*, 3(4): 591-619 [DOI: 10.3390/atmos3040591]
- Dittman M G, Ramberg E, Chrisp M, Rodriguez J V, Sparks A L, Zaun N H, Hendershot P, Dixon T, Philbrick R H and Wasinger D. 2002. Nadir ultraviolet imaging spectrometer for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS)//Proceedings Volume 4814, Earth Observing Systems VII. Seattle, WA, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.453748]
- Dobson G M B. 1931. A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone. *Proceedings of the Physical Society*, 43(3): 324-339 [DOI: 10.1088/0959-5309/43/3/308]
- Dong C H, Yang J, Zhang W J, Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P,

- Liu Y J and Cai B. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10): 1531-1544 [DOI: 10.1175/2009BAMS2798.1]
- Dubovik O, Herman M, Holdak A, Lapyonok T, Tauré D, Deuzé J L, Ducos F, Sinyuk A and Lopatin A. 2011. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5): 975-1018 [DOI: 10.5194/amt-4-975-2011]
- Elias T G, Cairns B and Chowdhary J. 2004. Surface optical properties measured by the airborne research scanning polarimeter during the CLAMS experiment//*Proceedings Volume 5235, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII*. Barcelona, Spain: SPIE [DOI: 10.1117/12.514245]
- Fabry C and Buisson H. 1913. L'absorption de l'ultra-violet par l'ozone et la limite du spectre solaire. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 3(1): 196-206 [DOI: 10.1051/jphysap:019130030019601]
- Farman J C, Gardiner B G and Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315(6016): 207-210 [DOI: 10.1038/315207a0]
- Finlayson-Pitts B J and Pitts J N. 2000. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. San Diego: Academic Press.
- Fioletov V E, McLinden C A, Krotkov N, Yang K, Loyola D G, Valks P, Theys N, Van Roozendaal M, Nowlan C R, Chance K, Liu X, Lee C and Martin R V. 2013. Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO_2 retrievals for detection of large emission sources. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19): 11399-11418 [DOI: 10.1002/jgrd.50826]
- Flynn L, Long C, Wu X, Evans R, Beck C T, Petropavlovskikh I, Mcconville G, Yu W, Zhang Z, Niu J, Beach E, Hao Y, Pan C, Sen B, Novicki M, Zhou S and Seftor C. 2014. Performance of the Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) products. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(10): 6181-6195 [DOI: 10.1002/2013JD020467]
- Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, Hou W Z, Xie Y S, Zhang Y, Xu H, Li K T and Wei Y Y. 2020. An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: application and validation for POLDER-3. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111894 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111894]
- Gille J C, Drummond J R, Wang J X, Edwards D P, Deeter M N, Khatatov B, Lamarque J F, Warner J and Ziskin D C. 1999. EOS MOPITT experiment: extracting the information from the measurements//*Proceedings Volume 3756, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*. Denver, CO, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.366396]
- Grainger J F and Ring J. 1962. Anomalous fraunhofer line profiles. *Nature*, 193(4817): 762 [DOI: 10.1038/193762a0]
- Guyenne T D and Readings C. 1993. GOME: Global Ozone Monitoring Experiment. Interim Science Report. Paris: European Space Agency
- Haagen-Smit A J. 1952. Chemistry and physiology of los angeles smog. *Industrial and Engineering Chemistry*, 44(6): 1342-1346 [DOI: 10.1021/ie50510a045]
- Haagen-Smit A J and Fox M M. 1954. Photochemical ozone formation with hydrocarbons and automobile exhaust. *Air Repair*, 4(3): 105-136 [DOI: 10.1080/00966665.1954.10467649]
- Hagolle O, Dedieu G, Mougenot B, Debaecker V, Duchemin B and Meygret A. 2008. Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: application to Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1689-1701 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.016]
- Hartley W N. 1880. On the probable absorption of solar radiation by atmospheric ozone. *Chemistry News*, 39(1): 111-128.
- He J L. 2020. Study on the influence of cloud adjacency effects on the aerosol optical depth retrieval and its reducing method. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(1): 132 (贺军亮. 2020. 云邻近效应对气溶胶光学厚度遥感反演的影响及其消减方法研究. *测绘学报*, 49(1): 132) [DOI: CNKI:SUN:CHXB.0.2020-01-012].
- Heath D F, Krueger A J, Roeder H A and Henderson B D. 1975. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS G. *Optical Engineering*, 14(4): 323-331 [DOI: 10.1117/12.7971839]
- Herman J, Huang L, McPeters R, Ziemke J, Cede A and Blank K. 2018. Synoptic ozone, cloud reflectivity, and erythemal irradiance from sunrise to sunset for the whole earth as viewed by the DSCOVR spacecraft from the earth - sun Lagrange 1 orbit. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1): 177-194 [DOI: 10.5194/amt-11-177-2018]
- Herman J R and Celarier E A. 1997. Earth surface reflectivity climatology at 340-380 nm from TOMS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D23): 28003-28011 [DOI: 10.1029/97JD02074]
- Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, Sayer A M, Hansell R, Seftor C S, Huang J and Tsay S C. 2013. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16): 9296-9315 [DOI: 10.1002/jgrd.50712]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 557-569 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.824067]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2006. Deep blue retrievals of asian aerosol properties during ACE-Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3180-3195 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.879540]
- Joiner J and Bhartia P K. 1997. Accurate determination of total ozone using SBUV continuous spectral scan measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D11): 12957-12969 [DOI: 10.1029/97JD00902]
- Kaufman Y J and Sendra C. 1988. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 9(8): 1357-1381 [DOI: 10.1080/01431168808954942]

- Kim J, Jeong U, Ahn M H, Kim J H, Park R J, Lee H, Song C H, Choi Y S, Lee K H, Yoo J M, Jeong M J, Park S K, Lee K M, Song C K, Kim S W, Kim Y J, Kim S W, Kim M, Go S, Liu X, Chance K, Miller C C, Al-Saadi J, Veihelmann B, Bhartia P K, Torres O, Abad G G, Haffner D P, Ko D H, Lee S H, Woo J H, Chong H E S N, Park S S, Nicks D, Choi W J, Moon K J, Cho A, Yoon J, Kim S K, Hong H, Lee K, Lee H, Lee S, Choi M, Veeffkind P, Levelt P F, Edwards D P, Kang M N, Eo M, Bak J, Baek K, Kwon H A, Yang J W N, Park J, Han K M, Kim B R, Shin H W, Choi H, Lee E, Chong J, Cha Y, Koo J H, Irie H, Hayashida S, Kasai Y, Kanaya Y, Liu C, Lin J T, Crawford J H, Carmichael G R, Newchurch M J, Lefer B L, Herman J R, Swap R J, Lau A K H, Kurosu T P, Jaross G, Ahlers B, Dobber M, McElroy C T and Choi Y. 2020. New era of air quality monitoring from space: geostationary environment monitoring spectrometer (GEMS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(1): E1-E22 [DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0013.1]
- Klaes K D. 2018. The EUMETSAT polar system. *Comprehensive Remote Sensing*, 1: 192-219 [DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10318-5]
- Koelmeijer R B A, de Haan J F and Stammes P. 2003. A database of spectral surface reflectivity in the range 335—772 nm derived from 5.5 years of GOME observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2): 4070 [DOI: 10.1029/2002JD002429]
- Krotkov N A, Carn S A, Krueger A J, Bhartia P K and Yang K. 2006. Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5): 1259-1266 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.861932]
- Levelt P F, Joiner J, Tamminen J, Veeffkind J P, Bhartia P K, Stein Zweers D C, Duncan B N, Streets D G, Eskes H, Van Der A R, McLinden C, Fioletov V, Carn S, De Laat J, Deland M, Marchenko S, McPeters R, Ziemke J, Fu D J, Liu X, Pickering K, Apituley A, González Abad G, Arola A, Boersma F, Chan Miller C, Chance K, De Graaf M, Hakkarainen J, Hassinen S, Ialongo I, Kleipool Q, Krotkov N, Li C, Lamsal L, Newman P, Nowlan C, Suleiman R, Tilstra L G, Torres O, Wang H Q and Wargan K. 2018. The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8): 5699-5745 [DOI: 10.5194/acp-18-5699-2018]
- Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, Mattoo S, Ichoku C, Kahn R and Eck T F. 2010. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21): 10399-10420 [DOI: 10.5194/acp-10-10399-2010]
- Li C, Krotkov N A, Carn S, Zhang Y, Spurr R J D and Joiner J. 2017. New-generation NASA aura ozone monitoring instrument (OMI) volcanic SO₂ dataset: algorithm description, initial results, and continuation with the suomi-NPP ozone mapping and profiler suite (OMPS). *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(2): 445-458 [DOI: 10.5194/amt-10-445-2017]
- Li Z Q, Hou W Z, Hong J, Zheng F X, Luo D G, Wang J, Gu X F and Qiao Y L. 2018. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218: 21-37 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.003]
- Lin J T, McElroy M B and Boersma K F. 2010. Constraint of anthropogenic NO_x emissions in China from different sectors: a new methodology using multiple satellite retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(1): 63-78 [DOI: 10.5194/acp-10-63-2010]
- Lin J T, Liu M Y, Xin J Y, Boersma K F, Spurr R, Martin R and Zhang Q. 2015. Influence of aerosols and surface reflectance on satellite NO₂ retrieval: seasonal and spatial characteristics and implications for NO_x emission constraints. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19): 11217-11241 [DOI: 10.5194/acp-15-11217-2015]
- Lin J T, Martin R V, Boersma K F, Sneep M, Stammes P, Spurr R, Wang P, Van Roozendaal M, Clémer K and Irie H. 2014. Retrieving tropospheric nitrogen dioxide from the Ozone Monitoring Instrument: effects of aerosols, surface reflectance anisotropy, and vertical profile of nitrogen dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(3): 1441-1461 [DOI: 10.5194/acp-14-1441-2014]
- Liu M Y, Lin J T, Kong H, Boersma K F, Eskes H, Kanaya Y, He Q, Tian X, Qin K, Xie P H, Spurr R, Ni R J, Yan Y Y, Weng H J and Wang J X. 2020. A new TROPOMI product for tropospheric NO₂ columns over East Asia with explicit aerosol corrections. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(8): 4247-4259 [DOI: 10.5194/amt-13-4247-2020]
- Liu Y N, Sun D X, Cao K Q, Liu S F, Chai M Y, Liang J and Yuan J. 2020. Evaluation of GF-5 AHSI on-orbit instrument radiometric performance. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 352-359 (刘银年, 孙德新, 曹开钦, 刘书锋, 柴孟阳, 梁建, 原娟. 2020. 高分五号可见短波红外高光谱相机在轨辐射性能评估. *遥感学报*, 24(4): 352-359) [DOI: 10.11834/jrs.20209258]
- Lorente A, Boersma K F, Yu H, Dörner S, Hilboll A, Richter A, Liu M Y, Lamsal L N, Barkley M, De Smedt I, Van Roozendaal M, Wang Y, Wagner T, Beirle S, Lin J T, Krotkov N, Stammes P, Wang P, Eskes H J and Krol M. 2016. Structural uncertainty in air mass factor calculation for NO₂ and HCHO satellite retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(3): 759-782 [DOI: 10.5194/amt-10-759-2017]
- Luo S, Di D and Cui L L. 2019. Study on FY-4A/GIIRS infrared spectrum detection capability based on information content. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 38(6): 765-776 (罗双, 狄迪, 崔林丽. 2019. 基于信息容量的FY-4A/GIIRS红外光谱探测能力研究. *红外与毫米波学报*, 38(6): 765-776) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2019.06.014]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S and Huang D. 2018. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018]
- Maignan F, Bréon F M, Fédèle E and Bouvier M. 2009. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2642-2650 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.022]

- Martonchik J V, Diner D J, Kahn R A, Ackerman T P, Verstraete M M, Pinty B and Gordon H R. 1998. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1212-1227 [DOI: 10.1109/36.701027]
- Migeotte M V. 1948. Lines of methane at 7.7μ in the solar spectrum. *Physical Review*, 74(1): 112-113 [DOI: 10.1103/PhysRev.74.112]
- Migeotte M V. 1949. The fundamental band of carbon monoxide at 4.7μ in the solar spectrum. *Physical Review*, 75(7): 1108-1109 [DOI: 10.1103/PhysRev.75.1108]
- Munro R, Lang R, Klaes D, Poli G, Retscher C, Lindstrot R, Huckle R, Lacan A, Grzegorski M, Holdak A, Kokhanovsky A, Livschitz J and Eisinger M. 2016. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing - An overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3): 1279-1301 [DOI: 10.5194/amt-9-1279-2016]
- Nowlan C R, Liu X, Chance K, Cai Z, Kurosu T P, Lee C and Martin R V. 2011. Retrievals of sulfur dioxide from the global ozone monitoring experiment 2 (GOME-2) using an optimal estimation approach: algorithm and initial validation. *Journal of Geophysical Research*, 116(D18): D18301 [DOI: 10.1029/2011JD015808]
- Perner D, Ehhalt D H, Pätz H W, Platt U, Röth E P and Volz A. 1976. OH-Radicals in the lower troposphere. *Geophysical Research Letters*, 3(8): 466-468 [DOI: 10.1029/GL003i008p00466]
- Platt U and Stutz J. 2008. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*. Berlin Heidelberg: Springer [DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4]
- Qiu J H. 1997. Principle and inversion method of atmospheric aerosol optical thickness and vegetation from space remote sensing//Lv D R, ed. *Earth Environment and Climate Change Detection and Process Research*. Beijing: China Meteorological Press: 71-77 (邱金桓. 1997. 从空间遥感大气气溶胶光学厚度和植被的原理和反演方法研究//吕达仁. 地球环境和气候变化探测与过程研究. 北京: 气象出版社: 71-77)
- Rodgers C D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific
- Schönbein C F. 1840. Beobachtungen über den bei der Elektrolyse des Wassers und dem Ausströmen der gewöhnlichen Elektrizität aus Spitzen sich entwickelnden Geruch. *Annalen der Physik*, 126(8): 616-635 [DOI: 10.1002/andp.18401260804]
- Shin M, Kang Y, Park S, Im J, Yoo C and Quackenbush L J. 2020. Estimating ground-level particulate matter concentrations using satellite-based data: a review. *GIScience and Remote Sensing*, 57(5): 174-189 [DOI: 10.1080/15481603.2019.1703288]
- Strow L L, Hannon S E, De Souza-Machado S, Motteler H E and Tobin D. 2003. An overview of the AIRS radiative transfer model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 303-313 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808244]
- Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, Dubovik O, Ducos F, François P, Goloub P, Herman M, Lifermann A and Waquet F. 2011. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(7): 1383-1395 [DOI: 10.5194/amt-4-1383-2011]
- Veefkind J P, Aben I, McMullan K, Förster H, De Vries J, Otter G, Claas J, Eskes H J, De Haan J F, Kleipool Q, Van Weele M, Hasekamp O, Hoogeveen R, Landgraf J, Snel R, Tol P, Ingmann P, Voors R, Kruizinga B, Vink R, Visser H and Levelt P F. 2012. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120: 70-83 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027]
- Wang W H, Flynn L, Zhang X Y, Wang Y M, Wang Y J, Jiang F, Zhang Y, Huang F X, Li X J, Liu R X, Zheng Z J, Yu W and Liu G Y. 2012. Cross-calibration of the total ozone unit (TOU) with the ozone monitoring instrument (OMI) and SBUV/2 for environmental applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4943-4955 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2210902]
- Wang Z T, Ma P F, Zhang L J, Chen H, Zhao S H, Zhou W, Chen C H, Zhang Y H, Zhou C Y, Mao H Q, Wang Y, Wang Y L, Zhang L H, Zhao A M, Weng G Q and Hu K W. 2021. Systematics of atmospheric environment monitoring in China via satellite remote sensing. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 14(2): 157-169 [DOI: 10.1007/s11869-020-00922-7]
- Waquet F, Goloub P, Deuzé J L, Léon J F, Auriol F, Verwaerde C, Balais J Y and François P. 2007. Aerosol retrieval over land using a multiband polarimeter and comparison with path radiance method. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11): D11214 [DOI: 10.1029/2006JD008029]
- Waquet F, Léon J F, Cairns B, Goloub P, Deuzé J L and Auriol F. 2009. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land. *Applied Optics*, 48(6): 1228 [DOI: 10.1364/AO.48.001228]
- Xie Y S, Li Z Q, Hou W Z, Zhang Y, Qie L L, Li L, Li K T and Xu H. 2019. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera onboard GF-5 satellite. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 219-226 (谢一淦, 李正强, 侯伟真, 张洋, 伽丽丽, 李莉, 李凯涛, 许华. 2019. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演, 36(S2): 219-226) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.033]
- Yan H, Chen L, Tao J, Su L, Huang J, Han D and Yu C. 2012. Corrections for OMI SO₂ BRD retrievals influenced by row anomalies. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11): 2635-2646 [DOI: 10.5194/amt-5-2635-2012]
- Yan H H, Li X J, Wang W H, Zhang X Y, Chen L F, Han D, Yu C and Gao L. 2017. Comparison of SO₂ column retrievals from BRD and DOAS algorithms. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1694-1706 (闫欢欢, 李晓静, 王维和, 张兴赢, 陈良富, 韩冬, 余超, 高玲. 2017. BRD和DOAS SO₂总量遥感反演算法的对比. 中国科学: 地球科学, 47(9): 1071-1083) [DOI: 10.1007/s11430-016-9057-6]
- Yang K, Bhartia P K, Wellemeyer C G, Qin W, Spurr R J D, Veefkind J P and de Haan J F. 2004. Application of spectral fitting method to

- GOME and comparison with OMI-DOAS and TOMS-V8 total ozone//Proceedings Quadrennial Ozone Symposium. Kos, Greece: [s.n.]
- Yang K, Krotkov N A, Krueger A J, Carn S A, Bhartia P K and Levelt P F. 2007. Retrieval of large volcanic SO₂ columns from the Aura Ozone Monitoring Instrument: comparison and limitations. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 112: D24S43 [DOI: 10.1029/2007JD008825]
- Zhang C X, Liu C, Chan K L, Hu Q H, Liu H R, Li B, Xing C Z, Tan W, Zhou H J, Si F Q and Liu J G. 2020. First observation of tropospheric nitrogen dioxide from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument onboard the GaoFen-5 satellite. *Light: Science and Applications*, 9(1): 66 [DOI: 10.1038/s41377-020-0306-z]
- Zhang X Y, Wang F, Wang W H, Huang F X, Chen B L, Gao L, Wang S P, Yan H H, Ye H H, Si F Q, Hong J, Li X Y, Cao Q, Che H Z and Li Z Q. 2020. The development and application of satellite remote sensing for atmospheric compositions in China. *Atmospheric Research*, 245: 105056 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105056]
- Zhang X Y, Zhang P, Fang Z Y, Qiu H, Li X J and Zhang Y. 2007. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring. *Meteorological Monthly*, 33(7): 3-14 (张兴赢, 张鹏, 方宗义, 邱红, 李晓静, 张艳. 2007. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展. *气象*, 33(7): 3-14) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0526.2007.07.001]
- Zhang Y, Li Z Q, Bai K X, Wei Y Y, Xie Y S, Zhang Y X, Ou Y, Cohen J, Zhang Y H, Peng Z R, Zhang X Y, Chen C, Hong J, Xu H, Guang J, Lv Y, Li K T and Li D H. 2021. Satellite remote sensing of atmospheric particulate matter mass concentration: advances, challenges, and perspectives. *Fundamental Research*, 1(3): 240-258 [DOI: 10.1016/j.fmre.2021.04.007]
- Zhang Y, Li Z Q, Liu Z H, Zhang J, Qie L L, Xie Y S, Hou W A, Wang Y Q and Ye Z X. 2018. Retrieval of the fine-mode aerosol optical depth over east china using a grouped residual error sorting (GRES) method from multi-angle and polarized satellite data. *Remote Sensing*, 10(11): 1838 [DOI: 10.3390/rs10111838]
- Zhang Y H, Li Z Q, Zhang Y, Hou W Z, Xu H, Chen C and Ma Y. 2014. High temporal resolution aerosol retrieval using Geostationary Ocean Color Imager: application and initial validation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083612 [DOI: 10.1117/1.JRS.8.083612]
- Zhu L, Jacob D J, Kim P S, Fisher J A, Yu K R, Travis K R, Mickley L J, Yantosca R M, Sulprizio M P, De Smedt I, Abad G G, Chance K, Li C, Ferrare R, Fried A, Hair J W, Hanisco T F, Richter D, Jo Scarino A, Walega J, Weibring P and Wolfe G M. 2016. Observing atmospheric formaldehyde (HCHO) from space: validation and intercomparison of six retrievals from four satellites (OMI, GOME2A, GOME2B, OMPS) with SEAC⁴RS aircraft observations over the southeast US. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(21): 13477-13490 [DOI: 10.5194/acp-16-13477-2016]

A review of collaborative remote sensing observation of atmospheric gaseous and particulate pollution with atmospheric environment satellites

ZHANG Ying¹, LI Zhengqiang¹, ZHAO Shaohua², ZHANG Xingying³, LIN Jintai⁴, QIN Kai⁵,
LIU Cheng⁶, ZHANG Yuanxun⁷

1.State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2.Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

3.Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

4.Department of Atmospheric and Ocean Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

5.School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

6.School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

7.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Air pollution, as important environmental problem, directly affects daily life and physical health of public. The gradual maturity of polluted gas and particulate matter observation technology has rapidly developed the monitoring of air pollutants near the surface based on satellite platforms. This study aims to clarify the collaborative observation's history for aerosols and gases and then provide a reference for future satellite platform design.

In this study, the popular remote sensing methods for trace gases and atmospheric particulates that are concerned on atmospheric environment are first described, and the applicable scenarios, advantages, and disadvantages of each method are discussed. Next, satellite platforms for collaborative observations of trace gases and aerosols are reviewed. According to the characteristics of remote sensing principle for the trace gases, the satellite platform is divided into ultraviolet and infrared bands, and the development course of sensors and

satellite platforms are discussed and analyzed. Finally, we discuss the issues to be solved urgently by satellite platforms and remote sensing algorithms aiming to monitor air pollutants near the ground, as well as possible future development directions.

For various trace gases, the good universal remote sensing methods are differential absorption spectrometry method and optimal estimation algorithm, which can fully utilize the absorption spectrum lines to achieve inversion of gases. The differential absorption spectroscopy method is effective for the monitoring of trace gases. However, the optimized estimation algorithm can further extract the layered information of trace gases from the hyperspectral information, which is helpful for obtaining a more detailed vertical distribution of trace gases in the atmospheric column. The band residual method and linear fitting method have strong pertinence to specific pollutant gases (such as sulfur dioxide). These simplified algorithms also have great advantages and application value. The core issue of the aerosol inversion algorithm is the signal decoupling of ground and atmosphere. Adding the information from spectrum, angle, polarization, and time series can effectively increase the decoupling capabilities. The algorithms derived from these principles include dark target algorithm, deep blue algorithm, empirical orthogonal function algorithm, polarization algorithm, and time series algorithm. Since the launch of NOAA-9 carrying SBUV/2 and AVHRR/2 in 1984, the collaborative detection of polluted gases and particulate matter has begun. Subsequently, Europe, the United States, South Korea, and China have launched satellites carrying advanced sensors, from the polar orbit to geostationary orbit. In the future, FY-4A of China, Geo-kompsat-2b of South Korea, Sentinel-4 of Europe, and TEMPO of the United States can be forming a global geostationary satellite constellation with high spatial resolution and hourly monitoring capability to achieve collaborative monitoring of polluted gases and particulate matter.

On the basis of the summary of trace gas and atmospheric aerosol inversion algorithms, the development history of satellite platforms and sensors is combined from the perspective of cooperative observation of gas and particulate matter. The advantages of cooperative observation of sensors in the ultraviolet, visible, and infrared bands are discussed. The high temporal and spatial resolution air pollution monitoring capabilities of the geostationary satellite constellation in the future and the contribution of Chinese satellites are prospected.

Key words: satellite, trace gas, particle, atmospheric environment, remote sensing, collaborative observation

Supported by The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41925019); Science and Technology Cooperation Program of Hainan Provincial Key Research and Development Program (No. ZDYF2020206)