

大气成分临边散射探测技术进展

王雅鹏^{1,2}, 张兴赢^{1,2,*}, 闫欢欢^{1,2}, 王红梅³, 张欣欣³, 王维和^{1,2}, 程良
晓⁴, 徐娜^{1,2}

1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

2 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

3 南通大学电气工程学院, 江苏 226019;

4 中国资源卫星应用中心, 北京 100094;

摘要: 临边散射卫星遥感技术为平流层臭氧的长时序动态监测提供了有价值的数据集。自 2001 年搭载在 Odin 卫星平台上的 OSIRIS (Optical Spectrograph and Infra-Red Imaging System) 载荷以来, 该技术领域的发展已历经 20 余年。后续分别搭载在 ENVISAT、Suomi NPP、NOAA-21 和风云三号 F 星 (FY-3F) 卫星平台上的 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY)、OMPS(Ozone Mapping and Profiler Suite)和 OMS (Ozone Monitoring Suite) 载荷均包含临边散射探测模块。根据载荷的波段设置、光谱分辨率、信噪比等信息, 利用正向辐射传输模型和反演算法, 可以获得 O₃ 廓线、NO₂ 廓线、BrO 廓线及平流层气溶胶和云等信息。本文综述了星载临边散射探测技术的进展, 包括临边探测载荷、正向辐射传输模型、反演算法、产品及应用四个方面, 总结了临边散射技术仍存在的问题及未来的发展趋势。在正向模型方面, 临边散射的模拟需要在球面大气条件下, 考虑大气散射、折射、气溶胶参数化方案及仪器特性, 从而实现不同切线高度的辐射模拟。在反演算法方面, 需要在指向信息校正和杂散光校正的基础上, 通过构建观测矢量, 借助正向模型的模拟结果和观测辐射进行大气参数的信息提取。临边散射探测技术在分析平流层臭氧动态变化及其相关的氮氧化物(如 NO₂)、卤素(如 BrO)、平流层云和气溶胶监测方面发挥了重要作用, 本文可为我国临边探测技术的发展提供参考。

关键词: 临边散射, 平流层臭氧, 辐射传输, 反演算法, 应用进展

中图分类号: TP701 文献标志码: A

引用格式: XXXX. 遥感学报. [DOI: ? /jrs. ?]

收稿日期: 2020-XX-XX; 预印本:XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(41775028, 41901269); 国家重点研发计划项目(2017YFB0504001); 风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0501)

第一作者简介: 王雅鹏(1990-), 女, 博士, 主要从事大气成分遥感反演算法研究。E-mail:wangyp@cma.gov.cn

通信作者简介: 张兴赢, 1978 年生, 男, 研究员, 方向为大气遥感反演方法研究和应用。E-mail:zxy@cma.gov.cn

23 1 引言

24 臭氧洞的发现表明, 在南极大气的平流层下层
 25 非匀相化学反应使大气臭氧含量发生了显著变化
 26 (Farman et al., 1985)。基于卫星观测的太阳后向散
 27 射天底探测器, 能提供臭氧总量的变化信息, 但受
 28 限于垂直分辨率而难以对臭氧损耗发生的位置进行
 29 表征, 因此需要高垂直分辨率的臭氧廓线数据及与
 30 臭氧损耗化学过程相关的大气成分的垂直分布数据
 31 来辅助进行诊断分析。在这种需求下, 掩星和临边
 32 观测方式以垂直分辨率高, 且对弱痕量气体可探测
 33 能力强的优势发展了起来。掩星探测器, 如
 34 HALOE (Halogen Occultation Experiment) 和
 35 SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
 36 II) 等在对流层至 60km 高度范围, 具有 2~3 km 垂
 37 直分辨率的臭氧廓线探测能力。但是掩星探测载荷
 38 的采样频率低, 仅能在进出光源 (日出, 日落) 的
 39 位置进行观测。为此, 同时兼有高空间覆盖的临边
 40 探测载荷得到了发展 (Haley et al., 2004a)。红外临
 41 边和微波临边探测载荷通过测量大气成分的发射信
 42 号进行信息提取, 可以进行昼夜观测, 对红外临边
 43 和微波临边探测载荷及其探测技术的详细综述见文
 44 献(李小英 et al. 2013; 王雅鹏 et al. 2016), 而临边散
 45 射依赖太阳光源, 仅能在太阳照射到的半球进行观
 46 测。本文仅对临边散射探测技术进行综述。

47 最早的临边散射探测是基于机载的实验数据进

48 行算法研究和探测能力测试的, 如 SOLES(Shuttle
 49 Ozone Limb Sounding Experiment) (McPeters et al.,
 50 2000)。其中星载的紫外临边载荷有搭载在 Odin 卫
 51 星平台上的 OSIRIS (Optical Spectrograph and Infra-
 52 Red Imaging System) 载荷(Llewellyn et al., 2004),
 53 搭载在 ENVISAT 卫星平台上的 SCIAMACHY
 54 (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for
 55 Atmospheric CHartographY) 载荷 (Noel et al.,
 56 1998), 搭载在 Suomi NPP 与后续的 NOAA-21
 57 (National Oceanic and Atmospheric Administration-
 58 21) 卫星平台上的 OMPS 临边载荷 (Ozone Mapping
 59 and Profiler Suite Limb Profiler) (Rault and
 60 Loughman, 2013, Jaross et al., 2014)和搭载在 FY-3F
 61 卫星平台上的紫外高光谱臭氧探测器-临边(OMS-L:
 62 Ozone Monitoring Suite-Limb)。其中 OSIRIS 和
 63 OMPS 载荷在垂直方向上采用 2D-CCD (2D-
 64 Charge Coupled Device) 面阵探测器同时进行垂直
 65 覆盖范围内的切高序列扫描, SCIAMACHY 采用扫
 66 描镜的方式在不同切高上进行序列扫描, OMS-L 也
 67 是采用扫描镜方式以 3 km 间隔在 15~60 km 垂直范
 68 围内序列扫描。临边散射探测增加了视场上传输路
 69 径的长度, 从而增加了信噪比, 其垂直分辨率可达
 70 ~2km 左右, 相较掩星探测具有全球覆盖和更高垂直
 71 分辨率的采样优势。

72 临边散射探测光谱中, 紫外 (UV) 波段探测敏感
 73 性高, 主要用于探测上平流层浓度小的臭氧 (30-
 74 50km), 但因该波段在低切高位置受瑞利散射的作

75 用明显，其难以探测 30 km 以下的臭氧垂直分布。¹⁰⁰
 76 因为在低切高处需要借助 600 nm 附近臭氧的
 77 Chappuis 吸收带及其翼区波谱（525nm, 675nm）进¹⁰¹
 78 行 35km 高度以下臭氧廓线的反演，该波谱范围的¹⁰²
 79 瑞利散射强度相较 UV 波段少一个量级(Haley et al.,¹⁰³
 80 2004b)。此外，UV 波段还常用于 BrO 垂直廓线的¹⁰⁴
 81 反演，可见光（VIS）波段可用于 NO₂ 的垂直廓线¹⁰⁵
 82 反演，可见光联合近红外波段可用于云和气溶胶参¹⁰⁶
 83 数的反演。根据不同载荷指标设计，如光谱覆盖范¹⁰⁷
 84 围、光谱分辨率、信噪比、杂散光水平等，紫外临¹⁰⁸
 85 边载荷能反演的产品种类和精度均有差异。¹⁰⁹

86 目前，我国在临边载荷方面除已经于 2023 年 8 月
 87 3 日发射的 OMS-L 载荷外，后续大气高精度温空气
 88 体卫星（又叫做大气 02 号星，简称为 DQ2）平台
 89 也要搭载类似载荷 (EMI_NL: Environment
 90 Monitoring Instrument with Nadir and Limb mode)。
 91 国际上，由欧空局在研的 ALTIUS（Atmospheric
 92 Limb Tracker for Investigation of the Upcoming
 93 Stratosphere）临边散射载荷具有探测平流层的能
 94 力，计划于 2024 年发射(Errera et al., 2021)。OMPS
 95 临边观测模块（OMPS-LP）也有后续发射计划
 96 (Zawada et al., 2021)。¹¹⁰

97 本文将从星载临边散射载荷、正向辐射传输模
 98 型、反演算法、产品及应用四个方面进行综述，回¹¹²
 99 顾其探测能力的发展和应用进展。¹¹³

2 载荷

临边散射载荷在轨状态及后续计划见图 1。灰色表示已经退役的载荷，绿色表示处于在轨运行状态的载荷，蓝色表示计划中的拟发射载荷。最早的 SOLES 载荷主要实现了临边散射观测的概念设计，通过仿真分析和飞行实验，证明了临边散射技术进行大气臭氧廓线探测的可行性，为后续星载平台的临边散射载荷发展奠定了基础。本节主要关注已经发射且具有成熟参考经验的 OSIRIS、SCIAMACHY 和 OMPS 临边载荷。



图 1 临边散射载荷发展进程，其中灰色表示已经退役的载
 荷，绿色表示处于在轨运行状态的载荷，蓝色表示计划中
 的拟发射载荷

Figure 1 The development status of satellite-based limb
 scattering measurement technique

116 **2.1 Odin/OSIRIS** 139 **SCIAMACHY** 载荷采用光栅分光, 波段范围覆盖紫
117 OSIRIS 载荷搭载在 Odin 卫星平台上于 2001 年 140 外到近红外波段 (214nm~2384nm), 分为 8 个光谱
118 2 月 20 日发射升空。Odin 卫星平台由瑞典国家空间 141 区间, 每个光谱区间配备了 1024 个二极管阵列
119 局 (Swedish National Space Board)、加拿大空间 142 (Rozanov et al., 2011a)。光谱分辨率从紫外的
120 航天局 (Canadian Space Agency)、法国空间研究 143 0.21nm 变化到近红外的 1.56nm。探测目标参数包
121 中心和芬兰国家技术局资助。Odin 轨道倾角为 144 括 O₃、BrO、HCHO、NO₂、云、气溶胶、CO、
122 97.8°, 轨道高度为 610km, 过赤道时间为升轨: 145 CH₄、N₂O、H₂O 等。该载荷于 2002 年 3 月发射升
123 18:30。该过境时间的选择是为了最大限度地提高太 146 空, 设计在轨寿命 10 年, 实际在轨运行至 2012 年
124 太阳能电池板在轨道上的功率。OSIRIS 载荷的光学成 147 4 月 8 日并于 2012 年 5 月初正式宣布任务结束。
125 像仪光谱覆盖范围为 280-800nm, 光谱分辨率为 148 **SCIAMACHY** 的临边观测模式的垂直采样间隔为
126 1nm, 除了 477-530nm 区间范围内有空隙外, 其余 149 3.3km, 沿轨方向的水平分辨率约为 400km, 穿轨
127 光谱区间的光谱是连续的。OSIRIS 的垂直探测范围 150 方向的水平分辨率约为 240km。特殊情况下为了提
128 为 10~100km (探测高度可到达大气中间层), 垂直 151 高信噪比, 会在穿轨方向做方位角的平均, 带来穿
129 瞬时视场角(FOV)为 1km, 垂直分辨率为 1~2km, 152 轨方向水平分辨率的相应改变。**SCIAMACHY** 临边
130 指向信息的精度为 500m (McLinden et al., 2012)。 153 辐射的信噪比随切高和波长发生变化, 通常在波长
131 OSIRIS 采用 2D-CCD 的探测元件, 其中: 空间维 154 大于 310nm 的情况下, 信噪比大于 1000(Noel et al.,
132 32 行, 用于垂直方向上的切高探测; 光谱维每行 155 2003)。需要说明的是 **SCIAMACHY** 在观测任务的
133 CCD 有 1353 个像元(Llewellyn et al., 2004), 探测目 156 初期 (2002.06~2003.12), 指向偏差的变化范围较
134 标包括 O₃、NO₂、云、气溶胶等。 157 大 (-0.5km~ 2.5km), 且表现出明显的季节变化
135 **2.2 ENVISAT/SCIAMACHY** 158 (幅度约为 800 m), 2003 年 12 月 13 日之后随着卫
136 搭载在 ENVISAT 上的 **SCIAMACHY** 光谱成像 159 星平台轨道预报模型的改进, 其指向偏差的季节变
137 仪, 采用天底、临边和掩星相结合的观测模式进行 160 化的振幅减小到了 250m, 但仍有~1km 的偏差(von
138 大气成分的探测, 本文仅关注其临边观测模式。 161 Savigny et al. 2005)。

163 2.3 Suomi NPP/OMPS
164 OMPS 载荷搭载在 Suomi NPP 与 NOAA-21 卫
165 星平台上, 是 NPOESS (National Polar-orbiting
166 Operational Environmental Satellite System) 系统的
167 一部分, 分别于 2011 年 10 月 28 日和 2022 年 11 月
168 10 日发射升空。OMPS 由三部分组成: 用于测量全
169 球臭氧总量的时空分布的天底探测器 (Nadir
170 Mapper, NM)、用于测量平流层臭氧垂直分布的天
171 底廓线仪 (Nadir Profiler, NP) 和用于测量高垂直
172 分辨率的臭氧廓线的临边探测器 (Limb Profiler
173 LP)。其中 OMPS-LP 载荷光谱波长范围为 290
174 1000 nm, 光谱分辨率为 1-40nm (UV: 1nm, 199
175 VIS: 10nm), 垂直探测范围为对流层顶~60km 高
176 度, 垂直分辨率为 2.1 km。三个垂直狭缝以 250km
177 的跨轨道间隔对临边观测进行采样, 以提供每周的
178 全球覆盖探测。OMPS 载荷的临边探测功能属于
179 Suomi NPP 卫星的试验组件(Flynn et al., 2009, Jaros
180 et al., 2014), 自 Suomi NPP 卫星平台之后, 该探测
181 能力由搭载在 JPSS-2 (The Joint Polar Satellite
182 System-2) 卫星上重新发射的 OMPS-LP 载荷继承,
183 该仪器由 NASA (美国航空航天局) 运行和管理,
184 而 OMPS 的天底载荷由 NOAA (美国国家海洋和大
185 气管理局) 负责。需要说明的是到达极地轨道后,
186 JPSS-2 被正式更名为 NOAA-21。后续在建的 JPSS-
187 3、4 卫星平台都计划搭载 OMPS-LP 载荷, 通过临

188 边观测方式, 可探测 O₃、云、气溶胶等(Errera et al.,
189 2021)。

2.4 FY-3F/OMS 与 DQ2/EMI_NL

OMS-L 载荷搭载在 FY-3F 卫星平台上, 于
2023 年 8 月 3 日成功发射。FY-3F 轨道高度为 836
km, 轨道倾角 98.75°, 过赤道时间为 10: 15 (降
交点)。OMS-L 载荷是全新研制的, 将提高我国对
平流层和对流层痕量气体的探测能力, 其光谱覆盖
范围为 290~500nm, 光谱分辨率为 0.6nm, 波长定
标精度 0.01nm, 垂直方向上采用摆扫的方式进行
15~60 km 切高范围的观测, 对应的垂直分辨率为 3
km。高精度温室气体星上拟搭载的 EMI_NL 载荷的
临边组件光谱覆盖范围为 290-610nm, 扫描方式与
OMS-L 类似, 垂直分辨率的设计指标为 2 km。

整体上, 临边散射载荷的光学设计指标及其搭
载的卫星平台能满足其提供全球覆盖的高垂直分辨
率的廓线探测能力。

3 临边散射正向辐射传输模型

正向辐射传输模型 (RTM, Radiative Transfer
Model) 可以模拟视线方向上背景大气分子的瑞利
散射、大气成分如臭氧和 NO₂ 的吸收, 以及来自气
溶胶和云等较大颗粒散射与吸收的潜在贡献。高精
度高效率的正向辐射传输模型是大气遥感参数反演

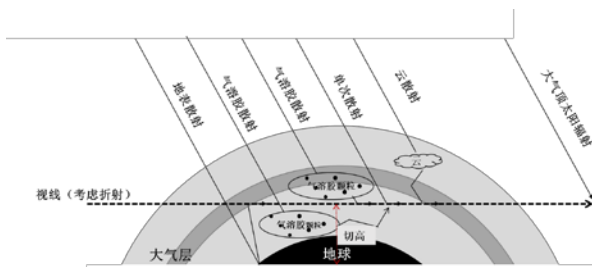
收稿日期: 2020-XX-XX; 预印本:XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(41775028, 41901269); 国家重点研发计划项目 (2017YFB0504001); 风云卫星应用先行计划 (FY-APP-2022.0501)

第一作者简介: 王雅鹏 (1990-), 女, 博士, 主要从事大气成分遥感反演算法研究。E-mail:wangyp@cma.gov.cn

通信作者简介: 张兴赢, 1978 年生, 男, 研究员, 方向为大气遥感反演方法研究和应用。E-mail:zxy@cma.gov.cn

211 的关键。在临边散射观测几何条件下（见图 2），天底
 212 观测几何的平面平行大气假设不在适用，同时多
 213 切高的连续观测对计算时效性的要求更高。此外多
 214 次散射叠加多切高的观测几何使辐射传输过程的数
 215 值求解更为复杂。一般来说，用于临边散射模拟的
 216 正向辐射传输模型需要考虑以下五个方面的影响：
 217 1）球面大气而非平面平行大气；2）考虑单次散射
 218 和多次散射；3）考虑大气折射；4）包含矢量模
 219 拟；5）包含气溶胶参数化方案（Mie 散射或
 220 Henyey-Greenstein 相函数）。



222 图 2 临边散射观测几何示意图

223 Figure 2 Illustration of the limb scattering viewing geometry

224 通常认为采用蒙特卡罗方式求解的球面辐射传
 225 输模型具有假设近似少、计算精度高，且能考虑临
 226 边传输路径不均一性的优势，如 Siro 和 MCC++模
 227 型，但是在计算耗时上比快速模式多一个量级
 228 (Loughman et al., 2004)。为了满足业务化运行的反
 229 演系统的计算效率，使用离散化、插值和各种简化
 230 假设（如水平均一性假设、简化多次散射）来求解
 231 辐射传输方程的模型更适用，如 SASKTRAN、
 232 GSLS、SCIATRAN(Zawada et al., 2021)。各模型参
 233 数设置见表 1。

234 3.1 SASKTRAN 模型

SASKTRAN 是一个完全球形的 RTM，最初是
 用于处理 OSIRIS 载荷的辐射模拟的标量模型。该
 模型的特点是为了取得计算精度和计算效率的折
 中，采用连续多阶散射方法，将辐射源项细分为太
 阳辐射和地表反射辐射的单次散射项，二次、三次
 及以上散射项共 6 个部分来模拟临边散射辐射
 (Bourassa et al., 2008; Zawada et al.2015)。该快速
 模型与计算精度较高的蒙特卡罗模型差异小于
 1.5%。该软件包可免费从

244 <https://arg.usask.ca/docs/sasktran/>（访问日期：2023-

245 10-09）下载。该模型中对平流层气溶胶的参数化

246 中，将硫酸盐气溶胶作为散射和吸收粒子纳入模

247 型，用 Mie 散射原理计算截面和散射相函数，将复

248 折射指数存为波长的查找表。SASKTRAN 的主要应

249 用于臭氧(Degenstein et al., 2009)，平流层气溶胶

250 (Bourassa et al., 2007), NO₂(Sioris et al., 2017) 的反

251 演算法。

252 3.2 SCIATRAN 模型

253 SCIATRAN 是一个集成了辐射传输模型和反演

254 算法的软件包，最开始是由德国不莱梅大学

255 Rozanov 等人针对 SCIAMACHY 开发的正向辐射传

256 输模型(Rozanov et al., 2005a)。该软件包可免费从

257 <https://www.iup.uni-bremen.de/sciatran/>（访问日期：

258 2023-10-09）下载。不同于仅针对临边散射观测几

259 何计算效率开发的 SASKTRAN 和 GSLS 模型，该

260 模型可用于天底、临边、掩星三种观测几何的模

261 拟。

Table 1 Rapid radiative transfer models for limb scattering

	SASKTRAN	SCIATRAN	GSLs
主要应用 传感器	OSIRIS	SCIAMACHY	OMPS-LP
下载地址	https://arg.usask.ca/docs/sasktran/	https://www.iup.uni-bremen.de/sciatran/	——
模拟几何	仅临边	天底+临边+掩星	仅临边
是否包含 球面大气	完全球面大气	包含完全球面与近似球面	完全球面
散射	多次散射+单次散射	多次散射+单次散射	多次散射+单次散射
折射	无	可选	无
矢量模拟	不包含	包含	包含
气溶胶相 函数	用 Mie 散射原理计算散射相函数	Henyey-Greenstein+Mie 散射	用 Mie 散射原理计算散射相函数
精度	1.5%	<8% (随切高变化, 30km 以下 精度高)	1-3%
参考文献	(Bourassa et al., 2008),	(Rozanov et al., 2005a)	(Loughman et al., 2015)

265 新版本的 SCIATRAN 模拟的光谱范围从最初版 273 (Henyey-Greenstein 或者 Mie 散射), 以及消光和
266 本的 175~2380 nm 扩展到了 180~4000 nm, 包含了 274 散射截面。在多次散射处理方面, 在临边观测几何
267 所有相关大气痕量气体的吸收特征, 并考虑了多次 275 条件下, SCIATRAN 可有近似球形和完全球形两种
268 散射、偏振、折射、热发射及海气耦合效应 276 模式供用户选择。其中 CDI (combined differential-
269 (Rozanov et al., 2017)。SCIATRAN 不仅内置了多种 277 integral) 模式在预先设定了太阳天顶角的平面平行
270 气溶胶参数化方案和气溶胶光学特性数据库, 还支 278 大气中, 适当地考虑了地球大气的曲率, 忽略偏
271 持用户自定义气溶胶参数。不同参数化方案适用于 279 振, 对多次散射源函数沿视线方向积分, 利用辐射
272 不用的波段区间, 配置不同的散射相函数计算方法 280 传输方程的解估计多重散射贡献的近似球形解

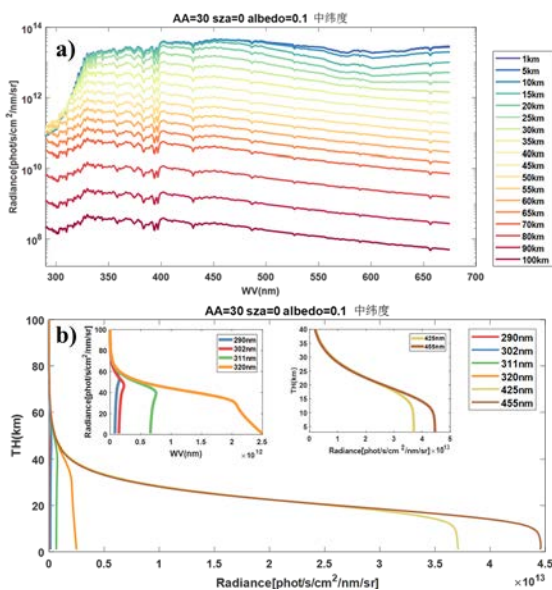
收稿日期: 2020-XX-XX; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(41775028, 41901269); 国家重点研发计划项目(2017YFB0504001); 风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0501)

第一作者简介: 王雅鹏(1990-), 女, 博士, 主要从事大气成分遥感反演算法研究。E-mail:wangyp@cma.gov.cn

通信作者简介: 张兴赢, 1978年生, 男, 研究员, 方向为大气遥感反演方法研究和应用。E-mail:zxy@cma.gov.cn

281 (Roza³⁰⁰nov et al., 2017), 该方式具有计算效率的优
 282 势, 其近似假设的思路与 GSLS 模型相同, 仅求解
 283 方式不同。为了进一步提高临边模拟的计算精度,
 284 还可以采用皮卡德迭代逼近 (Picard iterative
 285 approximation) 的方法得到完全球形大气条件下的
 286 多次散射贡献, 即完全球行模式 (CDIPI), 但会带
 287 来计算时长的线性增加。该迭代逼近策略是
 288 SASKTRAN 与 GSLS 快速模型不包含的。鉴于
 289 SCIATAN 模型可以模拟天底、临边和掩星三种观测
 290 几何, 覆盖紫外-可见光-近红外-热红外谱段, 耦合
 291 多种大气背景库及气溶胶数据库且支持用户自定义
 292 输入的优势, 该模型具有普遍的适用性, 广泛用于
 293 SCIAMACHY 的天底、临边和掩星观测几何的产品
 294 算法中, 如臭氧 (Roza³¹¹nov et al., 2007)、水汽
 295 (Roza³¹²nov et al., 2011a) 和平流层气溶胶 (Malinina et
 296 al., 2018) 等。基于 SCIATRAN 的临边模拟光谱如图
 297 3 所示。



298 图 3 a) 基于 SCIATRAN 模拟的 1: 5: 100km 切高序列的辐

射光谱(相对方位角: 30° ;太阳天顶角: 0° ;中纬度大
 气); b)不同波段临边观测光谱 (290nm, 302nm, 311nm,
 320nm, 425nm, 455nm)

Figure 3 a) The simulated limb scattering spectra in the
 tangent range between 1 to 100 km with the vertical interval of
 5km (Relative azimuth Angle: 30°; Solar zenith Angle: 0°;
 Mid-latitude atmosphere); b) the limb scattering spectra at
 290nm, 302nm, 311nm, 320nm, 425nm, 455nm

3.3 GSLS 模型

GSLS (Gauss-Seidel limb scattering) 模拟球面

大气中的矢量辐亮度。该辐射传输模型采用 Gauss-
 Seidel 迭代法求解大气中沿单一径向路径上的单次
 散射和近似多次散射, 其中近似多次散射源在选定
 的多个太阳天顶角使用伪球面计算得到(Loughman
 et al., 2004, Loughman et al., 2015), 最新版本的
 GSLS 模型针对 OMPS-LP 做了适应性改进, 可以计
 算离散波长的辐射, 并将单次散射误差从 4% 降至
 0.3%, 总辐射误差从 10% 下降到了 1-3%。此外,
 GSLS 最新版本的辐射误差的切高依赖性也大大降
 低了(Loughman et al., 2015)。GSLS 目前被用作
 OMPS-LP 臭氧和平流层气溶胶数据产品的业务化反
 演流程中(Rault and Loughman, 2013, Taha et al.,
 2021, Kramarova et al., 2018)。

整体上, 不同模型的对比证明单散射条件下各

模型的差异小于 0.2%, 在包含多次散射的标量和矢
 量测试中各模型的差异小于 1%(Zawada et al.,

2021)。

4 反演算法

在临边散射反演算法方面, Flittner et al. (2000) 提出了臭氧廓线反演的基本理论。在进行辐射归一化的基础上, 紫外 (UV) 波段通过波长对的方法 (臭氧强吸收+臭氧弱吸收通道的组合方式) 构建观测矢量, 该方法可以弱化气溶胶散射效应对臭氧廓线反演的影响。通常在用于臭氧反演的可见光 (VIS) 波段, 采用三元组 (1 个臭氧强吸收通道+ 个臭氧弱吸收通道) 的方式构建观测矢量。McPeters et al. (2000) 利用该波长对的方法实现了 SOLSE 机载平台上的 LORE (Limb Ozone Retrieval Experiment) 载荷臭氧廓线的反演, 此后, 该方法在 OSIRIS/Odin 紫外临边载荷 (von Savigny et al. 2003)、SCIAMACHY 载荷 (von Savigny et al. 2005)、OMPS 载荷 (Kramarova et al., 2018) 的业务化运行算法中得到了广泛的应用。其次, 由于天底差分光学吸收光谱技术 (DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy) 的发展, 也有学者将 DOAS 方法联合最优估计的方法用于紫外临边 O₃ 廓线的反演 (Haley et al., 2004a), 以及 BrO 廓线的反演 (Roazanov et al., 2011b)。这两种方法都能反演出各种条件下臭氧气候学的主要特征, 并且与臭氧探空数据具有高度一致性 (误差 < 5%) (Haley et al. 2004b; Roazanov et al., 2007)。

Rault 和 Loughman 基于 OMPS 载荷数据利用最优化的方法反演得到了对流层顶至 60 km 高度的臭氧廓线, 此方法是基于 OSIRIS、SCIAMACHY 等临边散射载荷算法的继承和发展, 具有较高的精度和较快的运行速度 (Rault and Loughman, 2013)。

此外, 乘代数重建技术 (MART: Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 也用于临边大气成分的反演。MART 方法由 Degenstein et al. (2009) 提出, 通过利用观测值和正向模型模拟计算值的比较以迭代更新大气状态参数。在每次迭代中, 用乘法因子更新每个高度的待反演大气状态参数, 该因子是各个切高上观测和模拟向量比率的加权平均值的总和。该方法最大的优势是可以合并来自 Chappuis 和 Hartley-Huggins 波段波长的辐射探测信息。在无云条件下, 可以得到 10~60km 高度范围的臭氧廓线, 从而避免了在波长对方法中需要将 UV 和 VIS 波段分开得到独立廓线的问题 (Degenstein et al., 2009)。目前国内学者采用了该方法来反演臭氧浓度 (Wang et al., 2011)。

上述临边反演算法都是不考虑视线水平方向的不均一性的。由于临边水平视线长, 该假设会带来一定的误差。Zawada et al. (2018) 考虑临边视线水平方向上的不均一性, 提出了二维层析成像反演方法, 可以同步进行沿轨方向和垂直高度方向的反演。

整体上, 对于临边散射载荷, 如 SCIAMACHY、OMPS 等采用波长对的方法和 DOAS 与最优估计理论相结合的方法进行臭氧廓线的反演。通过波长对的方法和 DOAS 的方法, 可以

380 消除宽带特征对反演的影响, 如气溶胶散射, 瑞利406 OSIRIS 载荷的臭氧廓线, 在 18~53 km 高度范
 381 散射等。而且这两种方法都有计算效率高、反演稳407 围内与 SAGE II 掩星观测的臭氧廓线平均偏差小于
 382 定的优势, 因此在临边散射载荷的大气成分反演中408 2% (Degenstein et al. 2009, Adams et al., 2013)。需
 383 应用广泛。需要说明的是这两种方法都需要在辐射409 要注意的是, 自 2012 年之后, OSIRIS 长时序平流
 384 归一化基础上, 通过去除随波长慢变信号的方式以410 层臭氧产品存在漂移现象, 且从 2014 年开始, 该现
 385 消除不具有波长依赖的校正误差及气溶胶的贡献。411 象变得更大更明显 (Bourassa et al., 2018), 影响了
 386 但是对于随切高和波长变化的误差来源及气溶胶的412 其在臭氧长期变化趋势监测中的应用(Hubert et al.
 387 多次散射贡献, 这两种反演方法都难以在算法中逃413 2016), 该问题被诊断为是由于仪器指向偏差的变化
 388 行准确的去除。仪器的杂散光、信噪比影响、地表414 导致的, 并在 OSIRIS V5.10 算法版本中进行了校正
 389 反射率误差、切高校正误差, 以及大气状态参数误415 (Bourassa et al., 2018)。SCIAMACHY 载荷的臭氧产
 390 差和平流层气溶胶的扰动等都是临边廓线反演系统416 品算法在更新迭代的过程中, 通过误差分解的方法
 391 的误差源, 需要在反演算法中进行定量的误差分417 指明了指向误差、平流层气溶胶参数设置和云干扰
 392 析。418 是影响臭氧反演精度的主要误差源(von Savigny et al.

393 5 产品及应用

394 5.1 臭氧

395 平流层臭氧对平流层的辐射收支起着至关重要423
 396 的作用, 其决定了平流层的温度结构并影响大气环424
 397 流和气候(Son et al., 2008, Shindell et al., 1999, Xie425
 398 et al., 2008, Zhang et al., 2020)。自发现南极春季臭426
 399 氧空洞以来, 研究证明人为释放氟氯化碳化合物会427
 400 消耗平流层臭氧层(Farman et al., 1985), 与平流层428
 401 臭氧有关的研究也得到了广泛的关注。近 30 多年以429
 402 来, 卫星观测一直被用于监测平流层臭氧的变化及430
 403 其长期趋势。其中基于临边和掩星观测的臭氧数据431
 404 在长期变化监测中发挥了重要的作用(Hassler et al.,432
 405 2014)。
 419 2005; Rahpoe et al.2013)。SCIAMACHY V2.1 臭氧
 420 产品与其他卫星载荷相比, 20~50 km 之间的偏差小
 421 于 10%, 通常在 5% 以内, 但在热带地区的 10~20
 422 km 高度范围内存在较高的系统偏差(Mieruch et al.
 423 2012), SCIAMACHY V3.0 臭氧产品改进了北半球
 424 高纬度地区由于仪器杂散光带来的严重低估的问题
 425 (~-15%), 与地基臭氧探空数据相比, 两者在热带
 426 地区差异通常小于 5%, 在高纬度地区差异也在
 427 10%内(Jia et al., 2015)。OMPS 臭氧廓线产品在 20-
 428 60 km 高度范围内与 MLS 载荷的偏差在 5-10%之
 429 间。OMPS 臭氧产品与地基臭氧探空数据的验证结
 430 果表明, 在 13~30km 高度范围内, 两者在北半球中
 431 纬度和高纬度地区的差异在 $\pm 5\%$ 范围内, 在南半球
 432 中纬度和高纬度地区两者的差异在 5-7%之间(Arosio

433 et al. 2018)。

434 基于临边观测的臭氧数据集可应用于长时序趋460
435 势分析。为了构建具有长时序一致性的平流层臭氧461
436 数据集，研究者对不同来源的臭氧数据集的偏差和462
437 稳定性进行研究。Rahpoe et al.(2015)与 Hubert e463
438 al.(2016) 分析了多种临边和掩星载荷臭氧数据集的464
439 长期稳定性、总体偏差和短期可变性，其研究结果465
440 指出了 SCIAMACHY 载荷臭氧廓线存在 10% 的偏466
441 差，且 SCIAMACHY 载荷和 OSIRIS 载荷存在长期467
442 趋势的漂移。该问题的发现推动和促进了临边载荷468
443 臭氧产品算法的更新，改进后的临边臭氧数据集与469
444 MLS 相比，两者的一致性无论在长期趋势还是短期70
445 变化上均有明显提升(Bourassa et al., 2018)。利用掩71
446 星和临边观测构成的长时序的臭氧数据集的趋势研72
447 究表明，自 1997 年以来臭氧在整个平流层上部呈显73
448 著的正趋势，但仍处在较弱的水平(Bourassa et al.74
449 2018; Sofieva et al.2017)。除趋势分析外，研究者75
450 还对引起趋势变化的驱动因子如热带大气准两年振76
451 荡 (QBO: Quasi-biennial oscillation of tropica77
452 atmosphere)、太阳周期、南方涛动等进行了分析78
453 (Sioris et al., 2014, Randel et al., 2007)。

454 5.2 二氧化氮

455 NO_x 与氯族元素参与平流层臭氧损耗的催化循
456 环，是造成极地春季臭氧洞形成的重要原因(Farman
457 et al., 1985)。NO₂ 转化为 HNO₃ 后的损失可作为臭
458 氧空洞非均相化学诊断的依据。Sioris et al. (2003)

459 首次利用 OSIRIS 临边观测资料得到了 19-40km 高
460 度范围的 NO₂ 廓线，与其他独立载荷 (HALOE/
461 POAM (Polar Ozone and Aerosol Measurement) III)
462 的偏差小于 20%。随后 Haley et al. (2004a)利用
463 DOAS 和最大后验估计相结合的方法实现了基于
464 OSIRIS 临边散射观测的 15~40 km 高度范围内 NO₂
465 廓线反演，对应的精度为 10%。Bourassa et al.
(2011)利用 437~451nm 光谱范围的 4 个波长进行
466 NO₂ 廓线快速反演方法研究，提高了计算效率。之
467 后，Sioris et al. (2017)使用更大的光谱拟合窗
468 (435~477nm) 改进了 10.5~39km 高度范围的 NO₂
469 廓线精度，减少了由噪声引入的不确定性。

研究学者基于临边散射探测技术生产的 NO₂ 数
据集确定了闪电是导致对流层上部 NO₂ 显著增加的
主要原因(Sioris et al. 2007)，证明了临边散射技术
在现有遥感技术中探测闪电产生的氮氧化物的应用
潜力。此外，得益于 OSIRIS 长时序的观测，
OSIRIS 与 SAGE II 联合生成的长达 34 年的 NO₂ 数
据集已经用于构建季候态的平流层 NO₂ 数据库，研
究分析平流层 NO_x 的趋势变化 (Dube et al., 2020)。

479 在大气化学方面，OSIRIS NO₂ 的数据集联合
480 Aura/MLS 的 N₂O、HNO₃ 和 O₃ 可以用来分析活性
481 氮 (NO_y) 与 QBO (quasi-biennial oscillation) 的联
482 系(Park et al., 2017); 联合 Odin 上的亚毫米波辐射
483 计 (SMR) 观测的 O₃、ClO 和 N₂O 的信息及化学传
484 输模型的模拟揭示典型时段南极极涡的化学和动力
485 学演化特征(Ricaud et al., 2005)。

486 5.3 氧化溴

487 利用 BrO 在紫外波段的吸收特征, 紫外-可见
 488 光载荷可以基于天底观测实现 BrO 柱总量的反演,
 489 如 GOME(Platt and Wagner,1998)、OMI(Suleiman et
 490 al., 2019) 、 GOME2(Theys et al., 2011) 和
 491 TROPOMI(Seo et al., 2019)。利用临边观测技术, 可
 492 以实现 BrO 垂直廓线的反演(McLinden et al. 2010,
 493 Millan et al., 2012, Rozanov et al., 2011b)。如利用
 494 SCIAMACHY 337~357nm 临边光谱区间, 可实现
 495 BrO 全球廓线的反演(Rozanov et al., 2005b, Kuehl et
 496 al., 2008), 对应的精度为 10~35%, 探测的最佳敏感
 497 层为 16~26km,垂直分辨率为 3~5 km (Rozanov et al.,
 498 2011b)。McLinden et al. (2010)提出了 OSIRIS 的
 499 BrO 反演算法, 得到了 2001-2008 年间共 7 年的
 500 BrO 数据集, 对应的高度范围为 16~36 km, 单廓线
 501 的精度为 30%, 有效垂直分辨率为 3-5 km。临边散
 502 射观测的 BrO 廓线为研究和监测平流层中溴含量的

506 5.4 平流层气溶胶

507 大型的火山爆发会造成平流层气溶胶含量的显
 508 著变化, 进而通过平流层气溶胶的辐射强迫效应影
 509 响气候(Bourassa et al., 2007)。此外, 即使在本底水
 510 平上, 气溶胶对痕量气体化学反应的影响也是显著
 511 的。如对臭氧催化循环至关重要的 NO_x/NO_y 对低水
 512 平的气溶胶表面敏感(Crutzen, 1970)。平流层气溶胶

513 也是极地平流层云团的凝结核, 在南极臭氧空洞的
 514 形成中起着至关重要的作用。在寒冷的北极冬季,
 515 也会影响北极极地涡旋中的催化臭氧反应(von
 516 Savigny et al., 2015)。

过去几十年来, 基于一系列的掩星载荷, 如
 SAGE, POAM 等实现了对平流层气溶胶消光系数
 的卫星探测。掩星和临边探测由于路径长, 提供了
 较高的垂直分辨率和对气溶胶背景水平的良好敏感
 性。SAGE II 被广泛认为是平流层中卫星气溶胶消
 光测量的基准, 多数临边散射载荷得到的气溶胶消
 光产品都与 SAGE II 的气溶胶消光产品进行交叉对
 比。相较于掩星观测只对消光系数敏感, 临边散射
 辐射同时取决于气溶胶的散射特性(特别是相位函数)
 和消光系数。在临边散射反演系统中 O_3 和 NO_2 等痕
 量气体的反演精度对假定气溶胶参数的误差都很敏
 感, 背景气溶胶对臭氧反演的误差在低于 40km 高
 度范围内的贡献为 5-8%(Loughman et al., 2005)。

临边散射技术对平流层气溶胶的探测能力主要
 体现在气溶胶数浓度和消光系数两方面。在气溶胶
 数密度反演方面, OSIRIS 的气溶胶数密度反演结果
 与 SAGEII 和 SAGEIII 相比差异在 15% 以内
 (Bourassa et al., 2007)。SCIAMACHY 气溶胶数浓度
 与 SAGE II 在 14~30km 范围内的整体偏差在 50%内
 (Ovigneur et al. 2011)。在气溶胶消光系数反演方
 面, SCIAMACHY 气溶胶消光系数与 SAGEII 的差
 异为 10% (>15km) (von Savigny et al., 2015)。
 OMPS V2.0 版本的气溶胶消光系数在 745、869 和

540 997 nm 处精度为 $10\% \pm 15\%$ (Taha et al., 2021)。565 **5.5 云**

541 Rieger et al. (2019)采用多波段的方法, 减弱 OSIRIS 566 由于云的存在会对临边散射的观测辐射产生复杂的

542 观测的时空偏差对反演结果的影响, 并进一步提高 567 影响, 因此临边观测的廓线反演是在无云条件或者

543 上对流层和下对流层高度的反演精度。与 SAGE 相 568 云上进行的。对于每个扫描切高序列, 需要确定云

544 比, OSIRIS 气溶胶消光系数在对流层顶以上大部分 569 高以建立反演廓线的下边界(Chen et al., 2016)。利

545 区域的偏差小于 10%。基于此 OSIRIS 可提供长达 570 用可见或近红外临边辐射垂直梯度的变化可以反演

546 17 年的气溶胶消光系数数据集 571 云高度信息, Eichmann et al. (2016)发展了基于

547 (https://arg.usask.ca/docs/osiris_v7/, 访问日期: 572 SCIAMACHY 的云检测方法 SCODA (SCIAMACHY

548 2023-10-09)。除了气溶胶数浓度和消光系数, 573 Cloud Detection Algorithm), 该云顶高度产品的全

549 Malinina et al. (2018)从 SCIAMACHY 的临边观测光 574 球偏差约为 1 km, 优于临边观测模式的垂直分辨

550 谱中反演出了气溶胶的粒径分布, 提供了单峰对数 575 率。Rault 和 Loughman (2013)基于 OMPS 波长大于

551 正态分布的两个参数 (不确定性小于 20%), 并进一 576 700nm (除了 759-767nm O₂ A 吸收带及 929~951nm

552 步计算 Ångström 指数(Malinina et al., 2019)。 577 水汽吸收带)上的辐射突变来确定临边观测序列上的

553 基于临边散射观测可构建长时序的平流层气溶 578 最高的云顶高度。但是气溶胶层也会导致可见光和

554 胶特性数据集(Thomason et al., 2018, Rieger et al. 579 红外波长辐射的突然变化, 所以这种方法不能区分

555 2019), 也可以准确表征临边 O₃ 和 NO₂ 反演算法中 580 对流层云和气溶胶。Chen et al. (2016) 基于云比气

556 所需的平流层气溶胶参数, 如 SCIAMACHY 临边 581 溶胶产生的辐射梯度更大的假设, 利用 OMPS-LP

557 V3.0 的臭氧反演算法中, 利用了由 SCIAMACHY 582 674 nm 和 868 nm 辐射垂直梯度的变化区分云层和

558 临边探测得的气溶胶消光系数作为正向模型的输 583 气溶胶,与 CALIPSO 云顶高度相比, 两者差异的中

559 入, 替代之前算法版本中利用 ECSTRA (Extinction 584 位数为 1.8 km(Chen et al., 2016)。需要说明的是,

560 Coefficient for STRatospheric Aerosol)气溶胶数据库 585 OMPS-LP 的云顶高度能识别极地平流层云 (PSCs:

561 的方法(Jia et al., 2015)。此外, 临边平流层气溶胶 586 Polar Stratosphere Cloudes), PSCs 频率和位置对于

562 产品还可以用于监测火山烟羽前后平流层气溶胶的 587 分析和解释极地春季可能发生的短期臭氧消耗是一

563 动态变化(Malinina et al., 2021), 辅助分析极地臭氧 588 个有价值的诊断指标(DeLand et al., 2020)。

564 洞的演变机理和过程。

Table 1 Specifications setting of limb scattering sensors and precision of products

传感器名称	OSIRIS	SCIAMACHY	OMPS_LP	
载荷	Odin	ENVISAT	NPP	
发射时间	2001.02	2002.03	2011.10	
观测方式	紫外临边	天底+临边+掩星	临边	
光谱范围	280-800nm	240-2380nm	290-1000nm UV:290-370nm VIS:370-750nm IR:750-1000nm	
光谱分辨率	1nm	0.25-1.5nm	1-40nm(UV:1nm;VIS:10nm)	
垂直探测范围	7~70km	-3~92km	对流层顶~60km	
垂直分辨率	1~2.5km	3.3km	1.5~2km	
产品及 其精度	O ₃ 廓线	6% @24km;12- 14% @10km; 33% @44km	优于 5%,20~50km; 整体 上优于 10%	<15km,20%; >15km, 10% (实际上优于 10%, 5-7%)
	NO ₂ 廓线	10% @25km;33- 35% @10km;50% @46km	20%	—
	BrO 廓线	30%	10~35%	—
	气溶胶数密度	15%	均方根差<50% (14~30km)	—
	气溶胶消光系数	10%	10% (>15km)	10%±15%
	云顶高度	方法同 OMPS(Chen et al. 2016))	1km	差值中位数 1.8km(CALIPSO)
	591	593		
	592	594		

收稿日期: 2020-XX-XX; 预印本:XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(41775028, 41901269); 国家重点研发计划项目(2017YFB0504001); 风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0501)

第一作者简介: 王雅鹏(1990-), 女, 博士, 主要从事大气成分遥感反演算法研究。E-mail:wangyp@cma.gov.cn

通信作者简介: 张兴赢, 1978年生, 男, 研究员, 方向为大气遥感反演方法研究和应用。E-mail:zxy@cma.gov.cn

595 临边散射载荷的设置及产品精度见表 2。整体 20 为平流层化学和动力学的动态监测提供了长达 20 余
 596 上,通过临边散射这种技术手段,使在紫外-可见光 21 年的观测资料。通过联合掩星探测资料,其时序观
 597 波段有吸收特征的大气成分,如 O₃、NO₂、BrO 等 22 测可追溯至 1984 年,不仅可以进行平流层臭氧的趋
 598 高垂直分辨率的廓线探测成为可能,促进了对平流 23 势变化分析,还可以动态监测南极臭氧洞的变化,
 599 层大气化学及动力学过程的理解与认识。需要强调 24 为极地短期臭氧消耗时段的化学和动力学过程提供
 600 的是,通过临边观测得到的是相应大气成分的垂直 25 诊断信息。
 601 分布信息。以 NO₂ 为例,天底观测几何得到的 NO₂ 26 临边散射技术经过 20 余年的发展,仍有未解决
 602 柱浓度是对流层和平流层贡献的综合,临边得到的 27 的问题。如正向模型方面,由于卫星观测的切高序
 603 NO₂ 廓线主要体现的是平流层 NO₂ 的垂直分布信 28 列多,且需要考虑多次散射贡献带来的模拟时长增
 604 息。需要注意到,受限于临边散射载荷的动态响应 29 加的问题。为了满足业务运行的需要,进一步发展
 605 范围、垂直扫描范围、地表反射干扰与云干扰等因 30 针对临边散射载荷的快速辐射传输模型对业务化运
 606 素,临边散射大气成分产品的有效探测高度在对流 31 行至关重要。在反演算法方面,临边散射载荷都存
 607 层顶以上,这就限制了其产品在对流层的应用能 32 在着指向信息误差大,以及视场受杂散光污染的问题,
 608 力。另一方面,已有的研究也指明需要定期监测和 33 题,精确的实验室定标及深入的指向误差来源分
 609 评估由于仪器定标精度变化(如指向精度)导致的 34 析,是校正杂散光影响和切高配准误差的有效途
 610 产品精度变化对应用端的影响。此外,现阶段的发展 35 径。此外,准确表征临边传输路径上气溶胶特征和
 611 展趋势指明,通过联合多源卫星观测,如掩星与临 36 云顶高度位置是降低反演不确定性的关键步骤。
 612 边观测的联合、天底和临边的联合等可以进一步推 37 目前,我国内也积极推动临边散射技术的发
 613 动卫星数据应用能力的提升。 38 展。针对 OMS-L 和 EMI_NL 临边载荷,开展临边

614 6 总结与展望

615 本文从卫星临边散射载荷、正向辐射传输模
 616 型、反演算法、产品及应用四个方面综述了星载临
 617 边散射技术的进展。整体上,临边散射卫星遥感技
 618 术因其在采样频率和垂直分辨率方面的优势,能提
 619 供 2-3km 垂直分辨率,近乎全球覆盖的探测能力,

638 展。针对 OMS-L 和 EMI_NL 临边载荷,开展临边
 639 散射探测仿真分析、临边反演算法开发及应用示范
 640 研究等工作,是提升我国临边散射能力的关键。此
 641 外,开展天底与临边协同反演模型的研发,可发挥
 642 两者的探测优势并进一步提升其应用能力。

643 参考文献(References)

644 ADAMS, C., BOURASSA, A. E., BATHGATE, A. F., MCLINDEN,
 645 C. A., LLOYD, N. D., ROTH, C. Z., LLEWELLYN, E. J.,

- 646 ZAWODNY, J. M., FLITTNER, D. E., MANNEY, G. L. 684 technique. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6521-6529.
- 647 DAFFER, W. H. & DEGENSTEIN, D. A. 2013 685 DELAND, M. T., BHARTIA, P. K., KRAMAROVA, N. & CHEN,
- 648 Characterization of Odin-OSIRIS ozone profiles with the 686 Z. 2020. OMPS LP Observations of PSC Variability During
- 649 SAGE II dataset. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1447-1459. 687 the NH 2019-2020 Season. *Geophysical Research Letters*, 47.
- 650 AROSIO, C., ROZANOV, A., MALININA, E., EICHMANN, K. U. 688 DUBE , K., RANDEL, W., BOURASSA, A., ZAWADA, D.,
- 651 VON CLARMANN, T. & BURROWS, J. P. 2018. Retrieval of 689 MCLINDEN, C. & DEGENSTEIN, D. 2020. Trends and
- 652 ozone profiles from OMPS limb scattering observations. 690 Variability in Stratospheric NO_x Derived From Merged SAGE
- 653 *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 2135-2149. 691 II and OSIRIS Satellite Observations. *Journal of Geophysical*
- 654 BOURASSA, A. E., DEGENSTEIN, D. A., GATTINGER, R. L. & 692 *Research-Atmospheres*, 125.
- 655 LLEWELLYN, E. J. 2007. Stratospheric aerosol retrieval with 693 ERRERA, Q., DEKEMPER, E., BAKER, N., DEBOSSCHER, J.,
- 656 optical spectrograph and infrared imaging system limb scatter 694 DEMOULIN, P., MATESHVILI, N., PIEROUX, D.,
- 657 measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere* 695 VANHELLEMONT, F. & FUSSEN, D. 2021. On the capability
- 658 112. 696 of the future ALTIUS ultraviolet-visible-near-infrared limb
- 659 BOURASSA, A. E., DEGENSTEIN, D. A. & LLEWELLYN, E. 697 sounder to constrain modelled stratospheric ozone.
- 660 2008. SASKTRAN: A spherical geometry radiative transfer 698 *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 4737-4753.
- 661 code for efficient estimation of limb scattered sunlight 699 Eichmann, Kai-Uwe, Luca Lelli, Christian von Savigny, Harjinder
- 662 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 700 Sembhi, and John P. Burrows. 2016. "Global cloud top height
- 663 109, 52-73. 701 retrieval using SCIAMACHY limb spectra: model studies and
- 664 BOURASSA, A. E., MCLINDEN, C. A., SIORIS, C. E. 702 first results." *Atmospheric Measurement Techniques*, 9
- 665 BROHEDE, S., BATHGATE, A. F., LLEWELLYN, E. J. & 703 (2):793-815. doi: 10.5194/amt-9-793-2016.
- 666 DEGENSTEIN, D. A. 2011. Fast NO₂ retrievals from Odin 704 FARMAN, J. C., GARDINER, B. G. & SHANKLIN, J. D. 1985.
- 667 OSIRIS limb scatter measurements. *Atmospheric Measurement* 705 Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal
- 668 *Techniques*, 4, 965-972. 706 ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315, 207-210.
- 669 BOURASSA, A. E., ROTH, C. Z., ZAWADA, D. J., RIEGER, L. A. 707 FLITTNER, D. E., BHARTIA, P. K. & HERMAN, B. M. 2000. O₃
- 670 MCLINDEN, C. A. & DEGENSTEIN, D. A. 2018. Drift 708 profiles retrieved from limb scatter measurements: Theory.
- 671 corrected Odin-OSIRIS ozone product: algorithm and updated 709 *Geophysical Research Letters*, 27, 2601-2604.
- 672 stratospheric ozone trends. *Atmospheric Measurement* 710 FLYNN, L. E., MCNAMARA, D., BECK, C. T.,
- 673 *Techniques*, 11, 489-498. 711 PETROPAVLOVSKIKH, I., BEACH, E., PACHEPSKY, Y., LI,
- 674 CHEN, Z., DELAND, M. & BHARTIA, P. K. 2016. A new 712 Y. P., DELAND, M., HUANG, L. K., LONG, C. S.,
- 675 algorithm for detecting cloud height using OMPS/LP 713 TIRUCHIRAPALLI, R. & TAYLOR, S. 2009. Measurements
- 676 measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9 714 and products from the Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV/2)
- 677 1239-1246. 715 and Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) instruments.
- 678 CRUTZEN, P. J. 1970. The influence of nitrogen oxides on the 716 *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4259-4272.
- 679 atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal* 717 HALEY, C. S., BROHEDE, S. M., SIORIS, C. E., GRIFFIOEN, E.,
- 680 *Meteorological Society*, 96, 320-325. 718 MURTAGH, D. P., MCDADE, I. C., ERIKSSON, P.,
- 681 DEGENSTEIN, D. A., BOURASSA, A. E., ROTH, C. Z. & 719 LLEWELLYN, E. J., BAZUREAU, A. & GOUTAIL, F. 2004a.
- 682 LLEWELLYN, E. J. 2009. Limb scatter ozone retrieval from 720 Retrieval of stratospheric O₃ and NO₂ profiles from Odin
- 683 10 to 60 km using a multiplicative algebraic reconstruction 721 Optical Spectrograph and Infrared Imager System (OSIRIS)

- limb-scattered sunlight measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109, 761-766.
- 724 HALEY, C. S., VON SAVIGNY, C., BROHEDE, S., SIORIS, C. E. & MCDADE, I. C., LLEWELLYN, E. J. & MURTAGH, D. 2004b. A comparison of methods for retrieving stratospheric ozone profiles from OSIRIS limb-scatter measurements. *Advances in Space Research*, 34, 769-774.
- 729 HASSLER, B., PETROPAVLOVSKIKH, I., STAEHELIN, J. AUGUST, T., BHARTIA, P. K., CLERBAUX, C. DEGENSTEIN, D., MAZIERE, M. D., DINELLI, B. M. DUDHIA, A., DUFOUR, G., FRITH, S. M., FROIDEVAUX L., GODIN-BEEKMANN, S., GRANVILLE, J., HARRIS, R. P., HOPPEL, K., HUBERT, D., KASAI, Y., KURYLO, M. KYRÖLÄ, E., LAMBERT, J. C., LEVELT, P. F., MCELROY, T., MCPETERS, R. D., MUNRO, R., NAKAJIMA, H. PARRISH, A., RASPOLINI, P., REMSBERG, E. ROSENLOF, K. H., ROZANOV, A., SANO, T., SASANO, SHIOTANI, M., SMIT, H. G. J., STILLER, G., TAMMINEN J., TARASICK, D. W., URBAN, J., VAN DER A. R. VEEFKIND, J. P., VIGOUROUX, C., VON CLARMANN, T. VON SAVIGNY, C., WALKER, K. A., WEBER, M., WILD, & ZAWODNY, J. M. 2014. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement technique uncertainties and availability. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1395-1427.
- 747 HUBERT, D., LAMBERT, J. C., VERHOELST, T., GRANVILLE J., KEPPENS, A., BARAY, J. L., BOURASSA, A. CORTESI, U., DEGENSTEIN, D. A., FROIDEVAUX, L. GODIN-BEEKMANN, S., HOPPEL, K. W., JOHNSON, B. KYRÖLÄ, E., LEBLANC, T., LICHTENBERG, MARCHAND, M., MCELROY, C. T., MURTAGH, D. NAKANE, H., PORTAFAIX, T., QUEREL, R., RUSSELL J. M., SALVADOR, J., SMIT, H. G. J., STEBEL, K. STEINBRECHT, W., STRAWBRIDGE, K. B., STÜBI, SWART, D. P. J., TAHA, G., TARASICK, D. W., THOMPSON A. M., URBAN, J., VAN GIJSEL, J. A. E., VAN MALDEREN R., VON DER GATHEN, P., WALKER, K. A., WOLFRAM, & ZAWODNY, J. M. 2016. Ground-based assessment of the bias and long-term stability of 14 limb and occultation ozone profile data records. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2497-2534.
- JAROSS, G., BHARTIA, P. K., CHEN, G., KOWITT, M., HAKEN, M., CHEN, Z., XU, P., WARNER, J. & KELLY, T. 2014. OMPS Limb Profiler instrument performance assessment. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 119, 4399-4412.
- JIA, J., ROZANOV, A., LADSTAETTER-WEISSENMAYER, A. & BURROWS, J. P. 2015. Global validation of SCIAMACHY limb ozone data (versions 2.9 and 3.0, IUP Bremen) using ozonesonde measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 3369-3383.
- KRAMAROVA, N. A., BHARTIA, P. K., JAROSS, G., MOY, L., XU, P., CHEN, Z., DELAND, M., FROIDEVAUX, L., LIVESEY, N., DEGENSTEIN, D., BOURASSA, A., WALKER, K. A. & SHEESE, P. 2018. Validation of ozone profile retrievals derived from the OMPS LP version 2.5 algorithm against correlative satellite measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 2837-2861.
- KUEHL, S., PUKITE, J., DEUTSCHMANN, T., PLATT, U. & WAGNER, T. 2008. SCIAMACHY limb measurements of NO₂, BrO and OClO. Retrieval of vertical profiles: Algorithm, first results, sensitivity and comparison studies. *Advances in Space Research*, 42, 1747-1764.
- LLEWELLYN, E., LLOYD, N. D., DEGENSTEIN, D. A., GATTINGER, R. L., PETELINA, S. V., BOURASSA, A. E., WIENSZ, J. T., IVANOV, E. V., MCDADE, I. C., SOLHEIM, B. H., MCCONNELL, J. C., HALEY, C. S., VON SAVIGNY, C., SIORIS, C. E., MCLINDEN, C. A., GRIFFIOEN, E., KAMINSKI, J., EVANS, W. F. J., PUCKRIN, E., STRONG, K., WEHRLE, V., HUM, R. H., KENDALL, D. J. W., MATSUSHITA, J., MURTAGH, D. P., BROHEDE, S., STEGMAN, J., WITT, G., BARNES, G., PAYNE, W. F., PICHE, L., SMITH, K., WARSHAW, G., DESLAUNIERS, D. L., MARCHAND, P., RICHARDSON, E. H., KING, R. A., WEVERS, I., MCCREATH, W., KYROLA, E., OIKARINEN, L., LEPPELMEIER, G. W., AUVINEN, H., MEGIE, G., HAUCHECORNE, A., LEFEVRE, F., DE LA NOE, J.,

- 798 RICAUD, P., FRISK, U., SJOBERG, F., VON SCHEELE, F. & 836
799 NORDH, L. 2004. The OSIRIS instrument on the Odi 837
800 spacecraft. *Canadian Journal of Physics*, 82, 411-422. 838
801 LOUGHMAN, R., FLITTNER, D., NYAKU, E. & BHARTIA, P. 839
802 2015. Gauss-Seidel limb scattering (GSLs) radiative transfer 840
803 model development in support of the Ozone Mapping and 841
804 Profiler Suite (OMPS) limb profiler mission. *Atmospheric 842*
805 *Chemistry and Physics*, 15, 3007-3020. 843
806 LOUGHMAN, R. P., GRIFFIOEN, E., OIKARINEN, L. 844
807 POSTYLYAKOV, O. V., ROZANOV, A., FLITTNER, D. E. & 845
808 RAULT, D. F. 2004. Comparison of radiative transfer models 846
809 for limb-viewing scattered sunlight measurements. *Journal of 847*
810 *Geophysical Research-Atmospheres*, 109. 848
811 LOUGHMAN, R. P., FLITTNER, D. E., HERMAN, B. M. 849
812 BHARTIA, P. K., HILSEN RATH, E. & MCPETERS, R. D. 850
813 2005. Description and sensitivity analysis of a limb scattering 851
814 ozone retrieval algorithm. *Journal of Geophysical Research 852*
815 *Atmospheres*, 110. 853
816 MALININA, E., ROZANOV, A., NIEMEIER, U., WALLIS, S. 854
817 AROSIO, C., WRANA, F., TIMMRECK, C., VON SAVIGNY, 855
818 C. & BURROWS, J. P. 2021. Changes in stratospheric aerosol 856
819 extinction coefficient after the 2018 Ambae eruption as seen 857
820 by OMPS-LP and MAECHAM5-HAM. *Atmospheric 858*
821 *Chemistry and Physics*, 21, 14871-14891. 859
822 MALININA, E., ROZANOV, A., RIEGER, L., BOURASSA, A. 860
823 BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P. & DEGENSTEIN, D. 861
824 2019. Stratospheric aerosol characteristics from space-born 862
825 observations: extinction coefficient and Angstrom exponent 863
826 *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3485-3502. 864
827 MALININA, E., ROZANOV, A., ROZANOV, V., LIEBING, P. 865
828 BOVENSMANN, H. & BURROWS, J. P. 2018. Aerosol 866
829 particle size distribution in the stratosphere retrieved from 867
830 SCIAMACHY limb measurements. *Atmospheric Measurement 868*
831 *Techniques*, 11, 2085-2100. 869
832 MCLINDEN, C. A., BOURASSA, A. E., BROHEDE, S., COOPER, 870
833 M., DEGENSTEIN, D. A., EVANS, W. J. F., GATTINGER, R. 871
834 L., HALEY, C. S., LLEWELLYN, E. J., LLOYD, N. D. 872
835 LOEWEN, P., MARTIN, R. V., MCCONNELL, J. C. 873
MCDADE, I. C., MURTAGH, D., RIEGER, L., VON
SAVIGNY, C., SHEESE, P. E., SIORIS, C. E., SOLHEIM, B.
& STRONG, K. 2012. OSIRIS A Decade of Scattered Light.
Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 1845-
1863.
MCLINDEN, C. A., HALEY, C. S., LLOYD, N. D., HENDRICK,
F., ROZANOV, A., SINNHUBER, B.-M., GOUTAIL, F.,
DEGENSTEIN, D. A., LLEWELLYN, E. J., SIORIS, C. E.,
VAN ROOZENDAEL, M., POMMERAU, J. P., LOTZ, W. &
BURROWS, J. P. 2010. Odin/OSIRIS observations of
stratospheric BrO: Retrieval methodology, climatology, and
inferred BrO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,
115.
MCPETERS, R. D., JANZ, S. J., HILSEN RATH, E., BROWN, T.
L., FLITTNER, D. E. & HEATH, D. F. 2000. The retrieval of
O-3 profiles from limb scatter measurements: Results from the
Shuttle Ozone Limb Sounding Experiment. *Geophysical*
Research Letters, 27, 2597-2600.
MIERUCH, S., WEBER, M., VON SAVIGNY, C., ROZANOV, A.,
BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P., BERNATH, P. F.,
BOONE, C. D., FROIDEVAUX, L., GORDLEY, L. L.,
MLYNCZAK, M. G., RUSSELL III, J. M., THOMASON, L.
W., WALKER, K. A. & ZAWODNY, J. M. 2012. Global and
long-term comparison of SCIAMACHY limb ozone profiles
with correlative satellite data (2002–2008). *Atmos. Meas.*
Tech., 5, 771-788.
MILLAN, L., LIVESEY, N., READ, W., FROIDEVAUX, L.,
KINNISON, D., HARWOOD, R., MACKENZIE, I. A. &
CHIPPERFIELD, M. P. 2012. New Aura Microwave Limb
Sounder observations of BrO and implications for BrO.
Atmospheric Measurement Techniques, 5, 1741-1751.
NOEL, S., BOVENSMANN, H., BURROWS, J., FRERICK, J.,
CHANCE, K., GOEDE, A. & MULLER, C. 1998.
SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1, SPIE.
NOEL, S., WUTTKE, M. W., SKUPIN, J., BOVENSMANN, H.,
BURROWS, J. P., GOTTWALDT, M., KRIEG, E. & IEEE;
IEEE, I. 2003. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT:
First performance monitoring results. 23rd International

- 874 Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003) 12
875 2003Jul 21-25 2003 Toulouse, France. 3120-3122. 913
- 876 OVIGNEUR, B., LANDGRAF, J., SNEL, R. & ABEN, I. 2019 14
877 Retrieval of stratospheric aerosol density profiles from 15
878 SCIAMACHY limb radiance measurements in the O₂ A-band 16
879 *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 2359-2373. 917
- 880 PARK, M., RANDEL, W. J., KINNISON, D. E., BOURASSA, A. 18
881 E., DEGENSTEIN, D. A., ROTH, C. Z., MCLINDEN, C. A. 19
882 SIORIS, C. E., LIVESEY, N. J. & SANTEE, M. L. 2019 20
883 Variability of Stratospheric Reactive Nitrogen and Ozone 21
884 Related to the QBO. *Journal of Geophysical Research* 22
885 *Atmospheres*, 122, 10103-10118. 923
- 886 PARRELLA, J. P., CHANCE, K., SALAWITCH, R. J., CANTY, T. 24
887 DORF, M. & PFEILSTICKER, K. 2013. New retrieval of BrO 25
888 from SCIAMACHY limb: an estimate of the stratospheric 26
889 bromine loading during April 2008. *Atmospheric Measurement* 27
890 *Techniques*, 6, 2549-2561. 928
- 891 Platt, U. and T. Wagner .1998. Satellite mapping of enhanced BrO 29
892 concentrations in the troposphere. *Nature*, 395(6701): 486-490 30
- 893 RAHPOE, N., VON SAVIGNY, C., WEBER, M., ROZANOV, A. 31
894 BOVENSMANN, H. & BURROWS, J. P. 2013. Error budget 32
895 analysis of SCIAMACHY limb ozone profile retrievals using 33
896 the SCIATRAN model. *Atmospheric Measurement Techniques* 34
897 6, 2825-2837. 935
- 898 RAHPOE, N., WEBER, M., ROZANOV, A. V., WEIGEL, K. 36
899 BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P., LAENG, A. 37
900 STILLER, G., VON CLARMANN, T., KYRÖLÄ, E., SOFIEV, 38
901 V. F., TAMMINEN, J., WALKER, K., DEGENSTEIN, D. 39
902 BOURASSA, A. E., HARGREAVES, R., BERNATH, P. 40
903 URBAN, J. & MURTAGH, D. P. 2015. Relative drifts and 41
904 biases between six ozone limb satellite measurements from the 42
905 last decade. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 4369-4381. 943
- 906 RANDEL, W. J., PARK, M., WU, F. & LIVESEY, N. 2007. A Large 44
907 Annual Cycle in Ozone above the Tropical Tropopause Linked 45
908 to the Brewer–Dobson Circulation. *Journal of the Atmospheric* 46
909 *Sciences*, 64, 4479-4488. 947
- 910 RAULT, D. F. & LOUGHMAN, R. P. 2013. The OMPS Limb 48
911 Profiler Environmental Data Record Algorithm Theoretical 49
- Basis Document and Expected Performance. *Ieee Transactions*
on *Geoscience and Remote Sensing*, 51, 2505-2527.
- RICAUD, P., LEFEVRE, F., BERTHET, G., MURTAGH, D.,
LLEWELLYN, E. J., MEGIE, G., KYROLA, E.,
LEPPELMEIER, G. W., AUVINEN, H., BOONNE, C.,
BROHEDE, S., DEGENSTEIN, D. A., DE LA NOE, J.,
DUPUY, E., EL AMRAOUI, L., ERIKSSON, P., EVANS, W. F.
J., FRISK, U., GATTINGER, R. L., GIROD, F., HALEY, C. S.,
HASSINEN, S., HAUCHECORNE, A., JIMENEZ, C., KYRO,
E., LAUTIE, N., LE FLOCHMOEN, E., LLOYD, N. D.,
MCCCONNELL, J. C., MCDADE, I. C., NORDH, L.,
OLBERG, M., PAZMINO, A., PETELINA, S. V.,
SANDQVIST, A., SEPPALA, A., SIORIS, C. E., SOLHEIM, B.
H., STEGMAN, J., STRONG, K., TAALAS, P., URBAN, J.,
VON SAVIGNY, C., VON SCHEELE, F. & WITT, G. 2005.
Polar vortex evolution during the 2002 Antarctic major
warming as observed by the Odin satellite. *Journal of*
Geophysical Research-Atmospheres, 110.
- RIEGER, L. A., ZAWADA, D. J., BOURASSA, A. E. &
DEGENSTEIN, D. A. 2019. A Multiwavelength Retrieval
Approach for Improved OSIRIS Aerosol Extinction Retrievals.
Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 124, 7286-
7307.
- ROZANOV, A., ROZANOV, V., BUCHWITZ, M.,
KOKHANOVSKY, A. & BURROWS, J. P. 2005a. SCIATRAN
2.0 - A new radiative transfer model for geophysical
applications in the 175-2400 nm spectral region. In:
BURROWS, J. P. & EICHMANN, K. U. (eds.) *Atmospheric*
Remote Sensing: Earth's Surface, Troposphere, Stratosphere
and Mesosphere - I.
- ROZANOV, A., BOVENSMANN, H., BRACHER, A.,
HRECHANY, S., ROZANOV, V., SINNHUBER, M.,
STROH, F. & BURROWS, J. P. 2005b. NO₂ and BrO vertical
profile retrieval from SCIAMACHY limb measurements:
Sensitivity studies. *Advances in Space Research*, 36, 846-854.
- ROZANOV, A., EICHMANN, K. U., VON SAVIGNY, C.,
BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P., VON BARGEN, A.,
DOICU, A., HILGERS, S., GODIN-BEEKMANN, S.,

- 950 LEBLANC, T. & MCDERMID, I. S. 2007. Comparison of the
951 inversion algorithms applied to the ozone vertical profile
952 retrieval from SCIAMACHY limb measurements. *Atmospheric*
953 *Chemistry and Physics*, 7, 4763-4779. 991
- 954 ROZANOV, A., WEIGEL, K., BOVENSMANN, H., DHOMSE, S.
955 EICHMANN, K. U., KIVI, R., ROZANOV, V., VÖMEL, H.
956 WEBER, M. & BURROWS, J. P. 2011a. Retrieval of water
957 vapor vertical distributions in the upper troposphere and the
958 lower stratosphere from SCIAMACHY limb measurements.
959 *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 933-954. 997
- 960 ROZANOV, A., KUEHL, S., DOICU, A., MCLINDEN, C.
961 PUKITE, J., BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P.
962 DEUTSCHMANN, T., DORF, M., GOUTAIL, F., GRUNOW
963 K., HENDRICK, F., VON HOBE, M., HRECHANYI, J.
964 LICHTENBERG, G., PFEILSTICKER, K., POMMERAU,
965 P., VAN ROOZENDAEL, M., STROH, F. & WAGNER, J.-P.
966 2011b. BrO vertical distributions from SCIAMACHY limb
967 measurements: comparison of algorithms and retrieval results.
968 *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1319-1359. 1006
- 969 ROZANOV, V. V., DINTER, T., ROZANOV, A. V., WOLANIN, A.
970 BRACHER, A. & BURROWS, J. P. 2017. Radiative transfer
971 modeling through terrestrial atmosphere and ocean accounting
972 for inelastic processes: Software package SCIATRAN. *Journal*
973 *of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 194, 65-86. 1011
- 974 SEO, S., RICHTER, A., BLECHSCHMIDT, A.-M., BOUGOUDIF,
975 I. & BURROWS, J. P. 2019. First high-resolution BrO column
976 retrievals from TROPOMI. *Atmospheric Measurement*
977 *Techniques*, 12, 2913-2932. 1015
- 978 SHINDELL, D., RIND, D., BALACHANDRAN, N., LEAN, J.,
979 LONERGAN, P. 1999. Solar Cycle Variability, Ozone, and
980 Climate. *Science*, 284, 305-308. 1018
- 981 SIORIS, C. E., HALEY, C. S., MCLINDEN, C. A., VON SAVIGNY,
982 C., MCDADE, I. C., MCCONNELL, J. C., EVANS, W. F.,
983 LLOYD, N. D., LLEWELLYN, E. J., CHANCE, K.,
984 KUROSU, T. P., MURTAGH, D., FRISK, U., PFEILSTICKER,
985 K., BOSCH, H., WEIDNER, F., STRONG, K., STEGMAN,
986 & MEGIE, G. 2003. Stratospheric profiles of nitrogen dioxide
987 observed by Optical Spectrograph and Infrared Imager System
on the Odin satellite. *Journal of Geophysical Research-
Atmospheres*, 108.
- SIORIS, C.E., MCLINDEN, C.A., FIOLETTOV, V.E., ADAMS, C.,
ZAWODNY, J.M., BOURASSA, A.E., ROTH, C.Z. &
DEGENSTEIN, D.A. 2014. Trend and variability in ozone in
the tropical lower stratosphere over 2.5 solar cycles observed
by SAGE II and OSIRIS. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3479-3496.
- SIORIS, C. E., MCLINDEN, C. A., MARTIN, R. V., SAUVAGE,
B., HALEY, C. S., LLOYD, N. D., LLEWELLYN, E. J.,
BERNATH, P. F., BOONE, C. D., BROHEDE, S. &
MCELROY, C. T. 2007. Vertical profiles of lightning-
produced NO₂ enhancements in the upper troposphere
observed by OSIRIS. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7,
4281-4294.
- SIORIS, C. E., RIEGER, L. A., LLOYD, N. D., BOURASSA, A. E.,
ROTH, C. Z., DEGENSTEIN, D. A., CAMY-PEYRET, C.,
PFEILSTICKER, K., BERTHET, G., CATOIRE, V., GOUTAIL,
F., POMMERAU, J.-P. & MCLINDEN, C. A. 2017.
Improved OSIRIS NO₂ retrieval algorithm: description and
validation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 1155-
1168.
- SOFIEVA, V. F., KYRÖLÄ, E., LAINE, M., TAMMINEN, J.,
DEGENSTEIN, D., BOURASSA, A., ROTH, C., ZAWADA,
D., WEBER, M., ROZANOV, A., RAHPOE, N., STILLER, G.,
LAENG, A., VON CLARMANN, T., WALKER, K. A.,
SHEESE, P., HUBERT, D., VAN ROOZENDAEL, M.,
ZEHNER, C., DAMADEO, R., ZAWODNY, J.,
KRAMAROVA, N. & BHARTIA, P. K. 2017. Merged
SAGE II, Ozone_cci and OMPS ozone profile dataset and
evaluation of ozone trends in the stratosphere. *Atmos. Chem.
Phys.*, 17, 12533-12552.
- SON, S.-W., POLVANI, L. M., WAUGH, D. W., AKIYOSHI, H.,
GARCIA, R., KINNISON, D., PAWSON, S., ROZANOV, E.,
SHEPHERD, T. G. & SHIBATA, K. 2008. The Impact of
Stratospheric Ozone Recovery on the Southern Hemisphere
Westerly Jet. *Science*, 320, 1486-1489.
- SULEIMAN, R. M., CHANCE, K., LIU, X., ABAD, G. G.,
KUROSU, T. P., HENDRICK, F. & THEYS, N. 2019. OMI

- 1026 total bromine monoxide (OMBRO) data product: algorithm
1027 retrieval and measurement comparisons. *Atmospheric*
1028 *Measurement Techniques*, 12, 2067-2084. 1063
- 1029 TAHA, G., LOUGHMAN, R., ZHU, T., THOMASON, L., KAR,
1030 RIEGER, L. & BOURASSA, A. 2021. OMPS LP Version
1031 multi-wavelength aerosol extinction coefficient retrieval
1032 algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 1015-
1033 1036. 1064
- 1034 THEYS, N., VAN ROOZENDAEL, M., HENDRICK, F., YANG, M.,
1035 DE SMEDT, I., RICHTER, A., BEGOIN, M., ERRERA, Q.,
1036 JOHNSTON, P. V., KREHER, K. & DE MAZIERE, M. 2018.
1037 Global observations of tropospheric BrO columns using
1038 GOME-2 satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*
1039 11, 1791-1811. 1065
- 1040 THOMASON, L. W., ERNEST, N., MILLAN, L., RIEGER, L.,
1041 BOURASSA, A., VERNIER, J.-P., MANNEY, G., LUO, H.,
1042 ARFEUILLE, F. & PETER, T. 2018. A global space-based
1043 stratospheric aerosol climatology: 1979-2016. *Earth System*
1044 *Science Data*, 10, 469-492. 1066
- 1045 VON SAVIGNY, C., ERNST, F., ROZANOV, A., HOMMEL, R.,
1046 EICHMANN, K. U., ROZANOV, V., BURROWS, J. P.,
1047 THOMASON, L. W. 2015. Improved stratospheric aerosol
1048 extinction profiles from SCIAMACHY: validation and sampling
1049 results. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 5223-5235
1050 VON SAVIGNY, C., HALEY, C. S., SIORIS, C. E., MCDADE,
1051 C., LLEWELLYN, E. J., DEGENSTEIN, D., EVANS, W. F.,
1052 GATTINGER, R. L., GRIFFIOEN, E., KYROLA, E., LLOYD,
1053 N. D., MCCONNELL, J. C., MCLINDEN, C. A., MEGIE, G.,
1054 MURTAGH, D. P., SOLHEIM, B. & STRONG, K. 2001.
1055 Stratospheric ozone profiles retrieved from limb scattered
1056 sunlight radiance spectra measured by the OSIRIS instrument
1057 on the Odin satellite. *Geophysical Research Letters*, 30. 1067
- 1058 VON SAVIGNY, C., KAISER, J. W., BOVENSMANN, H.,
1059 BURROWS, J. P., MCDERMID, I. S. & LEBLANC, T. 2005.
1060 Spatial and temporal characterization of SCIAMACHY limb
1061 pointing errors during the first three years of the mission.
1062 *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2593-2602. 1068
- 1063 WANG, Z. J., CHEN, S. B., JIN, L. H. & YANG, C. Y. 2011.
1064 Ozone profiles retrieval from SCIAMACHY Chappuis-Wulf
1065 limb scattered spectra using MART. *Science China-Physics*
1066 *Mechanics & Astronomy*, 54, 273-280. 1069
- 1067 XIE, F., TIAN, W. & CHIPPERFIELD, M. P. 2008. Radiative effect
1068 of ozone change on stratosphere-troposphere exchange.
1069 *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113. 1070
- 1071 ZAWADA, D., FRANSSSENS, G., LOUGHMAN, R., MIKKONEN,
1072 A., ROZANOV, A., EMDE, C., BOURASSA, A., DUECK, S.,
1073 LINDQVIST, H., RAMON, D., ROZANOV, V., DEKEMPER,
1074 E., KYROLA, E., BURROWS, J. P., FUSSEN, D. &
1075 DEGENSTEIN, D. 2021. Systematic comparison of vectorial
1076 spherical radiative transfer models in limb scattering geometry.
1077 *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 3953-3972. 1078
- 1078 ZAWADA, D. J., DUECK, S. R., RIEGER, L. A., BOURASSA, A.,
1079 E., LLOYD, N. D. & DEGENSTEIN, D. A. 2015. High-
1080 resolution and Monte Carlo additions to the SASKTRAN
1081 radiative transfer model. *Atmospheric Measurement*
1082 *Techniques*, 8, 2609-2623. 1083
- 1083 ZAWADA, D. J., RIEGER, L. A., BOURASSA, A. E. &
1084 DEGENSTEIN, D. A. 2018. Tomographic retrievals of ozone
1085 with the OMPS Limb Profiler: algorithm description and
1086 preliminary results. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11,
1087 2375-2393. 1088
- 1088 ZHANG, J., TIAN, W., XIE, F., PYLE, J. A., KEEBLE, J. &
1089 WANG, T. 2020. The Influence of Zonally Asymmetric
1090 Stratospheric Ozone Changes on the Arctic Polar Vortex Shift.
1091 *Journal of Climate*, 33, 4641-4658. 1092
- 1092 Li X Y, Chen L F, Su L, Zhang Y and Tao J H. 2013. Overview of
1093 sub -millimeter limb sounding. *Journal of Remote Sensing*,
1094 17(06): 1325-44 (李小英, 陈良富, 苏林, 张莹, 陶金花. 2013.
1095 亚毫米波临边探测发展现状. *遥感学报*, 17(06): 1325-44) .
1096 Wang Y P, Li X Y, Chen L F, Zhang Y, Zou M M, Zhang H and Zhu
1097 S Y. 2016. Overview of infrared limb sounding. *Journal of*
1098 *Remote Sensing*, 20(04): 513-27.(王雅鹏, 李小英, 陈良富,
1099 张莹, 邹铭敏, 张晗, 朱松岩. 2016. 红外临边探测发展现状.
1099 *遥感学报* .20 (04):513-27.)

1100

1101

1102

1103

The development and application of satellite-based limb

1104

scattering for atmospheric compositions

1105

Wang Yapeng^{1,2}, Zhang Xingying^{1,2*}, Yan Huanhuan^{1,2}, Wang Hongmei³, Zhang Xinxin³, Wang Weihe^{1,2}, Cheng

1106

Liangxiao⁴, Xu Na^{1,2}

1107

1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite

1108

Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081,

1109

China

1110

2 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FY3), China Meteorological Administration, Beijing,

1111

100081, China;

1112

3 School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong, 226019, China;

1113

4 China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

1114

Abstract:

1115

Objective

1116

Satellite-based limb scattering measurement technique had provided valuable data sets for long-term dynamic monitoring of stratospheric ozone and ozone-related atmospheric components, such as NO₂ and BrO. Since 2001, the development of this field has gone through more than 20 years, we summaries the principle and application of this technique, meanwhile analyses the problem to provide reference for the development of domestic limb scattering detection technology

1121

Method

1122

Since the OSIRIS onboard the Odin satellite platform, followed by SCIAMACHY onboard the ENVISAT platform, OMPS onboard the Suomi NPP and NOAA-21 platform and OMS-L onboard the FY-3F platform, all include limb scatter detection capability. Based on the design specifications of the payloads, such as wavelength coverage, spectral resolution, signal-to-noise ratio and instrument response function et al, with a radiative transfer model (RTM) capable of simulating the observed limb radiance at a series of tangent heights, O₃, NO₂, BrO profile, stratospheric aerosol and cloud information can be retrieved from limb scattering spectra. In this paper, we reviewed the development of satellite-based limb scattering technique, including instruments characteristics, RTM, inversion

1129

1130 algorithms, products and applications.

1131 **Result**

1132 In terms of forward models, the simulation of limb scattering needs to consider atmospheric
1133 scattering (single and multiple scattering), refraction, aerosol parameterization schemes and instrument
1134 characteristics under full spherical atmospheric conditions. In the aspect of retrieval algorithms, the
1135 wavelength shift correction, pointing information correction and stray light correction are needed to
1136 construct observation vectors for atmospheric parameters. The retrieved parameters had played an
1137 important role in analyzing stratospheric ozone dynamics and its related nitrogen oxides (e.g.NO₂) and
1138 halogen (e.g.BrO), as well as monitoring stratospheric clouds and aerosols.

1139 **Conclusion**

1140 Overall, limb scattering satellite remote sensing technology can provide 2-3km vertical resolution
1141 and almost global coverage detection capability due to its advantages in sampling frequency and
1142 observation geometry. However, there are still unresolved problems in limb scattering technology. For
1143 the forward model, a fast radiative transfer model specific for limb scattering sensors is critical to meet
1144 the needs of operational application. In addition, the limb scattering sensors all have the problem of
1145 pointing information error and the field of view is subject to the pollution of stray light. Accurate
1146 laboratory calibration and further analysis of the source of pointing error are effective ways to correct
1147 the influence of stray light and the registration error of tangent height. Meanwhile, accurately
1148 characterizing the aerosol characteristics and cloud top height on the limb path are also key steps to
1149 reduce the inversion uncertainty. This paper can facilitate the development and application of domestic
1150 limb scattering detection technology.

1151 **Key words:** limb scattering, stratospheric ozone, RTM, inversion algorithm, application progress

1152 **Supported by** the National Natural Science Foundation of China (41775028,41901269); National Key
1153 Research and Development Program of China (2017YFB0504001); Fengyun Application Pioneering
1154 Project(FY-APP-2022.0501)

1155