

氧气 A 吸收带大气遥感应用研究进展

张 岩,段民征,韩志刚,吕达仁

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要:位于可见光波谱的氧气 A 吸收带具有独特的谱线结构,随波长或仪器分辨率的变化表现出不同的光谱特性。因而从 20 世纪 60 年代到现在,氧气 A 吸收带在遥感中的应用一直是国外学者研究的热点。总结了业已取得的成果和未来应用的发展方向并分析了其潜在探测能力,希望能够引起国内相关学者的重视,为我国氧气 A 带探测技术的应用与发展提供理论基础。

关 键 词:氧气 A 吸收带;遥感;研究进展

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)02-0288-08

1 引 言

自遥感技术被引入大气科学领域以来,科学家们就在不断尝试利用特定吸收谱线探测大气特征(温、压、湿等)以及内部的云、气溶胶等的特定微观参数和宏观特征,进而获得最佳的反演结果。20 世纪 60 年代发射的第一颗气象卫星 TIROS 只有一个探测通道^[1],而之后的静止卫星普遍具有可见光、红外以及水汽 3 个探测通道。目前比较先进的 MODIS 仪器在可见光到热红外共设置了 36 个通道,AIRS、IASI 等在红外波谱有几千个通道。探测仪器的通道个数在不断提高,但获取大气、云和气溶胶特性的通道选取还是局限于特定的窄带探测技术。

能够发现一个全面、高效的通道一直以来都是大气遥感领域的研究重点,位于 758 到 778 nm 的氧气 A 吸收带自 20 世纪 60 年代就引起大气科学工作者的关注。近年来由于精细光谱测量技术上的突破,氧气 A 带遥感应用再次发展起来。氧气 A 带具有动态范围大,谱线分布规则的特性,能够用来反演云顶高度、云光学厚度、地表气压、大气压力廓线、高层大气温度廓线、气溶胶廓线和地表反照率,其应用能力堪称全面。

目前在轨运行的具备氧气 A(O_2 -A)带探测能力的科学仪器有 SeaWiFS, GOME, POLDER, MERIS, SCIAMACHY 等,近期刚刚发射的 OCO

和 GOSAT 卫星也搭载了能够覆盖 A 带的极高分辨率仪器(如表 1 所示),美国 NASA 戈达德空间飞行中心正在研制新型云高探测仪,集 11 μm 红外通道、 O_2 -A 带和 RING 效应通道于一身。可见利用 O_2 -A 带来探测大气、云、气溶胶等已经成为欧美对地遥感研究的一个热点问题,因此有必要对其研究历史以及应用能力作一个全面的总结。

2 氧气 A 吸收带及其应用原理

在红光和近红外之间存在 3 个由氧气分子吸收形成的吸收带,依据中心波长从小到大的顺序,它们依次被命名为氧气 γ ($14\,750\sim 15\,900\text{ cm}^{-1}$)、B($14\,300\sim 14\,600\text{ cm}^{-1}$)和 A 吸收带。在 A 带,氧气是唯一的吸收气体,其谱线为分布规则的双峰结构,由氧分子磁偶极矩转动跃迁而形成,因此强度较 γ 和 B 带都大。A 带的透射率动态范围也很大,有的波段小于 10^{-30} ,而有的波段则接近于 1(见图 1 所示 A 带光学厚度变化范围)。

由于氧气为混合比恒定的大气成分,加之 A 带的光谱特性,使其成为理想的大气要素反演通道。如利用云顶反射与云顶以上氧气吸收对应的关系,可以实现云顶高度反演;利用低层大气压力增宽是谱线加宽的主要因素,通过测量谱线远翼段的增宽获得大气压力廓线;利用带内光子光程研究云 3-D 辐射效应等。

表 1 目前能够覆盖或部分覆盖氧气 A 带的星载仪器及用途

Table 1 The payloads coving part or the whole Oxygen A-band of the present satellites

仪器名称	所在平台	升空时间	A 带用途或能提供的信息
GOME	ERS-2	1995	云信息
MOS	IRS-P3	1996	大气订正、云和气溶胶信息
SeaWiFS	SEASTAR	1997	大气订正
OSIRIS	Ordin	2001	中高层大气温度信息
SCIAMACHY	ENVISat	2002	云、气溶胶信息
MERIS	ENVISat	2002	云信息
GLI	ADEOS-Ⅱ	2002	大气订正
POLDER	ADEOS-I/ADEOS-Ⅱ / PARASOL	1996/2002/2004	云信息、地表气压
GOME-2	MetOP	2006	云信息
OCO	OCO	2008	云、气溶胶信息和地表气压
TANSO-FTS	GOSAT	2009	云、气溶胶信息和地表气压

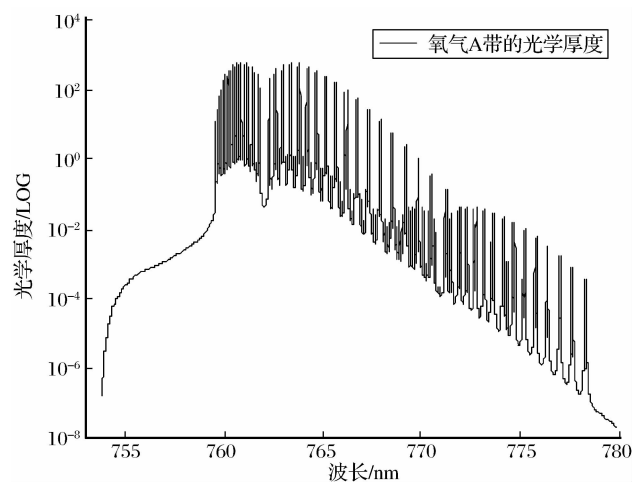


图 1 氧气 A 带光学厚度变化范围,对应中纬度夏季大气无气溶胶

Fig. 1 Schematic representation of optical depth in Oxygen A-band,in the middle altitude summer atmosphere with no aerosol

3 应用研究方向

3.1 云顶高度/气压

获得云顶高度是 O₂-A 带最早、最重要的研究方向之一,也是大气科学家利用 A 带的最初目的。1961 年 Hanel^[4]就建议利用 2.0 μm CO₂ 吸收带获得云顶高。但 Yamamoto 和 Wark^[5]认为 2.0 μm 受 1.87 μm 水汽带的远翼吸收影响,建议选用没有水汽吸收污染的 O₂-A 带。Chapman^[6]也于 1962 年独立提出了类似看法。虽然只是理论上的猜想,且仅局限于云高的获得,但随后研究证明将 O₂-A 带应用于遥感技术的猜想具有前瞻性。随着技术的进步,O₂-A 带在其它领域的应用潜力也逐渐被发现。

1965 年 Wark 和 Mercer^[7]详细介绍了 O₂-A 带光谱的产生和线强结构,并在美国标准大气条件下建立了一个简单的分辨率为 0.5 nm 的透射率查找表(LUT),得出查找表方法反演云高技术可行的结论。同年 Saiedy^[8]将自制的手握式光谱计(如图 2 所示)带上飞机,通过实测资料验证 O₂-A 带探测云高的可能性,最终反演结果低于真实值,标准偏差达 30 hpa,这与 Wark 和 Mercer 先前的预测相一致。Saiedy 将其归结为云内氧气吸收所致。1965 年 NASA 进行了首次 O₂-A 带云顶高度遥感太空可行性试验:利用 Gemini(双子座)-5 载人飞船完成“云顶高度光谱仪”对地观测。Saiedy^[9]对该项试验结果进行系统分析,结果显示 O₂-A 带光谱对高、中、低云具有指示作用。虽然早期成果有限,仅局限于模拟及数据分析,但技术可行的结论继续推动对 A 带的研究与应用。

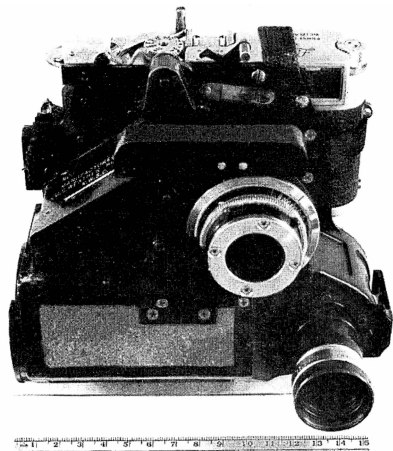


图 2 Saiedy 自制的第一台用于遥感观测氧气 A 带的仪器

Fig. 2 The first instrument made by Saiedy to observe Oxygen A-band by remote sensing

由于阿波罗计划使得美国对 A 带的研究一度停滞^[10-13],直到 1985 年 Wu^[14]的文章才又引起人们对 A 带的再重视。她不仅深入研究了光子光程问题(这一时期对这个问题的研究比较多),而且通过比较 CCOPE(Cooperative Convective Precipitation Experiment)实验中机载激光雷达和 MCR(Multi-spectral Cloud Radiometer)(3 个通道 754 nm、760.9 nm、763.4 nm)的数据,进一步证明卫星观测有能力通过 A 带反演云顶高度,并首次提出 O₂-A 带基线可以反演云尺度光学厚度。之后陆续有多篇文章继续对云光学厚度问题进行研究^[15-17]。进入 20 世纪 90 年代,O₂-A 带反演云顶高度的研究重点逐渐进入到实践应用阶段。德国的 Fischer^[18,19]对 O₂-A 带反演云顶高度进行了比以往更加深入的研究,分析了多种因素对辐射强度、辐射比的影响,并提出两种算法,模拟结果精度惊人地达到 200 m 和 50 m。随后的机载激光雷达对比实验,多通道反演结果误差甚至小于 40 m。目前欧空局 MERIS 仪器的神经网络算法即在此研究基础上提出^[20]。此外还有其它的云高业务算法如:Kuze 和 Chance^[21]提出同时得到云顶高度和云量的 ICFA(Initial Cloud Fitting Algorithm)算法;Koelemeijer 和 Stammes^[22]提出经 Wang 改进的 FRESCO+(Fast Method for Retrieval Scheme for Clouds from the Oxygen A Band+)^[23]方法以及 Kokhanovsky 和 Rozanov^[16,24]的 SACURA(SemiAnalytical Cloud Retrieval Algorithm)半经验反演算法等。这些业务算法的成功应用充分说明 A 带对云高遥感的巨大优势和实用性。最近的工作是 Preusker^[25]利用 IRS 卫星上 MOS 仪器进行的云高结果研究。

在进行云高算法的研究同时,还有许多人从事产品的验证以及与算法的比较工作。Lindstrot^[26]等在德国东北部地区使用机载激光雷达对 MERIS 产品进行了 12 架次对比观测,结果显示除卷云情况,产品与雷达结果的平均偏差为 +232 m,均方根为 249 m。虽然试验仅限于云高低于 3 000 m 的情况,但排除两种仪器在飞行速度、空间分辨率和时间分辨率上的误差,结果符合得相当好。Kokhanovsky^[27,28]等通过对比 MERIS 和 SCIAMACHY 产品发现 SCIAMACHY 的定标误差,并建议乘以一个修正因子进行修正。Naud^[29]等利用立体成像产品、地基雷达以及探空气球数据与 A 带产品分别做了比较,指出了 A 带的适用条件。

由于反演原理相似,当仪器视场无云时还可以

得到地表气压值。因而也有部分学者在从事地表气压反演的研究。

Barton 和 Scott^[30]是第一批尝试反演地面气压的学者,随后 Mitchell 和 O'Brien^[31]通过在 4 种不同模式下模拟特定通道辐射强度比对温度、气压的敏感性,发现温度廓线、地表反照率以及气溶胶背景场的不确定性是气压反演的主要误差源,并预测在一定前提下(1 cm^{-1} 光谱分辨率,以及温度廓线、气溶胶很精确)地表气压的反演精度甚至可达到 2hPa。1996 年 Bréon 和 Bouffies^[32]应用 POLDER 仪器上 O₂-A 带两通道(10 nm、40 nm),通过经验公式实现地面气压的反演。Diedenhoven^[33]等基于 SCIAMACHY 仪器讨论了气溶胶对反演地表气压的影响,证实 SCIAMACHY 存在定标误差。还提出通过比较仪器得到的地表气压和地面气压场数据库的差异,校正 A 带仪器定标准确度思想^[34]。

此外,Kokhanovsky 和 Rozanov^[35,36]还用实测和模拟资料探索了运用 A 带反演云底高度/云厚的可行性,并得到不错的结果。

3.2 气溶胶特性

在晴空条件下,气溶胶亦会对 O₂-A 带内的反射辐射强度造成一定影响。与云高反演相类似,我们可以获得底层气溶胶的高度,如果配合 A 带内的偏振信息,气溶胶廓线信息也可以得到。第一个尝试利用 A 带获得气溶胶柱光学厚度和光学厚度廓线的是 Badayev^[37]。

随后 Gabella^[38,39]利用 MOS 的低分辨率数据进一步证实 A 带内包含足够多的气溶胶信息。但与云顶高度/气压探测相比,气溶胶信息反演对仪器分辨率的要求更高。近年仪器制造技术的进步加快了气溶胶反演研究的开展。2006 年 Corradini^[40]用模拟数据讨论在 SCIAMACHY 仪器分辨率下反演气溶胶消光廓线的能力并指出:①光谱分辨率直接影响反演气溶胶消光廓线的准确性和垂直分辨率大小;②廓误差主要来源是气溶胶的相函数、单次散射反照率等气溶胶的先验信息。还预测“不同通道联合反演,可以在地表较亮时对气溶胶进行探测”。

通过偏振信息获得气溶胶信息是比较好的途径,因而许多研究的重点^[41,42]集中在 A 带偏振模拟上。Eyck Boesche 就指出,对比吸收通道和连续吸收通道线偏振度的变化可以获得更多的气溶胶信息,甚至卷云信息,而文献^[43]也证明了这一点。但现在还没有利用 O₂-A 带获得气溶胶信息的业务产品。

3.3 大气温、压廓线

大气层的温、压廓线是大气科学领域重点关注的内容,也是人们最早尝试获得的气象信息之一。它们直接影响着天气预报以及气候模式的准确性。Korb^[44,45]的研究指出 O₂-A 带是获得气压廓线新的理想通道。考虑到吸收线的增宽主要由温度和压力变化造成的,他们利用激光雷达在 O₂-A 带的强线区和连续吸收区分别发射电磁波,结合差分吸收技术反演各积分层的温度、压力,进而得到整层廓线。由于大气低层压力增宽是主要因素,实际获得底层温度廓线有一定难度。1989 年 Korb 利用机载、地基绿宝石激光器首次进行试验,成功获得了结果,精度分别达到了 1.5~2 hPa 和 2.0 hPa;机载与探空的定点对比,偏差小于 1.7 hPa。

瑞典科学家还利用接收高层大气中氧气分子在 A 带发射的日晖(dayglow)进而反演中间层的大气温度廓线。此理论已经用 Odin 卫星上 OSIRIS 仪器获得的临边观测数据得到了验证。

3.4 光子光程观测和高光谱利用

分析光子在大气及散射介质中的传输路径对理解云 3-D 效应、散射层反演参数,改进辐射传输模式等有重要帮助。A 带的“纯净”性使其成为为数不多的研究光子传输问题的首选通道,同时这一前沿问题也和 A 带的高光谱研究紧密联系。

早在 20 世纪 70 年代,苏联科学家就开始重视 A 带内云对光子光程影响的研究,Dianov-Klovov^[46]、Grechko^[47,48]发现多次散射能引起光程增加,空基观测表明光程增加量最大可达散射层厚度的 0.5 倍。美国的 Wu^[14]提出光子平均光程具体上受尺度光学厚度、尺度体积散射系数和云高度的影响。

近年来精密观测仪器的出现推动这一领域快速发展。Min^[49]等用 ARM 计划的地基仪器对光子光程进行了观测,分析了光程统计意义与云厚的关系,其它学者^[42,50,51]也单独进行了类似的观测并得到了光程的分布函数。2002 年,Heidinger 和 Stephens^[52]提出利用光子光程分布函数具有获得云三维信息的可能性,并设想将已知通道的光子光程分布函数应用到附近通道进行云参数反演的思想。不久 Min^[53]等就用自制的地基超光谱仪器——HAWS (High-resolution Oxygen A-band and Water Vapor Band Spectrometer) 测量 A 带和附近水汽吸收带内的光子光程,证实了这一思想的正确性:他们发现当有浓密厚云或多层云时,统计意义上的光程分布函数的均值和方差将增大;而在无云或是薄云的情

况下,平均光程和方差很小,这开辟了通过实测光子光程分布函数估计云或气溶胶的光学特性以及云层几何特性研究的先河。德国海德堡大学的 Scholl 和 Pfeilsticker^[54]也利用实测光程分布证实了先前学者^[49,55,56]提出的光子在介质中异常漫射(anomalous diffusion)理论。

与此同时,高光谱或超光谱分辨率下 O₂-A 带究竟能够提供什么辐射信息也逐渐被科学家所重视。

早到 1992 年 O'Brien 和 Mitchell^[57]就指出仪器光谱分辨率能够对结果产生影响,认为如果分辨率和通道设置合适,A 带自身可以提供精确反演云顶高度需要的额外信息(廓线,光学厚度),并建议提高仪器的光谱分辨率。在随后的实际测量中^[29,58]他们进一步发现仪器在不同分辨率下可以得到不同信息:高分辨率(1 cm⁻¹ 以上)能够得到细微的大气散射信息,而粗分辨率对地表反射贡献更加敏感。

在这之后的 Stephens 和 Heidinger^[59,60]进一步将重点放在了超光谱量级上,对 A 带的应用能力给出了全面的分析,指出包括光学厚度、散射层顶气压、散射层厚度、相函数、单次散射反照率和地表反照率在内的 6 个参数影响着 O₂-A 带的反射/吸收光谱;① 对散射薄层,反射辐射主要对光学厚度、相函数敏感;而反射辐射比则对散射层高度/气压更为敏感;② 对于半无限厚度散射层,辐射强度只对相函数主要信息(不对称因子)敏感等。他们还提出许多超前和极具开创意义的结论:① 反射辐射内包含了云的 3D 效应信息,可以实现对 3D 效应反演;② A 带在明亮下垫面时具有探测卷云的能力;③ 先验信息及其准确性,通道的分辨率对于反演云光学厚度,高度和气溶胶光学厚度廓线很重要;④ 主动遥感得到的结果作为先验信息可提高 A 带反演参数的精度等。上面的一些结论已经被 NASA 兰利(Langley)研究中心开发的一套高分辨率(0.5 cm⁻¹)光谱仪的实测结果所证实^[61]。

2004 年 Min^[62]继续探索仪器分辨率与可提取的大气有效信息之间联系。他定义了一个核函数代表透过率与压力的导数,模拟结果表明吸收越强,核函数对应峰值出现的高度越高。这表明在超光谱测量下,A 带吸收强度不同的通道对来自不同高度的散射信息敏感,这为氧气 A 带多通道、超光谱应用给予了理论依据。

此外还有人利用高光谱在从事 A 带吸收线结构的研究^[63-66]。

3.5 其它领域

O₂-A 带除在上面几个重要领域广泛开展研究和应用外,还在被动距离测量、大气辐射平衡研究领域有所应用。

Yamamoto^[67]是最早将氧气吸收带作用纳入到评估大气对太阳辐射吸收影响的人,他强调氧气 A、B 吸收带在平流层以及对流层上部的吸收作用影响不可忽略。以 Kiehl^[68],Chou^[69]等为代表的科学家继续从气候学应用角度对氧气吸收带对太阳辐射吸收的影响进行着研究;此外 Hawks^[70]为解决战区弹道导弹预警问题,在 O₂-A 带进行了被动距离探测应用尝试。

4 结 语

科学家们利用氧气 A 吸收带从事遥感应用的研究已近半个世纪。从早期单纯的云顶高度反演逐渐扩展到气溶胶信息获取温、压廓线反演,光子光程研究以及高光谱应用等多个领域,并且新的应用潜力还不断被提出。此外还推动类似通道(如 O₂-B 带、O₂-O₂)的应用。例如 B 带受水汽吸收带远翼影响,可以利用其探测高云^[71]。

随着氧气 A 带研究不断深入,未来的 A 带遥感应用将向着以下几个方向发展:

(1) 高光谱和高空间分辨率应用。已经证实高光谱应用是 A 带的优势之一,高光谱下 A 带提供的信息将更加“丰富”、层次更加“鲜明”。目前 SCI-AMACHY、MERIS 等仪器虽然在光谱分辨率上有提高,但代价是空间分辨率的下降,未来提高或改善仪器的分辨率将是重要的发展方向,例如已上天的日本 GOSAT 卫星的光谱分辨率达到了 0.5 nm^{-1} ,能提供更加精细的观测数据。

(2) 主、被动,多谱段相结合。十多年前,Heidinger 就提出主动方式得到的先验信息可以改进氧气 A 带反演云顶高度的精度,在当时还只是模拟结论。近年来 TRMM、CloudSat、CALIPSO 等卫星的出现,使主动探测方式与被动观测方式在天基的联合应用成为可能,目前在轨飞行的 A-TRAIN 星座也进一步验证了这种联合方式对大气化学研究、云和气溶胶参数反演等方面的有效性。A 带被动观测结合主动探测将会提供更多单一方式无法获得的大气信息,为深入了解云和气溶胶相互作用、地气辐射平衡等提供更多的帮助。

另外,多谱段结合应用也有巨大发展空间,可以弥补不同通道间获取信息的不足。德国学者研究表

明紫外通道可以帮助氧气 A 带对云参数的反演^[72,73],未来更多谱段与 A 带的联合将是一个趋势。

氧气 A 吸收带由于其单一的吸收气体成分和独特的谱线构成,在遥感技术发展的初期就受到重视。随着技术的进步,A 带的应用领域不断拓展,新的理论层出不穷,未来将会有更加广阔的应用研究空间。

参考文献:

- [1] TIROS: The System and Its Evolution[R]. ATSS-AC/Contractor Reports Unit, Scientific and Technical Information Division, 1965, Washington D. C.
- [2] Babcock H D. Study of the Infra-red Solar Spectrum with the Interferometer[J]. Astrophysical Journal, 1927, 65: 140-163.
- [3] Dieke G H, Babcock H D. The Structure of the Atmospheric Absorption Bands of Oxygen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1927, 13: 670-678.
- [4] Hanel R A. Determination of Cloud Altitude from a Satellite [J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66: 1300.
- [5] Yamamoto G, Wark D Q. Discussion of the Letter by RA Hanel, "Determination of Cloud Altitude from a Satellite" [J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66: 3596.
- [6] Chapman R M. Cloud Distributions and Altitude Profiles from a Satellite[J]. Planetary and Space Science, 1962, 9: 70-71.
- [7] Wark D Q, Mercer D M. Absorption in the Atmosphere by the Oxygen "A" Band[J]. Applied Optics, 1965, 4: 839-845.
- [8] Saiedy F, Hilleary D T, Morgan W A. Cloud-top Altitude Measurements from Satellites[J]. Applied Optics, 1965, 4: 495-500.
- [9] Saiedy F, Jacobowitz H, Wark D Q. On Cloud-top Determination from Gemini-5[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1967, 24: 63-69.
- [10] Adiks T G, Georgiyevskiy Y U S, Malkevich M S, et al. Atmosphere Transmission in the 0.76 μm O₂ Band, Academy of Sciences[J]. USSR. Izv., Atmospheric and Oceanic Physics, 1972, 8: 369-381.
- [11] Curran R J, Kyle H L, Blaine L R, et al. Multichannel Scanning Radiometer for Remote Sensing Cloud Physical Parameters[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52: 1546.
- [12] Gorodetskiy A K, Malkevich M S, Syachinov V I. Determination of Cloud Heights from Kosmos 320 Measurements[J]. USSR. Izv., Atmospheric and Oceanic Physics, 1971, 200: 588-590.
- [13] Malkevich M S, Chagar L U, Shukurov A K H. Corrections for Scattering of Radiation in Clouds in Photometric Cloud-height Determination[J]. USSR, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 1976, 11: 561-564.
- [14] Wu M L. Remote Sensing of Cloud-top Pressure Using Reflected Solar Radiation in the Oxygen A-band [J]. Journal of

- Applied Meteorology, 1985, 24: 539-546.
- [15] King M D. Determination of the Scaled Optical Thickness of Clouds from Reflected Solar Radiation Measurements[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44: 1734-1751.
- [16] Kokhanovsky A A, Rozanov V V. The Physical Parameterization of the Top-of-atmosphere Reflection Function for a Cloudy Atmosphere—Underlying Surface System; The Oxygen A-band Case Study[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 85: 35-55.
- [17] Nakajima T, King M D. Determination of the Optical Thickness and Effective Particle Radius of Clouds from Reflected Solar Radiation Measurements. Part I: Theory[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47: 1878-1893.
- [18] Fischer J, Cordes W, Schmitz-peiffer A, *et al.* Detection of Cloud-top Height from Backscattered Radiances within the Oxygen A Band. Part 2: Measurements[J]. Journal of Applied Meteorology, 1991, 30: 1260-1267.
- [19] Fischer J, Grassl H. Detection of Cloud-top Height from Backscattered Radiances within the Oxygen A Band. Part 1: Theoretical Study[J]. Journal of Applied Meteorology, 1991, 30: 1245-1259.
- [20] Cloud Top Pressure, MERIS Algorithm Theoretical Basis Document No ATBD 2. 3[R]. Free University of Berlin, Berlin, 2000.
- [21] Kuze A, Chance K V. Analysis of Cloud Top Height and Cloud Coverage from Satellites Using the O₂ A and B Bands[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 14481-14491.
- [22] Koelemeijer R B A, Stammes P, Hovenier J W, *et al.* A Fast Method for Retrieval of Cloud Parameters Using Oxygen A Band Measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 3475-3490.
- [23] Wang P, Stammes P, van der A R, *et al.* FRESCO+: An Improved O₂ A-band Cloud Retrieval Algorithm for Tropospheric Trace Gas Retrievals[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8: 6565-6576.
- [24] Rozanov V V, Kokhanovsky A A. Semianalytical Cloud Retrieval Algorithm as Applied to the Cloud Top Altitude and the Cloud Geometrical Thickness Determination from Top-of-atmosphere Reflectance Measurements in the Oxygen A-band[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2004, 109, 10. 1029/2003JD004104.
- [25] Preusker R, Fischer J, Albert P, *et al.* Cloud-top Pressure Retrieval Using the Oxygen A-band in the IRS-3 MOS Instrument[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28: 1957-1967.
- [26] Lindstrot R, Preusker R, Ruhtz T, *et al.* Validation of MERIS Cloud-top Pressure Using Airborne Lidar Measurements[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45: 1612-1621.
- [27] Kokhanovsky A A, Rozanov V V, Nauss T, *et al.* The Semianalytical Cloud Retrieval Algorithm for SCIAMACHY - I. The Validation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6: 1905-1911.
- [28] Kokhanovsky A A, Von Hoyningen-Huene W, Rozanov V V, *et al.* The Semianalytical Cloud Retrieval Algorithm for SCIAMACHY - II. The Application to MERIS and SCIAMACHY Data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6: 4129-4136.
- [29] Naud C, Mitchell K L, Muller J P, *et al.* Comparison between ATSR-2 Stereo, MOS O₂ A-band and Ground-based Cloud Top Heights[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28: 1969-1987.
- [30] Bartonij J, Scott J C. Remote Measurement of Surface Pressure Using Absorption in the Oxygen A-band[J]. Applied Optics, 1986, 25: 3502-3507.
- [31] Mitchell R M, O'Brien D M. Error-estimates for Passive Satellite Measurement of Surface Pressure Using Absorption in the A-band of Oxygen[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44: 1981-1990.
- [32] Breon FM, Bouffies S. Land Surface Pressure Estimate from Measurements in the Oxygen A Absorption Band[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 69-77.
- [33] Van Diedenhoven B, Hasekamp O P, Aben I. Surface Pressure Retrieval from SCIAMACHY Measurements in the O₂ A-band: Validation of the Measurements and Sensitivity on Aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5: 2109-2120.
- [34] Dubuisson P, Borde R, Schmechtig C, *et al.* Surface Pressure Estimates from Satellite Data in the Oxygen A-band: Applications to the MOS Sensor over Land[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2001, 106: 27277-27286.
- [35] Kokhanovsky A A, Rozanov V V. Cloud Bottom Altitude Determination from a Satellite[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2: 280-283.
- [36] Rozanov V V, Kokhanovsky A A. Determination of Cloud Geometrical Thickness Using Backscattered Solar Light in a Gaseous Absorption Band[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3: 250-253.
- [37] Badaev V V, Malkevich M S. On the Possibility of Determining the Vertical Profiles of Aerosol Attenuation Using Satellite Measurements of Reflected Radiation in the 0.76 Micron Oxygen Band[J]. USSR. Izv., Atmospheric and Oceanic Physics, 1979, 14: 722-727.
- [38] Gabella M, Guzzi R, Kisselev V, *et al.* Retrieval of Aerosol Profile Variations in the Visible and Near Infrared: Theory and Application of the Single-scattering Approach[J]. Applied Optics, 1997, 36: 1328-1336.
- [39] Gabella M, Kisselev V, Perona G. Retrieval of Aerosol Profile Variations from Reflected Radiation in the Oxygen Absorption A-band[J]. Applied Optics, 1999, 38: 3190-3195.
- [40] Corradini S, Cervino M. Aerosol Extinction Coefficient Profile Retrieval in the Oxygen A-band Considering Multiple Scattering Atmosphere. Test Case; SCIAMACHY Nadir Simula-

- ted Measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 97: 354-380.
- [41] Boesche E, Stammes P, Preusker R, *et al.* Polarization of Sky-light in the O₂ A-band: Effects of Aerosol Properties[J]. *Applied Optics*, 2008, 47: 3467-3480.
- [42] Veitel H, Funk O, Kurz C, *et al.* Geometrical Path Length Probability Density Functions of the Skylight Transmitted by Midlatitude Cloudy Skies; Some Case Studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 3355-3358.
- [43] Dubuisson P, Frouin R, Dessailly D, *et al.* Estimating the Altitude of Aerosol Plumes over the Ocean from Reflectance Ratio Measurements in the O₂ A-band[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 1899-1911.
- [44] Korb C L, Schwemmer G K, Dombrowski M, *et al.* Airborne and Ground Based Lidar Measurements of the Atmospheric-pressure Profile[J]. *Applied Optics*, 1989, 28: 3015-3020.
- [45] Korb C L, Weng C Y. A Theoretical Study of a Two-wavelength Lidar Technique for the Measurement of Atmospheric Temperature Profiles[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21: 1346-1355.
- [46] Dianov-Klokov V I, Kropotkina E P, Malkov I P, *et al.* Absorption Band Deformation and the Effective Pathlength in Clouds[J]. 1970, 9: 780-789.
- [47] Grechko E I. Measuring the Difference in Effective Paths at Two Wavelengths in the Presence of Reflection of Light by Clouds[J]. *USSR, Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 1979, 14: 479-481.
- [48] Grechko Y I, Dianov-Klokov V I, Malkov I P. Aircraft Measurements of Photon Paths in Reflection and Transmission of Light by Clouds in the 0.76 μm Oxygen Band[J]. *USSR, Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 1973, 9: 262-265.
- [49] Min Q, Harrison L C, Clothiaux E E. Joint Statistics of Photon Path Length and Cloud Optical Depth; Case Studies[J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 2001, 106: 7375-7385.
- [50] Min Q, Harrison L. Joint Statistics of Photon Pathlength and Cloud Optical Depth[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 1425-1428.
- [51] Pfeilsticker K, Erie F, Funk O, *et al.* First Geometrical Path-lengths Probability Density Function Derivation of the Skylight from Spectroscopically Highly Resolving Oxygen A-band Observations 1. Measurement Technique, Atmospheric Observations and Model Calculations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 4101-4116.
- [52] Heidinger A K, Stephens G L. Molecular Line Absorption in a Scattering Atmosphere. Part III: Pathlength Characteristics and Effects of Spatially Heterogeneous Clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59: 1641-1654.
- [53] Min Q L, Harrison L C, Kiedron P *et al.* A High-resolution Oxygen A-band and Water Vapor Band Spectrometer[J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 2004, 109, 10, 1029/2003JD003540.
- [54] Scholl T, Pfeilsticker K, Davis A B, *et al.* Path Length Distributions for Solar Photons under Cloudy Skies; Comparison of Measured First and Second Moments with Predictions from Classical and Anomalous Diffusion Theories[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, 10, 1029/2004JD005707.
- [55] Davis A, Marshak A. Lévy Kinetics in Slab Geometry; Scaling of Transmission Probability [M]. Novak MM; Singapore: World Scientific, 1997.
- [56] Davis A B, Marshak A. Space-time Characteristics of Light Transmitted through Dense Clouds: A Green's Function Analysis[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59: 2713-2727.
- [57] O'Brien D M, Mitchell R M. Error-estimates for Retrieval of Cloud-top Pressure Using Absorption in the A-band of Oxygen[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31: 1179-1192.
- [58] O'Brien D M, Mitchell R M, English S A, *et al.* Airborne Measurements of Air Mass from O₂ A-band Absorption Spectra[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15: 1272-1286.
- [59] Heidinger A K, Stephens G L. Molecular Line Absorption in a Scattering Atmosphere. Part II: Application to Remote Sensing in the O₂ A-band[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57: 1615-1634.
- [60] Stephens G L, Heidinger A. Molecular Line Absorption in a Scattering Atmosphere. Part I: Theory[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57: 1599-1614.
- [61] Pitts M, Hostetler C, Poole L, *et al.* An Airborne A-band Spectrometer for Remote Sensing of Aerosol and Cloud Optical Properties[C]//Fujisada H, Lurie J B, Ropertz A, *et al.* eds., *Conference on Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IV*, Spie-Int Soc Optical Engineering, Barcelona, Spain, 2000, 123-132.
- [62] Min Q L, Harrison L C. Retrieval of Atmospheric Optical Depth Profiles from Downward-looking High-resolution O₂ A-band Measurements; Optically Thin Conditions[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61: 2469-2477.
- [63] Yang Z, Wennberg P O, Cageao R P, *et al.* Ground-based Photon Path Measurements from Solar Absorption Spectra of the O₂ A-band[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 90: 309-321.
- [64] Adiks T G, Dianov-Klokov V I. Molecular Parameterization of the O₂ Absorption Band at 0.7609 μm and Their Use in Calculating the Transmission Function[J]. *USSR, Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 1968, 4: 1052-1059.
- [65] Burch D E, Gryvnak D A. Strengths, Widths, and Shapes of the Oxygen Lines near 13100 cm^{-1} (7620 Å) [J]. *Applied Optics*, 1969, 8: 1493-1499.
- [66] Miller J H, Boese R W, Giver L P. Intensity Measurements and Rotational Intensity Distribution for the Oxygen A-band [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1969, 9: 1507-1517.
- [67] Yamamoto G. Direct Absorption of Solar Radiation by At-

mospheric Water Vapor, Carbon Dioxide and Molecular Oxygen[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1962, 19: 182-188.

[68] Kiehl J T, Yamanouchi T. A Parameterization for Absorption Due to the A, B, and Gamma Oxygen Bands[J]. Tellus, Series B-Chemical and Physical Meteorology, 1985, 37: 1-6.

[69] Chou M D. Parameterizations for the Absorption of Solar-radiation by O₂ and CO₂ with Application to Climate Studies [J]. Journal of Climate, 1990, 3: 209-217.

[70] Hawks M R. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra[D]. Air Force Institute of Technology, 2005.

[71] Nakazawa T, Yamanouchi T, Tanaka M. Line Parameters of the Oxygen A-band and Calculation of the Atmospheric Transmission Functions for the A, B, and γ Bands[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1982, 27: 615-625.

[72] Van Deelen R, Hasekamp O P, van Diedenhoven B, *et al.* Retrieval of Cloud Properties from Near-ultraviolet, Visible, and Near-infrared Satellite-based Earth Reflectivity Spectra: A Comparative Study [J]. Journal of Geophysical Research, 2008; 113: 10. 1029/2007JD009129.

[73] Van Diedenhoven B, Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of Cloud Parameters from Satellite-based Reflectance Measurements in the Ultraviolet and the Oxygen A-band[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: 10. 1029/2006JD008155.

Review of Oxygen A-Band Research

ZHANG Yan, DUAN Min-zheng, HANG Zhi-gang, LV Da-ren

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, LAGEO, Beijing 100029, China)

Abstract: The oxygen A-band, located in the visible and near-infrared spectrum, demonstrates different spectral characteristics with the changes of wavelength and resolution. During the last several decades, great efforts have been affording to the research of its application for remote sensing. In this paper, the current and potential applications of oxygen A-band are reviewed. Furthermore, the noticeable achievements in different areas and the trends of development in the future are summarized. It is hoped that the attention of atmospheric remote sensing community and the development of these fields would be aroused in China.

Key words: Oxygen A-band; Remote sensing; Review