

用紫外辐射反演气溶胶单次散射反照率的方法研究

夏冬^{1*}, 谭浩波^{1,2**}, 邓雪娇², 万齐林², 鄢俊一¹, 莫伟强¹ (1. 东莞市气象局, 广东 东莞 523000; 2. 广州市热带海洋气象研究所, 广东 广州 510000)

摘要: 利用紫外辐射监测资料, 结合对流层紫外与可见光辐射传输模式, 反演气溶胶单次散射反照率(SSA)。敏感性试验和误差分析表明: 紫外辐照度对 SSA 敏感; 气溶胶光学厚度(AOD)对反演 SSA 的误差影响最大, 波长指数次之, 地表反照率和其他因素的影响较小。使用该方法计算的珠三角地区的气溶胶单次散射反照率为 0.84~0.99, 平均值为 0.92, 与以往研究相比具有较好的一致性。

关键词: 气溶胶单次散射反照率; 紫外辐射; 辐射传输模式

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)03-0402-07

Research on the method of retrieving aerosol single scattering albedo by using the ultra-violet and visible radiation.

XIA Dong^{1*}, TAN Hao-bo^{1,2**}, DENG Xue-jiao², WAN Qi-lin², YAN Jun-yi¹, MO Wei-qiang¹ (1. Dongguan Meteorological Bureau, Dongguan 523000, China; 2. Institute of Tropical and Marine Meteorology, Guangzhou 510000, China). *China Environmental Science*, 2013, 33(3): 402~408

Abstract: The aerosol single scattering albedo (SSA) retrieved by using a ultra-violet and visible radiation transfer model (TUV) as applied to the data of broadband ultra-violet radiometer was presented in this paper. The sensitivity analysis showed that UVA was sensitive to SSA. The error of the retrieving method was mainly related to aerosol optical depth and Angstrom exponent, on the other hand, the effects of surface albedo and other factors could be neglected. The retrieved SSA in the Pearl River Delta region was about 0.84~0.99, with an average of 0.92, and agreed well with the previous studies.

Key words: aerosol single scattering albedo; ultra-violet radiation; radiation transfer model

由于气溶胶在气候变化中起着至关重要的作用, 气溶胶的光学特性及其辐射强迫与气候效应是当前大气科学的研究热点之一^[1-7]。气溶胶的辐射效应分为直接效应和间接效应。其中直接效应表现为散射作用和吸收作用。气溶胶对太阳辐射的散射作用表现为对地气系统的冷却作用, 主要与气溶胶中硫酸盐、硝酸盐等成分有关。气溶胶又可以吸收太阳辐射, 表现为对地气系统的增温作用, 主要与气溶胶中黑碳成分有关。由于气溶胶时空分布、组成成分的复杂性, 观测资料的缺乏, 使得气溶胶成为目前环境与气候变化研究中既复杂, 又不可或缺的因素。

气溶胶单次散射反照率(SSA)是气溶胶光学特性的重要参数之一。它反映的是气溶胶对辐射的吸收作用和散射作用的比重。早在 20 世纪 70 年代, 国外学者就研究出用太阳漫射辐射反演 SSA 的方法^[8-10]。之后又有学者发展出用宽带的

太阳漫辐射反演 SSA 的方法^[11-14]。但是由于可以进行太阳散射辐射的观测的台站较少, 邱金桓等^[15]研究出利用太阳总辐射来反演 550nm SSA 的方法。近年, 吴兑等^[16]通过建立地面黑碳浓度与吸收系数的拟合方程, 结合地面散射系数的观测数据, 计算得到 532nm 气溶胶单次散射反照率, 并研究了其变化特征。

紫外辐射是指波长为 100~400nm 的辐射, 一般按照波长的不同将紫外辐射划分为 UVA (315~400nm)、UVB (280~315nm) 和 UVC (100~280nm)。其中 UVC 基本上被高层臭氧吸收

投稿日期: 2012-06-15

基金项目: 国家“973”项目(2011CB403403); 国家自然科学基金(40905018); 广东省自然科学基金(9151008019000008), 广州市科技计划项目(2010Y1-C481)

* 责任作者, 工程师, 584131440@163.com; ** 副研究员, hbtan@grmc.gov.cn

难于到达地面。UVB 对人体健康有十分重要的影响,同时影响农作物生长,UVA 可使人的皮肤变黑,对动植物生长存在重要影响。紫外辐射对人体健康有明显的影响,根据紫外辐射对皮肤的祛斑作用^[17],Burrows 等^[18]和 Austin 等^[19]提出了紫外指数(UV index)的计算方法,以表征紫外辐射对人体的伤害程度。由于大气臭氧层对紫外辐射具有强烈的吸收作用,紫外辐射也可用于反演大气整层臭氧浓度^[20-22]。此外,紫外辐射对农作物的生长也有影响^[23]。气溶胶对太阳紫外辐射同样具有散射和吸收作用。利用地面观测的紫外辐射,结合辐射传输模式,可以反演气溶胶单次散射反照率。国外已有不少用辐射传输模式反演紫外辐射的气溶胶单次散射反照率的方法。Petters 等^[24]利用安装于 Black Mountain, N. C. 的紫外辐射仪反演了 7 个通道的气溶胶单次散射反照率。Buchard 等^[25]利用安装于法国的 Villeneuve d'Ascq (VdA)地区的紫外到可见光波段的地面辐射仪,反演了从紫外到可见光的气溶胶单次散射反照率。

本文尝试利用安装于珠江三角洲中心区域——东莞的地基观测紫外辐射资料反演紫外波段气溶胶单次散射反照率,分析了其敏感性和误差,并对反演结果进行了检验。

1 模式与数据处理

TUV 模式^[26]是美国大气研究中心(NCAR, <http://ncar.ucar.edu>)基于米散射理论开发的采用的对流层紫外辐射与部分可见光辐射的辐射传输模式,模式波长 21~735nm.,分辨率为 0.05nm。TUV 模式采用了美国标准大气的臭氧廓线和 Elterman 得出的气溶胶廓线^[27]。TUV 模式主要输入参数包括:经纬度、日期、大气柱臭氧浓度、地表反照率、550nm 气溶胶光学厚度、气溶胶单次散射反照率、波长指数 a 和地面气压等。主要输出结果是任意波段的向下辐照度 $[W/(\mu m \cdot m^2)]$ 。

本文所用紫外辐射资料来自 Kipp & Zonen 公司生产的 UVS-AB-T 紫外辐射表,安装在东莞市板岭国家基本站(站号 59289),安装时间为

2010 年 5 月,观测谱区 315~400nm(UVA)和 280~315nm(UVB),观测的紫外辐射的年变化范围 <5%,非线性小于 1%,具有极高精度和极低的误差,对反演结果影响极小。板岭国家基本站位于东莞市南城区植物园内,其方圆 1km 左右为绿色植物,主要是果树、园林植物以及草地植物。另外本文还用到了安装于板岭测站内的黑碳浓度(BC)和香港科技大学 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度资料。

2 方法与原理

地面接收到的紫外辐射包括直接紫外辐射和散射紫外辐射。其中直接紫外辐射可以用 Bouguer-Lambert-Beer 定理来描述。通过大气到达地面的直射紫外辐照度 $F(\lambda)$ 公式为^[28]:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \cdot \text{SDCORR} \cdot \exp(-m\delta(\lambda)) \quad (1)$$

式中: $F_0(\lambda)$ 是大气上界的直射辐照强度; SDCORR = $x(d_0/d)^2$ 为日地距离修正因子, d_0 为日地平均距离, AU; d 为日地距离, AU; m 是大气质量; $\delta(\lambda)$ 是总的垂直大气光学厚度,由分子散射 $[\delta_R(\lambda)]$ 、气体吸收消光(如臭氧、氧气、水汽等) $[\delta_g(\lambda)]$ 和气溶胶消光 $[\delta_a(\lambda)]$ 3 部分组成:

$$\delta(\lambda) = \delta_R(\lambda) + \delta_g(\lambda) + \delta_a(\lambda) \quad (2)$$

瑞利散射的光学厚度计算公式为^[29]:

$$\delta_R(\lambda) = 0.08569\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \frac{P}{1013.25} e^{-0.125A} \quad (3)$$

式中: P 是大气压, hPa; A 是海拔高度, km。由大气吸收光谱可知,对于紫外辐射,气体吸收主要由臭氧引起,与大气柱臭氧浓度有关, SO_2 和 NO_x 的影响可以忽略不计^[30]。气溶胶消光用气溶胶光学厚度(AOD)来描述。Angstrom 于 1964 年根据气溶胶的 Junge 分布,推导出计算整层大气垂直光学厚度的公式^[30]

$$\delta_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: α 为波长指数,可用于确定气溶胶的类型,它与气溶胶粒子的谱分布有关; β 为浑浊度参数,随大气中气溶胶质点总量而变。

散射紫外辐射主要包括分子散射(Rayleigh)、大气气溶胶散射和云雾散射。其中分

子散射主要与气压和太阳高度角有关,也与地面反照率有关.晴空时,云雾散射可忽略不计.大气气溶胶的散射与气溶胶的光学厚度、单散射反射率和不对称因子有关,也与太阳高度角和地面反照率有关.

因此地面接收的向下紫外辐照度可以表示为:

$$F_{uv} = F(\theta_0, A_g, \delta, \varpi_0, g, \alpha, S, p) \quad (5)$$

式中: θ_0 为太阳天顶角; A_g 为地表反照率; δ 为气溶胶光学厚度; ϖ_0 为气溶胶单次散射反照率; g 为不对称因子; α 为波长指数; S 为大气柱臭氧浓度; p 为地面气压.

由此可建立查算表,比对模式输出的紫外辐照度和地面观测的紫外辐照度,反演得到 SSA.

本文主要利用分析地基紫外辐射资料来判识晴天.地基观测紫外辐射对云的干扰非常敏感,如果有云的干扰,紫外辐射数据会出现明显的波动,若紫外辐射数据的波动范围 < 1%, 则认为晴天.

3 灵敏度实验

对式(5)求偏导,得到式(6).

$$\Delta F_{uv} = \frac{\partial F_{uv}}{\partial \theta_0} d\theta_0 + \frac{\partial F_{uv}}{\partial A_g} dA_g + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \varpi_0} d\varpi_0 + \frac{\partial F_{uv}}{\partial g} dg + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_{uv}}{\partial S} dS + \frac{\partial F_{uv}}{\partial p} dp \quad (6)$$

如果其他参数的估计都正确,即 $d\theta_0 = dA_g = d\delta = d\varpi_0 = dg = d\alpha = dS = dp = 0$, 那么

$$\Delta F_{uv} = \frac{\partial F_{uv}}{\partial \varpi_0} d\varpi_0 \quad (7)$$

选择 2010 年 12 月 22 日(冬至)12:00 的 UVA 辐照度,设定不同的参数.这里主要设定不同的 A_g 、 δ 和 ϖ_0 值, A_g 取值 0.05~0.3, δ 取值 0.3~1.5, ϖ_0 取值 0.7~1.0, 得到 SSA 与 UVA 辐照度的散点图(图 1).从图 1 可以看到,辐照度对 SSA 的灵敏度与 SSA 和 AOD 的大小有关, SSA 越小, AOD 大, 辐照度对 SSA 越敏感(图 1 中斜率越大); 地表反照率对敏感度影响相对较小.总体来讲, SSA 与 UVA 辐照度之间存在明显的敏感度, 因此用 UVA 辐照度反演 SSA 是可行的.

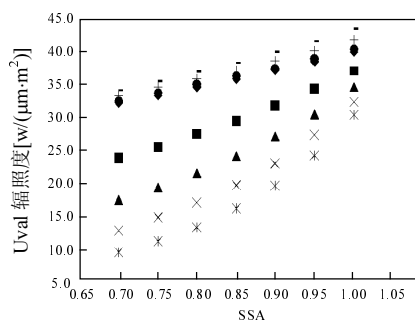


图 1 灵敏度分析

Fig.1 Sensitivity analysis

◆ AOD0.3;Ag0.05 ■ AOD0.6;Ag0.05 ▲ AOD0.9;Ag0.05 × AOD1.2;Ag0.05
* AOD1.5;Ag0.05 ● AOD1.3;Ag0.1 + AOD0.3;Ag0.2 □ AOD0.3;Ag0.3

4 误差分析

太阳高度角可以由经纬度和时间精确计算获得.由式(3)可知,气压的变化对瑞利散射的影响是非常小的,因此气压对辐照度的影响可以忽略不计.对于米散射理论,粒子的散射特性取决于粒子的相对尺度,即相函数只与波长有关^[31],则不对称因子也只与波长有关,取值为 0.7.这与真实大气是有差别的,从而导致模式的误差. Koepke 等^[32]曾经分析过 TUV 模式输出的辐照度的误差,发现误差较小,为 5%左右.

因此可以认为 $d\theta_0 = dg = dp = 0$, 则(6)式可表示为:

$$\Delta F_{uv} = \frac{\partial F_{uv}}{\partial A_g} dA_g + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \varpi_0} d\varpi_0 + \frac{\partial F_{uv}}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_{uv}}{\partial S} dS \quad (8)$$

式(8)表示反演 SSA 的误差主要与模式输出的辐照度、地表反照率、AOD、波长指数和大气柱臭氧浓度的不确定性有关.王开存等^[33]曾利用 MODIS 卫星反演地表反照率,认为秦岭以南地表反照率年变化幅度较小,年平均值在 0.1~0.14 之间,故设定东莞板岭观测站地表反照率的变化范围为 0.1~0.3,一般值为 0.2.根据谭浩波等^[34]的分析,MODIS 卫星反演的华南地区 550nm 的 AOD 值与地基太阳光度计观测 550nm 的 AOD 值有较好的一致性,总体误差较小, AOD 均值为 0.79, 均方根误差为 0.125^[34], 故设定 AOD

的变化范围为 0.6 ± 0.1 , 一般值为 0.6。根据谭浩波等^[34]的拟合结果, 华南地区波长指数 α 的值多为 1.2~1.6, 故设定波长指数的变化范围为 1.2~1.6, 一般值 1.4。大气柱浓度设定为 280~320 DU, 一般值为 300 DU^[35]。辐照度的误差范围设定为 $\pm 5\%$ 。

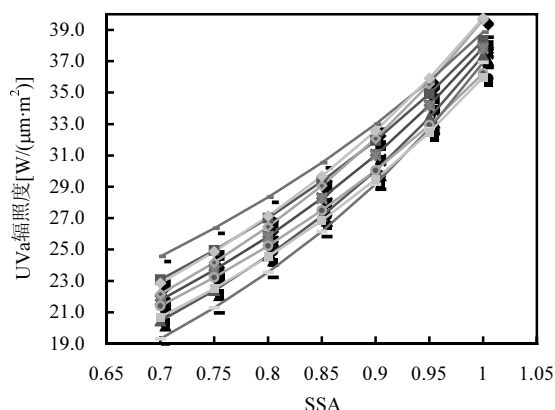
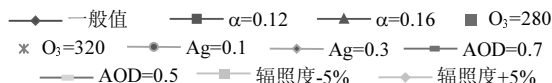


图2 误差分析

Fig.2 Error analysis



由图2可知, AOD对反演SSA的误差影响最大, 波长指数次之, 辐照度和地表反照率的影响较小, 大气柱臭氧浓度对反演SSA的影响极小, 可以忽略不计。由辐照度造成的最大反演误差在0.02~0.03之间。SSA越小, 由AOD和波长指数造成的反演误差越大, 由地表反照率造成的反演误差越小, 反之SSA越大, 由AOD和波长指数造成的反演的误差越小, 由地表反照率造成的反演误差越小。当 $SSA < 0.8$, 由AOD造成的最大反演误差大于0.05, 由波长指数造成最大反演误差约为0.02~0.04, 由地表反照率造成的最大反演误差约为0.01, 当 $0.8 < SSA < 0.9$, 由AOD造成的最大反演误差约为0.03~0.04, 由波长指数造成最大反演误差约为0.01~0.03, 由地表反照率造成的最大反演误差约为0.01~0.02, 当 $SSA > 0.9$, 由AOD造成的最大反演误差约为0.01~0.03, 由波长指数造成最大反演误差约为0.01~0.02, 由地表反照率造成的最大反演误差约为0.02~0.03。

根据已有研究结果, 对于整层大气来说, SSA

的值相对较大, 一般都在0.85以上, 只有少数在0.85以下, 但都高于0.8。对于地面, SSA的值比整层大气小, 可低于0.8。由于我们反演的是整层大气的SSA, 因此可将最大误差控制在可接受范围以内。但由于AOD越高, 反演的误差越大, 因此对于AOD较高的地区, 用紫外辐射反演的SSA的误差可能会较大。

5 结果检验

选取2010年10月~2011年5月晴朗无云日共21 d, 对比模式输出的UVA和紫外辐射表观测到的UVA, 反演得到21组UVA波段平均SSA的日均值数据。其中包含2010年10月28~11月3日和2010年12月26日~2011年1月1日两次连续晴朗天气过程。

5.1 与地面SSA对比

根据吴兑等^[16]的地面SSA计算方法, 利用东莞板岭的地面黑碳浓度和散射系数可计算出地面550nm SSA的值, 作为对比。

图3为2010年10月至2011年5月全部21组数据紫外辐射反演的整层大气UVA波段的SSA和地面550nm的SSA(SSA-g), 虚线表示整层大气SSA的最大误差范围。整层大气UVA波段SSA为0.84~0.99, 平均值为0.92, 地面550nm SSA为0.63~0.97, 平均值为0.79。

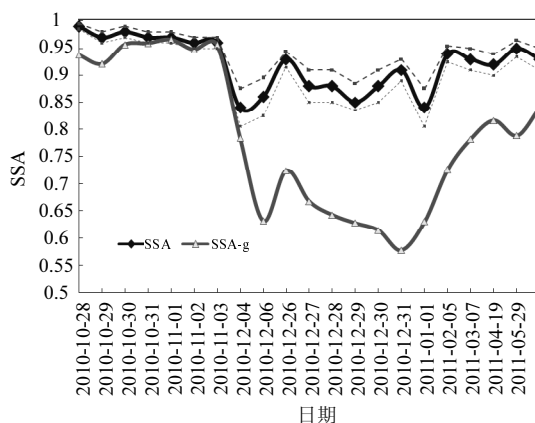


图3 SSA和SSA-g变化趋势

Fig.3 Change of SSA-UVA and SSA-BC

虚线表示整层大气SSA的最大误差范围

从图 3 可以看出,两者的变化趋势较为一致,相关性较高,相关系数为 0.82.整层大气 SSA 的最大误差与 SSA 有关,SSA 越小,最大误差越大.整层大气的 SSA 要明显大于地面的 SSA,这主要是因为地面受人为影响大,所以气溶胶的单次散射反照率的变化幅度更大,同时由于碳排放来源于地面,其垂直分布、生命史、沉降、老化后光学性质的改变都会导致整层大气柱中气溶胶的单次散射反照率与地面气溶胶的单次散射反照率存在一定差异.

5.2 与其他研究结果对比

与其他地区相比(表 1),本文得到的紫外部分整层大气的气溶胶单次散射反照率与 Buchard 等^[25]得到的相同波段的结果比较一致,平均值为 0.92,但比 Petters 等^[24]得到的更短波段的 SSA 偏大.总体来说,本文得到的紫外部分的 SSA 比可见光部分的偏大,这也与 Buchard 等^[25]得到的结果一致.本文得到的结果比海洋气溶胶的小^[43],这是因为海洋气溶胶中人类活动产生的黑碳气溶胶成分较少,吸收系数占消光系数的比重较小.

表 1 不同地区单次散射反照率(SSA)的比较
Table 1 Single scattering albedo in different area

地区	时间	λ (nm)	SSA	粒子范围	备注	文献
珠江三角洲中心	2010-10~2011-05	315~400	0.84~0.99	气溶胶	整层大气	本研究
珠江三角洲中心	2004-01~2007-12	532	0.81	PM ₁₀	地面	吴兑等 ^[16]
珠江三角洲北缘	2006-07	532	0.82	PM ₁₀	地面	Garland 等 ^[36]
北京城区	2003-06~2003-12	532	0.79	TSP	地面	毛节泰等 ^[37]
北京远郊区	2003-09~2005-01	525	0.88	TSP	地面	Yan 等 ^[38]
太湖	2005-09~2006-08	440	0.90	气溶胶	整层大气	Xia 等 ^[39]
香河	2004-09~2005-09	550	0.81~0.85	TSP	整层大气	Li 等 ^[40]
North Atlantic	1996~1997	550	0.85~0.99	气溶胶	大气边界层	Russell 等 ^[41]
Ace-Asia	2001-03~2001-05	550	0.92	TSP	飞机观测	Anderson 等 ^[42]
Ace-Asia	2001-03~2001-05	550	0.97	PM ₁₀	海洋气溶胶	Quinn 等 ^[43]
黑山北卡罗来纳	1999	330~368	0.65~0.96	气溶胶	整层大气	Petters 等 ^[24]
法国阿克斯新城	2003~2006	340	0.92	气溶胶	整层大气	Buchard 等 ^[2,5]

6 讨论

由于 AOD 越高,反演的误差越大,因此对于 AOD 较高的地区,用紫外辐射反演的 SSA 误差可能会较大.由于本文使用的是 MODIS 卫星反演的 AOD 资料,如果直接用地基多波段太阳直接辐射计的 AOD 资料,可将反演误差控制在更小范围内.地表反照率也是影响反演的误差的重要因素,如果能精确观测地表反照率,将进一步减小反演误差.

SSA 是表征大气气溶胶辐射特性和地气系统辐射平衡的重要参数之一,但目前尚无很好的观测手段,尤其是常规观测,无法得到长时间、准确的 SSA 测值.本文结合地面紫外辐射观测和辐射传输模式为反演整层大气平均 SSA 提供了一种方法,但因输入参数具有不确定性,仍需使用如

地基多波段太阳直接辐射计反演结果或其他方式进一步验证.

7 结论

7.1 利用紫外辐射结合对流层紫外与可见光辐射传输模式反演整层大气的 SSA,并对反演的敏感性和误差进行了分析.敏感性分析结果显示,UVA 辐照度对 SSA 有明显敏感度,因此用 UVA 辐照度反演 SSA 是可行的.敏感度与 AOD 和 SSA 的大小有关,SSA 越小,AOD 大,辐照度对 SSA 越敏感.

7.2 误差分析表明,AOD 对反演 SSA 的误差影响最大,波长指数次之,地表反照率的影响较小,其他因素影响较小.SSA 越小,由 AOD 和波长指数造成的反演误差越大,由地表反照率造成的反演误差越小,反之 SSA 越大,由 AOD 和波长指数

造成的反演的误差越小,由地表反照率造成的反演误差越小.总得来说,反演的最大误差在可接受范围以内.

7.3 本文反演的 SSA 比地面 SSA 的值要大,变化趋势较一致.反演的结果与以往的研究结果也具有较好的一致性.

参考文献:

- [1] Penner J E, Dickinson R E, O'Neill C A. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget [J]. *Science*, 1992,256: 1432-1434.
- [2] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992,255: 423-430.
- [3] Luo Y F, Lü D R, Zhou X J, et al. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001,106(D13): 14501-14513.
- [4] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002,297: 2250-2253.
- [5] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002,419:215-222.
- [6] 毛节泰,张军华,王美华.中国大气气溶胶研究综述 [J]. *气象学报*, 2002,60:625-634.
- [7] 邱金桓,吕达仁,陈洪滨,等.现代大气物理学研究进展 [J]. *大气科学*, 2003,27:628-652.
- [8] Herman B M, Browning S R, De Luisi J J. Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of atmospheric dust by remote sensing: The diffuse-direct radiation method [J]. *Atmos. Sci.*, 1975,32:918-925.
- [9] King M D, Herman B M. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing, Part I: Theory [J]. *Atmos. Sci.*, 1979,36:163-173.
- [10] King M D. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing. Part II: Application [J]. *Atmos. Sci.*, 1979,36:1072-1083.
- [11] Nakajima T, Hayasaka T, Higurashi A, et al. Aerosol optical properties in the Iranian region obtained by ground-based solar radiation measurements in the summer of 1991 [J]. *Appl. Meteor.*, 1996,35(8):1265-1278.
- [12] Qiu J H, Yang L Q, Zhang X Y. Characteristics of imaginary part and single scattering albedo of urban aerosol in northern China [J]. *Tellus*, 2004,56B(3):276-284.
- [13] 邱金桓.宽带太阳漫射辐射法反演辐射加权平均的气溶胶一次散射反照率研究 [J]. *大气科学*, 2006,30(5):767-777.
- [14] Qiu J H. Absorption properties of urban/suburban aerosols in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008,(1):1-10.
- [15] 邱金桓.从光谱或宽带太阳总辐射反演气溶胶一次散射反照率研究 [J]. *自然科学进展*, 2008,18(7):801-807.
- [16] Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 2009,52(8):1152-1163.
- [17] McKinley A F, Diffey B L. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin [J]. *CIE*, 1987, J6:17-22.
- [18] Burrows W R, Vallee M, Wardle D I, et al. The Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation [J]. *Meteor. Appl.*, 1994,1:247-265.
- [19] Austin J, Barwell B R, Cox S J, et al. The diagnosis and forecast of clear sky ultraviolet at the earth's surface [J]. *Meteor. Appl.*, 1994,1:321-336.
- [20] 江 芳.紫外散射反演臭氧总量的若干问题研究 [D]. 北京:中科院空间科学与应用研究中心, 2007.
- [21] 李 辉.用卫星资料反演臭氧总量的研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2003.
- [22] 秦大河.大气臭氧层和臭氧洞 [M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [23] 李英年,王文英,赵 亮,等.祁连山海拔高寒草甸地区紫外辐射特征及其对植物生理作用的探讨 [J]. *高原气象*, 2002,21(6): 615-621.
- [24] Petters J L, Saxena V K, Slusser J R, et al. Aerosol single scattering albedo retrieved from measurements of surface UV irradiance and a radiative transfer model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003,108(D9):AAC 11-1-11-7.
- [25] Buchard V, Brogniez C, Auriol F, et al. Aerosol single scattering albedo retrieved from ground-based measurements in the UV and visible region [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011,4:1-7.
- [26] Madroniich S. The atmosphere and UV-B radiation at ground level [M]//Environmental UV photobiology. [M]. Plenum Press, 1993:1-39.
- [27] Elterman L. UV, visible, and IR attenuation for Altitudes to 50km [D]. AFCRL-68-0153, Hanscom Field, Bedford, Massachusetts, USA: Air Force Cambridge Research Laboratories, 1968.
- [28] Biggar S F, Gellman D I, Slater P N. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990,32:91-101.
- [29] Hansen J E, Travis L D. Lightscattering in planetary atmospheres [J]. *Space Sci. Rev.*, 1974,16:527-610.
- [30] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学 [M]. 北京:北京大学出版社, 2003:93-95.
- [31] 袁易君,任德明,胡孝勇. Mie 理论递推公式计算散射相位函数 [J]. *光散射学报*, 2006,17(4):366-371.
- [32] Koepke P, Bais A, Balis D, et al. Comparison of models used for UV index calculations [J]. *Photochem. Photobiol.*, 1998,67(6):

- 657-662.
- [33] 王开存,刘晶淼,周秀骥,等.利用 MODIS 卫星资料反演中国地区晴空地表短波反照率及其特征分析 [J]. 大气科学, 2004,28(6): 941-949.
- [34] 谭浩波,吴 兑,邓雪娇,等.珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究 [J]. 环境科学学报, 2009,29(6):1146-1155.
- [35] 唐孝炎,张远航,邵 敏.大气环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1990:585-586.
- [36] Garland R M, Yang H, Schmid O, et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: implications for regional air pollution and radiative forcing [J]. Atmos. Chem. Phys. Discuss, 2008,8:6845-6901.
- [37] 毛杰泰,李成才.气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. 气象学报, 2005,63(5):622-635.
- [38] Yan P, Tang J, Huang J, et al. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. Atmos. Chem. Phys., 2008,8:2229-2242.
- [39] Xia X A, Li Z Q, Holben B, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. J. Geophys. Res., 2007,112:D22S12.
- [40] Li Z Q, Xia X A, Maureen C, et al. Aerosol optical properties and their radiative effects in Northern China [J]. J. Geophys. Res., 2007,112:D22S01.
- [41] Russell P B, Redemann J, Schmid B, et al. Comparison of aerosol single scattering albedos derived by diverse techniques in two north atlantic experiments [J]. Russell et al., 2002,(1):609-619.
- [42] Anderson T L, Masonis S J, Covert D S, et al. Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during ACE-Asia [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(D23):8647.
- [43] Quinn P K, Coffman D J, Bates T S, et al. Aerosol optical properties measured on board the Ronald H. Brown during ACE-Asia as a function of aerosol chemical composition and source region [J]. J. Geophys. Res., 2004,109(D19):D19S01.
- 致谢:** 北京大学大气物理学院毛节泰教授对本文撰写进行了大量指导,特此致谢!
- 作者简介:** 夏 冬(1982-),男,四川乐山人,工程师,硕士,主要从事大气环境和中短期天气预报工作.发表论文 3 篇.

测量土壤中的 N_2 、 N_2O 、NO 和 CO_2 排放

在此介绍 1 种带有 3 个独立工作的卵化器的时间步测量土壤中释放出 N_2 、 N_2O 、NO 和 CO_2 的全新设计的系统.采用全新的微型热导检测器并重新设计了容器使气体采样具有目前为止对 N_2 排放具有最高灵敏度监测 [N_2 , $0.23\text{mg}(N_2-N)/(\text{h}\cdot\text{kg})\text{ds}$ 或 $8.1\text{mg}(N_2-N)/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]并且可以实现重复实验.进一步测试不同的孵化方法,通过伴随土壤厌氧化最初阶段的脱氮作用来改进对 N_2 排放的定量测定.经历了好氧条件下更低孵化温度时土壤气体交换后在 25°C 时厌氧土壤进行孵化时,可以确立全氮平衡(如矿物中氮含量的改变被同时发生的氮气排放所抵消)的最好结果.厌氧化初始阶段后 N 和 C 的气体排放比是非常动态的. NO_3^- 土壤含有 $50\text{mg}(\text{N})/\text{kg}$ 干土(ds)及大约 $300\text{mg}(\text{C})/\text{kg}(\text{ds})$ 溶解有机碳(DOC), N_2 、 N_2O 和 NO 的累积排放量分别为 (24.3 ± 0.1) 、 (12.6 ± 0.4) 及 $(10.1 \pm 0.3)\text{mg}(\text{N})/\text{kg}(\text{ds})$.因此,土壤中观测到的变化中,氮气体排放量的 46.2%约为 N_2 ,24.0%约为 N_2O ,19.2%约为 NO. N_2 的最大排放量可以达到 $1\ 200\text{mg}(\text{N})/(\text{h}\cdot\text{kg})\text{ds}$,而 N_2O 和 NO 的排放峰值要比其低 2~3 个系数. $N_2:N_2O$ 和 $\text{NO}:N_2O$ 摩尔浓度比分别为 1.6~10.0 和 1.6~2.3.由于多种孵化条件下的脱氮作用准确地提供了氮气体排放力度和量级,检测系统可以提供可靠的工具来研究土壤中的脱氮作用.

朱 悦 译自《Environment Science and Technology》,2011,45:6066.