

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^{*}

邱金桓

中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测开放实验室(LAGEO), 北京 100029

摘要 提出一个应用光谱或宽带太阳总辐射反演气溶胶折射率虚部和一次散射反照率(SSA)的新方法, 它在原理上是基于漫辐射分量对 SSA 的敏感性. 通过数值模拟分析了辐射误差, 气溶胶光学厚度(AOD)和谱分布误差, 水汽含量误差和平面大气假设所引起的 SSA 反演误差. 如模拟结果所示, 对于文中建议的 AOD 下限, 如果辐射资料误差分别在 $\pm 2\%$ 和 $\pm 5\%$ 以内, SSA 误差在 ± 0.029 和 ± 0.07 以内; 如果 AOD 误差在 $\pm 10\%$ 以内, SSA 误差在 ± 0.041 以内. 实际 AOD 越大, SSA 反演精度越高. 文中还把从北京气象台站总辐射资料反演的 SSA 与AERONET北京站的 SSA 产品进行比较. 对4个AERONET波长, 应用本方法的 SSA 平均值对AERONET结果的最大偏差为0.032; 均方根偏差都在0.052以内. 两者有较好的吻合.

关键词 太阳总辐射 气溶胶 一次散射反照率 误差

气溶胶折射率虚部(aerosol imaginary part, AIP)和一次散射反照率(single scattering albedo, SSA)表征气溶胶的吸收特性, 是评估气溶胶辐射强迫的关键光学参数. 现有的气溶胶辐射强迫评估还存在很大不确定性, SSA 等气溶胶光学特性参数资料的缺乏是其主要原因之一. 多年来一些学者依据太阳漫辐射对 SSA 敏感而对气溶胶谱分布等参数不敏感特性, 发展从光谱太阳漫辐射^[1-3]和宽带的太阳漫辐射^[4-7]反演 AIP 和 SSA 的方法. 我国有100多个辐射观测站, 长期进行太阳总辐射的常规观测, 但只有部分台站同时进行漫(散射)辐射观测. 如果有一个方法可从这大量的总辐射资料反演 SSA , 它对丰富 SSA 信息库, 对气溶胶辐射强迫等研究都是有意义的. 我国气象台站的散射测量要进行遮光环遮光订正. 订正系数依赖于众多因子, 通常采用经验模式, 可存在较大误差. 直接采用总辐射资料反演 SSA , 无需该订正, 是这类方法的一大

好处. 较之漫射法, 应用总辐射反演 SSA 面临一些新的问题. 太阳总辐射包含直射和散射辐射2部分. 当气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)和太阳天顶角(θ_0)较小时, 总辐射主要来自直射的贡献, 它对 AIP 和 SSA 的变化是不敏感的, 不适用于反演 AIP 和 SSA . 但对很大 θ_0 情形, 平面大气假设下总辐射计算可存在较大误差, 又由于总辐射表的余弦效应误差, 辐射测量误差往往也较大. 因此, 要发展一个应用太阳总辐射反演 SSA 的方法, 必须研究的问题包括: 应用总辐射反演 SSA 的原理, 总辐射资料的优化选取, SSA 反演的主要误差因子等. 此外, 现有的应用宽带漫辐射反演 AIP 或 SSA 的一些方法都没有涉及如何反演不同波长 SSA 的问题. 基于这些问题, 本文致力于发展一个应用总辐射信息反演 AIP 和不同波长 SSA 的方法, 主要研究内容如下: (i) 分析应用总辐射反演 SSA 的原理, 发展一个反演不同波长

2007-09-10 收稿, 2008-01-22 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40333029)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403702)资助项目

E-mail: jhqu@mail.iap.ac.cn
©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

SSA 的算法; (ii) 提出一个不同 θ_0 下 AOD 下限模式, 用于选取总辐射资料; (iii) 分析 SSA 反演的主要误差; (iv) 对比检验.

1 原理与反演算法

1.1 原理

地面上向下的 λ 波长太阳辐照度包含漫射 (E_{Dif}) 与直射辐射 (E_{Dir}) 两部分, 可表为

$$E(\lambda) = E_{\text{Dif}} + E_{\text{Dir}} = \mu_0 E_0(\lambda) \{ T_{\text{Dif}}(\lambda, \mu_0, A_\lambda) + \exp[-m(\mu_0)\tau_{\lambda}] \} \quad (1)$$

式中 $E_0(\lambda)$ 为大气顶 λ 波长太阳辐照度, μ_0 为太阳天顶角余弦, $m(\mu_0)$ 是相对光学空气质量, τ_{λ} 是大气柱总光学厚度, T_{Dif} 是地表反射率为 A_λ 时漫射透过率. 当 θ_0 较小时, $m(\mu_0)$ 为 μ_0 的倒数.

太阳总辐射表 (pyranometer) 探测的总辐射 (global solar radiation, E_{GSR}) 可表为

$$E_{\text{GSR}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中 λ_1 和 λ_2 为辐射表光谱响应的下限和上限. 依据总辐射表的光谱响应, 本文取 $\lambda_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 3 \mu\text{m}$.

太阳的直射辐射与 AIP 和 SSA 无关. 原理上, 为从总辐射信息反演 AIP 和 SSA, 所选用的总辐射资料要包含足够多的漫辐射信息. 下面从图 1 分析适用于反演 AIP 和 SSA 的总辐射资料. 图 1 表示在不同的 μ_0 下宽带漫辐射与总辐射的比值 (R) 随 AOD 的变化. 从图 1 可以看出:

(1) AOD 越大, μ_0 越小, R 值越大. 因此, 对应较大 AOD 和较小 μ_0 的总辐射资料适用于反演 AIP 和 SSA.

(2) AOD 与 μ_0 的比值一样时, μ_0 越小, R 值越大. 在同样的辐射资料精度和 AOD 条件下, 从较小 μ_0 的总辐射所反演的 SSA 可具有较高的精度.

(3) 当 $\mu_0 \leq 0.5$ 时, AOD 大于 0.3 时 R 值大于 50%. 当 $\mu_0 \leq 0.2$ 而 AOD 小至 0.1 时, R 也大于 50%. $\mu_0 \geq 0.8$ 时, 为使 R 值大于 50%, AOD 要大于 0.5.

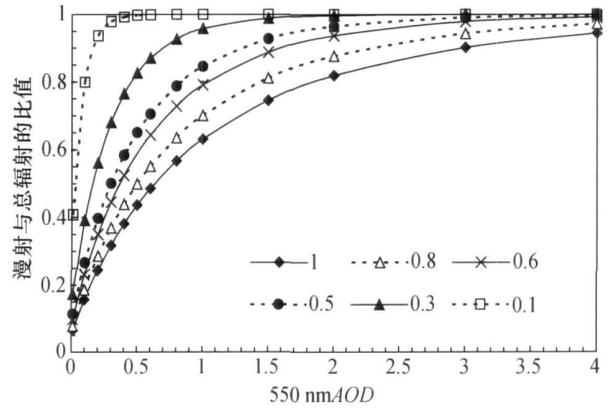


图 1 不同 μ_0 下宽带漫辐射与总辐射的比值 (R) 随 AOD 变化

原理上, 本文提出的从总辐射信息反演 SSA 的方法是基于漫辐射分量对 SSA 敏感性. 反演上要解决的问题是: 如何选择适当的总辐射资料, 使它对 SSA 的变化有足够强的敏感性, 保证 SSA 反演有合适的精度. 漫射贡献比 R 随 AOD 的变大而变大. 因此, 只要 AOD 大于某一下限, 可保证漫射贡献比大于某一设定的阈值. 大的阈值可保证总辐射资料对 SSA 有强的敏感性. 但阈值偏大, 就会滤掉对应较小 AOD 的总辐射资料. 依据宽带总辐射计算资料, 取 50% 为漫射贡献比阈值, 提出一个不同 μ_0 下 550nm 波长 AOD 下限模式 (称为 AOD 下限模式 1), 即

$$AOD \geq 0.718\mu_0 - 0.0813\mu_0^2 \quad (3)$$

μ_0 越小, AOD 下限越小. 当 μ_0 较小时, 水平探测面上太阳直射辐射远小于探测面直对太阳时的值, 使满足漫射贡献比阈值的 AOD 下限偏小, 相应的总辐射用于反演 SSA 时精度会较差. 基于这一点, 并依据后面论述的反演模拟, 提出如下一个更合适的 μ_0 -AOD 下限模式 (AOD 下限模式 2)

$$AOD \geq 0.718\mu_0 - 0.0813\mu_0^2 + 0.06(1 - \mu_0^2) \quad (4)$$

当 μ_0 为 1 时, 两式确定的 AOD 下限相同, μ_0 小于 1 时, 从 (4) 式计算的 AOD 下限偏大, 最多偏大 0.06. 如果 AOD 远大于该下限, 漫射贡献比可远大于 50%, 相应的总辐射资料越适用于反演 SSA. 此方法在原理上正是基于总辐射的这一特性.

1.2 反演算法

在 AIP 与波长无关假设下, 提出一个从宽带的太阳总辐射同时反演 AIP 和不同波长 SSA 的方法, 算法如下:

(1) 确定要反演的 SSA 波长, 根据 AIP 和气溶胶 Ångström 指数 (α) 可能变化范围, 选择一组 AIP 和 α 值, 通过 Mie 散射计算, 建立对应这些波长, AIP 和 α 值的 SSA 库;

(2) 应用太阳光度计探测的 AOD 或宽带消光法^[8] 反演的 AOD , 根据 AOD 下限模式选择用于反演 SSA 的晴天总辐射资料;

(3) 采用上一步的 AOD 和光度计探测的 α 值 (或假设的 α), 应用辐射传输算法计算不同 AIP 的太阳总辐射, 计算值等于总辐射真值的 AIP 取为解. 也可应用列表法 (LUT) 进行这一计算过程;

(4) 应用 SSA 库, 确定对应 AIP 解, α 值和所选波长的 SSA , 取为解.

上述算法中, 假设 AIP 与波长无关. 应用某一波长太阳总辐射反演 AIP 和 SSA 时, 无需此假设, 反演算法相类似.

2 误差分析

考虑总辐射对 SSA 的敏感性, 选择较小 μ_0 和较大 AOD 的辐射值有利于提高反演精度. 但当 μ_0 较小时, 辐射表余弦响应误差可使辐射观测精度变差, 平面大气假设也可能不再适用. 直射和散射辐射都随大气柱水汽含量的增大而变小, 使得总辐射比漫射对水汽含量的敏感性要强. 从总辐射反演 SSA 必然要求更高的水汽含量精度. 基于这些考虑, 现主要通过数值模拟分析影响 SSA 反演精度的如下 4 个误差因子: (i) 辐射资料误差; (ii) AOD 和谱分布的不确定性; (iii) 水汽含量误差; (iv) 平

面平行大气假设. 模拟中输入参数为: 气溶胶谱分布为 Ångström 指数等于 1 的 Junge 谱; 折射率为 $1.5-0.02i$; 等于 0.1 的宽带地表反照率; MODTRAN^[9] 中 1976 美国标准大气. 辐射计算采用 Stamnes 等发展的 DISORT 算法^[10], 大气分为 18 层.

2.1 辐射观测误差效应

表 1 表示应用 550 nm 波长和宽带 (300—3000 nm) 总辐射反演 SSA 时辐射资料误差所引起的 550 nm 波长 SSA 解误差. 如表所示:

(1) AOD 越大, SSA 反演误差越小. 当 $AOD=0.1$, $\mu_0=0.5$, 辐射误差为 $\pm 2\%$ 时, 从 550 nm 和宽带总辐射反演的 SSA 解的误差分别高达 0.097 和 0.116. μ_0 和辐射误差不变, 而 AOD 变大为 1.0 时, SSA 解的误差分别在 ± 0.008 和 ± 0.011 以内, 比 $AOD=0.1$ 时小约一个数量级. $AOD=2$ 时, 辐射误差高达 $\pm 10\%$ 时, 从 550 nm 和宽带总辐射反演的 SSA 解的误差也分别在 ± 0.028 和 ± 0.035 以内.

(2) μ_0 越小, SSA 解对辐射误差的敏感性越弱. 如当 $AOD=0.3$, 辐射误差为 $\pm 2\%$, $\mu_0=0.5$ 时, 从 550 nm 总辐射反演 SSA 的误差为 ± 0.034 , $\mu_0=0.2$ 时 SSA 误差为 ± 0.018 .

(3) 较之应用 550 nm 总辐射, 应用宽带总辐射反演 SSA 的误差稍大.

因此, 适当选取对应不同 μ_0 的 AOD 值对应用总辐射资料反演 SSA 是重要的. 下面根据图 2 和 3 分析对于 AOD 下限模式 1 和 2 (即公式 3 和 4) 所确定的 AOD 下限值, 由辐射误差所引起的 SSA 反演误差. 图 2 表示 AOD 下限随 μ_0 变化. 当 μ_0 从 0.1736 ($\theta_0=80^\circ$) 至 1 变化时, 模式 1 所确定的 AOD 下限在 0.122—0.636 之间变化, 模式 2 所确定的 AOD 下限在 0.18—0.636 之间变化.

表 1 对 5 个 550 nm 波长 AOD 值, 应用 550 nm 波长和宽带 (300—3000 nm) 总辐射反演 SSA 时辐射观测误差所引起的 SSA 解的误差

AOD	550 nm, $\mu_0=0.5$			550 nm, $\mu_0=0.2$			宽带, $\mu_0=0.5$		
	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
0.1	± 0.097	± 0.206	± 0.206	± 0.052	± 0.132	± 0.206	± 0.116	± 0.206	± 0.206
0.3	± 0.034	± 0.082	± 0.170	± 0.018	± 0.046	± 0.094	± 0.039	± 0.098	± 0.206
0.5	± 0.019	± 0.048	± 0.100	± 0.010	± 0.031	± 0.059	± 0.022	± 0.058	± 0.125
1.0	± 0.008	± 0.027	± 0.049	± 0.006	± 0.017	± 0.036	± 0.011	± 0.032	± 0.061
2.0	± 0.004	± 0.011	± 0.028	± 0.004	± 0.009	± 0.020	± 0.006	± 0.016	± 0.035

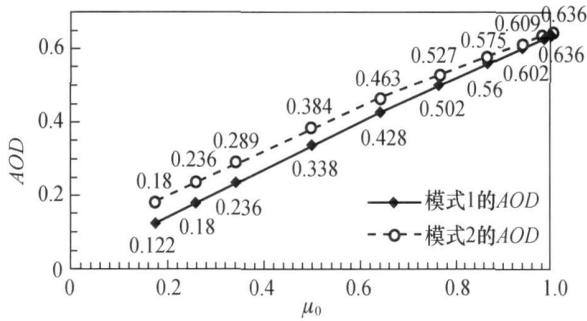


图 2 由公式(3)和(4)确定的 AOD 下限随 μ_0 的变化

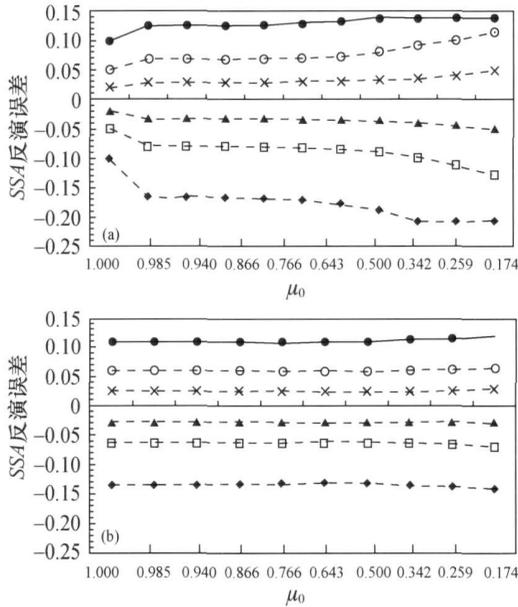


图 3 由宽带辐射误差导致的 550 nm 波长 SSA 反演误差
(a) 模式 1 的 AOD; (b) 模式 2 的 AOD

-◆- -10%; -□- -5%; -▲- -2%; -×- 2%; -○- 5%; -●- 10%

图 3 表示对(由 AOD 下限模式确定的)不同 μ_0 的 AOD 下限值, 辐射误差导致的 550 nm 波长 SSA 反演误差. 如图 3(a)所示, 对于模式 1 的 AOD 下限值, 从宽带总辐射反演的 SSA 误差都随 μ_0 变小有变大趋向. 而对模式 2 的 AOD 下限值(图 3(b)), 从宽带总辐射反演的 SSA 误差随 μ_0 变化是很小的, 如对 2% 的辐射误差, 对应 1 至 0.174 的 μ_0 变化, SSA 误差在 -0.028—0.029 之间变化. 模式 2 是更加合适的. 采用这一模式时, 如果辐射观测的误差分别在 $\pm 2\%$ 和 $\pm 5\%$ 以内, SSA 误差分别在 ± 0.029 和 ± 0.07 以内. 辐射高估时, SSA 解偏小, 辐射低估, 解偏大. 大量 SSA 解的平均值通常有更高精度.

当 μ_0 较小时, 仪器余弦响应误差可导致总辐射观测误差变大. 如对目前我国气象台站使用的总辐射表, θ_0 分别为 10° ($\mu_0 = 0.1736$) 和 30° ($\mu_0 = 0.5$) 时, 余弦响应误差在 10% 和 5% 以内^[11]. 如表 2 所示, 对于模式 2 的 AOD 下限值以及太阳高度角从 10° 至 40° 变化, 0° 至 30° 视高度角范围内漫射对总漫射的贡献比都在 12.3% 以内, 太阳高度角越小, 比例越低, 10° 时仅为 6.03%, 辐射表余弦响应误差所导致的漫射分量探测误差估计是小的, 主要影响直射分量的探测精度. 当太阳高度角为 30° 时, 总辐射表余弦响应最大误差为 5%, 而当 AOD 等于 0.384 时太阳直射辐射对总辐射的贡献比为 54.22%, 由此估计余弦响应误差所导致的总辐射观测误差在 2.71% (5% 乘 54.22%) 以内. 当太阳高度角为 10° 而 AOD 为 0.180 时, 余弦响应误差所导致的总辐射观测误差估计在 3.64% 以内. AOD 变大, 直射辐射对总辐射的贡献比变小, 余弦响应误差所引起的总辐射观测误差变小.

表 2 对模式 2(公式 4)确定的 AOD 下限和 550 nm 总辐射情形, 余弦响应误差所导致的总辐射观测误差 (δ) 估计

太阳高度角/ $^\circ$	550 nm AOD	直射辐射对总辐射贡献比/%	视高度角 0° 至 30° 漫射对总漫射贡献比/%	δ /%
40	0.463	56.58	12.27	
30	0.384	54.22	8.10	< 2.71
20	0.289	49.58	6.14	
10	0.180	36.40	6.03	< 3.64

2.2 AOD 和谱分布误差的效应

图 4 表示对于模式 2 的 AOD 下限和宽带总辐射, AOD 误差导致的 550 nm 波长 SSA 反演误差.

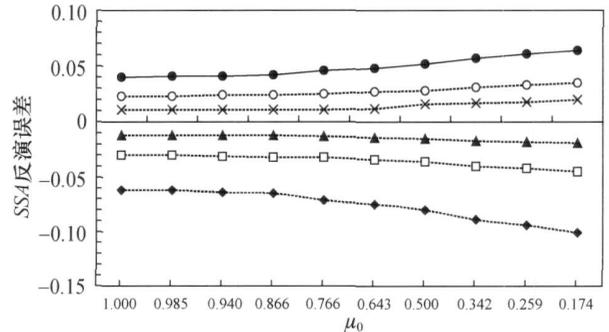


图 4 对于模式 2 的 AOD 下限值, AOD 误差所导致的 SSA 反演误差

-◆- -20%; -□- -10%; -▲- -5%; -×- 5%; -○- 10%; -●- 20%

当 AOD 误差在 ±10% 以内时, 在 μ_0 从 1—0.1736 范围内 SSA 误差都在 ±0.041 以内, AOD 的误差为 ±20%, SSA 误差在 ±0.093 以内.

比较其他的一些误差影响因子, Ångström 指数误差效应相对较弱. 数值反演实验表明: 如果该指数误差分别在 ±0.4 和 ±0.6 以内, SSA 误差在 ±0.027 和 ±0.04 以内, SSA 误差随 μ_0 变小有变大趋势.

2.3 大气柱水汽含量输入误差的效应

数值反演实验还表明: 如果水汽含量误差分别在 ±0.2 cm 和 ±0.4 cm 以内, SSA 误差在 ±0.015 和 ±0.04 以内.

2.4 平面平行大气假设的效应

引入平面大气假设可使反演算法大大简化, 但当 θ_0 很大时, 该假设可引起较大的辐射计算误差. 下面在一次散射假设下对这一误差予以评估. 采用现有的一些相对空气光学质量参数化模式, $\theta < 85^\circ$ 的太阳直射分量可精确计算^[12], 问题在于散射计算. 地面上向下的 λ 波长一次散射辐照度可表为:

$$E_\lambda = \int_0^\pi \int_0^1 \int_0^{\tau_i} S_0(\lambda) \mu p(\tau, \mu, \phi, \mu_0, \phi_0) \cdot \exp[-\tau m(\mu_0) - (\tau_i - \tau) m(\mu)] d\phi d\mu d\tau \mu = \int_0^\pi \int_0^1 \int_0^{\tau_i} S_0(\lambda) p(\tau, \mu, \phi, \mu_0, \phi_0) \cdot \exp[-\tau m(\mu_0) - (\tau_i - \tau) m(\mu)] d\phi d\mu d\tau \quad (5)$$

$$m(\mu_0) = \begin{cases} 1/\mu_0, & \text{平面大气} \\ 1/[\mu_0 + 0.15/(90 - \theta_0 + 3.885)^{1.253}], & \text{球面大气} \end{cases} \quad (6)$$

$$m(\mu) = \begin{cases} 1/\mu, & \text{平面大气} \\ 1/[\mu + 0.15/(90 - \theta + 3.885)^{1.253}], & \text{球面大气} \end{cases} \quad (7)$$

上面 3 式中, ϕ_0 为方位角, μ 和 ϕ 分别为视天顶角余弦和方位角, τ 为大气顶至 z 高度的大气光学厚度, P 为 z 高度处的大气散射相函数, τ_i 为大气柱总光学厚度, $m(\mu_0)$ 和 $m(\mu)$ 为对应 μ_0 和 μ 的相对空气光学质量. 本文采用 Kasten 模式^[12] 计算

$m(\mu_0)$ 和 $m(\mu)$. 散射计算时, 气溶胶消光系数分布为 MODTRAN^[9] 乡村模式乘一调制系数, 调制后, AOD 等于公式 (4) 所计算的 AOD 下限, 波长为 550 nm, 气溶胶谱分布为 Ångström 指数等于 1 的 Junge 谱, 折射率为 1.5—0.01*i*. 计算结果表明, θ_0 分别为 60° , 70° 和 80° 时, 平面大气假设下所计算的一次散射辐照度对球面大气计算结果的偏差分别为 0.84%, 1.53% 和 4.37%, 再考虑表 3 所示的太阳直射成分对总辐射的贡献, 平面大气假设下总辐射的计算偏差大约为 0.55%, 1.02% 和 3.2%. 依据 2.1 所分析的辐射误差导致的 SSA 反演误差, 对模式 2 的 AOD 下限, 平面大气假设下 θ_0 为 60° , 70° 和 80° 时总辐射计算偏差所导致的 SSA 反演误差估计分别在 0.007, 0.015 和 0.045 以内.

综合分析: 辐射资料误差和气溶胶光学厚度的不确定性对 SSA 反演精度有更大的影响. 对于模式 2 所确定的 AOD 下限值, 如果辐射观测误差分别在 ±2% 和 ±5% 以内, SSA 误差分别在 ±0.029 和 ±0.07 以内; 如果 AOD 误差在 ±10% 以内, SSA 误差在 ±0.041 以内. 如果太阳天顶角限制在 70° 以内, 平面大气假设所引起的 SSA 误差估计在 0.015 以内. 实际 AOD 越大于本文模式确定的 AOD 下限值, SSA 反演精度越高.

3 对比检验

图 5 应用本方法从北京气象台站 2001—2005 年间总辐射资料反演的 SSA 与 AERONET^[13] 北京站的 SSA 探测结果进行比较, 共有 129 组对比结果. 在比较中, 用于反演 SSA 的总辐射资料满足如下条件: (i) 由 08:00, 14:00 和 20:00 三个时刻云量观测记录插值得到的辐射观测期间的云量为零; (ii) 总辐射资料为总辐射表探测的 1 h 曝辐量; (iii) 采用宽带消光法反演的 AOD (或 AERONET 探测的 AOD) 大于由公式 (4) 确定的 AOD 下限值; (iv) 太阳天顶角余弦大于 0.2; (v) 在总辐射探测的 1 h 内, 至少有一个 AERONET 的 SSA 探测值. 有 2 个从总辐射资料反演的 SSA 值, 反演中都采用杨景梅和邱金桓发展的关于大气柱水汽含量与地面水汽压的一个经验关系式^[14]、利用宽带消光法^[8] 反演的 AOD. 不同在于 Ångström 指数 (α) 的输入上. 以 BRM_1 表示的一组反演统一假设 $\alpha = 1.2$, 而以

BRM_2 表示的一组反演采用 AERONET 探测的 440—870 nm 波长范围内的 α 值, 它的平均值等于 1.202. 从图 5 可以看出如下两点:

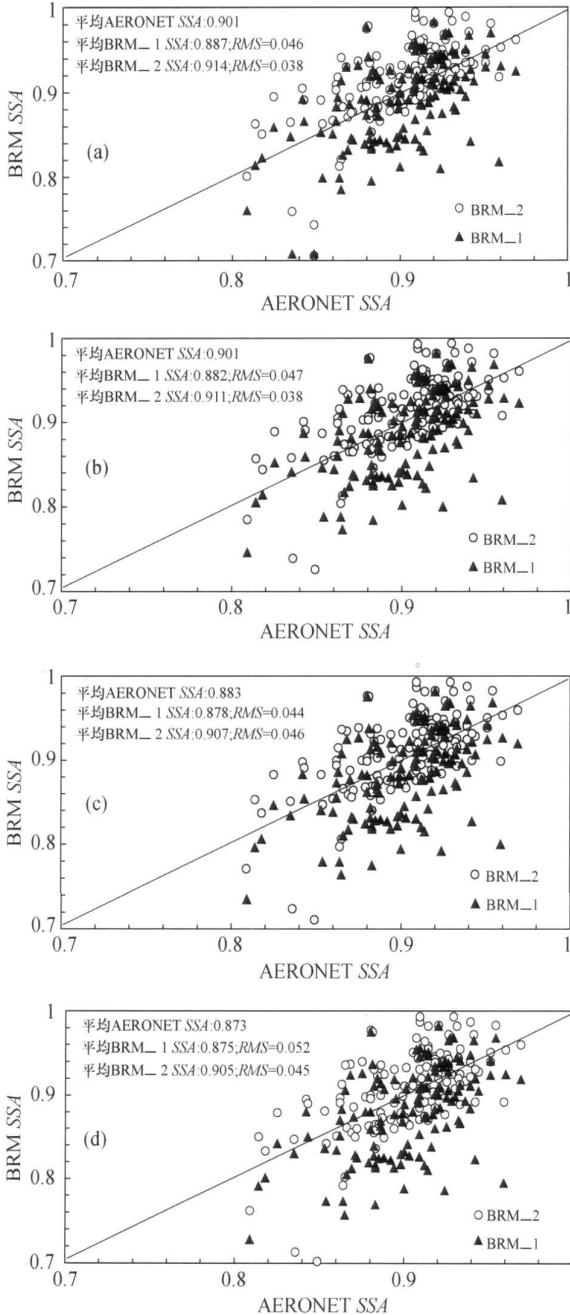


图 5 从宽带总辐射反演的 SSA 与 AERONET 的 SSA 比较
(a) 440 nm; (b) 670 nm; (c) 870 nm; (d) 1020 nm

(1) 对 4 个 AERONET 波长, BRM_1 和 BRM_2 的 SSA 平均值对 AERONET 结果的最大偏差为 0.032; 均方根偏差都在 0.052 以内. 在 440

和 670 nm 两个通道, BRM_2 的 SSA 与 AERONET 结果有较好吻合, 均方根偏差在 0.038 以内. 在 870 和 1020 nm 两个通道, BRM_1 的 SSA 平均值与 AERONET 结果有较好的一致, 偏差只有 0.005, BRM_2 的 SSA 平均值的偏差较大, 在 1020 nm 波长为 0.032.

(2) 在 440 和 670 nm 两个波长, AERONET 的 SSA 平均值都为 0.901, 而从 670 至 1020 nm, SSA 随波长增大呈下降趋势. 应用本文方法反演的 SSA 平均值在 440 至 1020 nm 范围内都随波长增大而变小. AERONET 探测 AIP 是随波长变化的, 而本文方法采用波长无关的 AIP 假设. 这估计是导致上述差异的一个重要原因.

此方法反演不同波长 SSA 的 3 个主要输入资料是太阳总辐射(宽带或光谱)、AOD 和 Ångström 指数, 无需漫射的信息. 与 AERONET 的 SSA 探测结果的较好吻合表明其方法的适用性.

4 结论

提出了一个应用光谱和宽带的太阳总辐射反演 AIP 和 SSA 的新方法. 这一方法在原理上是基于漫辐射分量对 SSA 的敏感性. AOD 越大而 μ_0 越小, 漫辐射分量对总辐射的贡献越大. 依据辐射模拟计算资料, 提出了 AOD 下限模式, 用于选择用于反演 SSA 的总辐射资料.

理论分析与反演模拟表明: 辐射资料误差、气溶胶光学厚度误差、大气柱水汽含量误差和平面大气假设是影响 SSA 反演精度的主要因子, 特别是前两者. 对于模式 2 所确定的 AOD 下限值, 如果辐射观测误差分别在 $\pm 2\%$ 和 $\pm 5\%$ 以内, SSA 误差分别在 ± 0.029 和 ± 0.07 以内; 如果 AOD 误差在 $\pm 10\%$ 以内, SSA 误差在 ± 0.041 以内. 实际 AOD 越大于模式确定的 AOD 下限值, SSA 反演精度越高.

将本方法从北京气象台站总辐射资料反演的 SSA 与 AERONET 北京站的 SSA 探测结果进行比较. 对 4 个 AERONET 波长, SSA 平均值对 AERONET 结果的最大偏差为 0.032; 均方根偏差都在 0.052 以内. 与 AERONET 的 SSA 探测结果的较好吻合表明这一方法的适用性. 反演不同波长 SSA 的 3 个主要输入资料是太阳总辐射(宽带或光

谱), *AOD* 和 Ångström 指数, 无需漫射的信息.

参 考 文 献

- Herman BM, Browning SR, De Luisi JJ. 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(5): 918—925
- King MD, Herman BM. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing. Part one: Theory. *J Atmos Sci*. 1979, 36(1): 163—173
- King MD, Herman BM. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing. Part two: Application. *J Atmos Sci*. 1979, 36(6): 1072—1083
- 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
- Qiu JH, Yang LQ, Zhang XY. Characteristics of imaginary part and single scattering albedo of urban aerosol in northern China. *Tellus*. 2004, 56B(3): 276—284
- 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. *大气科学*. 2006, 30(6): 767—777
- Qiu JH. Absorption properties of urban/suburban aerosols in China. *Adv Atmos Sci*, 2008(1): 1—10
- Qiu JH. Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties. *Tellus*. 2001, 53B(1): 72—82
- Berk A, Bernstein LS, Robertson DC. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122(1989). 1996, updated and commercialized by Ontar Corporation, 9 Village Way, North Andover, Mass. 01845
- Stamnes K, Tsay SC, Wiscombe WJ, et al. Numerically stable algorithm for Discrete Ordinate Method Radiative Transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl Opt*. 1988, 27(12): 2502—2509
- 中国气象局. 气象辐射观测方法. 北京: 气象出版社, 1996: 1—165
- Kasten F. A new table and approximate formula for the relative optical air mass. *Arch Meteorol Geophys Bioklimatol Ser B*. 1966, 14(2): 206—223
- Holben BN, Eck TF, Slutsker L, et al. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem Sens Environ*. 1998, 66(1), 1—16
- 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究. *大气科学*. 2002, 26(1): 9—22

(上接第 800 页)

随后, 30 位项目负责人针对自己的项目介绍新的想法和思路, 由于研究的方向比较接近, 专家们讨论非常热烈, 对各个项目都提出了很好的意见和建议, 尤其是激素测定的项目, 植物学专家针对目前我国的迫切需求对化学科学家提出了一些建议, 希望他们一方面探索新的高灵敏度的探测手段, 另一方面要首先解决我国植物激素研究中面临的测定困难的现实问题, 专家组也对其中还没有真正启动的个别项目提出了要求, 希望尽快落实实验方案, 确保可行性.

两天的会议取得了非常好的效果, 杜生明常务副主任在会议总结时谈到, 该会议是所有重大研究计划中第一次召开资助项目启动研讨会, 下次将邀请海外专家参加. 会议期间激素测定的专家单独召开了一次碰头会, 协调每个项目的侧重点, 针对 1—2 种激素进行方法学探讨并讨论如何进一步与植物激素研究者合作.

(供稿: 温明章 谷瑞升)