

大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法^{*}

I. 理论

尉东胶 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 提出了从宽谱太阳漫射辐射信息反演大气气溶胶折射率虚部的新方法。通过敏感性分析发现: 宽谱太阳漫射辐射对大气气溶胶折射率虚部的变化非常敏感, 而对粒子谱分布、气溶胶折射率实部、地表反射率、大气中水汽和臭氧含量的变化不很敏感或弱敏感。因此可以从中较好地提取大气气溶胶折射率虚部。数值试验表明该方法具有较高的精度。

关键词 太阳辐射 折射率虚部 敏感性

1 引言

大气气溶胶折射率虚部是大气气溶胶的一个重要特性, 它决定了大气气溶胶在辐射气候效应中的作用究竟是冷却还是加热。因此, 它对气溶胶辐射效应研究及全球气候变化研究具有重要意义。同时, 它对空间遥感大气订正也是相当重要的。

国内外许多学者, 包括 Herman 和 Browning^[1]、King 和 Herman^[2]、邱金桓和周秀骥^[3]等, 对大气气溶胶折射率虚部进行过大量的研究。他们所采用的窄谱遥感探测方法是目前遥感探测大气气溶胶折射率虚部的常用有效手段之一。但是, 目前世界上只有几个地点进行这种观测研究, 在世界范围内仍十分缺乏大气气溶胶折射率虚部的资料。大部分气象台站只有全谱或宽谱的太阳漫射辐射的长期观测历史。到目前为止, 国际上尚无一种有效的遥感探测方法可以从该辐射信息反演大气气溶胶折射率虚部。如果能有一种遥感探测方法可以较好地该辐射信息中反演出大气气溶胶折射率虚部, 必将对气溶胶辐射气候效应研究及全球气候变化研究起到非常重要的作用。

为了充分利用遍布全世界的气象台站长期的全谱或宽谱漫射辐射观测资料, 本文在分析了地面上晴天宽谱太阳漫射辐射对大气气溶胶粒子谱分布、折射率虚部、折射率实部、地表反射率、水汽和臭氧含量等参数的敏感性基础上, 提出了一个从该辐射信息反演大气气溶胶折射率虚部的新的遥感探测方法, 并通过数值试验在广泛的大气条件下分析了该方法的探测精度。该方法直接利用气象台站的漫射辐射观测资料, 可以方便地得到一个地区、一个国家乃至全球长期的大气气溶胶折射率虚部的分布, 为气溶胶辐射气候效应研究及全球气候变化研究提供丰富的资料。

1997-05-22 收到, 1997-07-02 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49493404

2 原理与敏感性分析

首先介绍 Herman 和 Browning^[1]的漫射一直射方法。考虑分子散射、粒子米散射和吸收, 则根据比尔定律, 对于波长 λ , 到达地面的直射辐射为

$$F(\lambda, \tau, \mu_0) = F(\lambda, 0, \mu_0) \exp\{[-\tau_R(\lambda) - \tau_d(\lambda)] / \mu_0\}, \quad (1)$$

其中, $F(\lambda, 0, \mu_0)$ 是大气上界波长 λ 的单色太阳辐射, μ_0 为天顶角余弦, τ_R 和 τ_d 分别为分子和其他粒子的光学厚度。波长 λ 处的漫射辐射 $S(\mu_0, \lambda, \tau, m)$ 由平面平行条件下的辐射传输方程求出。折射率 $m = n_R + in_I$, n_R, n_I 分别为实部和虚部。则漫射一直射的比率为

$$R(\mu_0, \lambda, \tau, n_I) = S(\mu_0, \lambda, \tau, n_I) / F(\mu_0, \lambda, \tau) \quad (2)$$

经过敏感性分析发现此比率对虚部 n_I 很敏感, 并对地表反射率 A 有一定的敏感性。因此, 把虚部和地表反射率作为双变量, 当此比率在至少两个天顶角时存在的情况下, 作出两条曲线, 其交点处的 n_I 和 A 值即为所求的虚部值和地表反射率。

由上面的分析可见, 窄谱方法显然不能直接采用气象台站的宽谱漫射辐射资料。为了直接应用我国气象台站的这种资料, 本文采取的宽谱对应于我国目前使用的太阳辐射计的光谱响应范围, 即 $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ 之间。对于平面平行大气, 采用求解精度较高的 Gauss-Seidel 迭代法^[4]求解对应于波长 λ 的向下单色漫射辐射 S_λ , 则地表宽谱 ($0.3 \sim 4 \mu\text{m}$) 漫射辐射为

$$S = \int_{0.3}^4 S_\lambda d\lambda, \quad (3)$$

下面分析一下宽谱漫射辐射对有关参数的敏感性。影响漫射的主要参数有: 气溶胶光学厚度、粒子分布、折射率实部和虚部、地表反射率和太阳天顶角。另外, 水汽和臭氧在计算波段内是主要的吸收气体, 因此它们对漫射的影响也需要考虑。由于采用宽谱方法, 还要考虑气溶胶光学厚度和折射率随波长的变化问题。考虑到在 $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ 范围内吸收太阳辐射的主要气体为 O_3 和 H_2O , 因此在忽略其他气体吸收的情况下, 某一波长 λ 的总光学厚度为

$$\tau_T(\lambda) = \tau_M(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) + \tau_{\text{O}_3}(\lambda), \quad (4)$$

其中, $\tau_M(\lambda)$ 为米散射光学厚度, 在 Junge 谱条件下, 可以取为

$$\tau_M(\lambda) = \tau_M(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-(r^* - 2)}, \quad (5)$$

式中, $\tau_M(\lambda_0)$ 为某个已知波长的米散射光学厚度, 根据邱金桓^[5]的研究, 可以从宽谱太阳直射辐射资料中求出 $0.7 \mu\text{m}$ 的米散射光学厚度, 即此已知波长可取为 $0.7 \mu\text{m}$; r^* 为 Junge 谱参数。

瑞利散射光学厚度取经验公式:

$$\tau_R(\lambda) = 0.00838 \frac{P}{P_0} \lambda^{-(3.916 + 0.074\lambda + 0.05/\lambda)} \quad (6)$$

式中, $P_0 = 1013 \text{ hPa}$, P 为实际大气压。

臭氧的光学厚度取为: $\tau_{O_3}(\lambda) = k_{O_3}(\lambda)x$, k_{O_3} 为臭氧的吸收系数^[6], x 为大气中臭氧含量。

水汽在 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $0.94 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \mu\text{m}$ 、 $1.38 \mu\text{m}$ 、 $1.87 \mu\text{m}$ 、 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $3.2 \mu\text{m}$ 附近均有吸收。水汽的光学厚度计算方法采用 Clough^[7]等人的基于逐线积分的计算方法。

如不作特别说明, 敏感性分析时取 $0.7 \mu\text{m}$ 的米散射光学厚度为 0.2, $P = P_0$, $x = 0.35 \text{ cm}$, $v^* = 3.0$, 实部 $n_R = 1.5$ 。图 1 为宽谱漫射对虚部的敏感性。图中 S/S_0 为宽谱漫射与大气上界对应波段的总辐射之比 (为一常量)。 $\mu = \cos\theta$, θ 为天顶角。可以看出在各个天顶角下, 宽谱漫射对虚部都是非常敏感的, 因此可以从中提取虚部。同时可以看出这种敏感性是随着 μ 的减少而增强的。另外, 可以发现其他量已知的情况下, 宽谱漫射是虚部的单调减函数。

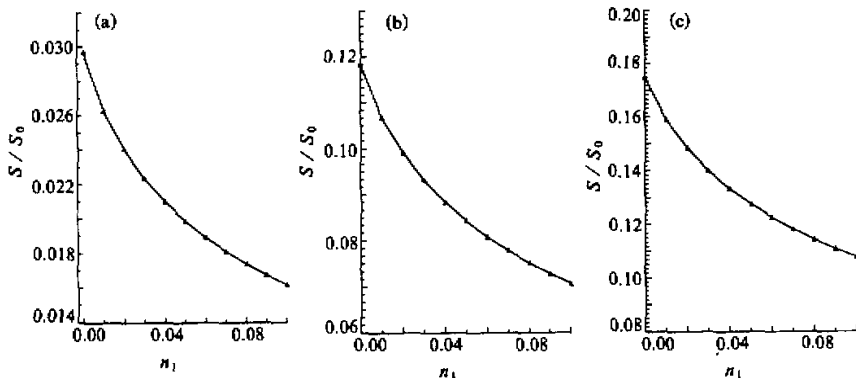


图 1 宽谱漫射对虚部的敏感性
(a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.5$, (c) $\mu=1.0$

图 2 为宽谱漫射对粒子谱分布的敏感性, (a)、(b)、(c) 分别为天顶角余弦为 0.1、0.5 和 1.0 的情况。图中谱分布参数 v^* 的变化范围为 1.0 到 5.0, 而在实际大气中 v^* 的变化范围通常为 2.0 到 4.0。从图中可以看出, 在比较宽的谱分布条件下, 宽谱漫射对粒子谱分布是弱敏感的。

图 3 为宽谱漫射对地表反射率的敏感性。可以看出宽谱漫射对地表反射率有一定的敏感性, 但比对虚部的敏感性要弱得多。同时可以发现宽谱漫射对地表反射率的敏感性随着 μ 的减少而减少, 刚好与对虚部的敏感性变化趋势相反, 故可以选择合适的通道有效地避开其影响。

通过数值试验表明, 在各个天顶角下, 实部从 1.4 变化到 1.6 引起的宽谱漫射相对变化不到 2%。同时发现, 宽谱漫射的 85% 集中在 $1 \mu\text{m}$ 之内, 而在这个范围内折射率

的变化是很小的^[8]。故实部变化的影响可以忽略。

由于在计算各对应波长的米散射光学厚度时, 需要某一个波长的米散射光学厚度 $\tau_M(\lambda_0)$ (计算中采用邱金桓用对应的宽谱太阳直射信息得到的 $0.7 \mu\text{m}$ 左右的光学厚度), 因此需要分析所用波长的光学厚度的误差对结果的影响。为此, 比较 $\tau_M(0.7)$ 真值为 0.2 时, 如果此光学厚度有的 $\pm 10\%$ 误差, 即 $\tau_M(0.7)=0.18$ 和 $\tau_M(0.7)=0.22$ 时, 对 S/S_0 造成的影响。在 $A=0.2$, $\mu=0.1$, $n_R=1.5$, $n_I=0.01$, $\tau_M(0.7)=0.2$ 时, S/S_0 为 0.0297, 而对应于 $\tau_M(0.7)=0.18$ 和 $\tau_M(0.7)=0.22$ 的 S/S_0 分别为 0.0293 和 0.0301。由此可见, $\tau_M(\lambda_0)$ 的测量误差对 S 影响比较小。

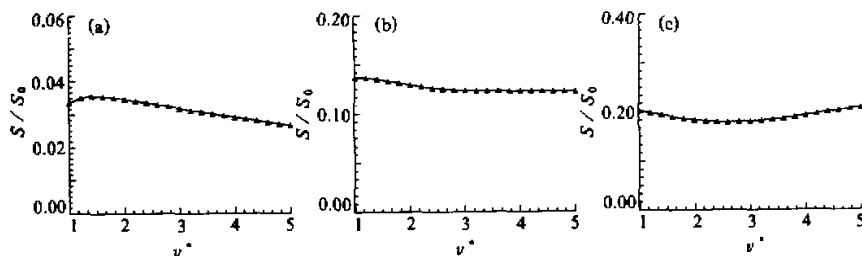


图2 宽谱漫射对粒子谱分布的敏感性
(a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.5$, (c) $\mu=1.0$

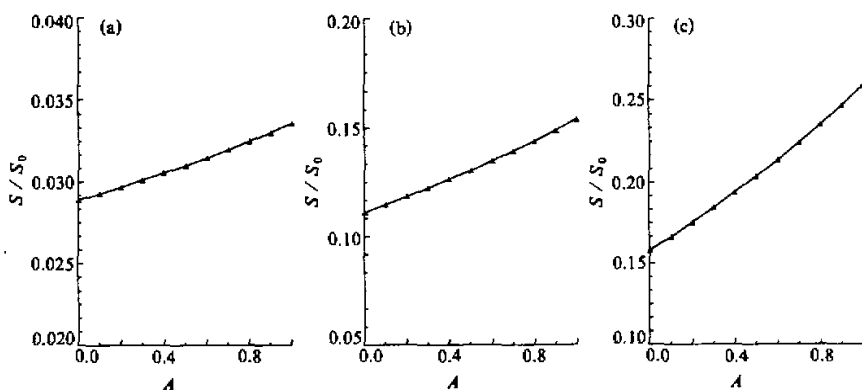


图3 宽谱漫射对地表反射率的敏感性
(a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.5$, (c) $\mu=1.0$

数值试验表明, 在各个天顶角下, 臭氧含量在典型值 0.35 cm 附近变化 $\pm 0.05 \text{ cm}$, 引起宽谱漫射的相对变化不到 1%。因此, 大气中臭氧含量变化对宽谱漫射的影响是很弱的。

宽谱漫射 85% 以上集中在 $1 \mu\text{m}$ 之内, 95% 以上集中在 $2 \mu\text{m}$ 之内, 而水汽在 $1 \mu\text{m}$ 之内的吸收很弱, 在 $2 \mu\text{m}$ 之内的吸收也不是很强。因此, 水汽对宽谱漫射的影响比较小。计算表明水汽变化为标准状态含量的 5 倍后, 宽谱漫射的相对变化只有 10% 左

右。

通过上述敏感性分析可以得出如下结论:

- (1) 宽谱漫射对气溶胶折射率虚部是非常敏感的。
- (2) 宽谱漫射主要集中在 $1\ \mu\text{m}$ 之内。而在这个范围之内折射率通常可以看作常数, 不随波长变化而变化^[8]。
- (3) 宽谱漫射对粒子谱分布、折射率实部、地表反射率、水汽和臭氧含量变化不很敏感或弱敏感。

根据最佳信息层理论, 利用宽谱漫射信息可以较好地反演大气气溶胶折射率虚部。

3 反演方法

根据敏感性分析, 宽谱漫射辐射可以写为下面的形式:

$$S = S(n_I, v^*, A, U, x, \tau_M(\lambda_0)), \quad (7)$$

其中, n_I 为虚部, v^* 为谱分布参数, A 为地表反射率, U 为大气含水量, x 为大气臭氧含量, $\tau_M(\lambda_0)$ 为某一波长 λ_0 ($0.7\ \mu\text{m}$ 左右) 的米散射光学厚度。

气象台站具有的资料包括宽谱直射辐射和宽谱漫射辐射资料及对应的大气状况资料。根据邱金桓的研究, 可以从宽谱直射辐射资料中求出某一波长 λ_0 ($0.7\ \mu\text{m}$ 左右) 的米散射光学厚度 $\tau_M(\lambda_0)$ 。从当时的大气状况可以计算大气含水量 U 。根据前面的敏感性分析, 谱分布对宽谱漫射不敏感, 因此可以设定一个谱分布参数 v^* 作为已知。宽谱漫射对地表反射率的敏感性要比对虚部的敏感性弱得多, 可以根据观测地点的地表性质结合某些已知类似地点的地表反射率粗略地取定观测地点的地表反射率 A 。根据卫星观测资料及地表观测结果, 可以得到臭氧含量 x 。故在上述参数均可当作已知, 则宽谱漫射仅为虚部的函数, 即

$$S = S(n_I). \quad (8)$$

前面的敏感性分析发现宽谱漫射是虚部的单调减函数。因此, 采用下面的步骤从宽谱漫射中反演虚部:

- (1) 假定一虚部值, 用 Gauss-Seidel 迭代法计算出该值对应的宽谱漫射。
- (2) 比较宽谱漫射的计算值与实际观测值, 若计算值大于观测值则增加虚部, 反之则减少虚部, 重新计算出此时的虚部值对应的漫射辐射。
- (3) 重复步骤 2, 直到在一定误差范围之内 (本文取观测值的 0.1%), 宽谱漫射的计算值与观测值相符, 则此时所取的虚部值即为所求的虚部。

4 误差分析

为了从宽谱太阳漫射辐射确定大气气溶胶折射率虚部, 需要已知宽谱漫射、粒子谱分布参数、水汽和臭氧含量、地表反射率及某一已知波长的米散射光学厚度。上述这些量的误差可能会引起虚部反演解的误差。因此, 下面主要通过数值试验分析这些量的误

差对虚部反演解的影响。

4.1 宽谱漫射观测误差效应

1990 年我国对一级站进行了仪器校正, 宽谱漫射的观测误差在 2%之内。为了检验本方法的适用性, 我们考虑了观测误差高达 5%的情况。表 1 是在各个天顶角余弦 μ 的情况下宽谱漫射观测误差对虚部反演造成的影响。计算时取实部为 1.5, 粒子谱分布参数 $\nu^* = 3$, 地表反射率 $A = 0.2$, 水汽含量取为标准状态含量, 臭氧含量取为 0.35 cm。如不作特别说明, 以下取法相同。由表 1 可以看出, 在各个天顶角下, 漫射观测误差 2%对虚部反演造成的相对误差不到 10%, 漫射观测误差 5%时造成的相对误差最大也不到 25%。分析一下对应于各个天顶角的虚部反演误差, 可以发现 μ 越小, 虚部反演的相对误差越小。

表 1 漫射辐射观测误差效应

观测误差	5%	2%	0%	-2%	-5%
$\mu = 0.1$	0.0409	0.0451	0.0488	0.0527	0.059
$\mu = 0.5$	0.0513	0.058	0.0631	0.068	0.0771
$\mu = 1.0$	0.0533	0.0607	0.066	0.0718	0.0812

为了考虑在虚部较小的情况, 我们计算了虚部真值为 0.01 时的观测误差效应, 结果见表 2。可以看出, 在虚部真值为 0.01 时, 对应于漫射辐射 2%误差的虚部解误差均小于 0.003, 对应于漫射辐射 5%误差的虚部解误差稍大一些。 μ 越小反演结果越好, 证明了前面敏感性分析得出的 μ 越小宽谱漫射对虚部的敏感性越强的趋势。

表 2 虚部真值为 0.01 时的漫射辐射观测误差效应

观测误差	5%	2%	0%	-2%	-5%
$\mu = 0.1$	0.00555	0.00805	0.01	0.01205	0.0151
$\mu = 0.5$	0.00475	0.00775	0.01	0.0126	0.0166
$\mu = 1.0$	0.0044	0.00765	0.01	0.0128	0.0171

4.2 粒子谱分布误差效应

粒子谱分布误差效应见表 3 和表 4。表中 $\nu^* = 3.0$ 的一列为虚部真值。可以看出, 在不同天顶角、不同虚部大小情况下, 粒子谱分布参数变化较大时, 对虚部反演造成的误差都是比较小的。因此, 即使在缺少粒子谱分布的情况下, 可以假定 $\nu^* = 3.0$ 来计

表 3 粒子谱分布误差效应

ν^*	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
$\mu = 0.1$	0.0505	0.0498	0.0488	0.0463	0.044
$\mu = 0.5$	0.062	0.063	0.0631	0.0619	0.0599
$\mu = 1.0$	0.063	0.065	0.066	0.065	0.0638

表 4 虚部真值为 0.01 时的粒子谱分布误差效应

ν^*	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5
$m = 0.1$	0.01045	0.0105	0.01	0.0092	0.007
$m = 0.5$	0.01275	0.0126	0.01	0.0113	0.0104
$m = 1.0$	0.0115	0.0106	0.01	0.0103	0.0106

算, 对虚部反演不会造成太大的影响。这一点对本方法在实际中的应用是非常有利的

4.3 地表反射率的误差效应

先考虑地表反射率不随波长变化的情形。经过数值试验发现, 在各个天顶角情况下, 当地表反射率真值为 0.2 时, 地表反射率 0.05 的误差引起的虚部相对误差只有 5% 左右; 地表反射率 0.1 的误差引起虚部相对误差只有 10% 左右; 天顶角余弦越小, 地表反射率误差对虚部的影响越小。另外, 地表反射率真值越大, 0.05 的误差引起虚部的相对误差越小。

考虑到有的地表表面其反射率随波长变化, 尤其是有植被的情况下, 我们选取如图 4 所示^[9]的代表 3 种不同情况的地表反射率随波长变化的典型曲线进行了计算。图中曲线(a)、(b)、(c)的地物分别为北京动物园的国槐、天津市的黄垆土及江苏南京地区的千枚岩。

对于图 4 所示的每一种情况, 取虚部 $n_i = 0.01$, 用真实的地表反射率随波长变化曲线计算宽谱漫射, 作为反演虚部时的宽谱漫射真值。其他参量取法如下: $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 的米散射光学厚度为 0.2, $\mu = 0.1$, $P = P_0$, $x = 0.35\text{ cm}$, $v^* = 3.0$, 实部 $n_R = 1.5$ 。反演虚部时, 虚部当作未知, 前一步计算出的宽谱漫射作为已知, 除了地表反射率之外, 其他参量取法相同, 因此虚部的真值为 0.01。反演时, 根据波长对地表反射率作分段处理, 分段方法及反演结果见表 5。

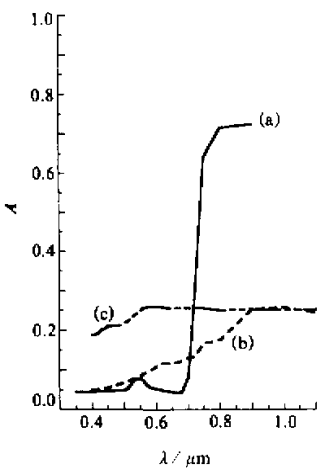


图 4 地表反射率随波长变化曲线

表 5 地表反射率随波长变化的分段处理方法及反演结果

	分段方法	虚部反演结果	反演误差
曲线 (a)	$\lambda \leq 0.75\text{ }\mu\text{m}, A = 0.05; \lambda > 0.75\text{ }\mu\text{m}, A = 0.7$	0.0095	0.0005
曲线 (b)	常数: $A = 0.15$	0.0103	0.0003
曲线 (c)	常数: $A = 0.25$	0.0104	0.0004

由表 5 可见, 在对地表反射率随波长变化的处理比较粗糙的情况下, 仍然可以得到比较好的反演结果, 对上述三条曲线的虚部反演误差均在 5% 之内。因此, 本文反演虚部方法在地表反射率随波长变化的情况下仍然可以得到很好的结果。

4.4 水汽的误差效应

经过各种天顶角下的数值计算发现: 在虚部较大时, 水汽 10% 误差造成的虚部误差仅为 2%, 水汽 30% 误差造成的虚部误差只有 4%; 在虚部较小, 如在虚部真值为 0.01 时, 水汽 10% 误差引起虚部解误差最大只有 0.0008, 水汽 30% 误差引起虚部解误差最大只有 0.0025。

4.5 臭氧的误差效应

臭氧含量在大气中是相对比较稳定的, 其总量差不多为 0.35 cm。我们计算了臭氧

含量有 0.05 cm 这样比较大误差的情况、在虚部真值为 0.05 时,发现虚部解的相对误差只有 1%~2%;在虚部真值为 0.01 时引起的虚部解误差也只有 0.0007。可见臭氧含量变化对虚部反演结果的影响很小。

4.6 米散射的误差效应

米散射误差效应来自于某一个特定波长(0.7 μm)的光学厚度误差。根据邱金桓的研究,得到的这一光学厚度的误差在 10%之内。计算表明:在各个天顶角情况下,此误差引起的虚部解误差变化较大, μ 小时的 2%增大到 μ 大时的 20%左右。因此可以选取较小的 μ 有效地避开其影响。例如,在 $\mu=0.1$ 情况下,虚部真值为 0.05 时造成的虚部解误差仅为 0.001,虚部真值为 0.01 时的虚部解误差只有 0.0008。

4.7 综合误差分析

为了分析上述六项综合误差,假定谱分布参数真值 $v^*=3.0$,地表反射率真值为 0.2,水汽含量真值为标准状态水汽含量,臭氧含量真值为 0.35 cm,波长 0.7 μm 的米散射光学厚度真值为 0.2,在宽谱漫射误差-2%~+2%,谱分布参数 v^* 误差-0.2~+0.2,地表反射率误差-0.05~+0.05,水汽误差-10%~+10%,臭氧误差-0.05 cm~+0.05 cm,波长 0.7 μm 的米散射光学厚度误差-0.02~+0.02 范围之内,随机选取 50 组进行数值试验。表 6 为对应于虚部真值为 0.01 和 0.05, $\mu=0.1, 0.5, 1.0$ 时的标准差。

表 6 虚部反演解标准差

虚部真值	$\mu=0.1$	$\mu=0.5$	$\mu=1.0$
0.01	0.0049	0.0047	0.0055
0.05	0.012	0.0098	0.0074

从表 6 中可以看出:在上述误差范围内,虚部真值为 0.01 时,在各个天顶角情况下,虚部反演解的最大的标准差只有 0.0055;虚部真值为 0.05 时,在各个天顶角情况下,虚部反演解的最大的标准差

只有 0.012。可见本文提出的方法求解大气气溶胶折射率虚部的精度还是很高的。

5 结论

本文在敏感性分析的基础上,提出了从宽谱漫射辐射信息遥感探测大气气溶胶折射率虚部的新方法。从敏感性分析和大量的数值试验可以看出以下几点:

(1) 宽谱太阳漫射对虚部非常敏感,而对粒子谱分布、地表反射率、实部、水汽和臭氧含量变化不敏感或弱敏感。

(2) 宽谱太阳漫射辐射 85%以上集中在 1 μm 之内。而在这个波长范围之内、折射率可以看作是不变的^[8]。

(3) 在宽谱太阳漫射和粒子谱分布参数有较大误差及考虑地表反射率随波长变化的情况下,本文所用方法对虚部的反演精度也是较高的。因此,此方法具有较高的实用性。

(4) 对于宽谱太阳漫射误差-2%~+2%,谱分布参数 v^* 误差-0.2~+0.2,地表反射率误差-0.05~+0.05,水汽含量误差-10%~+10%,臭氧含量误差-0.05 cm~+0.05 cm,波长 0.7 μm 的米散射光学厚度误差-0.02~+0.02 的误差范围之内,在各个天顶角下,虚部真值为 0.01 时,50 个虚部反演解的最大标准差为 0.0055,虚部真值为 0.05

时, 50 个虚部反演解的最大标准差为 0.012, 可见这种求解大气气溶胶折射率虚部的新方法具有较高的精度。

总之, 敏感性分析和大量的数值试验证明了本文所提出的从宽谱漫射信息反演大气气溶胶折射率虚部的具有较高的精度, 并且具有较高的实用性。关于如何在实用中根据实际情况选取合适的谱分布参数及地表反射率, 以减少反演误差的方法, 将在以后的实用性文章中说明。

参 考 文 献

- 1 Herman, B. M. and Browning R. S., 1975, 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.*, **32**, 918~925.
- 2 King, M. D. and Herman B. M., 1978, Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing, Part I: Theory, *J. of Atmos. Sci.*, **36**, 163~173.
- 3 Qiu Jinhuan and Zhou Xiuji, 1986, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance, Part I: Theory, *Adv. Atmos. Sci.*, **3**, 162~171.
- 4 Herman, B. M. and Browning, S. R., 1965, A numerical solution to the equation of radiative transfer, *J. Atmos. Sci.*, **22**, 559~566.
- 5 邱金桓, 1995, 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论, *大气科学*, **19**, 385~394
- 6 McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. E. A., Volz, F. E., Garing, J. S., 1971, AFCRL Environmental Research Paper, No.354, ARCRL~71-0279.
- 7 Clough, S. A., Kneizys, F. X., Davies, R., Gamache, R. and Tipping, R. H., 1980, *Atmospheric Water Vapor*, Academic Press, New York, 121~180.
- 8 Paltridge, G. W. and C. M. R. Platt, 1976, *Radiative Progress in Meteorology And Climatology, Developments in Atmospheric Science*, Vol. 5, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 65~108.
- 9 童庆禧等编著, 1990, 中国典型地物波谱及其特征分析, 191~237, 北京: 科学出版社.

Wide-Band Method to Retrieve the Imaginary Part of Complex Refractive Index of Atmospheric Aerosols. Part I: Theory

Wei Dongjiao and Qiu Jinhuan

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

Abstract This paper puts forward a new method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols from wide-band solar radiation. By the analysis of sensitivity, we found that: wide-band solar radiation is very sensitive to the imaginary part, at the same time, it is not sensitive or weakly sensitive to size distribution, real part, surface albedo and the amount of water vapor and ozone. So it is very possible to retrieve the imaginary part from wide-band radiation. The numerical experiments showed that this method has good precision.

Key words solar radiation imaginary part of refractive index sensitivity