

气溶胶光学厚度及 Ångström 指数遥感反演的不确定性对紫外线指数计算的影响

饶俊峰 张显峰[†] 潘一凡

北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; [†]通信作者, E-mail: xfzhang@pku.edu.cn

摘要 以地面站观测为参照, 分析香港地区 2005—2013 年间 MISR 气溶胶光学厚度产品和 Ångström 指数的不确定性, 通过辐射传输方程模拟该不确定性对香港地区夏季和冬季地方时 06:00—18:00 之间紫外线指数造成的影响。结果表明, 气溶胶光学厚度的不确定性在夏季和冬季对紫外线指数造成的偏差最大分别为 0.55 和 0.36, Ångström 指数不确定性在夏季和冬季对紫外线指数造成的偏差最大分别为 0.13 和 0.11。对比世界卫生组织划分的紫外线危害等级, 不论是气溶胶光学厚度还是 Ångström 指数的不确定性, 所引起的紫外线风险等级的最大偏差为一级, 夏、冬季基本上都不会影响对民众发布的紫外线风险分级。因此, 可认为使用 MISR 气溶胶光学厚度产品以及 Ångström 指数计算紫外线指数是可靠的。

关键词 MISR; 气溶胶光学厚度; Ångström 指数; 紫外线指数; 不确定性

中图分类号 P237; TP79

Impact of the Uncertainty of the Remotely Sensed AOD and Ångström Exponent on the Calculation of Ultraviolet Index

RAO Junfeng, ZHANG Xianfeng[†], PAN Yifan

Institute of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing 100871;

[†] Corresponding author, E-mail: xfzhang@pku.edu.cn

Abstract The research is to assess the uncertainty of aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent products retrieved from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) data by means of comparing them with ground measured data in Hong Kong in the period of 2005 to 2013. Further analysis of how these uncertainties are spread into the calculation of UV Index (UVI) is conducted based on a radiative transfer model. The results indicate that the maximum values of UVI uncertainty caused by MISR/AOD uncertainty are 0.55 and 0.36 in summer and winter, respectively. The maximum of UVI uncertainty caused by Ångström exponent uncertainty are 0.13 and 0.11 in summer and winter, respectively. Compared with the UVI exposure grades put forward by the World Health Organization, the uncertainty of both AOD and Ångström exponent can cause at most one grade deviation in the worst situation. In this sense, MISR/AOD and Ångström exponent products are reliable as input in the calculation of UVI.

Key words MISR; AOD; Ångström exponent; UVI; uncertainty

紫外线辐射对人体健康有重要影响, 过多地暴露在紫外线辐射下容易造成红疹、皮肤灼伤、皮肤光老化, 甚至致癌^[1-4]。另一方面, 适度暴露在太阳光下有利于维生素 D₃ 合成^[5]。因此, 长期监测紫外

线辐射强度, 并预报紫外线指数, 提醒民众采取对应的防护措施, 合理控制出行时间是非常必要的。

由于纬度、海拔、大气状况等的差异, 不同地区的紫外线辐射差异很大^[6]。对于紫外线辐射的监

测预报,目前主要有实验测量、辐射传输方程计算、经验预测等方法。站点观测只能代表仪器置放地点很小范围的真实情况,而辐射传输方程法比经验预测要准确^[6],且较之站点观测能得到空间分布的紫外线辐射强度数据,因此被广泛采用^[7-12]。

辐射传输方程法计算较为复杂,且需输入较多参数(包括臭氧含量、大气温度气压、地表状况、气溶胶等),往往因没有充分考虑这些参数的不确定性降低了模型的估算精度^[13]。卫星遥感反演能够在区域和全球尺度获得与紫外辐射相关的参数,用以替代缺乏地面测量的地区。然而,卫星遥感反演参数的不确定性也较大,在全球不同区域研究卫星遥感反演参数的不确定性具有重要意义^[14-16]。

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是气溶胶颗粒对太阳辐射散射吸收的一种度量,对紫外线辐射起削弱作用^[17-22]。搭载在 Terra 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)和多角度成像光谱仪(Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, MISR)都能生产 AOD 产品,并且可以通过 Ångström 定理计算 Ångström 指数。虽然 MODIS 能够提供更多的与地面观测站对比的数据(每 1~2 天覆盖全球),但据 Levy 等^[16]研究,MODIS 计算得到的 Ångström 指数缺乏物理有效性,与地面站测量差异很大。

首先,统计 2005—2013 年间香港地区夏季和冬季的平均臭氧含量(Ozone)、AOD、气溶胶单次散射反照率(aerosol single scattering albedo, SSA)、地表反照率(Albedo)、大气可降水量参数(water vapor column, WVC)等辐射传输方程模拟所需基本参数。在此基础上,将 2005—2013 年 MISR/AOD 产品以及据之计算的 Ångström 指数与 AERONET 地面站数据做对比,分析卫星遥感反演产品的不确定性。然后,利用辐射传输方程模拟与评估 MISR 数据不确定性对香港地区紫外线指数计算造成的影响。最后,根据世界卫生组织(WHO)关于紫外线指数等级划分标准和对人体的伤害程度,讨论 MISR/AOD 产品以及据之计算的 Ångström 指数的不确定性对气象部门预报紫外线指数的影响。

1 数据和方法

1.1 数据和研究区域

AERONET 是由分布在全世界范围的大约 700 个精准校正的太阳光度计组成的观测网络,可以提供每 15 分钟 0.340~1.020 μm 之间 7 个通道的无云

AOD 观测^[23-25]。本研究选取香港两个 AERONET 站,分别坐落于香港理工大学(PolyU, 22.30333°N, 114.17972°E)和鹤咀(Hok, 22.20970°N, 114.25800°E)。PolyU 站代表城市气溶胶类型, Hok 站代表乡村气溶胶类型。两站获取波长 440 和 675 nm 处的 AOD 数据用做 MISR 卫星遥感反演产品的参照。

2005 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日, MISR 的 443 和 670 nm 处的 AOD 是从 GIOVANNI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>)应用获得的,产品名称为“MIL3DAE”。该版本的气溶胶数据是 Level3 全球格网数据。本研究分别以 PolyU 和 Hok 站点经纬度为中心,按照距离最临近法选择最近的可用格网点数据与地面站数据进行比较分析。

由于 AERONET 地面站测量是 440 和 675 nm 处的 AOD,为进行对比,需将 MISR 的 443 和 670 nm 处的 AOD 分别转为 440 和 675 nm 处的 AOD。利用 Ångström 定理可知:

$$\frac{\text{AOD}_{\lambda_2}}{\text{AOD}_{\lambda_1}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

其中, λ_1 代表 MISR 的 AOD 相关波长(443 和 670 nm), λ_2 代表 AERONET 的 AOD 相关波长(440 和 675 nm), α 是 Ångström 指数, α 同样通过式(1),由 AERONET 的 440 和 675 nm 处的 AOD 计算而得。

2005 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日的 Ozone 数据从 NASA Reverb (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)获得,产品名称为“OMTO3e”,也是 Level 3 全球格网数据。2005 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日 354 nm SSA 和 354 nm Albedo 以及 WVC 数据从 NASA Reverb 获得(表 1)。

1.2 方法

气溶胶对紫外线辐射具有吸收和散射作用,

表 1 研究中用到的数据产品信息
Table 1 Data sets used in the study

参数类别	产品名称	数据级别	开始时间	结束时间
AOD	MIL3DAE	Level 3	2005-01-01	2013-12-31
Ozone	OMTO3e	Level 3	2005-01-01	2013-12-31
SSA	OMAERUV	Level 2	2005-01-01	2013-12-21
Albedo	OMAERUV	Level 2	2005-01-01	2013-12-21
Water	MOD05_L2	Level 2	2005-01-01	2013-12-21
AERONET	PolyU	Level 2	2005-11-04	2013-06-18
AERONET	Hok	Level 2	2007-10-17	2010-07-19

AOD 越大, 散射和吸收作用越强。TERRA 卫星大约在地方时 10:30 左右过境香港。评价 MISR/AOD 产品的不确定性, 严格的做法是只选取地面站在卫星过境时间内的数据做平均。考虑到紫外线辐射指数等气象预报往往是日产品, 由卫星遥感反演提供的 AOD 参与辐射传输模型计算时, 代表的是全天的 AOD, 综合考虑卫星遥感反演算法的不确定性以及用过境时的 AOD 替代全天 AOD 的不一致问题, 选择 AERONET 地面站当天测量时间 06:00—18:00 的 AOD 平均值与 MISR 产品做比较。

Ångström 指数是描述 AOD 与波长之间依赖关系的指数, 一旦已知某波长上的 AOD, 又知道 Ångström 指数, 那么其他波长处的 AOD 就可以根据 Ångström 定理计算得到。在物理意义上, Ångström 指数与气溶胶的颗粒大小有关, 颗粒越小, Ångström 指数越大, 反之亦然。实际应用中, 往往通过测量两个波长上的 AOD 计算其他波长的 AOD, 因此, Ångström 指数的不确定性会影响紫外线指数的计算。与确定 MISR/AOD 的不确定性相似, MISR 的 Ångström 指数的不确定性也是通过对比 AERONET 的 Ångström 指数获得。基于同样的理由, 选择 AERONET 地面站当天测量时间在 06:00—18:00 的 Ångström 指数平均值与 MISR 的 Ångström 指数做比较。假设卫星产品数据与地面站真值的差值符合正态分布, 选择一个标准差的置信区间作为衡量不确定性的标准。结合标准差传递公式, 可以分别得到 MISR/AOD 与 Ångström 指数产品的不确定性。

本研究使用辐射传输方程计算开源软件包 Libradtran 1.7 进行模拟。为了区分这种不确定性在不同季节可能造成的影响, 选取紫外线辐射较强的夏季和冬季分别进行模拟。紫外线辐射(250~400 nm)除与气溶胶有关, 还与其他因素有关, 因此分别统计 2005—2013 年夏季(以太阳直射在香港 PolyU 站前后共 30 天计)和冬季(以太阳直射在南回归线前后共 30 天计)的平均 Ozone, SSA, Albedo, WVC 和 AOD, 作为夏、冬季辐射传输方程计算的输入数据来模拟夏、冬季的基本辐射环境。辐射传输方程计算在无云条件下进行, 采用 cdisort 辐射传输方程^[26], 计算 250~400 nm 之间每 1 nm 的光谱辐照度。人体皮肤的生理实验结果^[27-30]表明, 紫外线不同波段对皮肤灼伤能力不同, 因此为了表征不同紫外线波段范围对人体皮肤的灼伤程度, 根据国际

照明委员会(CIE)作用函数计算世界卫生组织用于公众天气预报的紫外线指数(global solar UV index, UVI)。

$$UVI = k_{er} \times \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda} \times S_{er}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中, $k_{er}=40 \text{ m}^2/\text{W}$; E_{λ} 是 Libradtran 在波长 λ 处的辐照度计算结果, 单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$; S_{er} 是作用函数, 根据 CIE 1998 标准^[31]计算:

$$\begin{cases} S_{er}(\lambda) = 1.0 & (250 \text{ nm} < \lambda \leq 298 \text{ nm}), \\ S_{er}(\lambda) = 10^{0.094 \times (298 - \lambda)} & (298 \text{ nm} < \lambda \leq 328 \text{ nm}), \\ S_{er}(\lambda) = 10^{0.015 \times (140 - \lambda)} & (328 \text{ nm} < \lambda \leq 400 \text{ nm}). \end{cases} \quad (3)$$

为了衡量 AOD 不确定性对 UVI 造成的影响, 在辐射传输模拟中, 以香港地方时 06:00—18:00 之间(720 分钟), 每 2 分钟分别以夏、冬季 AOD 平均值和不确定性导致的最大波动范围上下边界 AOD 值($AOD_{443} - \sigma(AOD_{443})$, $AOD_{443} + \sigma(AOD_{443})$)模拟计算 UVI 值($2 \times 3 \times 360$)。定义三者的最大绝对偏差 ΔUVI 和最大相对偏差 $\Delta UVIP$, 用以描述 UVI 受气溶胶不确定影响的绝对变化和相对变化, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta UVI = \max(\text{abs}(UVI(AOD_{443}) - \\ UVI(AOD_{443} - \sigma(AOD_{443}))), \\ \text{abs}(UVI(AOD_{443}) - \\ UVI(AOD_{443} + \sigma(AOD_{443}))))), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta UVIP = \Delta UVI / UVI(AOD_{443}). \quad (5)$$

基于与 AOD 同样的方法, 在香港地方时 06:00—18:00 之间(720 分钟), 每 2 分钟分别以夏、冬季 Ångström 指数的平均值以及不确定性导致的最大波动范围上下边界 Ångström 指数值($\alpha_{avg} - \sigma(\alpha)$, $\alpha_{avg} + \sigma(\alpha)$)模拟计算夏、冬季的 UVI 值($2 \times 3 \times 360$)。与式(4)和(5)相仿, 定义三者的最大绝对偏差为 ΔUVI 和最大相对偏差为 $\Delta UVIP$ 来表征 Ångström 指数不确定性对 UVI 的影响。

2 结果与分析

2.1 MISR/AOD 与 Ångström 指数的不确定性分析

2.1.1 MISR/AOD 的不确定性

图 1 是由 PolyU 和 Hok 两站数据合并后的 AOD 与地面站对比。合并算法是将两站不同时间测得的 AOD 和 MISR 对应时间在对应站点位置反演的 AOD 组成的点对集, 由原先的两个小集合合并成一个样本容量较大的集合。鉴于香港地区面积较小, PolyU 站和 Hok 站所处位置又分属城市气溶胶类型

和乡村气溶胶类型,可以假设合并以后的数据集代表整个香港地区的情况。由图 1 可知, AERONET 的 AOD 与 MISR 相关性相对较高(440 nm 处相关系数为 0.74, 675 nm 处相关系数为 0.69), 说明 MISR 反演的 AOD 在较大程度上代表了大气的真实状况。另一方面, 从图 1 也可看出二者之间存在明显误差, 并且不同光学厚度范围内卫星遥感反演精度存在差异, 因此有必要定量评价使用这些有明显偏差的卫星遥感反演数据计算得到的紫外线指数的可靠性。导致偏差的原因除 MISR 反演算法本身的不确定性外, 还与地面站 AOD 数据选取的时间范围设定有一定关系。表 2 列出 PolyU 和 Hok 站与 MISR/AOD 分别对比的相关系数、回归方程斜率及平均偏差等。440 和 675 nm AOD 的平均偏差(MBE)分别为 -0.27 和 -0.12, 说明 MISR/AOD 产品过低估计了大气 AOD。MISR/AOD 与地面站 AOD 的差值为

$$\Delta AOD = AOD_M - AOD_G, \quad (6)$$

根据标准差传递公式推导可得

$$\sigma(AOD_M)^2 = \left(\frac{\partial(AOD_M)}{\partial(\Delta AOD)} \right)^2 \times \sigma(\Delta AOD)^2 + \left(\frac{\partial(AOD_M)}{\partial(AOD_G)} \right)^2 \times \sigma(AOD_G)^2, \quad (7)$$

$$\sigma(AOD_M) = \sqrt{\sigma(\Delta AOD)^2 + \sigma(AOD_G)^2}, \quad (8)$$

其中, $\sigma(\Delta AOD)$, $\sigma(AOD_M)$ 和 $\sigma(AOD_G)$ 分别代表 ΔAOD , MISR/AOD 和地面站 AOD 的不确定性。

假定 ΔAOD 是独立随机变量, 服从正态分布^[13], 则 MISR/AOD 的不确定性 ($\sigma(AOD_M)$) 可以认为是 ΔAOD 的标准差(SD)。根据 Holben 等^[23]的研究, AERONET 在 440 和 675 nm 处的 AOD 不确定性分别为 0.02 和 0.01。因此, 式(8)可以进一步整理为

$$\sigma(AOD_{M440}) = \sqrt{0.27^2 + 0.02^2} = 0.2707, \quad (9)$$

$$\sigma(AOD_{M675}) = \sqrt{0.17^2 + 0.01^2} = 0.1703. \quad (10)$$

据研究, MISR/AOD 产品反演的不确定性在 440 与 443 nm, 675 与 670 nm 处几乎是一样的^[13], 因此通过式(9)和(10)可以获得 MISR 443 和 670 nm 处 AOD 产品的不确定性。

2.1.2 MISR Ångström 指数的不确定性

通过采用与计算 MISR/AOD 不确定性类似的方法, 可以得到 MISR 反演的 Ångström 指数的不确定性。对比结果显示, MISR 的 Ångström 指数与 AERONET 的指数之间相关性不好(r 为 0.10)。Román 等^[13]在伊比利亚半岛的研究也证实了 MISR Ångström 指数与地面站相关性差的结论($r=0.35$)。从表 3 可见 MBE 都是负值, 说明 MISR 反演的 Ångström 指数低估了实际的 Ångström 指数。

定义 $\Delta\alpha$ 为 MISR Ångström 指数与 AERONET 指数的差值, 同样假定 $\Delta\alpha$ 是独立随机变量且服从正态分布, $\Delta\alpha$ 的不确定性 ($\sigma(\Delta\alpha)$) 可以认为是 $\Delta\alpha$ 的标准差(SD), 表 3 分别列出 PolyU 和 Hok 地面站以及两站合并后的 $\Delta\alpha$ 标准差, 类似于式(8), 可以得到 MISR Ångström 指数不确定性为

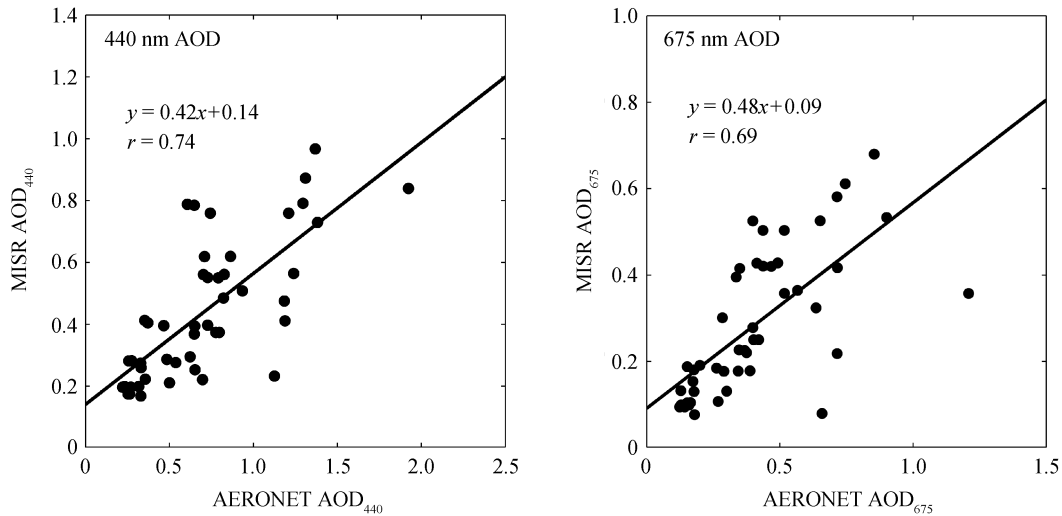


图 1 香港地区 AERONET AOD 与 MISR/AOD 的线性回归关系

Fig. 1 Regression relationship between AERONET AOD and MISR/AOD in Hong Kong

表 2 卫星遥感反演的 AOD 与地面站的对比统计
Table 2 Statistical characteristics of remotely sensed AOD and ground measured AOD

站点	波长/nm	斜率	r	MBE	MABE	SD
Polyu	440	0.41	0.74	-0.30	0.32	0.28
	675	0.45	0.69	-0.14	0.15	0.18
Hok	440	0.71	0.84	-0.13	0.13	0.14
	675	1.05	0.88	-0.02	0.07	0.09
两站合并	440	0.42	0.74	-0.27	0.29	0.27
	675	0.48	0.69	-0.12	0.14	0.17

表 3 卫星遥感反演的 Ångström 指数与地面站的对比
Table 3 Statistical characteristics of remotely sensed Ångström exponent and ground measured Ångström exponent

站点	斜率	r	MBE	MABE	SD
Polyu	0.12	0.05	-0.18	0.49	0.58
Hok	1.16	0.43	-0.27	0.45	0.43
两站合并	0.27	0.10	-0.19	0.49	0.55

$$\sigma(\alpha_M) = \sqrt{\sigma(\Delta\alpha)^2 + \sigma(\alpha_G)^2}, \quad (11)$$

其中,

$$\alpha_G = \ln\left(\frac{\text{AOD}_{440}}{\text{AOD}_{675}}\right) / \ln\left(\frac{675}{440}\right). \quad (12)$$

根据标准差传递公式可得

$$\sigma(\alpha_G)^2 = \frac{\partial(\alpha_G)^2}{\partial(\text{AOD}_{440})} \times \sigma(\text{AOD}_{440})^2 + \frac{\partial(\alpha_G)^2}{\partial(\text{AOD}_{675})} \times \sigma(\text{AOD}_{675})^2. \quad (13)$$

$$\sigma(\alpha_G) = \frac{1}{\ln\left(\frac{675}{440}\right)} \times \sqrt{\sigma(\text{AOD}_{440})^2 / \text{AOD}_{440}^2 + \sigma(\text{AOD}_{675})^2 / \text{AOD}_{675}^2}. \quad (14)$$

根据式(1):

$$\text{AOD}_{440} = \text{AOD}_{443} \times \left(\frac{440}{443}\right)^{-\alpha}, \quad (15)$$

$$\text{AOD}_{675} = \text{AOD}_{443} \times \left(\frac{675}{443}\right)^{-\alpha}. \quad (16)$$

将式(15)和(16)代入式(13)得

$$\sigma(\alpha_G) = \frac{1}{\ln\left(\frac{675}{440}\right)} \times \sqrt{\left(\frac{440}{443}\right)^{2\alpha} \times \sigma(\text{AOD}_{440})^2 + \left(\frac{675}{443}\right)^{2\alpha} \times \sigma(\text{AOD}_{675})^2} / \text{AOD}_{443}^2. \quad (17)$$

由式(9)和(10)已知 $\sigma(\text{AOD}_{440})$ 和 $\sigma(\text{AOD}_{675})$, 将式(17)代入式(11)得到 MISR Ångström 指数的不确定性:

$$\sigma(\alpha_M) = \sqrt{\frac{\left(\frac{440}{443}\right)^{2\alpha} \times 0.02^2 + \left(\frac{675}{443}\right)^{2\alpha} \times 0.01^2}{\text{AOD}_{443}^2 \times \left(\ln\left(\frac{675}{440}\right)\right)^2} + 0.55^2}. \quad (18)$$

由式(18)可知, MISR 的 Ångström 的不确定性由 443 nm 处的 AOD 和 Ångström 指数确定。通过对式(18)分别求 α 和 AOD_{443} 的一次偏导数 $\frac{\partial(\sigma(\alpha_M))}{\partial(\alpha)}$ 和 $\frac{\partial(\sigma(\alpha_M))}{\partial(\text{AOD}_{443})}$, 可以发现在 $\alpha > 0$, $\text{AOD}_{443} > 0$ 的条件下, 前者恒大于 0, 后者恒小于 0, 说明 Ångström 指数越大, AOD_{443} 值越小, 则 MISR Ångström 指数的不确定性越大。当取 $\alpha = 1.2$, $\text{AOD}_{443} = 0.3$ 时, MISR Ångström 的不确定指数为 0.59。该结果与 Levy 等^[16]得到的 MISR Ångström 指数不确定性(0.4)相近, 但是偏大, 原因在于本研究用以对比卫星数据的 PolyU 和 Hok 站点的时间范围较宽(06:00—18:00), 同时也与地区差异有关。

2.2 MISR/AOD 和 Ångström 指数不确定性对紫外线指数的影响分析

2.2.1 气溶胶光学厚度

由图 2 可知, 受 MISR 443 nm 处 AOD 的不确定性影响, 夏季紫外线指数的变动范围在 4.5%~7.0%之间, 地方时 12:00 受 AOD 不确定性的影响最小, 在地方时约 07:00 和 17:00 的影响最大。冬季紫外线指数的波动范围在 5.1%~7.4% 之间, 地方时 12:00 的相对偏差为 6.1%, 在地方时 08:30 和 15:30 的影响最大。由于 UVI 较小时, 紫外线辐射对于皮肤伤害较小, 所以一般关注 UVI 较大情况下 UVI 受气溶胶等因素影响的变化规律。图 2 中 UVI 大于 2.5 的部分, 按照世界卫生组织的紫外线指数等级划分不再是“Low”的安全级别。在这种情

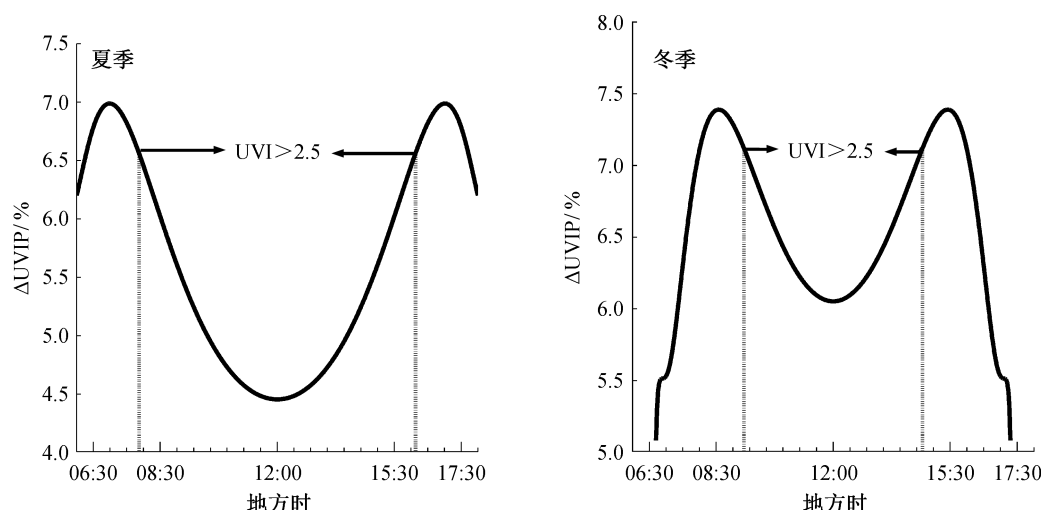

 图 2 MISR AOD443 不确定性引起的紫外线指数的夏、冬季相对变化($\Delta UVIP$)

 Fig. 2 $\Delta UVIP$ caused by MISR AOD443 uncertainty

况下,不论是夏季和冬季,紫外线指数相对变化都在地方时 12:00 的影响最小,并且向两边递增。与夏季相比,冬季受气溶胶影响紫外线指数相对变化更大。

2005—2013 年夏季 443 nm AOD 平均值为 0.21,由式(9)可知 AOD 不确定性为 0.2707,变化下界小于 0,所以在图 3 中,由变化下界引起的紫外线指数波动没有列出。由图 3 可知,随着气溶胶厚度增大,气溶胶的削弱作用增强,紫外线辐射减弱,紫外线指数降低。紫外线指数受 MISR 443 nm 的不确定性影响,最大绝对变化值 (0.55) 发生在正午,这与相对变化在地方时 12:00 变化最小正好相反。由于紫外线指数是通过四舍五入取整得到,所以最大差值 0.55 最多能导致紫外线指数 ± 1 的变化。按照世界卫生组织关于紫外线等级的分级 (1~2: 低; 3~5: 中; 6~7: 高; 8~10: 很高; >11: 极高),AOD 不确定性有可能造成波动前后的紫外线风险相差一个等级。

冬季紫外线辐射较弱,由图 4 可知,正午紫外线指数大约在 6~7 之间。由于气溶胶散射可以减弱紫外线辐射,因此 MISR/AOD 变化上界的紫外线指数较低,变化下界的紫外线指数较高。与夏季相比,冬季受 AOD 的影响变化也较小,最大变化 (0.36) 发生在正午,四舍五入之后最多造成紫外线指数 ± 1 的变化,紫外线风险最多相差一级。

综合夏季和冬季情况, MISR/AOD 的不确定性引起的紫外线指数波动在 ± 1 之内,因此由 MISR 反

演的 AOD 作为参数计算紫外线指数基本上可靠。

2.2.2 Ångström 指数

由图 5 可知,UVI 受 Ångström 指数不确定性影响较之气溶胶对紫外线的影响小 (1.1%~2.0% 之间),夏季波动范围在 1.1%~1.6% 之间,地方时 12:00 的百分比波动最小,地方时 07:15 和 16:45 影响最大。UVI 冬季波动范围在 1.6%~2.0% 之间,在地方时 09:00 和 15:00 影响最大。这个结论与 Román 等^[13]在伊比利亚半岛的实验结论(太阳高度角在 0~90° 变化时,紫外线直射与散射辐射之和的变动范围在 0.5%~2.0% 之间)相近,差别在于本文研究的是紫外线指数,而不是紫外波长的辐照度以及加权。基于与 2.2.1 节中气溶胶同样的原因,当只考虑 UVI 大于 2.5 时,不论夏、冬季,Ångström 指数对 UVI 百分比变化的影响都在正午时最小,同时向两边递增。从季节上看,冬季受 Ångström 指数不确定性的影响比夏季大。

就绝对变化而言,夏、冬季紫外线指数的绝对变化都在地方时 12:00 最大,分别为 0.13 与 0.11。相对于夏季(最大偏差 0.55),冬季受气溶胶影响小(最大偏差 0.36)。Ångström 指数的不确定性造成的 UVI 不确定性小,最多造成紫外线指数 ± 1 的变化。在世界卫生组织的紫外线指数风险分级标准下, MISR Ångström 指数的不确定性对紫外线风险等级的计算影响很小。尤其是冬季,紫外线辐射在正午时候大约在 6~7 之间,紫外线对人体的灼伤作用有限,小范围的波动不会有显著的影响。

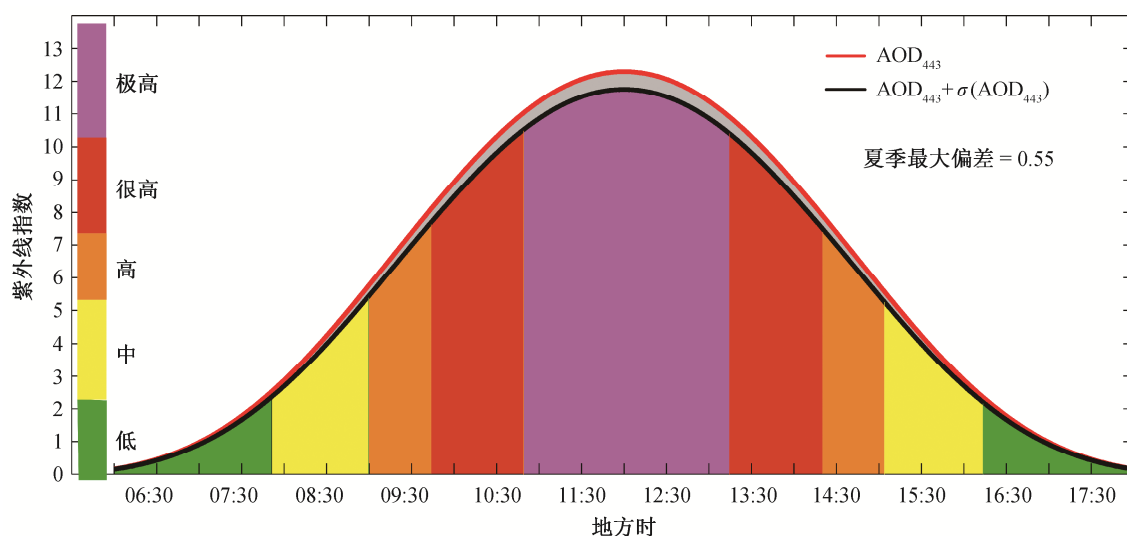


图 3 MISR 443 nm 气溶胶光学厚度不确定性引起的夏季紫外线指数变化
Fig. 3 UVI uncertainty caused by MISR AOD₄₄₃ uncertainty in summer

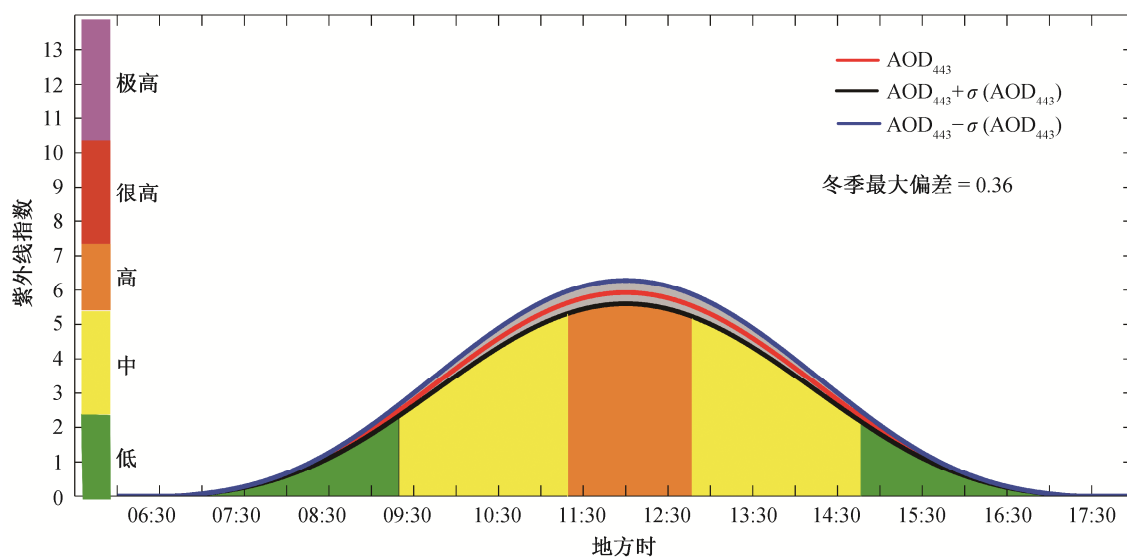


图 4 MISR 443 nm 气溶胶光学厚度不确定性引起的冬季紫外线指数变化
Fig. 4 UVI uncertainty caused by MISR AOD₄₄₃ uncertainty in winter

3 结论

本文通过对比 2005—2013 年间 MISR 气溶胶产品和 AERONET 地面站数据, 分别计算了 MISR 443 和 670 nm 处气溶胶光学厚度以及 Ångström 指数的不确定性。同时利用辐射传输方程, 评估了气溶胶光学厚度和 Ångström 指数不确定性造成的地表紫外线辐射指数的不确定性, 以及不同季节影响

程度的差异。研究结果表明, 紫外线指数受气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的不确定性影响具有一致的规律, 即当只考虑紫外线指数大于 2.5 时, 不论夏、冬季, 气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的不确定性导致的紫外线指数的相对变化都在正午时刻达到最小。无论夏、冬季, 气溶胶光学厚度和 Ångström 指数不确定性导致的紫外线指数的绝对变化都在正午时刻达到最大。夏季与冬季相比, 无

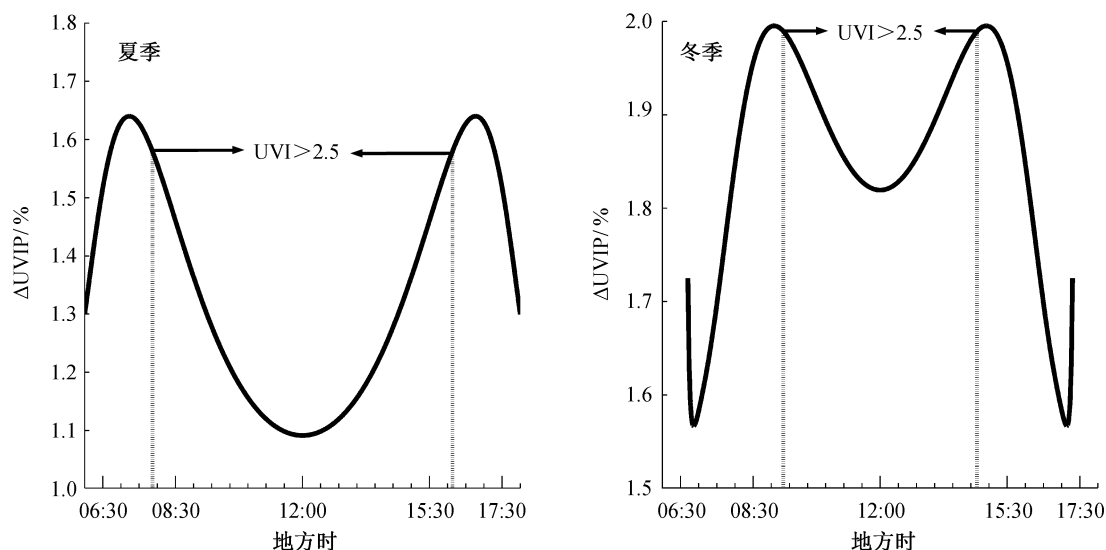

 图 5 MISR Ångström 指数不确定性引起的紫外线指数的夏、冬季相对变化(ΔUVIP)

 Fig. 5 ΔUVIP caused by MISR Ångström exponent uncertainty

论是气溶胶光学厚度还是 Ångström 指数, 对紫外线指数百分比的影响都是冬季高于夏季, 对紫外线指数绝对值的影响都是夏季高于冬季。气溶胶光学厚度与 Ångström 指数相比, 不论夏季还是冬季, 都是气溶胶光学厚度不确定性对紫外线指数的影响更大, 说明紫外线指数对气溶胶光学厚度不确定性更敏感。

由于气溶胶光学厚度和 Ångström 指数造成的紫外线指数误差在 ± 1 范围内, 所以 MISR 气溶胶光学厚度和 Ångström 指数产品用于辐射传输方程法预测紫外线指数基本上是可靠的。不论是气溶胶光学厚度还是 Ångström 指数的不确定性, 在夏季和冬季基本上都不会影响到对民众发布的紫外线分级, 最差情况下会导致紫外线风险等级有一级的偏差。

不同气溶胶光学厚度范围内, 卫星遥感反演结果的精度存在差异。下一步工作中有必要将气溶胶光学厚度划分为若干区间, 分别计算 MISR 反演结果在不同气溶胶光学厚度区间上的不确定性, 以期弄清当气溶胶光学厚度介于哪些区间时, 使用 MISR 反演的气溶胶光学厚度用以计算紫外线指数更可靠。

致谢 感谢 Janet Elizabeth Nichol 博士提供 AERONET 数据以及他为建立和维护香港 PolyU 和 Hok Tsui 两个观测站做出的努力和贡献。同时感谢 MISR 和 MODIS 科学团队提供卫星数据。

参考文献

- [1] Sklar L R, Almutawa F, Lim H W, et al. Effects of ultraviolet radiation, visible light, and infrared radiation on erythema and pigmentation: a review. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2013, 12(1): 54–64
- [2] Norval M, Lucas R M, Cullen A P, et al. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, 10(2): 199–225
- [3] Lucas R M, McMichael A J, Armstrong B K, et al. Estimating the global disease burden due to ultraviolet radiation exposure. *International Journal of Epidemiology*, 2008, 37(3): 654–667
- [4] Juzeniene A, Brekke P, Dahlback A, et al. Solar radiation and human health. *Reports on Progress in Physics*, 2011, 74(6): 066701
- [5] Holick M F. Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, and osteoporosis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 79(3): 362–371
- [6] Moreno J C, Serrano M A, Lorente M, et al. An empirical model of erythema ultraviolet radiation in the city of Valencia, Spain. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2013, 12(9): 1707–1716
- [7] Den Outer P N, Slaper H, Tax R B. UV radiation in the Netherlands: assessing long-term variability and trends in relation to ozone and clouds. *Journal of*

- Geophysical Research, 2005, 110(D2): 169–190
- [8] Lindfors A, Kaurola J, Arola A, et al. A method for reconstruction of past UV radiation based on radiative transfer modeling: applied to four stations in northern Europe. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (D23): 209–232
- [9] Walker D. Cloud effects on erythemal UV radiation in a complex topography [D]. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, 2009
- [10] Bilbao J, Román R, de Miguel A, et al. Long-term solar erythemal UV irradiance data reconstruction in Spain using a semiempirical method. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D22): 898–908
- [11] Antón M, Serrano A, Cancillo M L, et al. Experimental and forecasted values of the ultraviolet index in southwestern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D5): 1007–1012
- [12] Tourpali K, Bais A F, Kazantzidis A, et al. Clear sky UV simulations for the 21st century based on ozone and temperature projections from Chemistry-Climate Models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(4): 1165–1172
- [13] Román R, Bilbao J, de Miguel A. Uncertainty and variability in satellite-based water vapor column, aerosol optical depth and Ångström exponent, and its effect on radiative transfer simulations in the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 556–569
- [14] Kahn R A, Garay M J, Nelson D L, et al. Satellite-derived aerosol optical depth over dark water from MISR and MODIS: comparisons with AERONET and implications for climatological studies. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D18): 1148–1154
- [15] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Optical properties of boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D11): 1840–1846
- [16] Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, et al. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(21): 10399–10420
- [17] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation: II. *Geografiska Annaler*, 1930, 12: 130–159
- [18] Van de Hulst H C. Scattering in a planetary atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 1948, 107(2): 220–246
- [19] IPCC. IPCC fourth assessment reports (AR4), working group I report: climate change 2007, the physical science basis. Geneva: WMO/UNEP Report, 2007
- [20] 郑有飞, 石广玉. 太阳紫外线辐射预测计算模型研究. *太阳能学报*, 2001, 22(4): 461–465
- [21] 张庆阳, 张沅, 胡英. 国外紫外线指数预报概况. *气象*, 2000, 26(11): 56–57
- [22] 邓英姿, 董蕙青. 紫外线指数及其预报技术介绍. *广西气象*, 2000, 21(3): 38–40
- [23] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1–16
- [24] Holben B N, Tanre D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 12067–12097
- [25] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(3): 337–349
- [26] Buras R, Dowling T, Emde C. New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(12): 2028–2034
- [27] McKinlay A F, Diffey B L. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE J*, 1987, 6(1): 17–22
- [28] WHO. International commission on non-ionizing radiation protection. Global solar UV index: a practical guide. 2002
- [29] Freeman R G. Data on the action spectrum for ultraviolet carcinogenesis. *Journal of the National Cancer Institute*, 1975, 55(5): 1119–1122
- [30] Kligman L H, Sayre R M. An action spectrum for ultraviolet induced elastosis in hairless mice: quantification of elastosis by image analysis. *Photochemistry and Photobiology*, 1991, 53(2): 237–242
- [31] CIE Standard. Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. CIE S 007/E-1998. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 1998