



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150081

北京地区夏季气溶胶光学厚度反演

郑小慎¹, 邓霖¹, 高飞²

(1. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457;
2. 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044)

摘要: 基于 6S 模型对比分析了 3 种大气气溶胶模式在北京地区夏季气溶胶光学厚度反演中的适用性. 首先下载 Terra-MODIS L1B 夏季空间分辨率为 1 km 的数据, 基于城市型、大陆型、海洋型 3 种标准大气气溶胶模式生成了 3 套查找表, 利用暗像元法, 反演得到了北京地区夏季大气气溶胶光学厚度. 然后利用 AERONET 提供的实测陆地气溶胶光学厚度对反演结果进行精度验证. 结果表明: 海洋型和大陆型气溶胶模式反演的气溶胶光学厚度与地基数据相关性较高, 相关系数分别为 0.806 6 和 0.766 4; 而城市型气溶胶模式反演的气溶胶光学厚度与地基数据存在明显差异, 相关系数仅为 0.482 5; 将晴天和雾霾天气反演结果与地基数据进行对比, 可以看出在天气晴朗时北京地区采用海洋型气溶胶模式反演气溶胶光学厚度更为准确.

关键词: 气溶胶光学厚度; MODIS; 6S 模型; 北京夏季

中图分类号: X823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2016)02-0051-06

Retrieval of Aerosol Optical Depth over the Urban Area of Beijing in Summer

ZHENG Xiaoshen¹, DENG Lin¹, GAO Fei²

(1. Tianjin Key Laboratory of Marine Resource and Chemistry, College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The applicability of three kinds of atmospheric aerosol models to Beijing aerosol optical depth (i. e., AOD) inversion in summer was studied and compared based on 6S model. Firstly, the Terra-MODIS L1B data in summer were downloaded, whose spatial resolution was 1 km, and then three look-up tables (LUT) were created based on continental, marine and urban standardization aerosol models and the AOD values of Beijing in summer was retrieved using dense dark vegetation algorithm. After that, the accuracy of the retrieved results was verified against the real land AOD data from AERONET. The results showed that the AOD inversion results of marine model and continental aerosol model have the high relativity with AERONET data, and the correlation coefficient is 0.806 6 and 0.766 4, respectively. There were obvious differences between the AOD inversion results of urban model and AERONET data; the correlation coefficient was only 0.482 5. The retrieved AOD results during clear days and haze/fog days were compared with AERONET data, which showed that it was more accurate to retrieve the AOD using the marine model on clear summer days over the urban area of Beijing.

Key words: aerosol optical depth; MODIS; 6S; summer in Beijing

近 20 年来, 随着人类工业化的加剧, 大气气溶胶的光学性质、物理性质、化学性质等已经成为研究热点^[1-2]. 大气气溶胶是指悬浮在大气中直径在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 的固体和液体颗粒, 它对环境的影响主

要体现在降低能见度、引发雾霾天气等方面. 大气气溶胶还影响着全球的气候, 其影响可分为直接效应与间接效应. 直接效应是指气溶胶通过对太阳辐射和红外辐射的吸收和散射, 影响了地球-大气系统的辐

收稿日期: 2015-06-23; 修回日期: 2015-11-12

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(14JCYBJC22500)

作者简介: 郑小慎(1973—), 女, 河北献县人, 教授, zxs@tust.edu.cn.

射收支平衡;间接效应是指气溶胶通过改变云的微物理特性及光学特性和降水效率,间接地影响地表的温度. 卫星气溶胶光学厚度(AOD)表征了大气在垂直方向上总的消光系数,精确地测量大气气溶胶光学厚度,可以有效地校正遥感影像,提高定量分析的可行性,也可以作为污染物监控的重要指标. 美国国家宇航局(NASA)提供了 10 km 分辨率的全球 AOD 数据产品,但由于 NASA 提供的数据产品分辨率低、数据经常缺失且没有考虑到气溶胶在特殊地带分布的差异,仅采用固定的反演参数,导致产品在局部地区的反演结果较差,利用的局限性较大. 为此很多学者利用 NASA 提供的 Terra-MODIS L1B 1 km 的数据,利用暗像元法反演得到了 1 km 分辨率的气溶胶光学厚度^[3-4]. 但大多数学者仅以大陆型气溶胶模式生成大气顶表观反射率的查找表,没有考虑到季节及沿海地区气溶胶分布变化,可信度低^[5-7]. 本文基于 6S 模型,设定气溶胶光学厚度值为 0.01 ~ 2.00,步长为 0.01,生成了大陆型、海洋型、城市型 3 套大气顶表观反射率查找表. 利用 Terra-MODIS L1B 1 km 数据,根据暗像元法,通过 IDL 程序调用查找表反演获得了 3 套夏季北京地区 1 km 的气溶胶光学厚度. 并分别与 AERONET 网提供的 CE-318 所测得的陆地气溶胶光学厚度进行验证分析,讨论了 3 种查找表在夏季北京地区的适用性.

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

北京地区地处华北平原西北边缘,西北为黄土高坡,东临渤海. 其气候特点为四季分明,春季干旱,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干燥. 风向有明显的季节变化,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风. 因此,北京地区气溶胶春、秋、冬三季受西北陆地沙尘影响较大,而夏季则受局部地区降雨及渤海的影响较大. 选取北京地区受海陆影响较为典型的地区作为研究对象,可以较好地反映渤海周边城市的情况.

1.2 MODIS 数据

NASA 于 1999 年 12 月发射的 Terra 卫星所携带的 MODIS 传感器数据可以提供从可见光、近红外到红外共 36 个通道的探测资料,光谱范围分布在 0.42 ~ 14.24 μm,扫描宽度为 2 330 km,可提供有关陆地、水汽、气溶胶、云、臭氧、海色、浮游植物等有关信息,为气候变化、大气探测以及人类活动对区域

和全球环境影响的研究工作提供极大帮助. MODIS 为用户提供 10 km 分辨率的气溶胶光学厚度产品,但是数据的精度不高且数据缺失严重,不能连续、准确地分析 AOD 的时空变化. MODIS 产品采用的气溶胶模式较为单一,不适用于局部地区气溶胶光学厚度的反演,特别是对于受海陆气候双重影响的北京地区. 故本文采用 NASA 提供的 Terra 的一级数据 MODIS L1B. 该数据经过了辐射校正,且分辨率为 1 km. 选取 2014 年 7 月、8 月共 33 d 无云的数据进行反演.

1.3 AERONET 实测气溶胶光学厚度

AERONET(Aerosol Robotic Network)是由 NASA 和 LOA-PHOTONS(CNRS)联合建立的地基气溶胶遥感观测网. 该网络提供了全球范围内陆地与海洋 600 多个地基站点的气溶胶数据,其 AOD 的观测误差在 0.01 ~ 0.02. 可以将其作为真实值进行卫星遥感数据的验证^[8-9]. 本文选取北京地区 Beijing、Beijing_CAMS、XiangHe 3 个 AERONET 站的 L2.0 级观测数据进行反演结果的精度验证. 站点信息列于表 1.

表 1 北京 AERONET 站点信息

Tab. 1 Information from AERONET station in Beijing

站点名	经纬度	海拔高度/m	样本个数
XiangHe	116.962°E, 39.754°N	36	27
Beijing	116.381°E, 39.977°N	92	16
Beijing_CAMS	116.317°E, 39.933°N	106	27

由于 AERONET 提供的数据里面没有 550 nm 的 AOD,故根据 Eck 等^[10]发现的 AOD 的自然对数与波长的自然对数存在的二次项拟合关系(式(1)),利用 AERONET 提供的其中 4 个波段,通过 Matlab 插值获得 550 nm 的 AOD 数据.

$$\ln \tau_a(\lambda) = a + b \ln(\tau) + c(\ln \lambda)^2 \quad (1)$$

式中: $\tau_a(\lambda)$ 为所求波段的 AOD 值; τ 为波段值; a 、 b 、 c 为待求参数.

2 反演原理

卫星遥感反演大气气溶胶是基于卫星探测到的大气上界表观反射率 ρ^* 所计算的,可表达为

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu_s E_s} \quad (2)$$

式中: L 为卫星探测到的辐亮度, W/m^3 ; E_s 为大气上界的辐射通量, W ; $\mu_s = \cos \theta_s$, θ_s 为太阳天顶角.

ρ^* 与地表双向反射率 ρ_t 的关系可表示为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{\rho_i}{1 - \rho_i S} T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (3)$$

式中: θ_v 为传感器天顶角; φ_s 为太阳方位角; φ_v 为传感器方位角; $\varphi_s - \varphi_v$ 为相对方位角; ρ_a 为路径程辐射, J ; S 为大气后向散射比; $T(\theta_s)$ 为总的大气透射率; $T(\theta_v)$ 为地表反射率为零时归一化后总的向下辐射通量, 等价于总的向下透过率。

在单次散射近似中, 程辐射与气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 、气溶胶散射相函数 $P_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)$ 和单次散射反射率 ω_0 成比例。

$$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = \rho_m(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{\omega_0 \tau_a P_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)}{4\mu_v \mu_s} \quad (4)$$

式中: $\rho_m(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)$ 代表分子散射造成的程辐射; μ_v 为传感器天顶角的余弦值。

将式(4)代入式(3)中, 可得

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = \rho_m(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{\omega_0 \tau_a P_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)}{4\mu_v \mu_s} + \frac{\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) T(\theta_s, \omega_0, \tau_a, P_a) T(\theta_v, \omega_0, \tau_a, P_a)}{1 - S(\omega_0, \tau_a, P_a) \rho^*} \quad (5)$$

由式(5)可以知道卫星探测的表现反射率既是地表反射率 $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)$, 又是气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 的函数。表现反射率、太阳和传感器的几何参数可以由卫星数据获得。若已知地表的反射率, 单次散射反射率 ω_0 及气溶胶散射相函数 $P_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)$ 参数有关的气溶胶模型, 则可以反演获气溶胶光学厚度。

3 反演步骤

根据 Kaufman 等^[11]发现的在植被密集处地表具有较低反射率, 且近红外通道反射率和红蓝通道反射率具有较好的线性相关的结论, 选用 MODIS 数据的蓝波段 (0.47 μm)、红波段 (0.65 μm) 和近红外波段 (2.13 ~ 3.8 μm), 结合暗像元法、6S 大气传输模型, 利用 IDL、ENVI5.0、Matlab2014a、ArcGIS10.0 等工具, 最终反演获得北京地区夏季 550 nm 气溶胶光学厚度。

步骤一: 据 DN 值转换得到亮温和反射率。

步骤二: 对图像进行几何校正。

步骤三: 去云处理。本文采用的云检测算法为多光谱综合去云法^[12]。该算法从可见光反射率、红外波段亮温值以及亮温差等方面综合考虑, 逐步建立一个云检测掩膜。选取 MODIS 的 B1、B6、B8、B26、B29、B31 波段, 通过判断这 6 个波段及波段的组合, 进行云的检测与判断, 生成云掩膜去除图像中的云。

步骤四: 生成大气顶表现反射率查找表。通过建立查找表可以确定大气参数, 结合暗像元法获得的地表反射率, 可以得到理论上大气上界的表现反射率, 若与卫星上传感器实际收到的表现反射率相同或相近时, 则此时的对应大气参数下的气溶胶光学厚度值即为实际气溶胶光学厚度。所以查找表中大气模式和气溶胶类型的确定, 对反演结果的影响非常大。

根据国际气象与大气物理学会关于标准大气辐射中气溶胶类型的定义, 对流层是由水溶性、沙尘性、海洋性、煤烟性 4 种基本气溶胶组分组成, 同时根据 4 种组分体积分数的不同, 定义了大陆型、城市型及海洋型 3 种气溶胶类型。其各个组分的体积分数见表 2^[13]。

表 2 大陆型、海洋型、城市型 3 种气溶胶模型 4 种粒子的体积分数

Tab. 2 Volume percentages of the four basic aerosol particles with continental, marine and urban aerosol model

类型	体积分数			
	沙尘性粒子	水溶性粒子	海洋性粒子	煤烟性粒子
海洋型	0.00	0.05	0.95	0.00
大陆型	0.70	0.29	0.00	0.01
城市型	0.17	0.61	0.00	0.22

许多学者在研究北京地区气溶胶光学厚度时, 假设气溶胶模型为大陆型, 这种处理主要考虑到西北的沙尘对北京的影响, 但忽略了夏季北京盛行东南风。故, 渤海的海洋性粒子对北京的影响并不可忽略。因此, 本文分别生成了大陆型、海洋型、城市型 3 套查找表。根据刘灿^[14]所进行的表现反射率、气溶胶光学厚度对太阳天顶角、卫星天顶角、相对方位角的敏感性试验可知, 当太阳天顶角、卫星天顶角小于 60°时, 卫星表现反射率与气溶胶光学厚度值可近似看成线性相关, 而气溶胶光学厚度对相对方位角不敏感, 可适当增加相对方位角的步长。具体的输入参数: 气溶胶光学厚度为 0.01 ~ 2.0, 步长为 0.01; 太阳天顶角为 0°、7°、12°、18°、30°、45°、60°; 卫星天顶角为 0°、7°、12°、18°、30°、45°、60°; 相对方位角为 0° ~ 180°, 步长为 24°; 大气模式为中纬度夏季; 气溶胶模型为 iaer = 1、2、3, 分别代表大陆型、海洋型、城市型。

步骤五: 获取暗像元掩膜及气溶胶光学厚度反演结果.

近红外通道反射率和红蓝通道反射率具有较好的线性相关, 且短波红外对气溶胶的影响相对于可见光可忽略不计^[14], 由此可以从短波红外波段的表现反射率获得红光和蓝光波段的地表反射率.

$$\rho_{0.47}^s = \rho_{2.12}^* / 4 \quad \rho_{0.66}^s = \rho_{2.12}^* / 2 \quad (6)$$

通过式(6)可获得红、蓝波段的地表反射率, 若假定一种大气气溶胶模型, 就可以通过卫星传感器观测到的表现反射率反演获得气溶胶光学厚度. 反演过程为, 先从遥感图像中读取角度数据和科学数据, 然后用浓密植被法(暗像元法)判断暗像元, 得到暗像元区域掩膜文件, 进行掩膜, 并根据得到的暗像元, 裁剪科学数据和角度数据. 最后, 根据暗像元区域的表现反射率与地表真实反射率相等原理, 求得红蓝波段的地表真实反射率. 取出同一行列号对应的地表表现反射率和真实反射率, 循环查找大气顶表现反射率查找表, 将卫星接收到的表现反射率同查找表中的参数进行对比, 若与查找表中的参数相同, 则对应查找表中的气溶胶光学厚度即为反演所得值.

4 结果验证与分析

通过 IDL 程序, 反演得到 2014 年 7 月、8 月北京地区 33 d 的气溶胶光学厚度. 选取 Terra-MODIS 过境时刻(国际标准时间 02:05—03:50 即北京时间 10:05—11:50)由 AERONET 数据通过式(1)换算所得 550 nm AOD 值进行验证. 由于 AERONET 的实测时刻与 MODIS 卫星过境时刻存在一定的时差, 所以要对数据进行时空匹配^[9]. 卫星观测数据选取以 AERONET 站点为中心, 5 × 5 格点的数据进行平均, 地面站点的数据选取最为接近卫星过境时刻的数据作为验证的数据. 将 AERONET 站点 33 d 的 AOD 数据进行平均, 与 MODIS 反演的 33 d AOD 数据平均值进行对比, 结果见表 3.

表 3 AERONET 平均值与反演平均值对比
Tab. 3 Average values of AERONET and MODIS

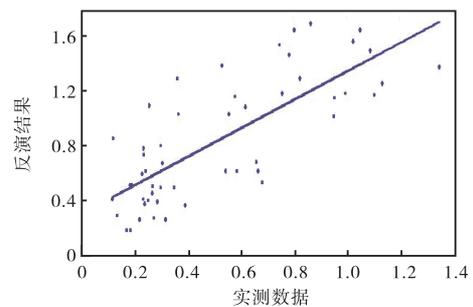
站点	气溶胶光学厚度			相对误差/%			
	AERONET	海洋型	大陆型	城市型	海洋型	大陆型	城市型
XiangHe	0.57	0.67	0.75	1.45	17.54	31.58	154.39
Beijing	0.43	0.71	0.90	1.74	65.12	109.30	304.65
Beijing_CAMS	0.53	0.79	0.94	1.63	43.40	77.36	207.55
均值	0.51	0.72	0.86	1.61	42.02	72.70	222.20

由表 3 可知: 海洋型与大陆型的反演结果的相对误差较小, 其值更接近于真值, 而城市型的反演结果与两者相差较大, 偏离真值的程度非常大. 并且可以发现, 海洋型、大陆型、城市型其反演的气溶胶光学厚度值及反演结果与真值的相对误差依次增大, 这是因为海洋型气溶胶模式中海洋性粒子占 95%, 而海洋性粒子半径很大, 散射能力主要集中在前向, 故卫星接收的后向散射量小, 反演的值也低. 而城市型气溶胶模式中, 以细粒的水溶性和煤烟粒子为主, 其后向散射强, 故城市型的反演值存在明显的高估. 在大陆型气溶胶模型中沙尘性粒子占 70%, 而水溶性等粒子占有 30%, 所以其反演值介于海洋型和城市型之间. 另外, 对比 3 个站点的相对误差可以发现, 香河站的反演结果的相对误差小于 Beijing、Beijing_CAMS 两站点, 这是因为香河站位于市郊, 植被较为浓密, 而北京站位于北京市区内北三环路和北四环路之间, 植被覆盖率低于香河, 地表反射率大, 一定程度上不符合暗像元的条件, 所以反演所得的气溶胶光学厚度值存在高估.

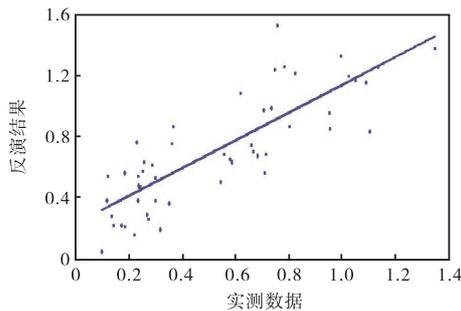
将海洋型、大陆型、城市型 3 种气溶胶模型反演的结果与 AERONET 的 3 个站点共 60 个数据进行一元线性拟合, 并计算其均方根误差, 其结果见表 4. 大陆型、海洋型气溶胶模式与 AERONET 拟合曲线如图 1 所示, 海洋型 AOD 分布图如图 2 所示.

表 4 AERONET 实测数据与反演结果一元线性拟合结果
Tab. 4 Fitting curves of AERONET and MODIS

站点	海洋型		大陆型		城市型	
	相关系数	均方根误差	相关系数	均方根误差	相关系数	均方根误差
XiangHe	0.812 3	0.266 1	0.849 8	0.286 0	0.735 1	0.928 7
Beijing	0.895 6	0.287 1	0.847 2	0.548 4	0.477 5	1.333 0
Beijing_CAMS	0.822 4	0.316 3	0.769 9	0.484 9	0.384 9	1.205 1
全部站点	0.806 6	0.289 7	0.766 4	0.435 4	0.482 5	1.135 5



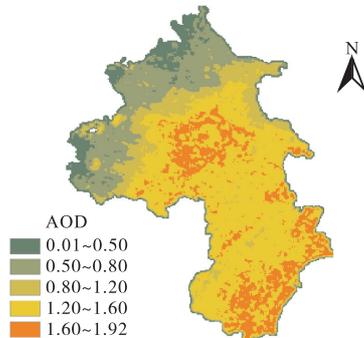
(a) 大陆型



(b) 海洋型

图1 大陆型、海洋型 AOD 反演结果与 AERONET 数据线性拟合

Fig. 1 Fitting curves of the retrieval data of AOD based on continental and marine LUT and AERONET

图2 2014年7月27日 11:50 550 nm 海洋型 AOD 分布图
Fig. 2 Distribution of AOD based on ocean LUT in 550 nm at 11:50 am on July 27, 2014

海洋型气溶胶模式下反演的气溶胶光学厚度与 AERONET 网提供的地基数据相关性系数最高达到 0.806 6, 均方根误差最小达到 0.289 7, 其拟合曲线的表达式为 $\tau_{\text{MODIS}} = 0.9045\tau_{\text{AERONET}} + 0.2401$, 这一结果与文献[15]的研究结果相近. Levy 等^[16]认为在 550 nm 处, MODIS AERONET 的回归方程近似于 $\tau_{\text{MODIS}} = 0.9\tau_{\text{AERONET}} + 0.1$. 结果说明, 夏季北京地区海洋型气溶胶模型所反演的结果较大陆型、城市型的好. 这一结果与马葵等^[13]、金健等^[17]的结果相符. 这是因为夏季北京地区受局部地区风的影响, 盛行的东南风有利于东南部的渤海所带来的海洋性粒子扩散, 其影响不可忽略. 另外, 夏季北京地区多雨水, 相对湿度大, 其水溶性粒子体积分数增多, 沙尘粒子体积分数少, 故大陆型气溶胶模型的反演结果受到影响, 反演值存在高估. 但这种影响并不是长期的, 而是受短暂天气现象所影响. 马葵等^[13]利用实测的气溶胶光学厚度分析了北京地区气溶胶模型对大气校正的影响, 提出了北京地区在污染的天气应用大陆型反演, 而晴朗的天气下用海洋型气溶胶模型更好. 根据

中国空气质量在线监测平台提供的天气数据, 分别提取出 2014 年 7 月和 8 月北京雾霾天与晴天 AERONET 所测的气溶胶光学厚度, 并分别与 MODIS 反演所得气溶胶进行一元线性拟合, 结果与马葵等^[13]的结果一致(见表 5).

表5 晴天和雾霾天海洋型、大陆型相关性对比

Tab. 5 Relativity of marine model and continental model on clear days and fog/haze days

类型	相关系数	均方根误差	标准差
晴天大陆型	0.833 5	0.354 7	0.261 3
晴天海洋型	0.907 4	0.254 2	0.180 5
雾霾天大陆型	0.678 3	0.438 6	0.296 3
雾霾天海洋型	0.565 6	0.440 3	0.345 1

5 结 语

从验证分析结果来看, 北京地区夏季气溶胶光学厚度反演选择海洋型气溶胶模型更为准确. 若研究夏季某天的情况则可根据当天当地的天气状况合理地选择海洋型或大陆型气溶胶模型进行反演. 对于北京地区利用 6S 模型生成查找表的气溶胶光学厚度的反演, 若只考虑使用大陆型气溶胶模型, 必定会造成一定的误差. 本文采用业务化的暗像元法对北京地区进行气溶胶光学厚度的反演, 该方法简单实用、其精度也能满足一般遥感应用的需求, 其反演结果对于渤海周边城市的气溶胶光学厚度的反演具有一定的普遍性, 对渤海周边城市范围气溶胶光学厚度的反演意义重大.

参考文献:

- [1] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望[J]. 热带气象学报, 2003, 19(增刊): 145-151.
- [2] 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(5): 625-634.
- [3] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(S1): 177-186.
- [4] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003(S1): 108-117.
- [5] 范辰乾. 基于 MODIS 数据的气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 浓度关系研究: 以济南市为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.
- [6] 滕维远. 北京及其周边地区 MERSI 与 MODIS 数据

- 气溶胶光学厚度反演研究[D]. 北京:首都师范大学, 2013.
- [7] 何涛. 中国区域 MODIS 陆地气溶胶 V5.2 算法的有效性评估及算法的改进研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2010.
- [8] 王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 基于 AERONET 观测资料对 MODIS 气溶胶产品的验证[C]//第 31 届中国气象学会年会论文集, 北京:中国气象学会, 2014.
- [9] 王宏斌, 张镭, 刘瑞金, 等. 中国地区两种 MODIS 气溶胶产品的比较分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 772-783.
- [10] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D24): 31333-31349.
- [11] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L, et al. The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [12] 何全军, 曹静, 黄江, 等. 基于多光谱综合的 MODIS 数据云检测研究[J]. 国土资源遥感, 2006(3): 19-22.
- [13] 马葵, 李正强, 李浩, 等. 卫星影像大气校正中气溶胶模型的影响分析:以天津地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 410-418.
- [14] 刘灿. 基于 MODIS 数据的气溶胶光学厚度反演研究:以重庆主城区为例[D]. 重庆:重庆师范大学, 2014.
- [15] 肖钟湧, 江洪, 陈健, 等. 利用 MODIS 遥感数据反演广州市气溶胶光学厚度[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 577-584.
- [16] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D13): 211-1-211-21.
- [17] 金健, 卢远, 李嘉力, 等. 北部湾 MODIS 气溶胶光学厚度的反演[J]. 地理空间信息, 2015, 13(1): 8-11.

责任编辑:周建军

(上接第 35 页)

- [12] Bakırel T, Bakırel U, Keleş O Ü, et al. In vivo assessment of antidiabetic and antioxidant activities of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in alloxan-diabetic rabbits[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2008, 116(1): 64-73.
- [13] 王虹, 刘红梅. 迷迭香提取物对亚急性衰老模型小鼠的抗衰老作用[J]. 中药药理与临床, 2008, 24(3): 52-54.
- [14] Sotelo-Felix J I, Martinez-Fong D, Muriel P, et al. Evaluation of the effectiveness of *Rosmarinus officinalis* (*Lamiaceae*) in the alleviation of carbon tetrachloride-induced acute hepatotoxicity in the rat[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2002, 81(2): 145-154.
- [15] Botsoglou N, Taitzoglou I, Zervos I, et al. Potential of long-term dietary administration of rosemary in improving the antioxidant status of rat tissues following carbon tetrachloride intoxication[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(3): 944-950.
- [16] Lin Y J, Seroude L, Benzer S. Extended life-span and stress resistance in the *Drosophila* mutant methuselah[J]. Science, 1998, 282(5390): 943-946.
- [17] Kang M I, Kobayashi A, Wakabayashi N, et al. Scaffolding of Keap1 to the actin cytoskeleton controls the function of Nrf2 as key regulator of cytoprotective phase 2 genes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(7): 2046-2051.
- [18] Satoh T, Kosaka K, Itoh K, et al. Carnosic acid, a catechol-type electrophilic compound, protects neurons both in vitro and in vivo through activation of the Keap1/Nrf2 pathway via S-alkylation of targeted cysteines on Keap1 [J]. Journal of Neurochemistry, 2008, 104(4): 1116-1131.
- [19] Satoh T, Izumi M, Inukai Y, et al. Carnosic acid protects neuronal HT22 Cells through activation of the antioxidant-responsive element in free carboxylic acid- and catechol hydroxyl moieties-dependent manners[J]. Neuroscience Letters, 2008, 434(3): 260-265.

责任编辑:郎婧