

基于卫星偏振遥感的细粒子气溶胶光学厚度反演

高迦南¹, 李丽萍^{1*}, 崔廷伟², 陈晨¹

¹中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

²国家海洋局第一研究所, 山东 青岛 266061

摘要 利用 PARASOL 卫星搭载的多角度偏振地球反射率探测仪-3(POLDER-3)的偏振数据,反演了香河地区细粒子气溶胶光学厚度。反演数据与 POLDER、MODIS 业务化产品及 AERONET 数据进行对比分析,POLDER 的细粒子气溶胶光学厚度反演效果显著优于 MODIS 产品,相关系数由 0.67 升至 0.93,平均误差由 0.32 降至 0.15。将 POLDER 偏振数据与神经网络方法相结合,相关系数升至 0.94,平均误差降为 0.11。将该神经网络(NN)训练模型应用于杭州和香港地区进行验证,在杭州地区反演精度相似,在香港地区适用性较差。研究表明,利用 POLDER 偏振数据结合神经网络方法来提取细粒子气溶胶信息是可行的。

关键词 大气光学; 细粒子气溶胶; 偏振遥感; 神经网络; POLDER

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030101

Retrieval of Fine Mode Aerosol Optical Depth Based on Satellite Polarization Remote Sensing

Gao Jianan¹, Li Liping^{1*}, Cui Tingwei², Chen Chen¹

¹College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

²The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract Fine mode aerosol optical depth in Xianghe was calculated, using data from the onboard multi-angle polarization sensor POLDER-3 in the PARASOL satellite. The retrieval results were compared with the operational products of POLDER, MODIS, and AERONET data. The results show that the accuracy of POLDER using polarization remote sensing is significantly better than that of unpolarized MODIS. The correlation coefficient is increased from 0.67 to 0.93, and the average error is reduced from 0.32 to 0.15. As combined with the neural network (NN) method, the method gave correlation coefficient of 0.94 and standard deviation of only 0.11. Then, NN was applied to Hangzhou and Hong Kong, respectively. The verification results show that it has similar accuracy in Hangzhou but poor applicability in Hong Kong. The research shows it is feasible to use the NN to extract fine mode aerosol information from polarized signals.

Key words atmospheric optics; fine mode aerosol; polarization remote sensing; neural network; POLDER

OCIS codes 010.1110; 010.1120

1 引言

大气气溶胶的辐射特性是目前全球大气科学研究的热点。由于气溶胶成分复杂,性质各异,时空变化性很大^[1],因此利用卫星遥感技术对全球气溶胶的相关数据开展观测研究,同时结合模型进行预测,是研究大气气溶胶辐射特性的有效手段。地面观测

是卫星遥感观测的有效补充。为加强大气气溶胶的研究,多国联合建立了全球气溶胶自动观测网(AERONET),这提供了可靠的长时间序列地面观测数据。

气溶胶对太阳辐射的作用与粒子的尺度谱分布有关,根据陆地站点观测数据,常见的气溶胶粒子尺度谱模型可认为是双峰对数-正态分布^[2]。常用的

收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2019-07-18; 录用日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(61675187,40805005)

* E-mail: lipingli@ouc.edu.cn

细粒子比(FMF)定义为细粒子光学厚度与总光学厚度的比值^[3]。随着我国工业化进程的推进,越来越多的气态污染物进入大气,影响细粒子气溶胶的分布^[4-5]。细粒子气溶胶光学厚度和 FMF 作为体现人为污染影响的参数^[6],其研究越来越受重视。

目前卫星遥感中总气溶胶光学厚度反演算法的研究较为成熟^[7-8],但与细粒子有关的反演研究较少。文献^[9]利用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)设定-0.1~1.1共13组粗细粒子比例反演 FMF,但受地面反射率精度影响,同时受限于粗细粒子比例的离散假设,算法精度较低,全球尺度下相关系数(R)仅为0.325。

相对于大气颗粒物,陆地反射率是低偏振的,卫星遥感偏振信号主要来自大气中细粒子气溶胶的散射^[10-11],利用偏振信号可有效地气解耦去除地面反射影响。在此基础上,法国研制了多角度偏振地球反射率探测仪(POLDER)系列传感器,并基于长期观测的细粒子气溶胶模型和6SV辐射传输模型,构建查找表反演细粒子光学厚度^[4]。

近年来,除了常规反演方法,文献^[12-13]引入神经网络(NN)方法代替经验和半经验分析算法,反演叶绿素浓度、叶绿素垂直分布或初级生产力等。但现有神经网络与卫星遥感数据相结合时,均立足于非偏振的光学遥感,将偏振光学遥感与神经网络结合的研究报道较少。本文尝试将神经网络方法和搭载 POLDER-3 传感器的 PARASOL 偏振数据相结合,反演截断半径与 AERONET 一致的细粒子气溶胶光学厚度值。

2 实验数据与流程

2.1 研究区域和数据处理

首先,分析中国 AERONET 站点的 FMF 数据,鉴于方差越大,说明当地气溶胶的变化越大,研究意义也越大,因此优先选择均值和方差较大的代表性站点。根据日均 FMF 分布特征,选择香河站点作为研究区域(均值方差:0.770±0.186)。香河站点位于北京东南方向约 50 km 处(116.96°E, 39.75°N),当地气候、季节特性和气溶胶类型与北京基本一致,常作为北京地区气溶胶的对比站点。对香河地区多年气溶胶 FMF 月平均数据进行分析,结果显示 FMF 存在明显的季节变化规律,其中 3 月至 6 月细粒子气溶胶较少,其他月份较多。为了减小季节变化对反演精度的影响,综合考虑后选择秋冬季数据(10 月至次年 2 月)进行反演。

PARASOL 卫星以多角度和偏振探测为特色,可探测的 3 种偏振光波长为 490,670,865 nm。按照惯例,将选用光学厚度均换算至 500 nm。根据卫星过境时间(前后 15 min),计算得到该时间窗口内 AERONET 观测数据的均值,以香河站点为中心选择 25 km 范围内的卫星像素数据(5~7 个有效数据点),以减少时空不同步误差。最后根据法国国家航天中心(CNES)的云标识^[14]去除云污染数据,求出有效数据点在 3 个偏振波段的 Stokes 参数均值和相对标准偏差,并剔除相对偏差大于 60% 的数据。

2.2 网络训练与分析

卫星数据与物理信息之间往往是非线性关系,利用神经网络方法可以较好地拟合非线性函数。但非线性程度太高,会增加训练难度并使拟合效果变差,通过数据预处理可降低输入输出的非线性程度,有效提升网络反演效果^[15]。考虑到研究数据是无量纲物理量且范围基本一致,而数据归一化与反归一化过程会产生微小误差,根据前期实验情况,预处理主要分为两部分。首先将 Stokes 参数的两垂直分量辐射定标后换算为总偏振表观反射率,所用公式为

$$R_{\lambda} = \sqrt{Q_{\lambda}^2 + U_{\lambda}^2}, \quad (1)$$

式中: Q_{λ} 、 U_{λ} 分别为 λ 波长的 2 个偏振 Stokes 分量反射率; R_{λ} 为 λ 波长总偏振表观反射率。然后,将观测几何角由 4 个弧度构造出 1 组表征光线在大气与卫星间传输过程的变量,公式为

$$\begin{cases} s_{oz} = \frac{1}{\sin Z_{\text{solar}}} \\ s_{ez} = \frac{1}{\sin Z_{\text{sensor}}} \\ s_{oa} = \sin \left| \frac{A_{\text{solar}} - A_{\text{sensor}}}{2} \right| \end{cases}, \quad (2)$$

式中: Z_{solar} 、 Z_{sensor} 分别为太阳和传感器的天顶角; A_{solar} 、 A_{sensor} 分别为太阳和传感器的方位角; s_{oz} 和 s_{ez} 分别为在不考虑多次散射情况下光线向下传输和向上传输的最大路程; s_{oa} 为卫星与太阳的相对方位角关系。至此完成神经网络训练模型输入变量的设计。

筛选 2005 年 10 月至 2006 年 2 月的 L1 数据,共获得 70 天 1013 组数据。随机选取 75% 作为训练集,25% 作为测试集。将预处理得到的 3 个偏振变量和 3 个辐射传输变量作为训练输入,地面实测值作为训练输出。利用 MATLAB 神经网络工具箱

综合考虑网络速度和准确性后,设定层数为5层,节点数量采取先递增后递减的结构,选择 trainlm 和 sigmoid 分别作为训练函数和激活函数,满足误差梯度不下降的次数或最大迭代次数时,训练终止。实验发现最佳的误差不下降次数与输入输出的非线性

关系有关,实验的最佳调整次数为30次。训练过程调用 GPU (GTX 1050Ti) 进行计算,所需时间为10 s左右,测试集相关系数 R 大于 0.9 视为训练成功。训练成功后,相应的数据点回归分布与相关系数如图 1 所示。

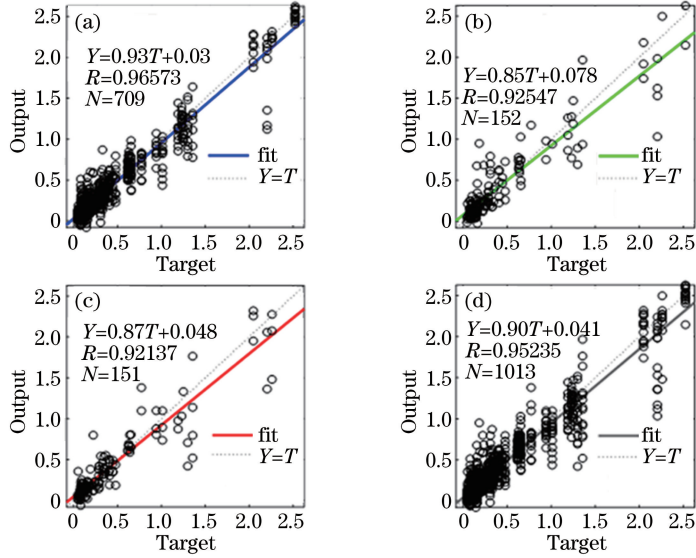


图 1 数据点回归分布。(a)训练集;(b)验证集;(c)测试集;(d)所有数据集

Fig. 1 Regression distribution of data points. (a) Training set; (b) verification set; (c) test set; (d) all data sets

由于 PARASOL 采用多角度成像模式,假设每个像素点即同一地点,有同一时刻的多次观测数据。将同一时刻的输出值求平均作为最终反演结果,所有数据的对比由图 1(d)作相应的换算,换算结果如图 2 所示,其中 E_{RMS} 均为方根误差。

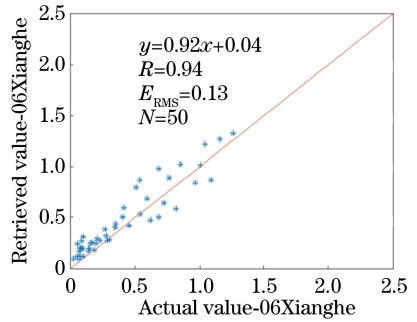


图 3 2006 年 10 月至 2007 年 2 月反演对比

Fig. 3 Retrieval comparison from October 2006 to February 2007

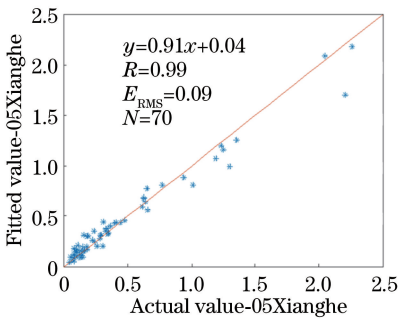


图 2 2005 年数据拟合情况

Fig. 2 Fitting of data in 2005

图 2 中横纵坐标分别代表真实的光学厚度和对应的拟合光学厚度。经过对比可知该网络没有出现欠拟合或过拟合的情况,训练成功的网络可用于下一年的预测和反演。

2.3 数据反演与对比分析

利用上述网络对 2006 年 10 月至 2007 年 2 月细粒子气溶胶光学厚度进行反演,数据处理方法同

上,与实测值的对比如图 3 所示。

图 3 中横纵坐标分别代表真实的光学厚度和对应的反演光学厚度。由图 3 可以看出反演效果总体上很好,但光学厚度在 0.5~1.0 范围内各点分布较为松散。可能的原因有:0.5~1.0 范围内的 2005 年数据共有 6 组(图 2),训练用到的数据只会更少,这使网络在该范围内训练不足^[16]。另外,在真实光学厚度小于 0.5 的情况下,反演值几乎全部系统性偏大,出现这种精细结构的偶然性很小。

图 4 为 PARASOL 和 MODIS 相同时间窗口内的香河地区反演产品对比。偏振遥感的优势就在于

对细粒子气溶胶的反演, PARASOL 产品总体上有明显的线性趋势, 如图 4(a) 所示。MODIS 所发布的细粒子反演算法最先着手于北美地区的大气环

境, 属于实验产品^[17], 已有研究表明该产品在南亚的印度地区适应性不好^[18], 对比发现在香河地区反演效果也不理想, 如图 4(b) 所示。

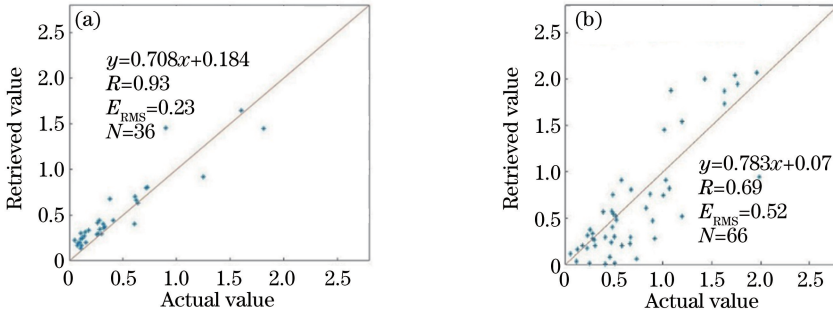


图 4 PARASOL 与 MODIS 细粒子气溶胶光学厚度反演结果。(a) PARASOL 反演; (b) MODIS 反演

Fig. 4 Retrieval of fine aerosol optical depth by PARASOL and MODIS. (a) PARASOL retrieval; (b) MODIS retrieval

POLDER 官方产品在这里出现了相同的问题: 光学厚度小于 0.5 的情况下, 反演值系统性偏大。这与本文的反演情况一致, 分析可能的原因: 该时段内地面站点的测量仪器使用或者记录不规范使数据系统性偏小; 卫星因微小漂移, 传感器的系统性偏差如定标系数等未被校正; 该地区大气环境发生变化, 气溶胶综合性质的差异导致反演偏差。研究表明^[19], 气象条件会影响空气污染的聚集与扩散, 气压、最高气温、湿度与空气污染的正相关系数可达 0.6, 分析中国地面气候资料日值数据, 发现 2005—2006 年各气象要素基本一致, 气象差异可忽略。查找 2006 年 8 月至 2007 年 2 月香河周边新闻、资讯, 发现如下信息: 9 月 1 日由北京大学牵头启动了“区域污染大型综合观测项目”; 9 月 14 日廊坊市环保局宣布市内 21 家污染排放不达标的企业被关闭; 12 月 26 日华北五省市奥运空气质量小组公布了《北京 2008 奥运会空气质量保证方案》。政府的干预迅速地改变了该地区的污染状况, 人为气溶胶的下降使当地气溶胶综合性质与成分占比发生变化。考虑到真实环境中细粒子与粗粒子并不是非此即彼, 也并非只有细粒子会使光线发生偏振, 而细粒子成分的减少会使“卫星收到的偏振信息几乎全部来自于细粒子气溶胶”这一先验假设的误差增大, 进而使反演结果出现系统性偏移, 因此有理由认为第三种解释的可能性最大。

表 1 为 3 种方法相关系数 (R)、均方根误差 (E_{RMS})、平均误差 (Error) 和拟合直线的综合比较。MODIS 在香河地区适用性最差, PARASOL 官方算法明显优于 MODIS, 但略低于本文神经网络反演法。

表 1 各算法反演效果评价

Table 1 Evaluation of the algorithm's retrieval effect

Method	R	E_{RMS}	Error	Linear fitting	N
MODIS	0.67	0.521	0.32	$y = 0.783x + 0.053$	66
POLDER	0.93	0.230	0.15	$y = 0.708x + 0.185$	36
NN	0.94	0.130	0.11	$y = 0.924x + 0.092$	50

2.4 反演方法在其他区域的印证

在环境、气候及地表反射率变化较小的条件下, 同一地点 L1 数据的变化几乎只与大气环境有关, 上述内容正是基于这样的可行性分析作出了尝试。考虑到卫星接收的偏振信号来自地面的占比很小, 将香河地区训练的网络用来反演其他地区细粒子气溶胶厚度在理论上具有可行性。实验选择 2008 年 10 月至 2009 年 2 月的杭州 (120.16°E , 30.29°N) 与香港 (114.18°E , 22.30°N) 站点进行反演算法的推广研究, 数据处理方法同 2.3 节, 两个站点分别匹配成功 16 组和 30 组有效数据。两地区的反演结果如图 5 所示。

杭州地区反演结果相关系数为 0.93, 均方根误差为 0.11, 说明这种方法受地面差异的影响较小, 可在较大空间范围内推广。香港地区反演结果相关系数仅为 0.03。反演差异的原因可能是: 香港与香河空间距离过远, 气候类型不同, 香港属于亚热带季风气候, 而杭州与香河同属于温带大陆性气候; 香港受海洋影响较大, 而香河与杭州受海洋影响小; 秋冬季节, 香港与香河、杭州温差较大; 香港以贸易、金融业为主, 附近工业布局与香河、杭州周边差异较大。以上原因使 3 个地区的气溶胶类型差异明显, 导致以香河地区数据为基础建立的神经网络训练模型在香港的适用性变差。在香港地区, 可以重新训练新的神经网络, 实现该类区域的反演。

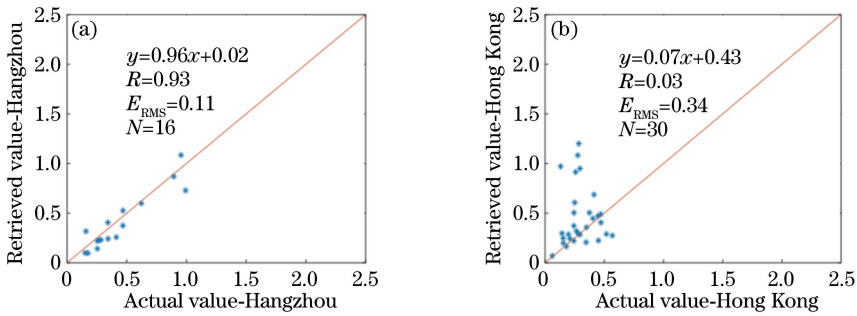


图5 其他地区反演结果对比。(a)杭州地区;(b)香港地区

Fig. 5 Comparison of retrieval results in other regions. (a) Hangzhou region; (b) Hong Kong region

3 结 论

相对于非偏振遥感,偏振遥感在提取细粒子气溶胶信息方面有着独特优势。研究表明,采用神经网络结合 PARASOL 偏振数据,可以更快速度、更高精度反演细粒子气溶胶光学厚度,且在环境、气候、气溶胶模型相似的区域,网络具有较好的可迁移性。

另外,讨论了2006年香河数据的系统性偏差原因,但有待其他研究的佐证。将气溶胶简单分为粗细两种粒子,并无视粗粒子的起偏性,能否满足偏振遥感的发展也值得思考。关于网络通用地区的划分和反演季节的推广也有待下一步的细化。

最后,POLDER系列传感器分辨率较低,刈幅较窄且已退役,我国近期发射的GF-5卫星也具备多角度偏振遥感的能力,且具有更高分辨率,在未来或许能得到更好的效果与结论。

致谢 本文所用POLDER数据和产品来自法国利尔科技大学,MODIS数据和产品来自NASA,地面实测数据来自AERONET的香河、杭州、香港站点,气象数据来自国家气象信息中心,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Qin W B, Li X B, Lu X Y, et al. Aerosol vertical distribution characteristics in northwest China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0301001.
秦武斌, 李学彬, 鲁先洋, 等. 我国西北地区气溶胶垂直分布特征分析 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0301001.
- [2] Levoni C, Cervino M, Guzzi R, et al. Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 8031-8041.

- [3] Kaufman Y J, Boucher O, Tanré D, et al. Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): 317-330.
- [4] Zhang Y. Retrieval of aerosol optical parameters based on multi-angle intensity and polarization satellite data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
张洋. 基于多角度标量和偏振卫星数据的气溶胶光学参数反演研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [5] Zhang H, Tao Z M, Ma X M, et al. Fitting of hygroscopic factor between PM_{2.5} mass concentration and aerosol backscattering coefficient in Hefei area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704006.
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区PM_{2.5}质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0704006.
- [6] Anderson T L. Testing the MODIS satellite retrieval of aerosol fine-mode fraction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D18): 18204-18219.
- [7] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16815-16830.
- [8] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [9] Levy R C, Remer L A, Dubovik O. Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D13): 13210-

- 13224.
- [10] Jiang Z, Chen L F, Wang Z T. Study on the retrieval of fine mode aerosol optical depth and size distribution using polarized signal[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(4): 460-464.
蒋哲, 陈良富, 王中挺. 细粒子气溶胶光学厚度和谱分布偏振的反演[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(4): 460-464.
- [11] Wang J J, Liu X Y, Zhang Y T, et al. Transmission characteristics of polarized light in aerosol[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080103.
汪杰君, 刘小燕, 张玉婷, 等. 偏振光在气溶胶中的传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080103.
- [12] Gross L, Thiria S, Frouin R, et al. Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C2): 3483-3495.
- [13] Scardi M, Harding L W, Jr. Developing an empirical model of phytoplankton primary production: a neural network case study[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 120(2/3): 213-223.
- [14] Buriez J C, Vanbauce C, Parol F, et al. Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2785-2813.
- [15] Zheng Y P, Wang X N, Hou D X, et al. Effect of data preprocessing on fitting ferrite thermal conductivity by BP neural network [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2019, 30(1): 19-24.
郑燕鹏, 王晓娜, 侯德鑫, 等. 数据预处理对 BP 神经网络拟合铁氧体导热系数的影响[J]. *中国计量大学学报*, 2019, 30(1): 19-24.
- [16] di Noia A, Hasekamp O P, Wu L H, et al. Combined neural network/Phillips - Tikhonov approach to aerosol retrievals over land from the NASA Research Scanning Polarimeter [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(11): 4235-4252.
- [17] Lee J, Kim J, Song C H, et al. Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(26): 3110-3117.
- [18] Sai Suman M N, Gadhavi H, Ravi Kiran V, et al. Role of coarse and fine mode aerosols in MODIS AOD retrieval: a case study over southern India [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(4): 907-917.
- [19] Yang Y Q, Wang J Z, Hou Q, et al. Study on Beijing air quality PLAM index forecasting method during the 2008 Olympics[C] // 2014 China Society of Environmental Sciences Academic Annual Meeting. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 40-47.
杨元琴, 王继志, 侯青, 等. 2008 奥运期间北京空气质量 PLAM 指数预报方法研究[C] // 2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 40-47.