

Applicability Analysis of Himawari-8 Satellite New Generation AOT Products at Chengdu Site

Zili Zhao

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: zhaozilicuit@outlook.com

Received: Oct. 25th, 2019; accepted: Nov. 7th, 2019; published: Nov. 14th, 2019

Abstract

A minimum albedo aerosol retrieval method (MAARM) is used to perform the inversion of Himawari-8 satellite aerosol data. The inversion results were compared with the official V3.0 data of Himawari-8 and the Chengdu site data of Sun/Sky-radiometer Observation Network (SONET) at the same time to verify the applicability of the satellite data in Chengdu site. The results are as follows: 1) AOT data obtained by MAARM inversion method have a good relationship with SONET AOT data; 2) The use of different empirical Asian aerosol models will affect the accuracy of AOT inversion; 3) AOT obtained by MAARM inversion method is more applicable to Chengdu area compared with official version 3 AOT data of Himawari-8.

Keywords

Himawari-8, AOT, SONET, Chengdu, Suitability Analysis

Himawari-8卫星新一代AOT产品在成都站点的适用性分析

赵梓利

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: zhaozilicuit@outlook.com

收稿日期: 2019年10月25日; 录用日期: 2019年11月7日; 发布日期: 2019年11月14日

摘要

本文基于一种最小反照率气溶胶反演方法(MAARM)对Himawari-8卫星气溶胶数据进行反演, 分别将反演结果与Himawari-8的官方V3.0数据以及同一时刻的太阳辐射计观测网(SONET)的成都站点数据进行对比, 验证卫星数据在成都站点的适用性。结果显示: 1) 通过MAARM方法反演得到的AOT与SONET的AOT数据可得到较好的相关性; 2) 不同亚洲气溶胶经验模型的使用会影响AOT反演的精度; 3) MAARM反演得到的AOT与Himawari-8的AOT相比更适用于成都地区。

关键词

Himawari-8, 气溶胶光学厚度, SONET, 成都, 适用性分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气溶胶是指由分散并悬浮在气体介质中的固体或液体小质点形成的胶体分散体系, 在气候变化、云的物理结构、降水、季风环流和人体健康等方面有着重要的影响[1]。因人类的活动会向大气中排放气溶胶, 人为气溶胶导致了太阳辐射吸收和散射的增强, 可直接影响或改变地气系统的辐射平衡。同时人为气溶胶作为云凝结核或冰核, 可以改变云的微物理特性和停留时间、地表反射率等方面, 间接影响气候的辐射强迫[2]。不同浓度的污染气溶胶可通过微物理过程, 影响大气的热力过程和动力过程, 大气动力过程的变化反过来影响降水粒子的增长, 从而影响地面降水[3]。季风环流为由气溶胶引起的持续性强雾-霾天气过程的生成和发展提供适宜的大气环流背景场[4], 在人体平均呼吸高度处, 雾-霾天与晴天不同粒径气溶胶中微生物浓度与种群结构存在明显差异, 其中粒径分布和微生物种群结构是雾-霾天气气溶胶与人体健康密切相关的典型特征[5]。

Jethva [6]等指出气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, 简称 AOT)是有关辐射强度和特征的基础气溶胶参数。AOT 为在垂直方向上介质消光系数的积分, 随波长变化, 是描述气溶胶对光的衰减作用的[7], 为无量纲量。小粒径气溶胶对大气产生的消光占主导作用, 且 AOT 的大部分来源于底层大气[8]。大粒子的 AOT 值越大, 表明其浑浊度较高, 相应的能见度也就越低[9]。

目前已有卫星反演 AOT 的方法都是区分地表类型以及气溶胶组成的不同, 用不同的原理进行反演 AOT。根据反演方法原理的不同, 可归纳为暗像元法、深蓝算法、地气耦合算法、多角度遥感法、改进暗像元法、云顶气溶胶光学厚度、结构函数法、双星协同法、偏性特性遥感等 9 种算法[10], 这些算法大部分都可用于城市地区, 其中暗像元法适用于低反射率的地区, 而且需要地表反射率的先验知识[11]; 深蓝算法使用红蓝波段进行反演, 要求地表反射率的精度较高, 且受气溶胶垂直分布及相函数的影响较大; 双星协同法可应用于高反射率地区在内的各种地表类型, 不用先假定气溶胶类型等参数, 无须估算地表反照率, 但卫星数据较大, 不便于运算。

随着社会的不断发展和城市化进程的加速, 社会对气溶胶污染的关注度逐步加大。暗像元法中使用的气溶胶模型为污染程度较轻的模型, 已然不适用于有雾霾天气时的 AOT 反演[12]。建立气溶胶模型所

需要的数据应从地面观测站中获取，但地面观测站数量有限且发展较为缓慢，不能满足较大范围的覆盖。

Yan, Li, Taixin [13] [14] [15]等人提出了一种名为最小反照率气溶胶反演方法(the Minimum Albedo Aerosol Retrieval Method, 简称 MAARM)的算法。该方法利用 Himawari-8 的卫星数据作为唯一数据来源和修正后的辐射传递方程，提高了反演 AOT 的计算效率。这种改进的算法依赖于 Himawari-8 的高时间分辨率，有可能实现在高时间分辨率下监测气溶胶的变化。

2. 资料和方法

2.1. 资料

SONET 观测网络主要采用的是新一代 CIMEL 太阳 - 天空偏振辐射计(CE318-DP)类型仪器，该辐射计主要用于测量不同波段、不同方向、不同时间的太阳和天空在紫外光、可见光和近红外的辐射亮度，可用于推算大气气溶胶、水汽、臭氧等多种成分的特性。该仪器具有观测精度高，技术成熟，易携带安装，全自动观测及数据易于传输的优点，广泛应用于大气环境监测、卫星产品校正等领域的研究。它设有 10 个光谱通道，分别为 340 nm、380 nm、440 nm、500 nm、675 nm、870 nm、936 nm、1020 nm、1020 nm 和 1640 nm，其中 936 nm 观测通道位于水汽吸收范围。

日本的新一代地球静止气象卫星葵花 8 (Himawari-8)于 2014 年 10 月 7 日发射，2015 年 7 月 7 日正式投入使用，采用三轴稳定的方式，定位于东经 140 度，其观测范围为东亚和西太平洋地区。Himawari-8 配有先进的葵花成像仪(Advanced Himawari Imager, 简称 AHI)，具有 16 个观测通道，可提供 500 m 高空间分辨率以及 10 min 高时间分辨率的观测数据。

2.2. 方法

Yan 等(2018)人提出的 MAARM 算法(图 1)利用 Himawari-8 的卫星数据作为唯一数据来源和修正后的辐射传递方程，简化了反演 AOT 的计算过程，根据太阳光谱辐射传输算法对卫星数据进行第二次模拟时的假设，本文认为地表反射类型为朗博反射，即地表接收的辐射与发散的辐射是相同的，可认为地表不吸收任何辐射。

根据太阳光谱辐射传输算法对卫星数据进行第二次模拟时的假设，本文认为地表反射类型为朗博反射，即地表接收的辐射与发散的辐射是相同的，可认为地表不吸收任何辐射。卫星测得的反射率 ρ^* 可以估计为：

$$\begin{aligned}\rho^* &= \text{albedo}/\mu_0 \\ &= \rho^a + \frac{T_{(\theta_0)}T_{(\theta)}}{1 - \rho_S S_{(\lambda)}} \rho_S\end{aligned}\quad (1)$$

其中 ρ^a 为大气反射率， ρ_S 为地表反射率， $S_{(\lambda)}$ 是大气后向散射率。

大气反射率 ρ^a 可以表示为气溶胶反射率 ρ_{Aer} 和瑞利反射率 ρ_{Ray} 之和：

$$\rho^a = \rho_{Aer} + \rho_{Ray}\quad (2)$$

其中分子的瑞利反射率 $\rho_{Ray}(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$ 近似为：

$$\rho_{Ray}(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = \frac{\omega_R \tau_R P_R(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)}{4\mu_0\mu}\quad (3)$$

在本文中，瑞利单散射反照率 $\omega_R \approx 1$ 。

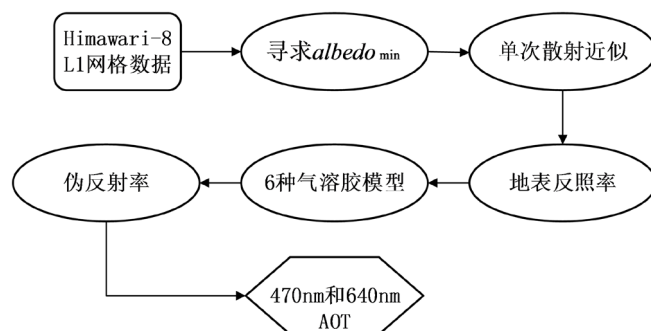


Figure 1. MAARM algorithm flow chart

图 1. MAARM 算法流程图

3. Himawari-8 的 AOT 产品在成都地区适用性分析

3.1. Himawari-8 AOT 官方产品在成都地区适用性分析

如图 2 所示, 红色实线为线性拟合, 黑色实线为 $y = x$, 两条虚线分别是上行线为 $y = 1.15x + 0.05$ 和下行线为 $y = 0.85x - 0.05$, 对应误差为 $\Delta\tau = \pm(0.05 + 0.15_{\text{SONET AOT}})$, 计算了拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 的值以及期望误差 EE 的区间范围。上行线和下行线组成的区间为 EE 区间, 落入该区间的值越多, 则验证 AOT 的精度越高。Himawari-8 与 SONENT 的 AOT 反演的相关系数 R 为 0.662, $R^2 = 0.438$ 和 $\text{RMSE} = 0.4734$, 表明两者的相关性较好。有 17% 的数据落入期望误差(EE)区间, 有 6% 的数据高于 EE 区间且有 77% 的数据低于 EE 区间, 表明 Himawari-8 的官方 AOT 值整体呈现低估现象。

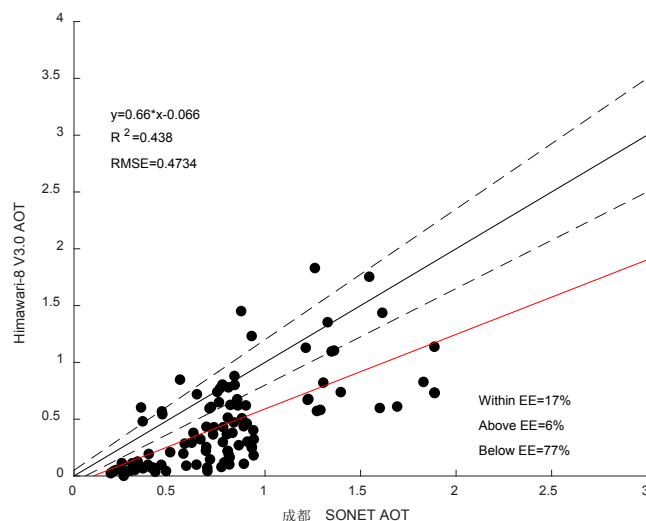


Figure 2. Himawari-8 AOT verification

图 2. Himawari-8 AOT 验证

3.2. MAARM 反演的 AOT 在成都地区适用性分析

利用 Lee 和 Kim 定义的东亚地区六个气溶胶模型以及 SONENT 数据, 对 MAARM 方法反演 AOT 进行验证, 如图 3 所示, 红色实线为线性拟合, 黑色实线为 $y = x$, 两条虚线分别是上行线为 $y = 1.15x + 0.05$ 和下行线为 $y = 0.85x - 0.05$, 对应误差 $\Delta\tau = \pm(0.05 + 0.15_{\text{SONET AOT}})$, 计算拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 的值以及期望误差 EE 的区间范围。

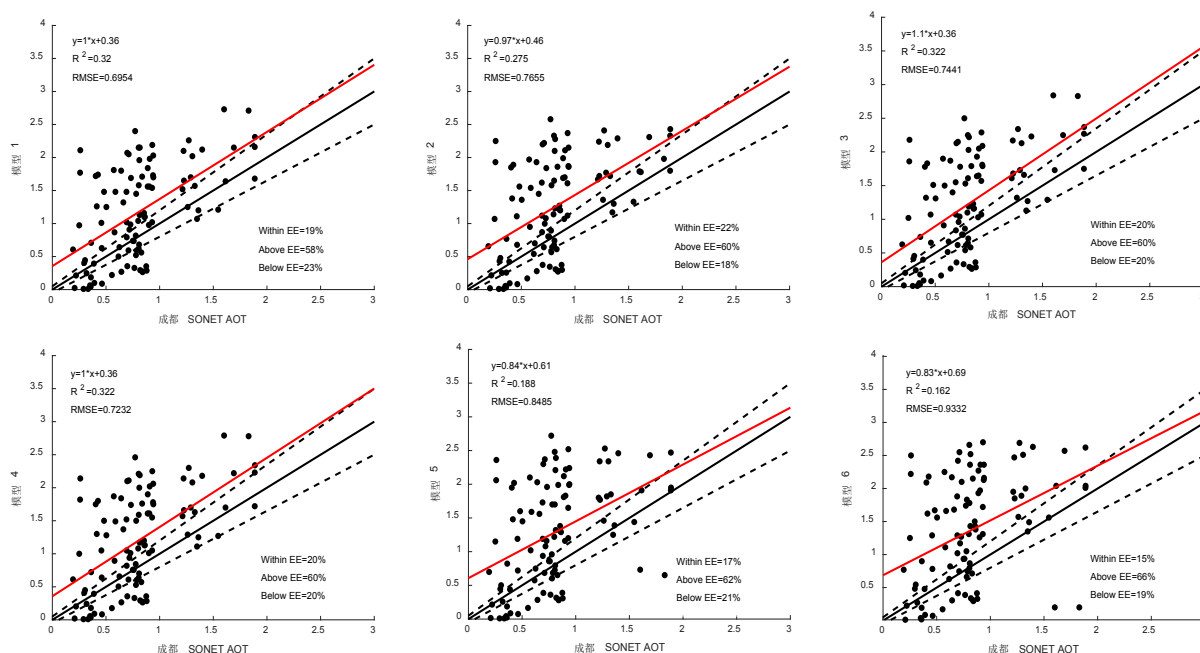


Figure 3. MAARM AOT verification
图 3. MAARM 的 AOT 验证

通过 MAARM 方法反演得到的 AOT 与 SONET 的 AOT 数据可得到较好的相关性。模型 1、模型 3 和模型 4 的相关系数 $R = 0.567$ ，模型 2 的相关系数 $R = 0.524$ ，四个相关系数均大于 0.5，表明两者是可以得到较好的相关性的。

不同的气溶胶模型会带来不同的反演精度。六个气溶胶模型中，采用模型 1 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果中 $R = 0.567$ ， $RMAE = 0.6954$ ，有 19% 的数据落入 EE 区间，有 58% 的数据高于 EE 区间，有 23% 的数据低于 EE 区间，均方根误差 $RMAE$ 较其他模型低。模型 2 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果中 $R^2 = 0.275$ ， $RMAE = 0.7655$ ，有 22% 的数据落入 EE 区间，有 60% 的数据高于 EE 区间，有 18% 的数据低于 EE 区间，落入 EE 区间的值较其他模型多。

模型 3 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果中 $R^2 = 0.322$ ， $RMAE = 0.7441$ ，有 20% 的数据落入 EE 区间，有 60% 的数据高于 EE 区间，有 20% 的数据低于 EE 区间，可得到较好的相关性。模型 4 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果中 $R^2 = 0.322$ ， $RMAE = 0.7232$ ，有 20% 的数据落入 EE 区间，有 60% 的数据高于 EE 区间，有 20% 的数据低于 EE 区间，反演精度较其他模型略高，表明模型 4 比其他模型更适用于成都地区。模型 5 和模型 6 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演精度低于其他气溶胶模型。总体而言，高于 EE 区间的值较多，表明经 MAARM 反演得到的 AOT 值整体呈现高估现象。

MAARM 反演得到的 AOT 与 Himawari-8 的 AOT 相比更适用于成都地区。利用模型 2 所得的 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果有 22% 的数据落入 EE 区间，Himawari-8 的官方 AOT 与 SONET 的 AOT 反演结果有 17% 的数据落入 EE 区间，总体来说，通过 MAARM 方法反演得到的 AOT 值比 Himawari-8 的官方 AOT 更适用于成都站点，但 MAARM 反演结果最好的模型 4 也仍与 SONET 数据存在着不小的误差。

3.3. 误差分析

MAARM 反演得到的六种气溶胶模型的 AOT 精度略有差异，其中模型 5 和模型 6 的精度较低，其他模型与 Himawari-8 的 L3 的 V3.0 的官方 AOT 相比较，也能得到 MAARM 反演的 AOT 的精度略高于

Himawari-8 的 AOT 的结论。由于卫星气溶胶模型信息自身的限制, 本文使用了 Lee 和 Kim 经验的亚洲气溶胶模型进行 AOT 反演, 每个模型使用的 SSA 和 g 值有所不同, 会对反演结果产生不同的影响, 使用适合的 SSA 和 g 值, 对反演精度的作用不可忽视。然而, Bi 等人研究表明, 若在高浓度气溶胶条件下使用该气溶胶模型会产生显著的差异, g 值在高浓度气溶胶条件下可以明显高于纯尘条件下。因此, 经验气溶胶模型可以作为 MAARM 反演 AOT 的误差来源。

已有大量研究表明, 地表反射率是卫星数据反演 AOT 的一个重要参数, Kaufman 等人指出若地表反射率存在误差且误差仅为 0.01, 可以导致反演得到的 AOT 值误差为 0.1。在本文利用 20 天的最小反照率和辐射传递方程计算地表反射率的方法与最小反射率法相似, 现有研究表明最小反射率法是一种精度高, 准确性高的 AOT 反演方法, 并已应用于卫星数据中。然而, 最小反射率法也有其局限性, Knapp 等人在 2005 年研究表明, 云因素和地形因素会导致最小反射率的值存在误差, 最终影响 AOT 的反演精度。

在算法方面, 一个原因是算法做了 20 天内的最小反照率对气溶胶的影响最小, 且只受背景气溶胶 τ_B 的影响的假设, 但现实条件下仅可近似满足此假设, 会造成 MAARM 对部分地表 AOT 反演失败。AOT 反演的另一个问题是辐射传递方程, 本文采用 Yan 等人提出的一种考虑多种气溶胶散射影响并将其复杂性降至最低的修正辐射传递方程, 修正后的气溶胶反射率辐射传输方程较为简单且便于计算, 但气溶胶反射率和瑞利反射率(ρ_{Aer} 和 ρ_{Ray}) 在计算地表反射率 ρ_s 时, 需满足 $\rho^* - \rho_{Aer} - \rho_{Ray} > 0$, 如果出现 $\rho^* - \rho_{Aer} - \rho_{Ray} < 0$ 的情况, 也会导致 MAARM 反演 AOT 的失败。

随着城市化的快速推进, 人类活动增加了气溶胶的浓度, 进而引起控制质量下降, 雾霾天气增多、雾霾浓度增加等一系列的变化。在污染严重的日子, 利用近红外波段和红波段来推导地表反射率关系是不恰当的, 也是极其容易出现误差的, 这将给反演 AOT 带来很大的不确定性, 有可能导致最终反演的失败。

本文所选取的成都站点位于地形较为复杂的城市地区, 这些表面会产生极大的不确定性, 这使得卫星很难在这些区域获取准确的 AOT 数据。而且城市地区普遍存在绿色植被缺乏的问题, 绿色植被缺乏会造成地表反射率偏高, 反演出的数据与 SONET 的 AOT 有所差异。其次, 本文所采用的 Himawari-8 卫星气溶胶数据进行反演, 成都地区处于 Himawari-8 卫星观测的边缘地区, 该观测数据本身也会有一定误差存在, 影响 AOT 反演结果的精度。

4. 结论

本文使用 Yan 等人提出的一种基于卫星的气溶胶特征反演算法(MAARM), 对 Himawari-8 卫星气溶胶数据进行反演, 分别将反演结果与 Himawari-8 的官方 V3.0 数据以及同一时刻的太阳辐射计观测网(SONET)的成都站点数据进行对比, 得到以下几个结论:

- 1) 通过 MAARM 方法反演得到的 AOT 与 SONET 的 AOT 数据可得到较好的相关性。
- 2) 不同亚洲气溶胶经验模型的使用会影响 AOT 反演的精度。使用的亚洲气溶胶经验模型的不同, 即使用不同的 SSA 和 g 值, 得到的反演结果中均方根误差、拟合优度以及期望误差也会存在一定的差距。
- 3) MAARM 反演得到的 AOT 与 Himawari-8 的 AOT 相比更适用于成都地区。
- 4) MAARM 反演结果最好的模型 4 也仍与 SONET 数据存在着不小的误差。算法的假设、成都站点地形的影响、气溶胶模型的使用以及卫星观测边缘数据的使用等方面都有可能影响数据的准确性, 导致 MAARM 算法的失败。

结果表明, 与 Himawari-8 反演相比, MAARM 在 AOT 反演方面取得了改进, 与 Himawari-8 的 AOT 相比, MAARM 反演出 AOT 具有较高的准确性。由于 Himawari-8 的高时间分辨率, MAARM 不仅可以在城市尺度上, 而且可以在更大的区域上更频繁地探测气溶胶性质的变化。

基金项目

成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007, BKJX2019013, BKJX2019042, BKJX2019056, BKJX2019062, BKJX2019081, BKJX2019089, BKJX2019120 和 JY2018012)支持。

参考文献

- [1] 王娜. 气溶胶的影响[J]. 农家参谋, 2018(3): 210.
- [2] 倪敏, 郑军, 马嫣, 等. 气溶胶的辐射强迫作用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 73-78.
- [3] 杨桃进, 刘宇迪, 睦敏. 不同浓度污染气溶胶对一次暴雨的影响[J]. 大气科学, 2017, 41(4): 882-896.
- [4] 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 等. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1609-1627.
- [5] 杨唐, 韩云平, 李琳, 等. 雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1680-1687.
- [6] Jethva, H., Torres, O. and Ahn, C. (2014) Global Assessment of OMI Aerosol Single-Scattering Albedo Using Ground-Based AERONET Inversion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 9020-9040. <https://doi.org/10.1002/2014JD021672>
- [7] 王耀庭, 王桥, 王艳姣, 等. 大气气溶胶性质及其卫星遥感反演[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 27-33.
- [8] 巫俊威, 罗磊, 杨东, 等. 成都夏季气溶胶消光特性研究[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(3): 72-79.
- [9] 赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 617-622.
- [10] 汤玉明, 邓孺孺, 刘永明, 等. 大气气溶胶遥感反演研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 25-34.
- [11] Kaufman, Y.J., Wald, A., Remer, L.A., *et al.* (1997) Remote Sensing of Aerosol over the Continents with the Aid of a $2.2\mu\text{m}$ Channel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 1286-1289. <https://doi.org/10.1109/36.628795>
- [12] Tao, M., Chen, L., Su, L. and Tao, J. (2012) Satellite Observation of Regional Haze Pollution over the North China Plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117**, D12203. <https://doi.org/10.1029/2012JD017915>
- [13] Yan, X., Li, Z.Q., Luo, N., *et al.* (2018) A Minimum Albedo Aerosol Retrieval Method for the New-Generation Geostationary Meteorological Satellite Himawari-8. *Atmospheric Research*, **21**, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.021>
- [14] Li, Z.Q., Xu, H., Li, K.T., *et al.* (2018) Comprehensive Study of Optical, Physical, Chemical, and Radiative Properties of Total Columnar Atmospheric Aerosols over China: An Overview of Sun-Sky Radiometer Observation Network (SONET) Measurements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **99**, 739-755. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0133.1>
- [15] Zhang, T.X., Zang, L., Wan, Y.C., Wang, W. and Zhang, Y. (2019) Ground-Level PM_{2.5} Estimation over Urban Agglomerations in China with High Spatiotemporal Resolution Based on Himawari-8. *Science of the Total Environment*, **676**, 535-544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.299>